

# СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ МИКРОКОНТРОЛЛЕР АО «ПКК МИЛАНДР» ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

**СТАНИСЛАВ ГУСЕВ**, ведущий инженер АО «ПКК Миландр», [gusev.stas@ic-design.ru](mailto:gusev.stas@ic-design.ru),  
**СЕРГЕЙ ШУМИЛИН**, начальник отдела АО «ПКК Миландр»,  
**ЮРИЙ КАЛАЧЕВ**, независимый эксперт

*В статье рассмотрены методы векторного управления электроприводом с использованием современных вычислительных средств. Приведены основные сведения из теории векторного управления и рассказано о специализированном микроконтроллере для управления электроприводом, разработанном в АО «ПКК Миландр».*

Электрические машины давно и прочно вошли в нашу жизнь и используются во всех современных электромеханических устройствах, от небольших сервоприводов до мегаваттных двигателей промышленных установок.

Принцип работы электрических двигателей остается прежним. Однако применение современных вычислительных и производственных средств помогает более точно рассчитывать и изготавливать компоненты двигателей, что предоставляет возможность постоянно совершенствовать их конструкции. Также с развитием электроники и теории управления появляются новые способы управления электроприводами.

Именно появление этих новых способов управления и элементной базы, позволяющей их реализовать, определяет тенденции развития современного электропривода. В рамках данных тенденций управляемые приводы с двигателями постоянного тока заменяются электроприводами с двигателями переменного тока. По сравнению с двигателями постоянного тока управлять ими сложнее, зато они существенно надежнее и дешевле.

Среди наиболее часто применяемых в настоящее время двигателей можно выделить асинхронный с короткозамкнутым ротором и синхронный с постоянными магнитами (в англоязычной литературе PMSM – permanent magnet synchronous motor).

Раньше для управления асинхронными электродвигателями применялся скалярный метод, суть которого сводится к обеспечению постоянного отношения амплитуды напряжений обмоток статора к частоте. Такой метод управления относительно прост в реализации и позволяет регулировать частоту вращения двигателя в диапазоне до 1:10 – этого достаточно для большинства массовых применений.

Развитие систем автоматизации технологических процессов, робототехники, электрических и гибридных транспортных средств требует от электропривода предельного быстродействия и сверхвысоких диапазонов регулирования, что недостижимо при скалярном методе. Для обеспечения требуемых характеристик необходимо использование алгоритмов, позволя-

ющих оптимально управлять не только частотой и амплитудой, но и фазой управляющих напряжений, что и реализуется при так называемом векторном управлении.

Наиболее популярным алгоритмом векторного управления, широко распространенным в настоящее время, является управление, ориентированное по полю (FOC – Field Oriented Control). В основе алгоритма находится векторное представление всех физических величин. Например, трехфазному току статора может быть поставлен в соответствие вектор в трехфазной системе координат ABC (см. рис. 1).

Обычно все вычисления в системе векторного регулирования производятся в системе координат, связанной с потоком ротора двигателя. Математические преобразования, позволяющие

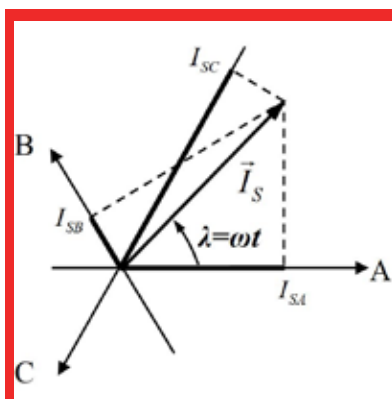


Рис. 1. Векторное представление токов статора

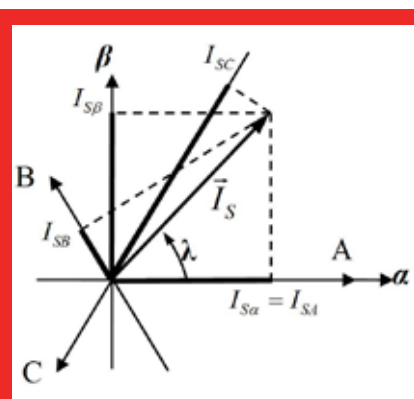


Рис. 2. Графическое представление преобразования Кларка

проецировать токи статора в систему, связанную с потоком ротора, выполняются в два этапа. На первом этапе наблюдается переход из реальной трехфазной системы координат ABC, ориентированной по электрическим осям обмоток статора двигателя, в неподвижную Декартову систему координат  $\alpha\beta$  (см. рис. 2).

Данное преобразование называется преобразованием Кларка и может быть представлено математическими выражениями для прямого (1) и для обратного преобразования (2).

$$\begin{cases} I_{S\alpha} = I_{SA} \\ I_{S\beta} = \frac{I_{SB} - I_{SC}}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{SA} = I_{S\alpha} \\ I_{SB} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{S\beta} - \frac{1}{2} I_{S\alpha} \\ I_{SC} = -\frac{1}{2} I_{S\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{S\beta} \end{cases} \quad (2)$$

Следующий этап – переход от неподвижной Декартовой системы координат к вращающейся системе  $dq$ , ориентированной по потоку ротора двигателя. Этот переход называется преобразованием Парка (см. рис. 3)

Математические выражения для прямого и обратного преобразований Парка представлены формулами (3) и (4) соответственно.

$$\begin{cases} A_d = A_\beta \sin\phi + A_\alpha \cos\phi \\ A_q = A_\beta \cos\phi - A_\alpha \sin\phi \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_\alpha = A_d \cos\phi - A_q \sin\phi \\ A_\beta = A_d \sin\phi + A_q \cos\phi \end{cases} \quad (4)$$

На рисунке 4 представлена структурная схема векторного управления асинхронным двигателем.

Управление двигателем производится заданием тока статора в системе координат, связанной с потоком ротора двигателя. При помощи математических преобразований, соответствующих обратным преобразованиям Парка и Кларка, осуществляется перевод управляющего значения тока в значения напряжений, которые подаются на обмотки статора двигателя через ШИМ-преобразователь и мощные транзисторные ключи. В то же время при помощи АЦП снимаются текущие значения токов обмоток статора – они проецируются в двухфазную вращающуюся систему координат и сравниваются с заданными значениями проекций тока  $I_d$  и  $I_q$ .

Учитывая, что вращающаяся система координат связана с потоком ротора двигателя, в преобразованиях Парка нужно использовать угол текущего положения ротора, определяемый с помощью датчика положения вала. Для асинхронных двигателей значения, полученные с датчика, отстают от реальных на угол скольжения, вычислять который требуется отдельно. Для двигателей с постоянными магнитами в этом нет необходимости, поскольку вращающееся магнитное поле связано с ротором.

Таким образом,  $I_d$ -составляющая управляющего тока ориентирована по потоку ротора двигателя, а  $I_q$ -составляющая перпендикулярна ему. Математически для ненасыщенного асинхронного двигателя можно показать, что составляющая тока  $I_d$  является чисто намагничивающей и не взаимосвязана с моментом, в то время как  $I_q$ -составляющая линейно пропорциональна моменту.

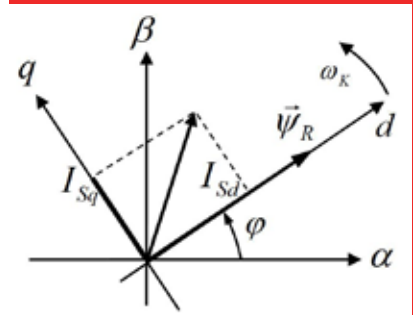


Рис. 3. Графическое представление преобразования Парка

Для двигателя с постоянными магнитами с неявнополюсным ротором намагничивающую составляющую обычно приравнивают к нулю, а управление моментом двигателя осуществляется изменением  $I_q$ -составляющей.

В целом система векторного регулирования состоит из двух контуров: внутреннего контура регулирования заданного тока с временной дискретностью, связанной с периодом ШИМ, и внешнего контура регулирования скорости, чья временная дискретность зависит от реализуемой задачи и от вычислительных возможностей ядра.

Следовательно, в рамках одного цикла регулирования тока необходимо преобразовать текущие значения токов обмоток статора при помощи АЦП, затем преобразовать полученные значения во вращающуюся систему координат, связанную с потоком ротора двигателя, выработать новые значения тока (за это отвечают программные ПИ регуляторы), а после с учетом полученного с датчика угла поворота ротора и его поправки на угол скольжения осуществить обратные преобразования, чтобы определить новые значения напряжений обмоток статора.

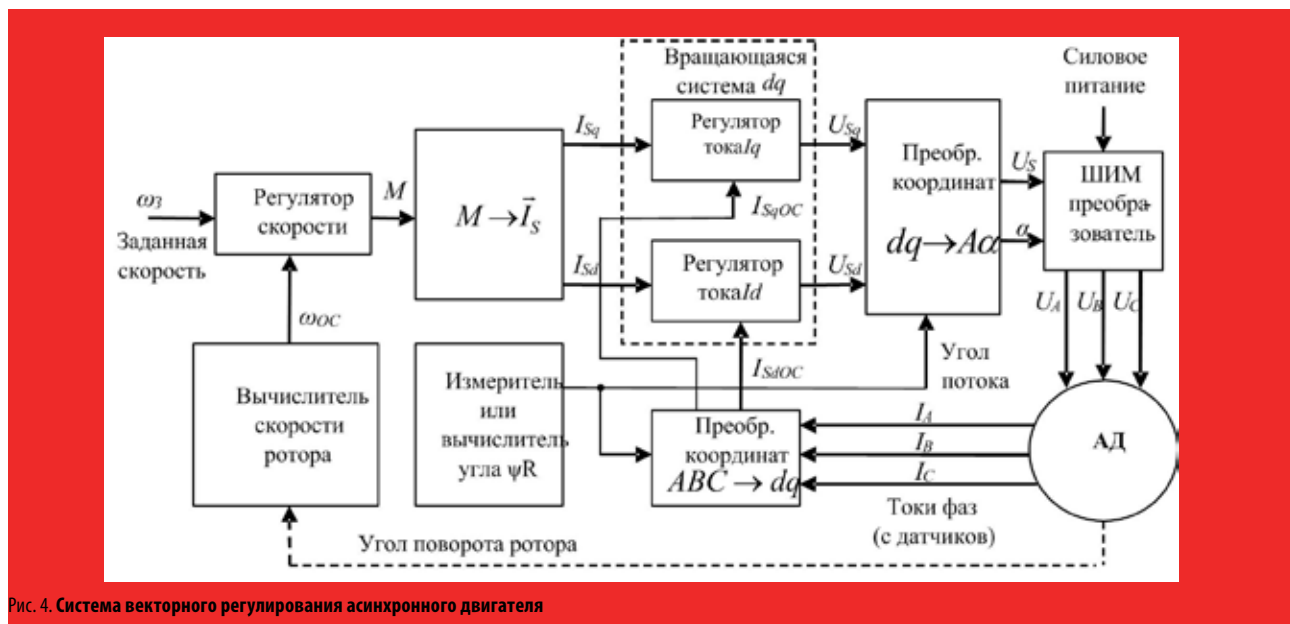


Рис. 4. Система векторного регулирования асинхронного двигателя

В рамках цикла управления скоростью надо произвести оценку скорости вращения вала (на основе показания датчика положения или косвенными методами), сравнить реальную скорость с заданным значением и вычислить проекции токов, нужные для получения требуемой скорости.

**МИКРОКОНТРОЛЛЕР,  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ДЛЯ  
ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ**

Реализация алгоритмов векторного регулирования предполагает наличие развитой системы взаимодействующих контроллеров АЦП и блоков ШИМ-генераторов, квадратурных энкодеров и модулей захвата для обработки датчиков положения вала, блоков аналогового сравнения, ЦАП и системы аварийного отключения. Алгоритмы тригонометрических преобразований и расчет токовой модели двигателя для вычисления угла скольжения и скорости предъявляют повышенные требования и к вычислительным возможностям ядра микроконтроллера. Таким образом, во многих случаях в системах векторного регулирования асинхронных двигателей используются микроконтроллеры на основе мощных вычислительных ядер и периферийных блоков, специализированные для выполнения задач такого рода.

В настоящее время компанией АО «ПКК Миландр» создается микроконтроллер, специализированный для задач управления двигателями. Структурная схема разрабатываемого кристалла

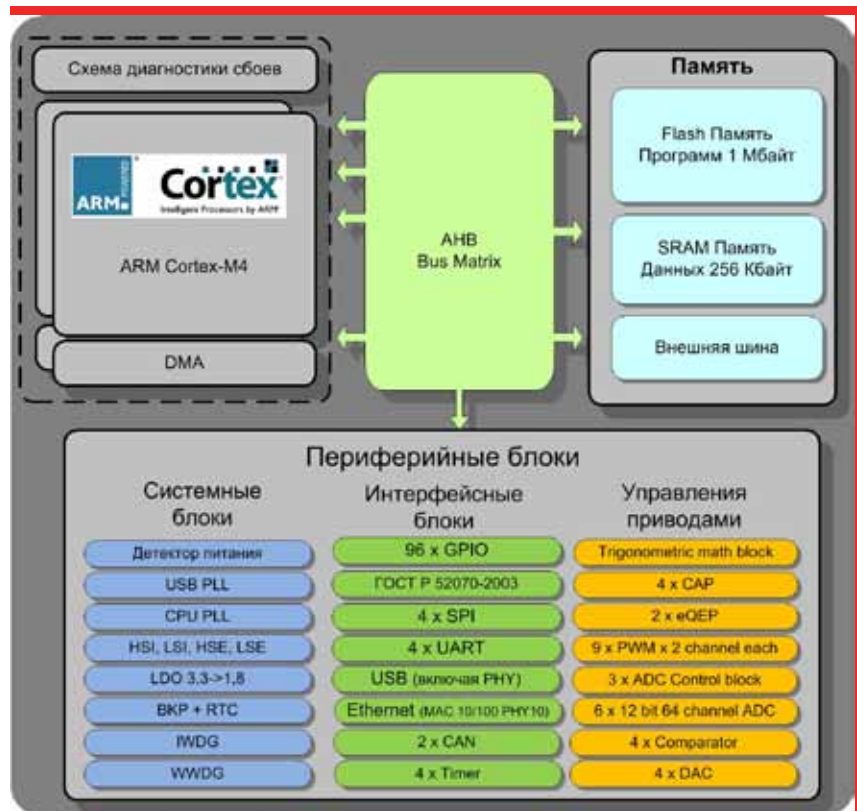


Рис. 5. Структурная схема микроконтроллера, специализированного для задач управления электроприводами

представлена на рисунке 5. В основу кристалла положены два вычислительных RISC-ядра ARM Cortex-M4F с блоками обработки переменных с плавающими запятыми. Действие вычислительных ядер возможно как в параллельном независимом режиме, где каждое ядро выполняет свой независимый алгоритм,

так и в защищенном от сбоев режиме, в котором реальное управление системой производится только одним из них, во время как второе ядро дублирует первое. Расхождения в результатах их работы воспринимаются как критический сбой и запускают функции восстановления системы.

Учитывая, что связанный с периодом таймера ШИМ-генератора цикл регулирования тока статора системы требует выполнения ряда ресурсоемких тригонометрических преобразований, в системе реализована подсистема математических преобразований, позволяющая выполнять тригонометрические вычисления, что поможет снизить нагрузку на вычислительные ядра системы.

Блоки ШИМ микроконтроллера обладают гибкими возможностями конфигурирования выходов как в элементарном, так и в независимом режиме. В них реализовано аппаратное отключение по внешним и по внутренним событиям, аппаратное управление мертвой зоной, блок высокочастотного модулятора для управления силовыми ключами с использованием импульсного трансформатора.

Всего в микроконтроллере содержится девять независимых блоков ШИМ, имеющих по два выхода в каждом. Все блоки ШИМ объединены в цепочку и могут быть синхронизованы между собой. Кроме того, в микроконтроллере

Таблица. Характеристики микроконтроллера, специализированного для задач управления электроприводами

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Ядра                              | – 2 ядра ARM Cortex-M4F  |
| Режимы работы ядер                | – Высокопроизводительный режим. Выполнение независимого кода на каждом из ядер.<br>– Защищенный режим. Режим дублирования выполнения кода с запуском функции восстановления системы в случае расхождения.  |
| Тактовая частота                  | – 150 МГц  |
| Память программ                   | – Энергонезависимая Flash-память до 1 Мбайт  |
| Память данных                     | – ОЗУ до 256 кбайт   |
| Блоки управления электроприводами | – 9 двухканальных блоков ШИМ-генераторов;<br>– 6 аналого-цифровых преобразователей;<br>– 3 контроллера АЦП, с возможностью выполнения цепочек до 64 преобразований для двух аналоговых АЦП;<br>– 2 блока квадратурных энкодера;<br>– 4 блока захвата;<br>– 4 блока аналоговых компараторов;<br>– 4 блока цифроаналоговых преобразователей;<br>– 4 блока таймера общего назначения с функциями ШИМ-генератора и блока захвата |
| Интерфейсы передачи данных        | – ГОСТ P 52070-2003;<br>– 4 контроллера SPI;<br>– 4 контроллера UART;<br>– 2 контроллера CAN;<br>– контроллер USB<br>– контроллер Ethernet 10/100 (включая физический уровень 10 Мбит/сек)   |

ре реализовано четыре блока таймера общего назначения, также имеющих развитые функции ШИМ-генераторов.

Для управления встроенными аналого-цифровыми преобразователями разработаны блоки контроллеров, каждый из которых осуществляет управление двумя аналоговыми 64-канальными 12-разрядными блоками АЦП и позволяет автоматически выполнять цепочки до 32 преобразований с записью результата в таблицу из 64 регистров. Для удобства обращения со стороны DMA регистры результатов могут быть также организованы в FIFO. Управление преобразованиями двух блоков АЦП в рамках одного контроллера может выполняться независимо, последова-

тельно либо поочередно с задаваемым смещением, что позволяет увеличить частоту преобразований. Запуск цепочки преобразований осуществляется как программно, так и при помощи управляющего сигнала от блоков ШИМ – таким образом, начало преобразования может быть синхронизировано с периодом регулирования токов системы. Микроконтроллер содержит три независимых контроллера преобразований, каждый из которых управляет двумя преобразователями.

Для обработки показаний датчиков положения в систему интегрированы два блока квадратурных энкодеров и четыре блока захвата, позволяющие работать с датчиками различных типов.

Кроме специализированных под задачи управления двигателями блоков в микроконтроллере содержится широкий набор интерфейсных блоков, включающих контроллеры Ethernet, USB и ГОСТ Р 52070–2003.

Предварительные характеристики контроллера представлены в таблице. Предполагается, что возможностей микроконтроллера достаточно для управления двумя асинхронными приводами одновременно. Первые образцы ожидаются в начале 2016 года. ◀

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование. Заметки практика. ЭФО, 2013.