



## ТЕХНИЧНІ ЗАСОБИ І ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

**Литература:**

1. ГОСТ Р 8.625-2006 «Термометры сопротивления из платины, меди и никеля». М., Стандартинформ, 2006.
2. Стивен Смит. Научно-техническое руководство по цифровой обработке сигналов. 2-е изд., пер. Козлова М. Ф. и АВТЭКС, 1999.
3. Официальный сайт Analog Devices, <http://www.analog.com/>

УДК[658.5.012.1]

## ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Ковальчук Д.А., Мазур А.В.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

**Аннотация:** В статье рассмотрены основные принципы построения системы векторного управления синхронным двигателем переменного тока с постоянными магнитами на роторе без применения датчиков положения ротора, а также перспективы ее технической реализации.

**Annotation:** This article discusses the basic principles of vector control system for AC synchronous motor with permanent magnets on the rotor, without rotor position sensors, and the prospects for its technical implementation.

**Ключевые слова:** электропривод, синхронный электродвигатель, векторное управление, микроконтроллер.

Синхронный двигатель представляет собой электрическую машину переменного тока, частота вращения ротора которой равна частоте вращения магнитного поля. Статор такого двигателя содержит трехфазную обмотку, и по конструкции подобен статору асинхронной машины. На роторе расположен либо электромагнит постоянного тока, либо постоянные магниты. На небольшие мощности (до 10 кВт) такие двигатели в основном выполняют с постоянными магнитами на роторе. В дальнейшем в статье будем рассматривать только этот тип двигателей, поэтому под синхронным двигателем будем понимать, что он с постоянными магнитами на роторе. Вентильные двигатели, бесколлекторные двигатели постоянного тока - все они относятся к синхронным, и к ним применим рассматриваемый в статье способ управления.

На данный момент данный тип двигателей является наиболее перспективным для регулируемого электропривода. Они имеют целый ряд преимуществ перед асинхронными двигателями и двигателями постоянного тока, а именно:

- Высокие энергетические показатели (КПД более 90 %);
- Меньшие масса и габариты при одинаковой мощности;
- Широкий диапазон изменения частоты вращения;
- Высокая перегрузочная способность по моменту;
- Большой срок службы и высокая надежность.
- 

К недостаткам синхронных двигателей можно отнести разве что их относительно высокую стоимость, которая обусловлена высокой стоимостью постоянных магнитов. В связи с этим до недавнего времени эти двигатели находили применение в основном в высокоточных системах (например, электроприводы подачи станков с ЧПУ, промышленных роботов, военной технике, прецизионной механике). Однако в последнее время наблюдается тенденция снижения стоимости синхронных двигателей в связи с появлением более дешевых технологий производства высококоэрцитивных постоянных магнитов. И это приводит ко все большему внедрению данного типа двигателей в бытовых и промышленных приложениях, таких, как привод компрессоров в холодильной технике, привод циркуляционных насосов, системы вентиляции. Это позволяет, в первую очередь, уменьшить габариты привода и сделать его регулируемым. Наблюдаются тенденции постепенного вытеснения синхронными двигателями их асинхронных предшественников и коллекторных

**ТЕХНИЧНІ ЗАСОБИ І ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**

двигателей. Кроме того, у асинхронных двигателей существенно падает КПД при понижении частоты вращения ниже 40% от номинальной. У синхронных двигателей этот недостаток менее выражен. Эти факторы делают синхронный двигатель практически идеальным решением для энергосберегающего электропривода с широким диапазоном регулирования. Но к сожалению системы управления синхронными двигателями на данный момент занимают небольшой сегмент рынка электроприводов. Большинство выпускаемых частотных преобразователей рассчитаны на работу только с асинхронными двигателями, а производители, использующие в составе своих изделий синхронные двигатели, производят узкоспециализированные электроприводы под свои нужды, которые трудно адаптировать для сторонних решений. Инженерам, использующим в своих разработках синхронный двигатель, часто приходится самостоятельно разрабатывать и электропривод к нему.

При разработке встроенных систем управления часто ставится задача интегрировать электропривод в общую систему управления. Таким примером может служить система управления тепловым насосом, которая может состоять из системы верхнего уровня и локальных исполнительных систем – электроприводов компрессора, вентиляторов, клапанов. Все это должно входить в состав единого устройства. Следовательно, электропривод должен быть гибким и легко адаптируемым под конкретную систему.

Все выше сказанное обуславливает актуальность задачи разработки системы управления синхронными двигателями, которая могла бы быть адаптированной под конкретные приложения, и легко встраиваемой в более сложные системы автоматического управления.

Возможны несколько способов управления синхронными двигателями. Классическим является принцип управления в функции положения ротора. В этом случае на валу двигателя устанавливается датчик положения ротора, и коммутация обмоток происходит при определенных положениях ротора, таким образом создается вращающееся магнитное поле. Система управления в этом случае относительно проста, но усложняется конструкция двигателя и требуется большее количество проводников, соединяющих двигатель и привод. Это уменьшает надежность системы. Для повышения надежности системы применяют способы управления без датчиков положения ротора. Это прежде всего метод скалярного управления, когда обмотки двигателя коммутируются с определенной частотой без отслеживания положения ротора, но в этом случае возможно выпадение двигателя из синхронизма и его остановка. Этого недостатка лишен метод управления с определением положения ротора по импульсам противоЭДС. Ток протекает через 2 фазы двигателя, а третья фаза используется для отслеживания противоЭДС. В этом случае уменьшается максимальный момент двигателя и следовательно развиваемая мощность. Метод векторного управления лишен большинства недостатков рассмотренных выше способов. Этот метод широко используется в асинхронных приводах переменного тока. Однако он применим и ко всем остальным типам трехфазных двигателей.

**Основные принципы векторного управления**

Векторное управление является методом управления синхронными и асинхронными двигателями, не только формирующим гармонические токи фаз (как при скалярном управлении), но и обеспечивающим управление магнитным потоком ротора, или, другими словами, положением вектора магнитного потока в пространстве.

Векторное управление трехфазным двигателем позволяет управлять им аналогично управлению двигателем постоянного тока.

Для понимания следующего материала нужно иметь представление о системах координат, используемых при векторном управлении. Давайте вкратце их рассмотрим.

**Неподвижная трехфазная система координат ABC.** Система имеет три оси, расположенные под углом 120 градусов друг к другу и пересекающиеся в начале координат (рисунок 1, А). Можно сказать, что оси этой системы совпадают с электрическими осями обмоток двигателя. Ток двигателя в этой системе можно представить как вектор, вращающийся вокруг начала координат, а его проекции на оси системы координат пропорциональны мгновенным токам в фазах.

**Неподвижная Декартова система координат  $\alpha\beta$ .** Система имеет две перпендикулярные оси  $\alpha$  и  $\beta$  (рисунок 1, Б). Одна ось системы совпадает с одной из трехфазных осей ABC, а начало координат совпадает с трехфазной системой. Переход из трехфазной системы в декартову называют также преобразованием Кларка, и он выполняется по следующим формулам [1]:

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



## ТЕХНИЧНІ ЗАСОБИ І ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

**Вращающаяся система координат dq.** Система имеет две перпендикулярные оси d и q, начало координат системы совпадает с началами координат описанных выше систем (рис. 1, В). Оси системы вращаются вокруг начала координат со скоростью вращения ротора. Переход из неподвижной системы во вращающуюся называют преобразованием Парка. Оно выполняется по следующим формулам [1]:

$$\begin{cases} A_d = A_\beta \sin \varphi - A_\alpha \cos \varphi \\ A_q = A_\beta \cos \varphi + A_\alpha \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

Возможно также обратное преобразование Парка:

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

Как видно (2) и (3), для выполнения преобразований необходимо знать угол поворота системы, т.е. ротора двигателя, который нужно измерить или рассчитать.

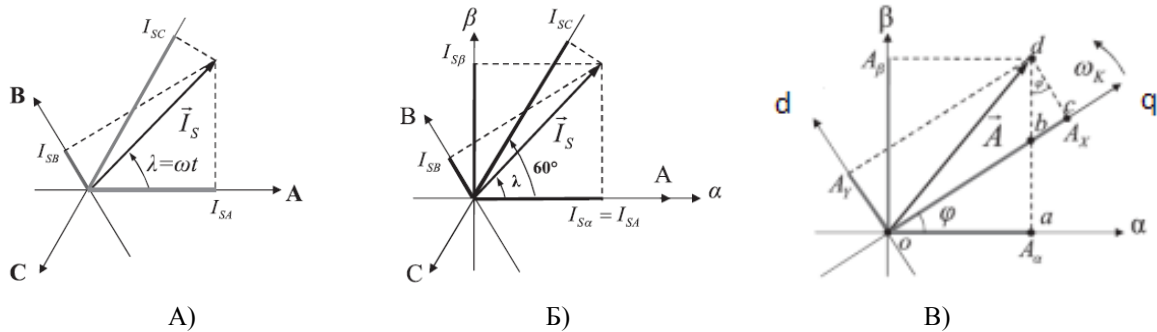


Рисунок 1. Системы координат

Смысл вращающейся системы координат заключается в том, что система управления строится в координатах, вращающихся вместе с управляемым вектором. И поскольку управляемый вектор не вращается относительно системы координат, то его амплитуда и фаза определяется только двумя скалярными величинами – его проекциями на оси d и q.

Система векторного управления является, по сути, системой регулирования момента двигателя. Ведь из уравнения механического равновесия двигателя известно, что вал двигателя вращается с постоянной скоростью в случае, если развиваемый двигателем момент и момент сопротивления нагрузки равны. В противном случае двигатель будет или разгоняться или тормозиться. Момент двигателя создается вследствие взаимодействия тока и потокосцепления статора. Для трехфазного двигателя момент определяется выражением [1]:

$$\bar{M} = \frac{3}{2} Z_p \bar{I}_s \bar{\psi}_s,$$

где:  $Z_p$  – число пар полюсов,  $I_s$  – статорный ток двигателя,  $\psi_s$  – потокосцепление статора. Или переходя к осям dq:

$$M = \frac{3}{2} Z_p (I_{sq} \psi_d - I_{sd} \psi_q).$$

Потокосцепления можно выразить через индуктивности статора по соответствующим осям:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_{sd} I_{sd} + \psi_f; \\ \psi_q &= L_{sq} I_{sq}. \end{aligned}$$

С учетом этих выражений можно переписать уравнение момента в следующем виде:

$$M = \frac{3}{2} Z_p (I_{sq} \psi_f + I_{sd} \psi_{sq} (L_{sd} - L_{sq})).$$



## ТЕХНИЧНІ ЗАСОБИ І ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

Будем рассматривать управление двигателем с неявнополюсным ротором. Как известно, у такого двигателя индуктивности статора по осям  $d$  и  $q$  равны. Следовательно, выражение для момента такого двигателя упростится:

$$M = \frac{3}{2} Z_p I_{sq} \Psi_f.$$

Из этого выражения видно, что при постоянном потоке ротора (постоянного магнита), момент двигателя зависит только от  $q$ -составляющей статорного тока. А  $d$ -составляющая является паразитной, не создает момент и только вызывает дополнительные потери. Таким образом, управлять моментом двигателя можно, управляя  $q$ -составляющей статорного тока, поддерживая  $d$ -составляющую равной нулю.

Структурная схема системы векторного управления приведена на рисунке 2 [2].

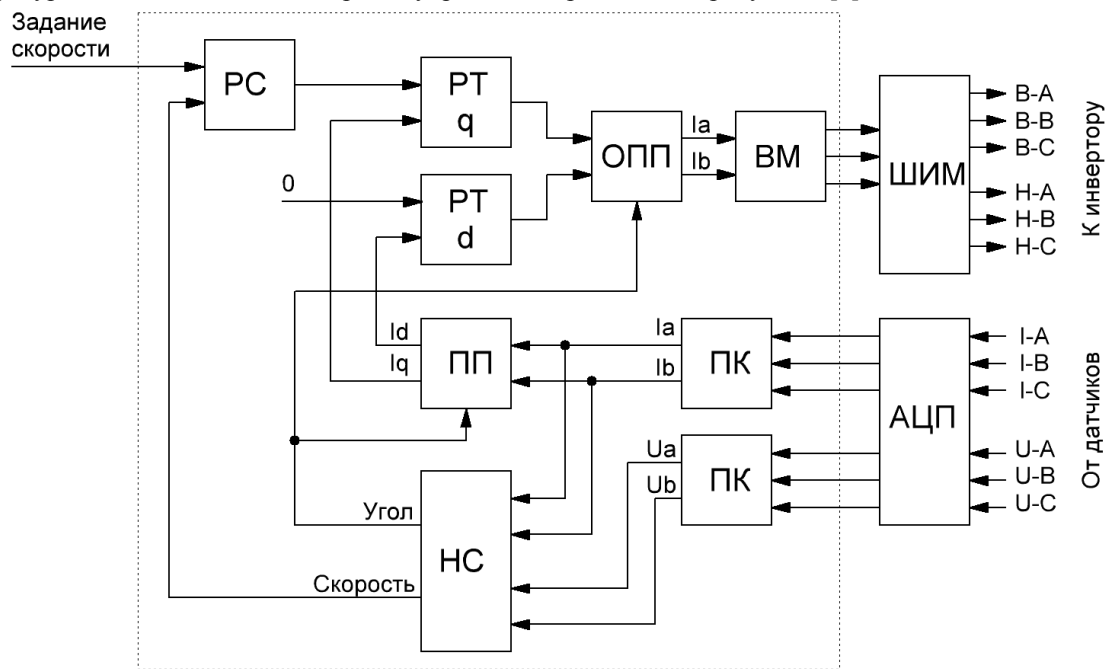


Рисунок 2. Структурная схема системы векторного управления

Для реализации векторного управления измеряются мгновенные значения токов в трех фазах двигателя. Затем выполняется преобразование вначале из трехфазной системы в Декартову (преобразование Кларка, **ПК** на схеме), а затем из Декартовой во вращающуюся (преобразование Парка, **ПП**). В результате получаем два сигнала тока –  $I_d$  и  $I_q$ . Для обоих токов строятся пропорционально-интегральные регуляторы (на схеме – **РТ $q$**  и **РТ $d$** ). Сигналы с выходов регуляторов преобразуются обратно в Декартову систему координат (обратное преобразование Парка, **ОПП**). Пространственно-векторный модулятор (**ВМ**) осуществляет расчет необходимых длительностей включения силовых ключей, а также последовательность коммутации, для реализации расчетного вектора тока в пространстве, т.е. непосредственно в обмотках двигателя.

Регулятор скорости (**РС**), обеспечивающий поддержание заданной скорости вращения вала двигателя, представляет собой параллельный ПИ-регулятор. Сигналом задания скорости является внешний сигнал, задаваемый пользователем или системой управления верхнего уровня. В качестве обратной связи по скорости используется сигнал, пропорциональный текущей скорости двигателя, рассчитанной с помощью наблюдателя состояния (**НС**) как производная от угла поворота ротора. Выходной сигнал регулятора скорости является сигналом задания момента двигателя. В данной системе реализована так называемая система подчиненного регулирования координат.

Для определения угла поворота ротора используется так называемый наблюдатель состояния (**НС**). Он рассчитывает текущий угол поворота ротора двигателя, опираясь на измеренные значения мгновенных токов и напряжений двигателя. Одновременно он выполняет расчет скорости и момента развиваемого двигателем. Все вычисления он выполняет, опираясь на математическую модель двигателя. Наблюдатель состояния один из

**ТЕХНИЧНІ ЗАСОБИ І ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**

самых сложных узлов системы векторного управления и его разработка в статье не рассматривается. Сам наблюдатель будем рассматривать как «черный ящик».

**Техническая реализация.** Обзор рынка электронных компонентов показал, что электронной промышленностью выпускаются специализированные интегральные микросхемы для векторного управления электродвигателями. Первые поколения данных микросхем были реализованы на жесткой логике или ПЛИС. Другими словами, в них был аппаратно реализован алгоритм векторного управления, причем под конкретный тип двигателя. Они не содержали в себе вычислительного микропроцессора, для управления ими требовался внешний микроконтроллер. Один из наиболее известных производителей данного типа микросхем – американская фирма International Rectifier (IR), выпускающая микросхемы серии IRMCK [5].

Следующим поколением специализированных микросхем для управления электродвигателями были микросхемы содержащие в своем составе, кроме аппаратно реализованной системы векторного управления, еще и управляющий микропроцессор, чаще всего с ядром MSC51 [5]. Такие микросхемы также выпускаются фирмой IR – серия IRMCF 312, фирмой Toshiba выпускаются аналогичные микросхемы. Существуют похожие разработки и у других производителей. Преимуществом такой системы является отсутствие необходимости в мощной вычислительной системе, т.к. все вычисления производятся аппаратно, а микроконтроллер только управляет этим процессом. Но существенным минусом такого подхода является низкая гибкость таких систем. Обычно они специализированы под управление конкретным типом двигателя и не дают возможности вносить какие-либо изменения в алгоритм работы системы. При разработке встраиваемого электропривода это иногда бывает очень важно. Фирма IR вела разработки по созданию универсального привода, который мог бы быть легко перестроен под конкретные задачи. Однако на данный момент они не достигли существенного успеха, т.к. подобные системы выходили сложными и дорогостоящими.

В начале 2013 года американская фирма Texas Instruments (TI) предложила новый подход к решению данной проблемы – полная программная реализация алгоритма управления на микроконтроллере общего назначения. Ею было разработано программное обеспечение модульной структуры InstaSpin-FOC. Данный пакет программного обеспечения содержит все необходимые библиотеки для реализации системы векторного управления любым типом трехфазных двигателей. Эти библиотеки содержат все модули, приведенные на структурной схеме системы управления (рисунок 2). Данное программное обеспечение довольно гибкое и позволяет разработчику легко вносить изменения в алгоритмы работы системы.

Элементы структурной схемы (рисунок 2), обведенные пунктиром, реализуются программно в микроконтроллере. Широтно-импульсный модулятор (ШИМ) и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) – аппаратная периферия микроконтроллера. Они работают автономно.

Естественно, для программной реализации данной системы требуются большие вычислительные мощности микроконтроллера. Фирма TI выпускает высокопроизводительные и в то же время относительно недорогие 32-разрядные микроконтроллеры серии C2000. К примеру, самый младший процессор данной серии TMS320F28027 работает на частоте 60 МГц, содержит достаточно мощную периферию, такую, как 12-разрядный АЦП и 8-канальный ШИМ высокого разрешения [3]. Данный микроконтроллер способен выполнять алгоритм векторного управления с частотой 20 кГц, т.е. за 50 мкс выполняет все необходимые расчеты. Оптовая стоимость данного процессора порядка 5 долларов.

**Выводы:** В статье были рассмотрены основные принципы построения системы векторного управления синхронным двигателем. Из вышеописанного видно, что принцип векторного управления позволяет управлять трехфазным синхронным двигателем так же легко, как и двигателем постоянного тока, т.е. регулируя всего одну величину – ток (момент) двигателя. Система векторного управления также обеспечивает лучшие рабочие характеристики двигателя, по сравнению с другими методами управления. Современная элементная база позволяет создать недорогой и в то же время высококачественный электропривод, который может быть легко адаптирован под конкретные задачи управления.

Следующим этапом исследования будет техническая реализация системы, а именно синтез программного обеспечения и разработка принципиальной электрической схемы электропривода, которые будут рассмотрены в следующей статье.

**Литература**

1. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). ЭФО, 2013. 63 с.
2. InstaSpin-FOC Users Guide. Texas Instruments, 2013. 426 p.
3. TMS320F28027F – Piccolo MCUs. Datasheet. Texas Instruments, 2012. 216 p.
4. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Векторное\\_управление](http://ru.wikipedia.org/wiki/Векторное_управление)
5. URL: <http://www.compel.ru/lib/ne/2008/18/4-konfiguriruemyie-kontrolleryi-elektroprivoda-serii-irmck/>