

# ВСЕ О ДВИГАТЕЛЕ

Сборник информации о двигателях различных модификаций

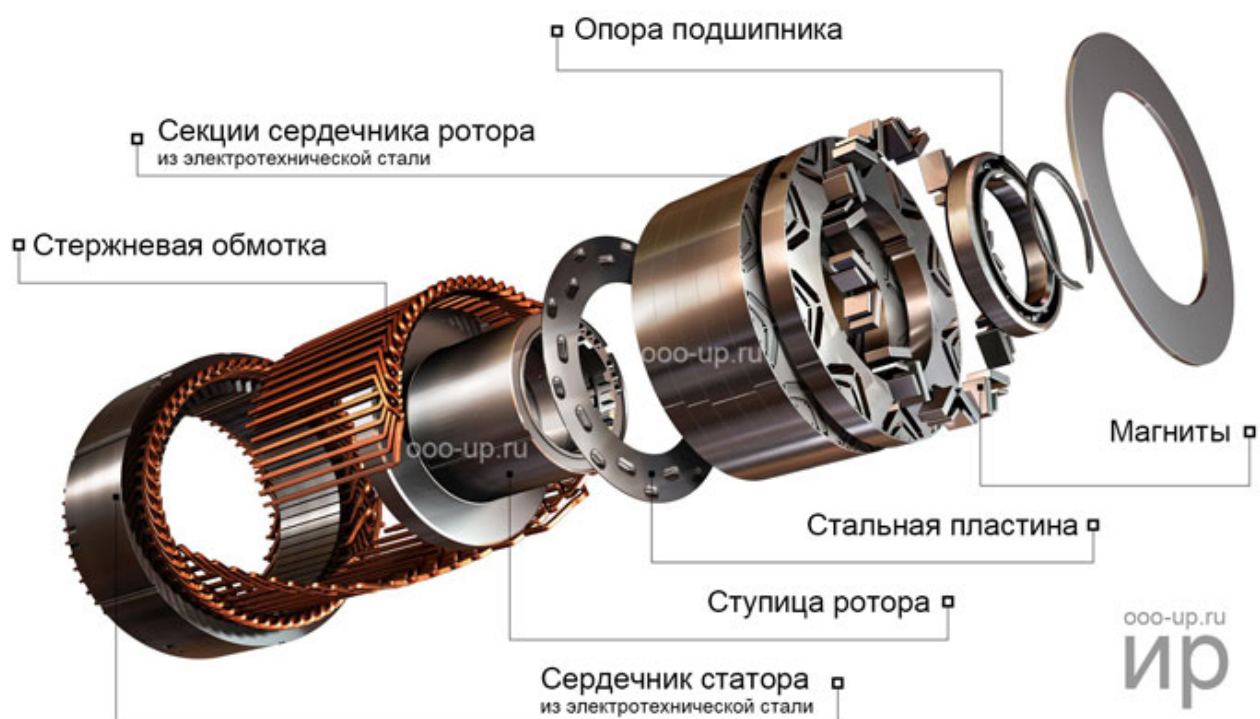
## Что такое двигатели pmsm

### Синхронный двигатель с постоянными магнитами

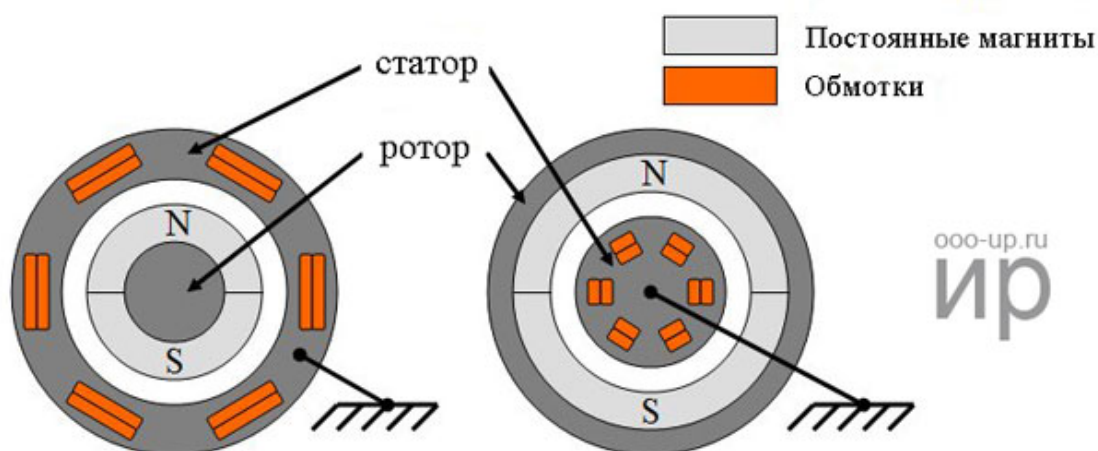
Главное отличие между синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ) и асинхронным электродвигателем заключается в роторе. Проведенные исследования <sup>1</sup> показывают, что СДПМ имеет КПД примерно на 2% больше, чем высокоэффективный (IE3) асинхронный электродвигатель, при условии, что статор имеет одинаковую конструкцию, а для управления используется один и тот же частотный преобразователь. При этом синхронные электродвигатели с постоянными магнитами по сравнению с другими электродвигателями обладают лучшими показателями: мощность/объем, момент/инерция и др.

### Конструкции и типы синхронного электродвигателя с постоянными магнитами

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, как и любой вращающийся электродвигатель, состоит из ротора и статора. Статор — неподвижная часть, ротор — вращающаяся часть.

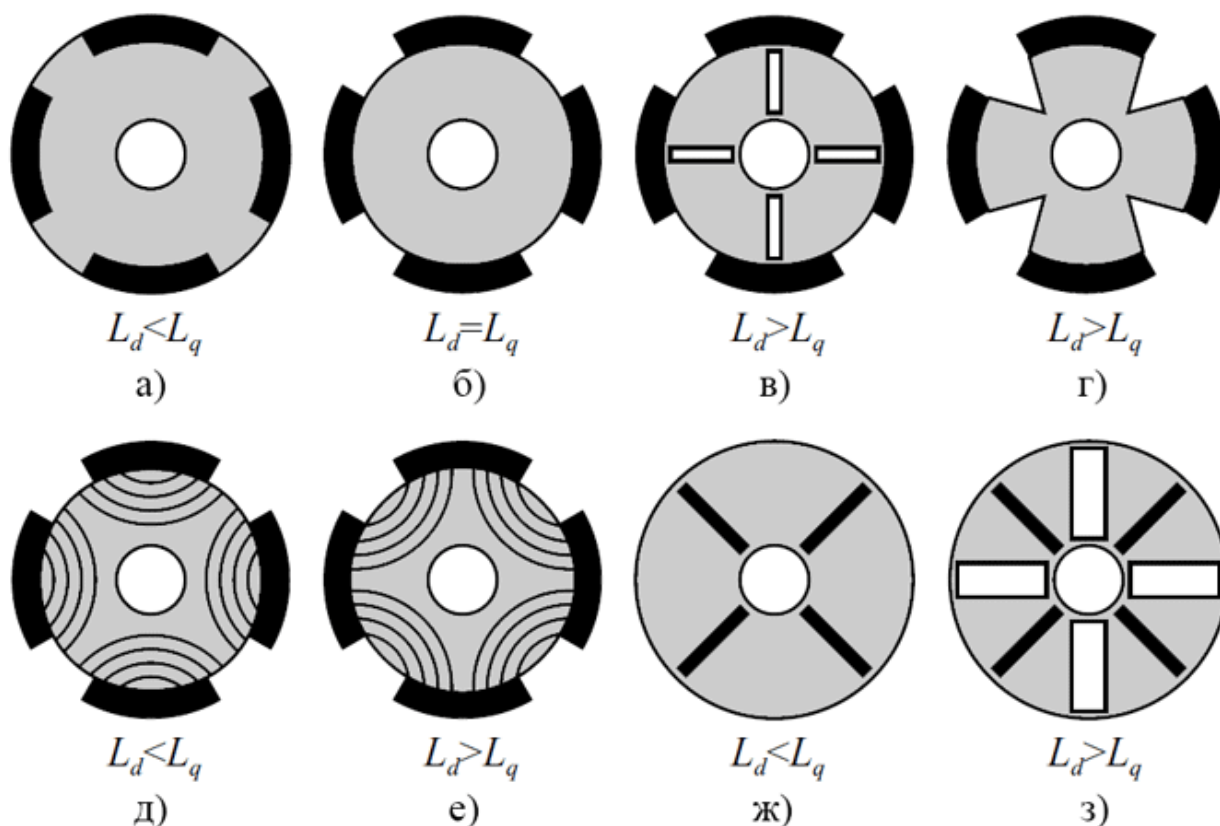


Обычно ротор располагается внутри статора электродвигателя, также существуют конструкции с внешним ротором — электродвигатели обращенного типа.



**Ротор** состоит из постоянных магнитов. В качестве постоянных магнитов используются материалы с высокой коэрцитивной силой.


Электродвигатель с неявно выраженными полюсами имеет равную индуктивность по продольной и поперечной осям  $L_d = L_q$ , тогда как у электродвигателя с явно выраженными полюсами поперечная индуктивность не равна продольной  $L_q \neq L_d$ .

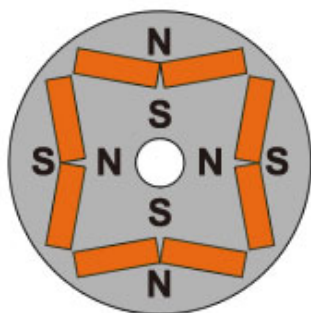


Также по конструкции ротора СДПМ делятся на:

- синхронный двигатель **с поверхностной установкой** постоянных магнитов (англ. SPMSM — surface permanent magnet synchronous motor);
- синхронный двигатель **со встроенными** (инкорпорированными) магнитами (англ. IPMSM — interior permanent magnet synchronous motor).



 Постоянные магниты



**Статор** состоит из корпуса и сердечника с обмоткой. Наиболее распространены конструкции с двух- и трехфазной обмоткой.

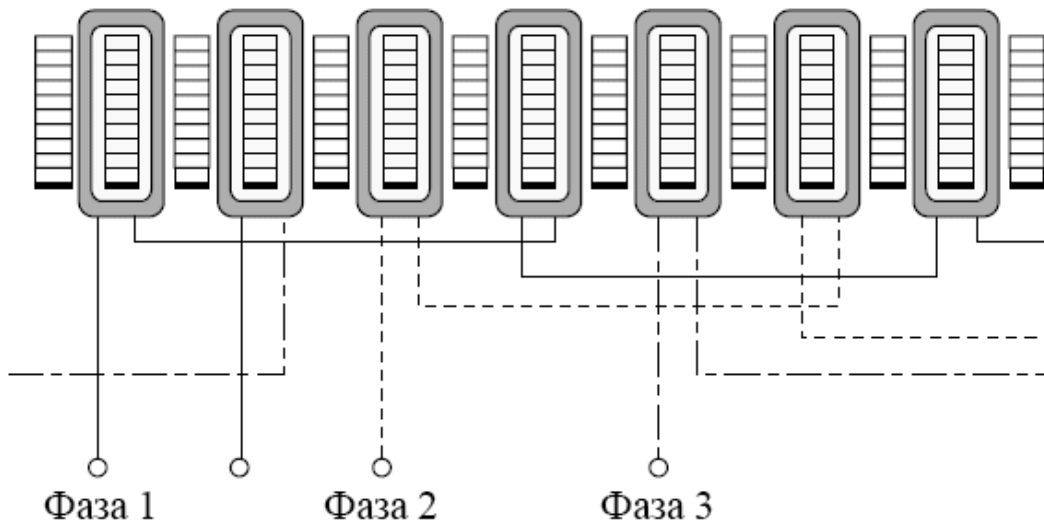
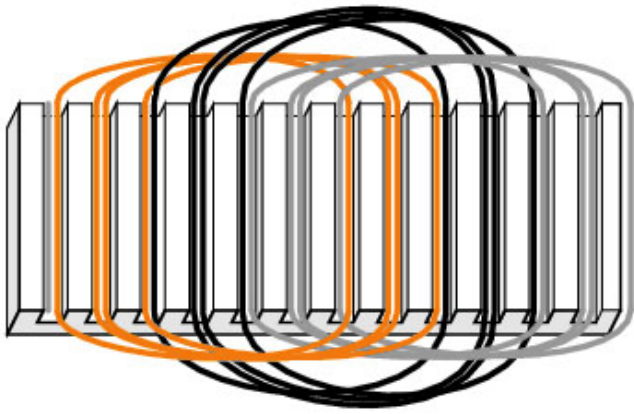
В зависимости от конструкции статора синхронный двигатель с постоянными магнитами бывает:

- с распределенной обмоткой;
- с сосредоточенной обмоткой.



**Распределенной** называют такую обмотку, у которой число пазов на полюс и фазу  $Q = 2, 3, k$ .

**Сосредоточенной** называют такую обмотку, у которой число пазов на полюс и фазу  $Q = 1$ . При этом пазы расположены равномерно по окружности статора. Две катушки, образующие обмотку, можно соединить как последовательно, так и параллельно. Основной недостаток таких обмоток — невозможность влияния на форму кривой ЭДС [2].



**Форма обратной ЭДС** электродвигателя может быть:

- трапецеидальная;
- синусоидальная.

Форма кривой ЭДС в проводнике определяется кривой распределения магнитной индукции в зазоре по окружности статора.

Известно, что магнитная индукция в зазоре под явно выраженным полюсом ротора имеет трапецеидальную форму. Такую же форму имеет и наводимая в проводнике ЭДС. Если необходимо создать синусоидальную ЭДС, то полюсным наконечникам придают такую форму, при которой кривая распределения индукции была бы близка к синусоидальной. Этому способствуют скосы полюсных наконечников ротора [2].

## Принцип работы синхронного двигателя

Принцип действия синхронного электродвигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора. Концепция вращающегося магнитного поля статора синхронного электродвигателя такая же, как и у трехфазного асинхронного электродвигателя.

Принцип работы синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора.



Магнитное поле ротора, взаимодействуя с синхронным переменным током обмоток статора, согласно закону Ампера, создает крутящий момент, заставляя ротор вращаться (подробнее).

Постоянные магниты, расположенные на роторе СДПМ, создают постоянное магнитное поле. При синхронной скорости вращения ротора с полем статора, полюса ротора сцепляются с вращающимся магнитным полем статора. В связи с этим СДПМ не может сам запуститься при подключении его напрямую к сети трехфазного тока (частота тока в сети 50Гц).

# Управление синхронным двигателем с постоянными магнитами

Для работы синхронного двигателя с постоянными магнитами обязательно требуется система управления, например, частотный преобразователь или сервопривод. При этом существует большое количество способов управления реализуемых системами контроля. Выбор оптимального способа управления, главным образом, зависит от задачи, которая ставится перед электроприводом. Основные методы управления синхронным электродвигателем с постоянными магнитами приведены в таблице ниже.

Управление				Преимущества	Не
Синусоидальное	Скалярное			Простая схема управления	Уп оп по, где во: уп
	Векторное	Полеориентированное управление	С датчиком положения	Плавная и точная установка положения ротора и скорости вращения двигателя, большой диапазон регулирования	Тре по. мо ми си

			<b>Без датчика положения</b>	Не требуется датчик положения ротора. Плавная и точная установка положения ротора и скорости вращения двигателя, большой диапазон регулирования, но меньше, чем с датчиком положения	Без датчика положения ротора и скорости вращения двигателя, большой диапазон регулирования, но меньше, чем с датчиком положения
		<b>Прямое управление моментом</b>		Простая схема управления, хорошие динамические характеристики, большой диапазон регулирования, не требуется датчик положения ротора	Выходной момент
<b>Трапециидальное</b>	<b>Без обратной связи</b>			Простая схема управления	Управление по скорости, где требуется



	<b>С обратной связью</b>	<b>С датчиком положения (датчиками Холла)</b>	Простая схема управления	Требуется Холловский пульсатор Простая управляющая трапециидальная обратная ЭДС система обратной связи на
		<b>Без датчика</b>	Требуется более мощная система управления	Не требуется обратная пульсация Простая управляющая трапециидальная обратная ЭДС система обратной связи на



**Читайте также: Свист и скрежет при запуске двигателя**

Для решения несложных задач обычно используется трапециидальное управление по датчикам Холла (например — компьютерные вентиляторы). Для решения задач, которые требуют максимальных характеристик от электропривода, обычно выбирается полеориентированное управление.

**Трапециидальное управление**

Одним из простейших методов управления синхронным двигателем с постоянными магнитами является — трапецеидальное управление. Трапециидальное управление применяется для управления СДПМ с трапециидальной обратной ЭДС. При этом этот метод позволяет также управлять СДПМ с синусоидальной обратной ЭДС, но тогда средний момент электропривода будет ниже на 5%, а пульсации момента составят 14% от максимального значения. Существует трапециидальное управление без обратной связи и с обратной связью по положению ротора.

Управление **без обратной связи** не оптимально и может привести к выходу СДПМ из синхронизма, т.е. к потере управляемости.

Управление **с обратной связью** можно разделить на:

- трапециидальное управление по датчику положения (обычно — по датчикам Холла);
- трапециидальное управление без датчика (бездатчиковое трапециидальное управление).

В качестве датчика положения ротора при трапециидальном управлении трехфазного СДПМ обычно используются три датчика Холла встроенные в электродвигатель, которые позволяют определить угол с точностью  $\pm 30$  градусов. При таком управлении вектор тока статора принимает только шесть положений на один электрический период, в результате чего на выходе имеются пульсации момента.

## Полеориентированное управление

Полеориентированное управление позволяет плавно, точно и независимо управлять скоростью и моментом бесщеточного электродвигателя. Для работы алгоритма полеориентированного управления требуется знать положение ротора бесщеточного электродвигателя.

Существует два способа определения положения ротора:

- по датчику положения;
- без датчика — посредством вычисления угла системой управления в реальном времени на основе имеющейся информации.

## Полеориентированное управление СДПМ по датчику положения

В качестве датчика угла используются следующие типы датчиков:

- индуктивные: синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ), редуктосин, индуктосин и др.;
- оптические;
- магнитные: магниторезистивные датчики.

## **Полеориентированное управление СДПМ без датчика положения**

Благодаря бурному развитию микропроцессоров с 1970-х годов начали разрабатываться бездатчиковые векторные методы управления бесщеточными электродвигателями переменного тока. Первые бездатчиковые методы определения угла были основаны на свойстве электродвигателя генерировать обратную ЭДС во время вращения. Обратная ЭДС двигателя содержит в себе информацию о положении ротора, поэтому вычислив величину обратной ЭДС в стационарной системе координат можно рассчитать положение ротора. Но, когда ротор не подвижен, обратная ЭДС отсутствует, а на низких оборотах обратная ЭДС имеет маленькую амплитуду, которую сложно отличить от шума, поэтому данный метод не подходит для определения положения ротора двигателя на низких оборотах.

Существует два распространенных варианта запуска СДПМ:

- запуск скалярным методом — запуск по заранее определенной характеристики зависимости напряжения от частоты. Но скалярное управление сильно ограничивает возможности системы управления и параметры электропривода в целом;
- метод наложения высокочастотного сигнала – работает только с СДПМ у которого ротор имеет явно выраженные полюса.

На текущий момент бездатчиковое полеориентированное управление СДПМ во всем диапазоне скоростей возможно только для двигателей с ротором с явно выраженными полюсами.

Источник

## **STM32 — PMSM Control — Управление PMSM с помощью STM32**

### **Управление PMSM с помощью STM32**

*Изложенный ниже материал основан на документации AVR447 от фирмы Atmel. Пример управления PMSM двигателем с тремя датчиками Холла для микроконтроллера STM32 базируется на информации, изложенной в этой документации.*

Существует некоторая путаница в терминологии связанной с бесколлекторными двигателями. Само понятие «бесколлекторный двигатель» — весьма обширное и включает в себя несколько групп двигателей, в том числе и бесколлекторные двигатели с постоянными магнитами. Далее подразумевается бесколлекторные двигатели с постоянными магнитами.

В большинстве литературных источников двигатели с постоянными магнитами разделены на две категории по форме обратной ЭДС. Обратная ЭДС может быть трапецевидной или синусоидальной. Хотя терминология в литературе иногда противоречива, в большинстве случаев считается, что бесколлекторный двигатель постоянного тока (BLDC) имеют трапецевидную обратную ЭДС, а синхронный двигатель с постоянными магнитами (PMSM) имеет синусоидальную обратную ЭДС. И BLDC и PMSM могут возбуждаться синусоидальными токами.

### **Конструктивные отличия PMSM и BLDC Motors**

PMSM и BLDC могут иметь некоторые конструктивные отличия. Так как при работе BLDC возникают пульсации момента на валу, BLDC двигатели проектируют таким образом, чтобы снизить пульсации момента. Тем не менее, PMSM и BLDC могут возбуждаться как трапецевидным так и синусоидальными токами. Можно сказать, что возбуждая BLDC двигатель синусоидальным напряжением, мы превращаем его в PMSM. Если Вы считаете что для превращения BLDC в PMSM нужно обязательно внести в него конструктивные изменения, то замена регулятора — это и может быть тем самым необходимым конструктивным изменением.

## Ожидаемый эффект

Если BLDC двигатель возбуждать синусоидальными токами, ожидается увеличение момента на валу, снижение вибрации, снижение шума, увеличение максимальных оборотов. Почему так происходит? Вспомним, как работает система управления BLDC двигателем. Для его управления используется блочная коммутация (block commutation). Т.е. При достижении определенного положения ротора происходит коммутация (напряжение подается на определенные обмотки) и магнитное поле статора смещается и остается неподвижным до момента следующей коммутации пока ротор не провернется до определенного положения. Таким образом, магнитное поле статора вращается не плавно, а шагами. Это доступно продемонстрировано на этом фрагменте видео.

**Читайте также: Как правильно подобрать контрактный двигатель**

Наглядно это можно объяснить с помощью двух магнитов. Магнит статора как бы тянет к себе ротор. При этом магнит статора перемещается скачками и ждет пока ротор приблизится, потом совершает следующий скачок. При этом в момент скачка дистанция между магнитами увеличивается, а их магнитное взаимодействие снижается, а при приближении магнитное взаимодействие увеличивается. Из-за этого и получаются пульсации момента. Если сделать движение более равномерным, выдерживая между «магнитами» постоянную дистанцию, усилие между магнитами пульсировать не будет, и движение будет происходить с меньшими потерями. Благодаря синусоидальному возбуждению, и достигается плавность вращения магнитного поля статора, что и дает эффект.

## Как генерировать синусоиду?

Возникает вопрос, как получить трехфазную синусоиду с управляемой частотой и амплитудой? Чтобы управлять трехфазным двигателем с помощью синусоидальных токов, для каждой фазы требуется генерировать независимые напряжения. Это делается с помощью трех полумостов, по одному на каждый вывод двигателя. Каждый полумост состоит из двух ключей (верхний и нижний), обычно это MOSFET транзисторы.

Для генерации определенного уровня напряжения используется ШИМ (PWM). В зависимости от скважности ШИМ можно управлять средним напряжением **Vout**. Но форма сигнала **Vout** будет повторять сигнал ШИМ, т.е. будет прямоугольной как ШИМ сигнал, а не гладкой. Если это напряжение подать на низкочастотный фильтр, то на выходе фильтра будет напряжение пропорциональное коэффициенту заполнения ШИМ верхнего ключа. Управляя скважностью ШИМ можно получить произвольную форму напряжения на выходе, в том числе и требуемое напряжение синусоидальной формы.

По некоторым причинам, в устройствах управления двигателем не используют фильтры низких частот. Во-первых, сам двигатель действует как фильтр. Индуктивность и сопротивление обмоток двигателя создают RL фильтр. К тому же механическая инерция двигателя и нагрузка создают «механический» фильтр низких частот. При достаточно большой частоте PWM, флуктуации скорости ротора будут абсолютно не значительные. Во-вторых, Протекание тока через низкочастотный фильтр, например RC-фильтр, привело бы к существенным потерям мощности на самом фильтре.

Поскольку при генерации PWM используется комплементарная работа двух ключей (верхнего и нижнего) нужно учесть тот факт, что для закрытия ключа требуется некоторое время. Поэтому нужно выключать открытый ключ, и через некоторое время, необходимое для его закрытия, открывать комплементарный ключ. Это время получило термин **Dead-time**. У микроконтроллера STM32 этот вопрос решает таймер, который занимается генерацией PWM.

Теперь перейдем непосредственно к генерации синусоиды. Зная положение ротора в данный момент времени, можно математическим путем вычислять амплитуду (скважность PWM) для каждой из трех фаз. Однако математические вычисления

занимают много времени и поэтому поступают иначе. Можно создать таблицу, в которую поместить заранее вычисленную синусоиду для всех трех фаз.

Генерировать синусоиды для каждой фазы — это прямой метод, но есть более эффективный способ. Мы будем генерировать три синусоидальных напряжения вывод-вывод (дифференциальное напряжение между двумя выводами) со сдвигом фазы на 120 градусов между ними. Таблицы 3-1 3-2 показывают, как этого можно достичь, не делая полные синусоиды для каждого вывода двигателя.

На рисунке 3-3 наглядно изображен этот алгоритм в сравнении с блочной коммутацией (как для BLDC).

У такого подхода есть два преимущества:

- 1) максимальная амплитуда сгенерированного напряжения выше, чем при генерации чистой синусоиды на каждой фазе. Как следствие получим более высокий вращающий момент и скорость.
- 2) Каждый вывод двигателя треть времени подключен к земле, что сокращает потери мощности на коммутацию.

При создании таблицы значений нужно найти компромисс между объемом таблицы и скоростью работы с ней. Поскольку форма волны одинакова для всех трех фаз, и отличается только сдвигом на 120 градусов, то можно сохранять в таблице только одну волну и использовать ее для расчета всех трех выходных напряжений. Однако, для сокращения времени на вычисления, принято решение сохранить в таблице значения для всех трех фаз. Так обеспечивается наиболее быстрая обработка данных. Используемая в примере таблица «синусов» имеет 192 значения для каждой фазы. Т.е. генерируемый сигнал будет разбит на секции и меть ступенчатую форму.

Этого вполне достаточно. При необходимости Вы можете скорректировать таблицу.

Таким образом, за один электрический оборот нам придется 192 раза вычислять и изменять значение PWM для каждой из трех фаз.

При расчете PWM для каждой фазы, нужно учитывать и величину подаваемой на двигатель мощности. В примере в качестве регулятора мощности используется сигнал с потенциометра. При реализации замкнутой системы, например, со стабилизацией оборотов, этот показатель будет вычисляться математически с учетом текущей нагрузки, требуемых оборотов и параметров ПИД регулятора.

## **Датчики положения и их использование**

Было бы идеально, если датчик положения ротора мог в любой момент информировать микроконтроллер о текущем положении ротора. В данном случае мы не имеем такой возможности. Три датчика Холла изменяют свое состояние 6 раз за один электрический оборот. Между этими событиями положение ротора достоверно не известно. Для определения текущего положения ротора между срабатываниями датчиков, мы вынуждены производить вычисления с учетом текущей скорости вращения ротора.

## **Определение скорости вращения**



Для того чтобы генерировать напряжение, подаваемое на выводы двигателя нужной частоты, нужно знать скорость вращения двигателя. Для определения скорости вращения используются датчики положения. Вычисляя время между двумя переключениями датчиков положения (будем считать, что скорость вращения ротора за это время не изменяется), можно рассчитать частоту, с которой нам надо генерировать выходной сигнал. Таким образом, зная скорость, мы можем вычислить положение ротора в любой момент времени. Скорость вращения ротора может изменяться, и мы вынуждены периодически подстраивать выходное напряжение в соответствии с реальным положением ротора. Такая подстройка называется фазовая подстройка.

**Читайте также: Как часто надо промывать двигатель промывочным маслом**

## **Фазовая подстройка**

Удобнее всего фазовую подстройку выполнять, когда контроллер точно знает реальное положение ротора. В случае с тремя датчиками Холла — это момент изменения состояния датчиков. Именно в этот момент можно узнать точный угол ротора. Подстройка выполняется путем коррекции индекса положения в таблице выходных значений (в таблице синусов).

## **Блочная коммутация**

В момент старта скорость ротора не известна до тех пор, пока не произойдет последовательно два изменения состояния датчиков холла. Чтобы обеспечить нормальный запуск двигателя, пока скорость вращения ротора не известна, применяется блочная коммутация. Т.е. контроллер управляет двигателем как (BLDC). Этот метод был описан ранее. Пример для STM32 найдете здесь. Карта напряжений, используемая в режиме блочной коммутации, показана на рис.3-3(штриховая синяя линия) на фоне с синусоидальным напряжением. Как только скорость вращения ротора будет определена, происходит переход к синусоидальному возбуждению.

## **Управление углом опережением коммутации**

Данный алгоритм позволяет программно установить угол опережения коммутации, чтобы настроить фазу синусоиды и заставить ее опережать ротор. Подбором угла опережения можно добиться максимальной скорости или эффективности двигателя. В примере этот угол не изменяется на протяжении всей работы. Но, он программно доступен и при необходимости его можно корректировать на ходу, например, в зависимости от текущей скорости вращения ротора двигателя.

## Программная реализация для STM32F103

### Генерация PWM (TIM1)

Как и в предыдущем примере таймер **TIM1** занимается генерированием PWM сигналов для 6 ключей. Так же **TIM1** обеспечивает **Dead-Time** и отключает выходы таймера, генерирующие PWM сигналы, при перегрузке по току. Сигнал о перегрузке по току подается на вход таймера **TIM1\_BKIN**.

### Генерирование выходного напряжения (синусоид) (TIM4)

Генерирование выходных напряжений заданной формы для трех фаз двигателя выполняется путем изменения скважности PWM. В таблице **PMSM\_SINTABLE** хранятся 192 значений. Т.е. за один электрический оборот нужно 192 раза изменять скважность PWM для каждой из трех фаз. Таймер **TIM4** отмеряет требуемое время и вызывает обработчик прерывания **TIM4\_IRQHandler**, где и выполняются необходимые вычисления и установка новых значений PWM для всех трех фаз, и выполняется приращение индекса положения в таблице синусов **PMSM\_SinTableIndex**.

### Определение скорости вращения (TIM3)

Для того чтобы сообщить таймеру TIM4 необходимое время, нужно знать с какой скоростью вращается ротор. Таймер **TIM3** используется для определения скорости вращения. Таймеры TIM3 и TIM4 тактируются одинаково. Это упрощает работу с ними. Таймер TIM4 должен «шагать» по таблице синусов (**PMSM\_SINTABLE**) с такой скоростью, чтобы пройти все 192 пункта таблицы за один полный электрический оборот.

Поскольку у нас есть датчики положения, мы можем в определенном положении запустить таймер счетчик **TIM3** и считать с него счетчик при завершении полного оборота. Затем значение этого счетчика разделить на 192 и получить число, которое

нужно задать таймеру TIM4. Поскольку TIM3 и TIM4 настроены на одинаковую частоту, прерывание TIM4 будет срабатывать 192 раза за электрический оборот. Что и требуется.

Поскольку датчики положения изменяют свое состояние 6 раз за электрический оборот, мы можем измерять время необходимое для прохождения не полного оборота, а 1/6 оборота. И делить значение счетчика на 32 ( $192/6=32$ ). Таким образом, измерение скорости будет выполняться 6 раз за один электрический оборот.

## Датчики холла (EXTI9\_5\_IRQ)

Сигналы датчиков Холла генерируют прерывания. Обработчик прерывания определяет текущее актуальное положение ротора, считывает данные с таймера **TIM3**, корректирует скорость работы **TIM4**, и выполняет фазовую подстройку путем смещения индекса положения в таблице синусов **PMSM\_SinTableIndex**. Поскольку частота вращения ротора изменяется, работа таймера **TIM4** может вызывать смещение выходного напряжения по фазе. Т.е. выходная синусоида будет отставать или опережать актуальное положение ротора. Для устранения этого эффекта применяется фазовая подстройка. Поскольку в момент изменения состояния датчиков Холла мы точно знаем актуальное положение ротора, можно скорректировать текущее положение в таблице синусов путем коррекции **PMSM\_SinTableIndex**. Соответствие данных датчиков Холла и положение в таблице синусов определено в таблицах **PMSM\_STATE\_TABLE\_INDEX\_FORWARD** и **PMSM\_STATE\_TABLE\_INDEX\_BACKWARD** для прямого и обратного направления вращения ротора.

## Структурная схема

Схема и двигатели, используемые в этом примере точно такие же, как и в предыдущем примере. Это позволит сравнить эффективность двух способов управления бесколлекторными двигателями с постоянными магнитами.

*Примечание: Вопросы проектирования силовой части регулятора в этой статье не рассматриваются. Статья затрагивает лишь вопросы программной реализации управления PMSM. Пример принципиальной схема силовой части будет рассмотрен отдельно.*

## Видео



## BLDC Motors и PMSM. Выводы

Возбуждение бесколлекторного двигателя с постоянными магнитами синусоидальными токами имеет несомненные преимущества. И позволяет повысить эффективность работы двигателя. Коррекция угла опережения (timing), позволяет находить компромисс между максимальным моментом на валу и скоростью вращения ротора.

Смотри также ВИДЕО:

### Бесколлекторные моторы «на пальцах»

Что такое бесколлекторные моторы и как управлять бесколлекторными моторами:



Источник

