

STSPIN820: Управление микрошагами

Введение

STSPIN820 — это компактный драйвер шагового двигателя в корпусе QFN 4 x 4 мм, подходящий для широкого спектра приложений управления движением. Встроенный контроллер реализует ШИМ-управление током и может поддерживать микрошаговое разрешение до 1/256 шага.

В первой части этого документа дается общий обзор работы шагового двигателя, описывая взаимосвязь между токами, протекающими в обмотках двигателя, и движением вала двигателя.

Во второй части объясняется, как выбрать режим микрошага в STSPIN820 и как изменить его динамически, чтобы оптимизировать компромисс между точностью и скоростью.

1 Обзор шаговых двигателей

Основная концепция шагового двигателя, как следует из названия, заключается в дискретизации движения через равные промежутки времени, называемые шагами. Таким образом, вал двигателя можно расположить под контролируемым и точным углом.

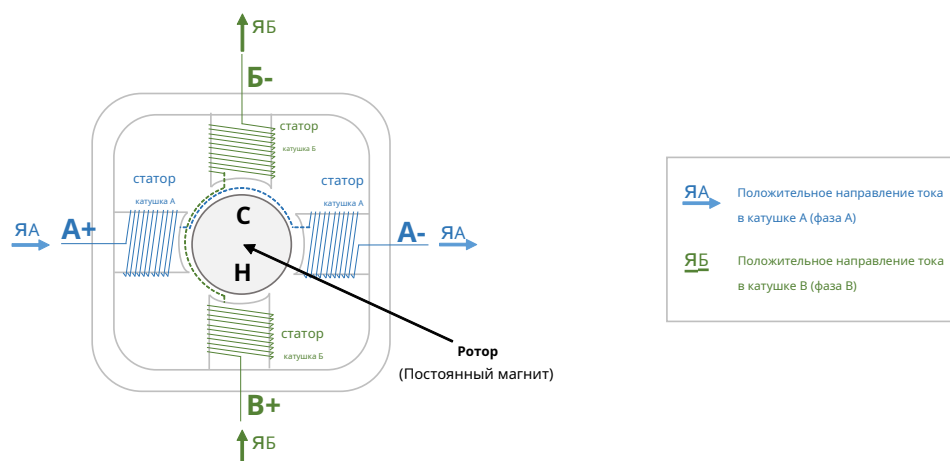
Шаговые двигатели - это бесщеточные двигатели: обмотки расположены на статоре, а ротор может быть постоянным магнитом, структурой с переменным сопротивлением или комбинацией того и другого, как в случае гибридных шаговых двигателей. Обмотки статора могут быть сгруппированы и питаться одним и тем же током: каждая группа называется фазой. По направлению тока в каждой фазе шаговые двигатели классифицируются как:

- *Однополярный*: ток в фазе всегда однонаправленный;
- *Биполярный*: ток в каждой фазе может течь в обоих направлениях.

Подавая питание на фазы двигателя (т.е. пуская в них ток) можно создать магнитное поле, называемое магнитным полем статора (*Бстаж*). Это поле притягивает магнитное поле ротора (*Бгниль*), тем самым выравнивая двигатель вал в одном заданном ступенчатом положении. Используя правильную последовательность движения, можно шаг за шагом перемещать вал двигателя, точно контролируя его угол.

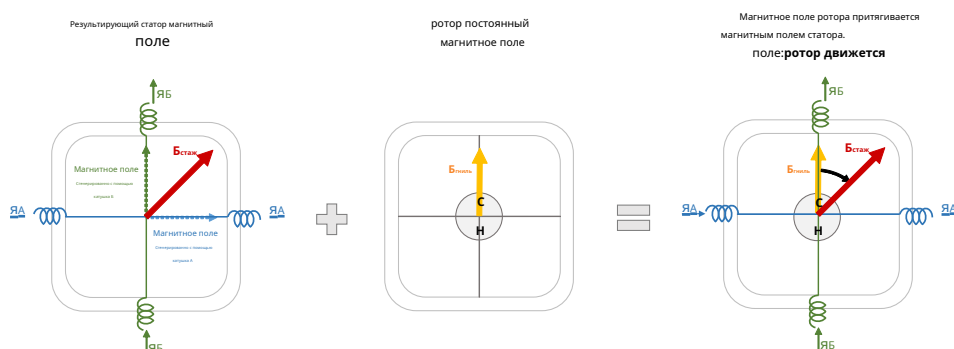
STSPIN820 предназначен для управления двухфазными биполярными шаговыми двигателями. Упрощенная модель биполярного шагового двигателя представлена на рис. [Рисунок 1](#): обмотки сгруппированы в две фазы (названные *А* и *В*), расположенные через каждые 90° на статоре; ротор представляет собой простой постоянный магнит с одной парой полюсов.

Рисунок 1. Упрощенная схема двухфазного биполярного шагового двигателя



Ток, протекающий в одной фазе, создает магнитное поле. Если обе фазы находятся под напряжением, магнитное поле статора представляет собой комбинацию двух перпендикулярных полей, генерируемых двумя фазами, как в [фигуре 2](#). Ротор движется, чтобы совместить собственное магнитное поле с полем статора.

Фигура 2. Представление магнитных полей статора и ротора



Изменяя направление токов в фазах, можно выравнивать ротор по разным ступеням. Таким образом, управляя фазными токами в правильной последовательности, можно шаг за шагом перемещать вал двигателя.

1.1

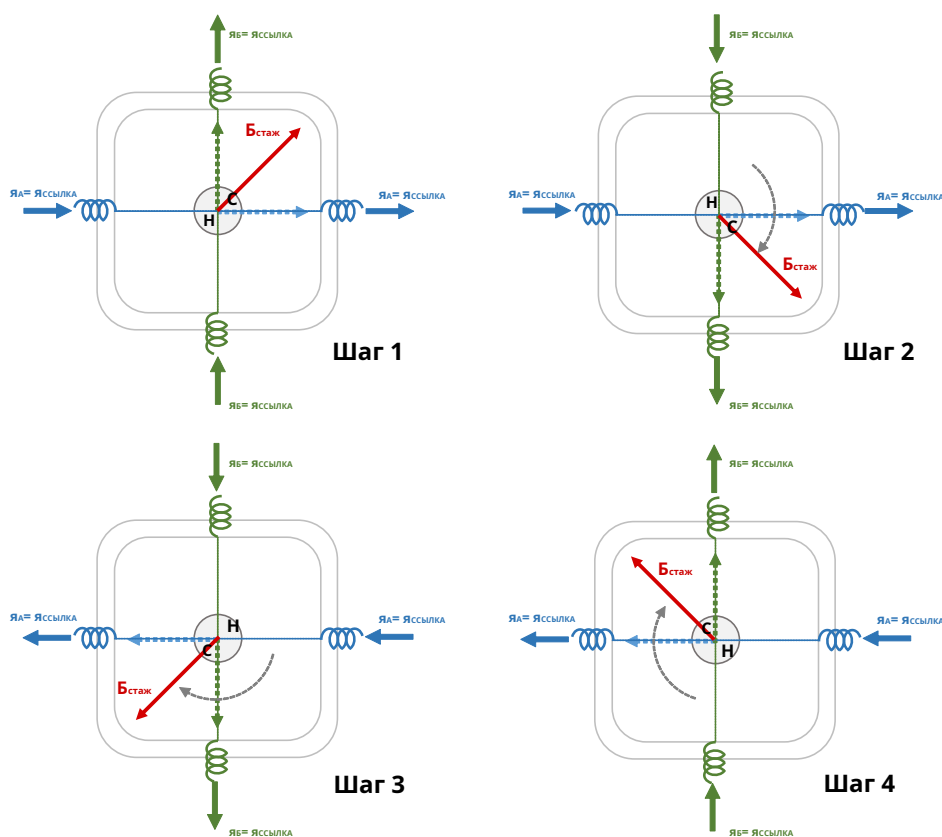
Полный шаг операции

Простым способом управления шаговым двигателем является полношаговый режим: изменяется только направление тока в каждой фазе, а его значение ($I_{ссылка}$) сохраняется постоянным. Допускаются четыре возможные комбинации, каждая из которых соответствует шаг, как показано на [Рисунок 3](#).

STSPIN820 использует подход для подачи питания на обе фазы, чтобы иметь большее магнитное поле и, следовательно, больший крутящий момент по сравнению с однофазным подходом. Поскольку токи, протекающие в двух фазах, имеют одинаковую величину ($I_{ссылка}$), генерируемые поля (прямо пропорциональные текущему) имеют одинаковую величину. Ссылаясь на [Рисунок 3](#) два поля перпендикулярны, поэтому результирующее магнитное поле равно $\sqrt{2}$ больше, чем два магнитных поля, взятые по отдельности.

Величина результирующего магнитного поля определяет притяжение ротора и, таким образом, создаваемый крутящий момент.

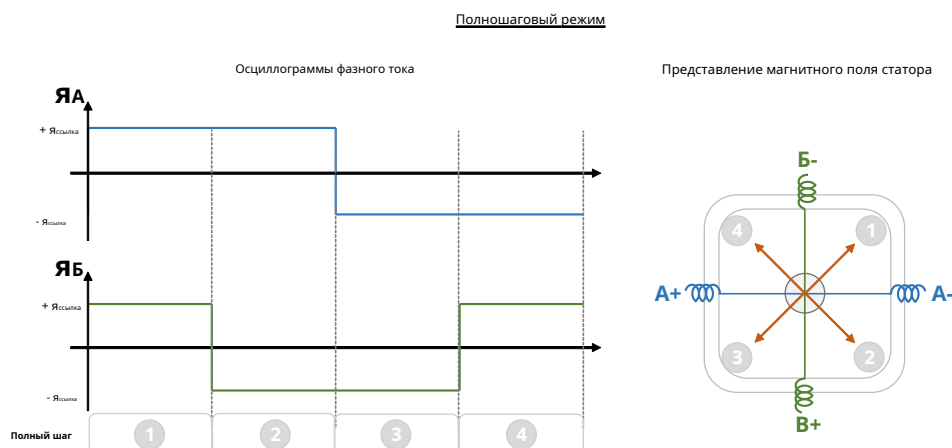
Рисунок 3. Последовательность токов в полношаговом режиме



Повторение последовательности полного шага приводит к непрерывному вращению двигателя. В STSPIN820 каждый импульс на выводе тактовых импульсов (STCK) запускает переход от одного шага к другому. Направление, в котором выполняется последовательность (то есть направление вращения), выбирается выводом DIR.

Диаграмма фазных токов полной ступенчатой последовательности представлена в Рисунок 4: формы сигналов тока в идеале представляют собой две прямоугольные волны с задержкой 90°.

Рисунок 4. Представление фазных токов в полношаговом режиме

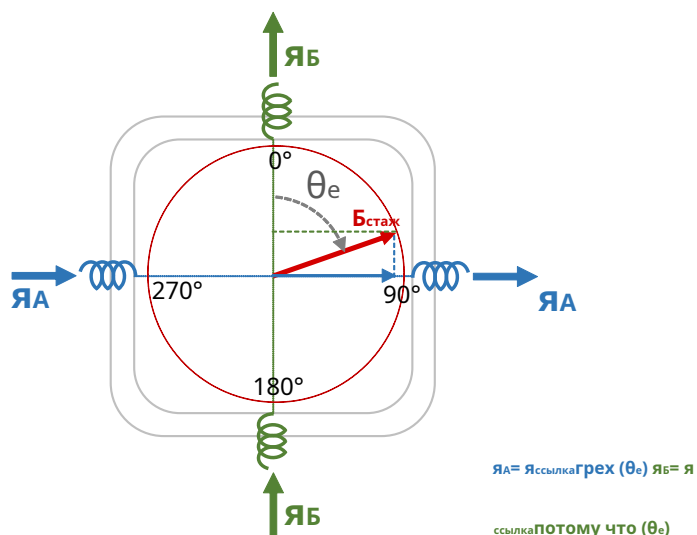


1,2

Микрошаговая операция

В соответствии с полношаговым режимом управления положение магнитного поля статора может принимать четыре разных положения. Чтобы определить положение магнитного поля статора, полезно определить электрический угол θ_e как угол магнитного поля статора относительно одной оси. Ссылаясь на Рисунок 5, ось Y используется в качестве точки отсчета 0° , поэтому электрические углы, разрешенные в полношаговом режиме, составляют 45° , 135° , 225° и 315° .

Рисунок 5. Представление электрического угла с помощью двух квадратурных токов



Чтобы увеличить разрешение в движении, электрический угол одного полного шага, то есть 90° , можно разделить на несколько микрошагов, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Различные микрошаги получаются путем регулировки уровней токов в соответствии с синусоидой и косинусом целевого электрического угла, который должен быть получен, как показано на рис. [Рисунок 5](#). Количество интервалов, разделяющих один полный шаг, определяет разрешение микрошага и указано как M . STSPIN820 поддерживает восемь различных разрешений, от полного пошагового режима до $1/256$ -микрошаговый режим. Согласно предыдущему определению, $M=2$ соответствует полушаговому режиму, $M=4$ для четвертьшагового режима и т.д., вплоть до $M=256$ для максимального разрешения. Ссылаться на [Раздел 2.1](#), [Таблица 1](#) для полного списка.

Электрический угол, соответствующий одному микрошагу (θ_{μ}) определяется:

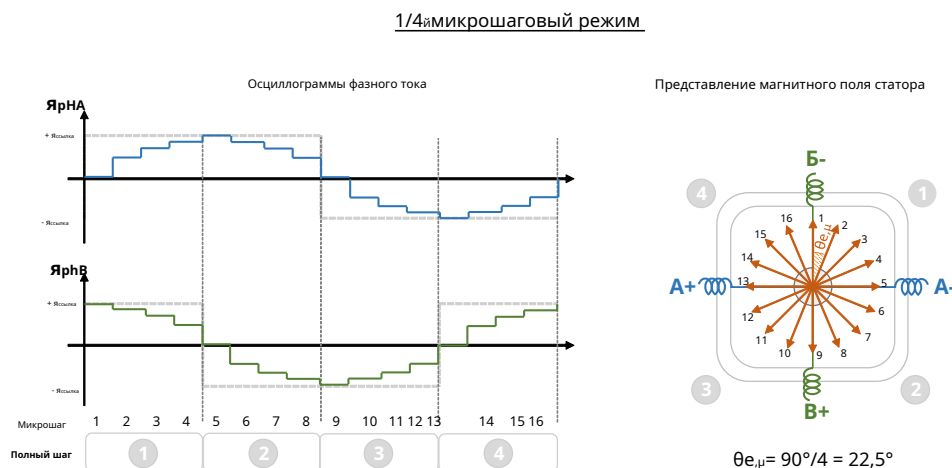
Уравнение 1

$$\theta_{\mu} = \frac{90^\circ}{M}$$

(1)

Пример микрошага с использованием $M = 4$, разрешение в четверть шага приведен в [Рисунок 6](#). Угол электрического шага равен $\theta_{\mu} = 22,5^\circ$; пример показывает последовательность токов и соответствующее положение статора магнитное поле.

Рисунок 6. Электрический угол и фазные токи – пример с использованием $1/4$ -микрошаговый режим



Увеличение режима микрошага позволяет иметь более плавные синусоиды и меньший угол между микрошагами. Плавное и постоянное вращение магнитного поля статора приводит к более плавному движению вала двигателя. Для более низких режимов микрошага квантование можно увидеть на синусоидах; и наоборот, при максимальном разрешении (256 микрошагов) текущие синусоиды очень плавные.

1.2.1

ШИМ-управление током

STSPIN820 управляет различными уровнями необходимого тока с помощью метода ШИМ. Максимальное значение тока (т.е. пик синусоиды, названный $I_{\text{ссылка}}$) задается напряжением на выводе REF, деленным на шунт резистор $R_{\text{шунт}}$ подключен к контакту SENSE на каждой фазе.

В режиме микрошага эталонные значения дискретизируются в соответствии с количеством микрошагов, т. е. разрешением микрошага M . Каждая фаза имеет свой собственный регулятор тока PWM; значения выбираются путем масштабирования $I_{\text{ссылка}}$ значение в соответствии со следующим:

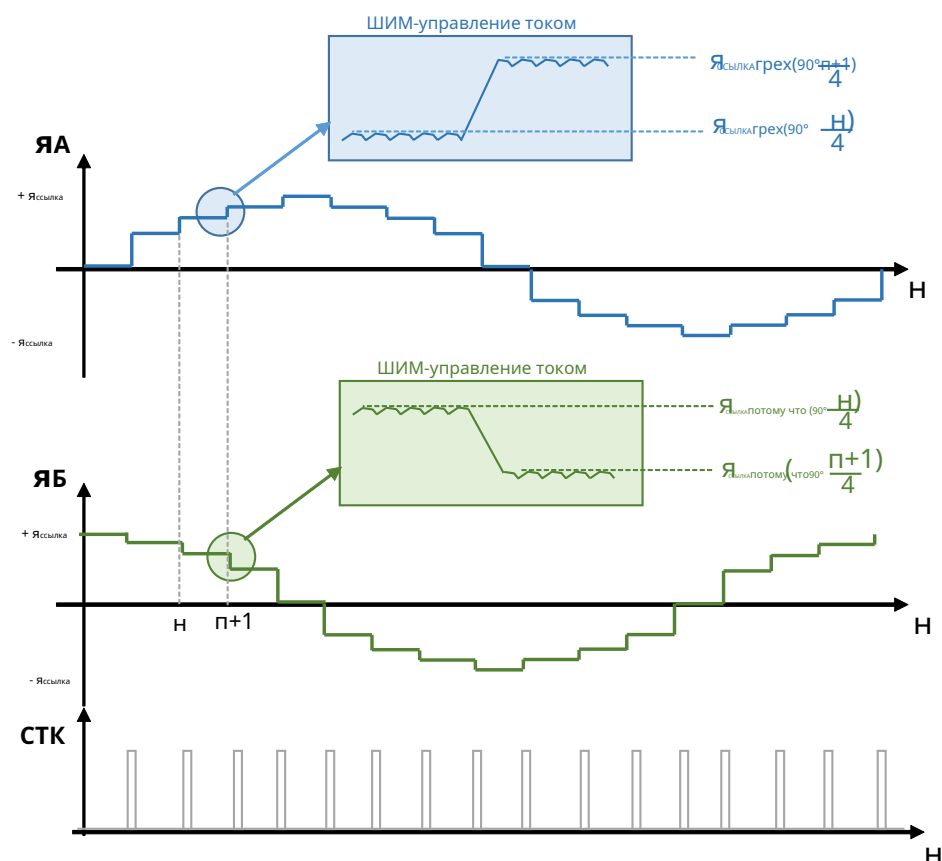
Уравнение 2

(2)

$$\begin{cases} I_A = I_{REF} \cdot \sin \left(90^\circ \cdot \frac{H}{M} \right) = \frac{I_{ССЫЛКА}}{PC} \cdot \text{грех} \left(90^\circ \cdot \frac{H}{M} \right) \\ I_B = I_{REF} \cdot \cos \left(90^\circ \cdot \frac{H}{M} \right) = \frac{I_{ССЫЛКА}}{PC} \cdot \text{потому что} \left(90^\circ \cdot \frac{H}{M} \right) \end{cases}$$

Где I_{REF} — это микрошаг в последовательности, которая увеличивается при каждом импульсе на выводе STCK. Рисунок 7 показывает пример того, как работает ШИМ-управление током; разрешение в этом примере — четвертьшаговый режим ($M=4$).

Рисунок 7. ШИМ-управление током — пример с использованием 1/4 микрошага



Это видно из Рисунок 7 что максимальный эталонный ток на одной фазе соответствует нулевому току на другой фазе. Результирующий ток, определяемый комбинацией двух токов, равен $I_{ССЫЛКА}$; это правда в все режимы микрошага. В полношаговом режиме оба тока равны $I_{ССЫЛКА}$, поэтому их комбинация $2I_{ССЫЛКА}$ как описано в Раздел 1.1.

1,3

Электрический угол и механический угол

Упрощенная модель шагового двигателя, описанная в [Секция 1](#) используется для объяснения основных принципов работы. Однако в большинстве случаев он не подходит из-за плохой разрешающей способности движения: полный механический оборот вала двигателя состоит всего из 4 полных шагов. В большинстве приложений требуется больше полных шагов для одного механического оборота. Чтобы увеличить разрешение движения, один полный шаг должен соответствовать меньшему механическому углу. Механический угол, то есть физический угол, покрываемый движением вала двигателя во время полного шага, называется углом шага θ_m : выражается в градусах следующий:

Уравнение 3:

$$\theta_m = \frac{360^\circ}{N_s}$$

(3)

Где N_s это количество шагов на один оборот. Ссылаясь на типичное значение $N_s = 200$, угол шага θ_m составляет $1,8^\circ$.

Понятия электрического угла θ_e , (описано в [Секция 1](#)) и механический угол θ_m (описано здесь выше) можно резюмировать следующим образом: [Рисунок 8](#):

- Последовательность из 4 полных шагов соответствует полному периоду формы фазного тока, то есть 360° электрического угла.
- Та же последовательность из 4 полных шагов (по определению в 4 раза больше θ_m) соответствует меньшему углу на валу двигателя.
- Один полный шаг всегда соответствует электрическому углу $\theta_e = 90^\circ$ и на механический угол θ_m данный [уравнение \(3\)](#).

В итоге происходит уменьшение между частотой вращения магнитного поля статора, т. е. частотой форм токов в двух фазах f_e , и частота вращения вала двигателя f_m , т.е. скорость двигателя в оборотах в секунду (Гц). Коэффициент редукции выражается

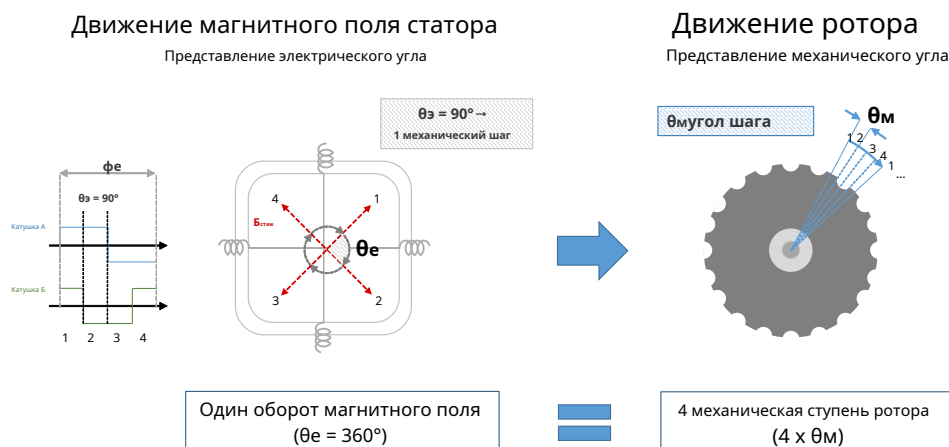
Уравнение 4:

$$\frac{f_e}{f_m} = \frac{90^\circ}{\theta_m} = \frac{N_s}{4}$$

(4)

При угле шага $1,8^\circ$ передаточное число между электрическим и механическим углом составляет 50; Итак, учитывая электрическую частоту $f_e = 100$ Гц, механическая частота вращения $f_m = 2$ Гц, значит 2 оборота в секунду или 120 об/мин.

Рисунок 8. Представление электрического угла и механического угла ротора



1.3.1

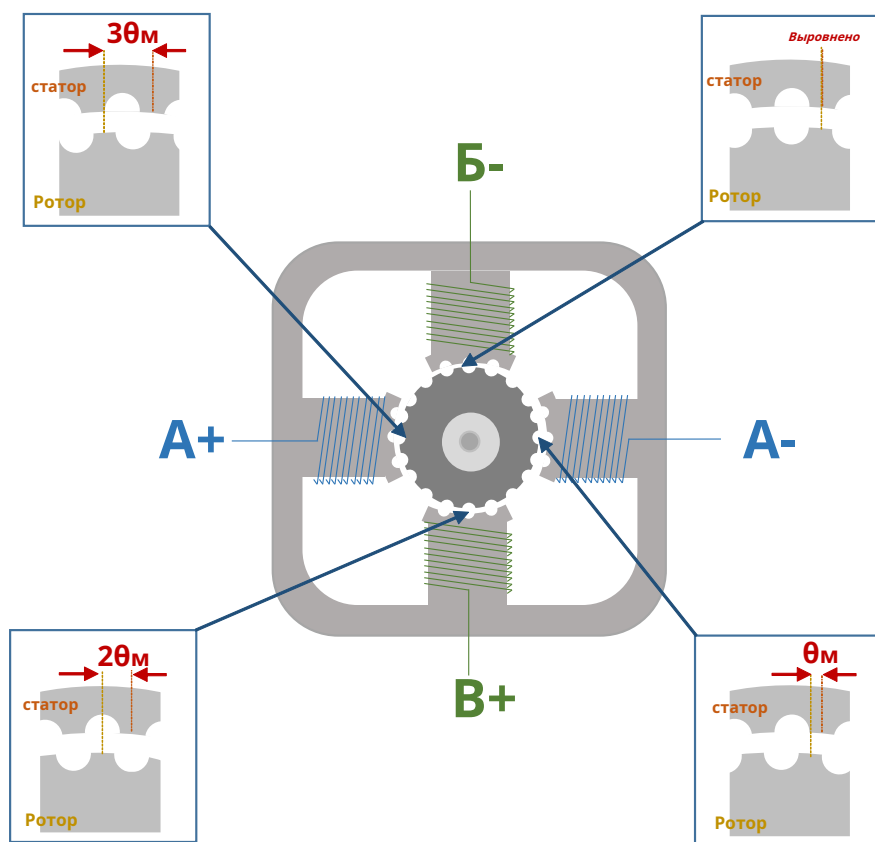
Пример гибридного шагового двигателя

Давайте рассмотрим типологию шагового двигателя, обычно используемого во многих приложениях: гибридный шаговый двигатель. Уменьшение электрического и механического угла достигается за счет правильной формы ротора и статора. Ротор имеет зубчатую форму, что фактически увеличивает количество пар полюсов и создает структуру с переменным сопротивлением. Каждый зубец ротора фактически является парой полюсов, так как внутри ротора находится постоянный магнит; кроме того, форма зубьев изменяет сопротивление конструкции, способствуя тем самым выравниванию ротора в четко определенных положениях. Используя преимущества двигателей с постоянными магнитами и двигателей с переменным сопротивлением, гибридные двигатели могут повысить свои характеристики с точки зрения шагового разрешения, крутящего момента и скорости.

Смещение между зубьями ротора и полюсами статора определяет движение в соответствии с последовательностью фазных токов. Ссылаясь на [Рисунок 9](#), можно в принципе понять, как работает гибридный шаговый двигатель. [Рисунок 9](#) представляет зубья статора и ротора и то, как они выровнены: когда зубья одного полюса статора выровнены с зубьями ротора, зубья всех других полюсов статора смещаются. Механический сдвиг между зубьями статора и ротора увеличивается на θ_m для двух последовательных полюсов статора. Таким образом, при каждом изменении электрического угла $\theta_e 90^\circ$, ротор перемещается на один угол шага θ_m чтобы совместить его зубья с зубьями статора под напряжением.

По конструкции полный поворот на 360° электрического угла соответствует перемещению, эквивалентному шагу между двумя соседними зубьями шагового двигателя. Следовательно, число зубьев ротора равно $N_s/4$ или, другими словами, каждому углу шага соответствует $1/4$ углового шага между зубьями.

Рисунок 9.Схематическое изображение гибридного шагового двигателя и смещения зубьев



2 Выбор режима микрошага

2.1 Выбор пошагового режима в STSPIN820

STSPIN820 можно легко настроить на один из восьми возможных режимов микрошага. Пошаговый режим зависит от значения, присутствующего на трех цифровых выводах устройства: MODE3, MODE2 и MODE1. Ссылаться на [Таблица 1](#) для получения подробной информации о выборе режима. Внутренняя логика управляет контактами асинхронно, поэтому режим шага может динамически изменяться во время работы. Это позволяет оптимизировать работу драйвера двигателя.

Таблица 1. Выбор пошагового режима в STSPIN820

Пошаговый режим	M	РЕЖИМ3	РЕЖИМ2	РЕЖИМ1
Полный шаг	1	0	0	0
Полшага	2	0	0	1
Четверть шага	4	0	1	0
1/8й шаг	8	0	1	1
1/16й шаг	16	1	0	0
1/32й шаг	32	1	0	1
1/128й шаг	128	1	1	0
1/256й шаг	256	1	1	1

STSPIN820 управляет двигателем в соответствии с тактовой частотой, последовательностью импульсов, подаваемой на вывод STCK. Количество импульсов STCK, необходимых для перемещения на один шаг, зависит от выбранного режима микрошага. Импульс на STCK перемещает двигатель на один микрошаг, поэтому чем выше режим микрошага, тем большее количество импульсов STCK необходимо для перемещения на один полный шаг. Например, рассмотрим следующие случаи:

- В полношаговом режиме выполняется одно полное пошаговое движение с использованием одного импульса STCK.
- В полушаговом режиме выполняется одношаговое движение с использованием двух импульсов STCK.
- Использование масштаба 1/32 микрошагового режим, одно движение полного шага выполняется с использованием 32 импульсов STCK

Другими словами, увеличение разрешения микрошага приводит к меньшему углу движения при каждом импульсе STCK. Электрическая частота фетекующих сигналов, может быть выражена как функция тактовой частоты шага частота ϕ_{STCK}

Уравнение 5:

$$\phi_e = \frac{\phi_{STCK}}{4 \cdot M}$$

(5)

Объединение [уравнение \(4\)](#) и [уравнение \(5\)](#) можно найти зависимость между скоростью двигателя (механической частотой f_m) и тактовая частота шага по отношению к режиму микрошага.

Уравнение 6:

$$\phi_m = \frac{\phi_{STCK}}{N_S \cdot M}$$

(6)

Ясно, что увеличение разрешения микрошага требует более высокой частоты тактовых импульсов для достижения заданной скорости: т.е. требуется больше импульсов тактовых импульсов для перемещения вала двигателя на тот же механический угол.

Таблица 2. Сводка параметров

Определение	Символ	Единица	Описание
Угол шага	θ_m	°	Это угол, покрываемый одним шагом шагового двигателя. Типичное значение составляет 1,8°, что означает, что для выполнения полного поворота необходимо 200 шагов.
Шагов за оборот	HC		Это количество шагов, необходимых для полного механического оборота вала двигателя.
Микрошаговый режим	M		M представляет, на сколько интервалов делится один шаг. Чем выше микрошаговый режим, тем плавнее движение и синусоидальный профиль тока.
Частота STCK	ϕ_{STCK}	Гц	Ступенчатая тактовая частота — тактовая частота, предоставляемая STSPIN820.
Электрическая частота	ϕ_e	Гц	Это частота форм тока, поэтому частота вращения магнитного поля статора
Механическая частота	ϕ_m	Гц	Это частота вращения ротора, поэтому она соответствует скорости в оборотах в секунду.

2.2

Компромисс между скоростью и разрешением

Использование режимов микрошага с высоким разрешением повышает точность позиционирования и плавность движения, позволяя избежать нежелательной вибрации двигателя. Точность и плавность очень важны, когда двигатель движется на низкой скорости или выполняет точное позиционирование. С другой стороны, есть некоторые недостатки в микрошаговом режиме, когда двигатель вращается на более высоких скоростях:

- синусоидальные профили тока могут быть искажены противоэлектродвижущей силой (БЭДС) и пределом dI/dt , налагаемым фазной индуктивностью и напряжением питания.
- шаговые часы имеют высокую частоту, как указано в [уравнение \(5\)](#)
- плавность движения и точность позиционирования больше не требуются, поскольку двигатель движется с высокой скоростью и не указывает точное положение.

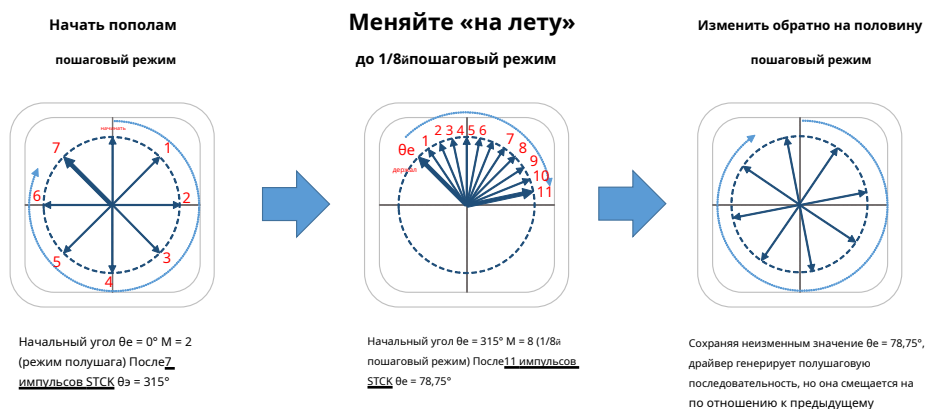
Поскольку необходимо вычислить профили ускорения и замедления, чем выше частота STCK, тем выше усилие, требуемое MCU. Хотя STSPIN820 поддерживает подсчет шагов даже на частотах до 4 МГц, уменьшение разрешения микрошагов может быть вариантом для снижения частоты STCK. Как указывалось ранее, когда двигатель вращается на высоких скоростях, точность позиционирования не так критична, и разрешение микрошагов может быть уменьшено, что снижает тактовую частоту шага и накладные расходы микроконтроллера. Выбор правильного разрешения микрошага позволяет ограничить тактовую частоту шага без потери производительности. В конце концов, на более высокой скорости можно работать в полношаговом режиме: [Раздел 1.1](#).

2.3

Управление электрическим углом в STSPIN820

STSPIN820 поддерживает изменение микрошагового режима «на лету»: это означает, что во время движения двигателя разрешение можно изменить, просто воздействуя на контакты MODE, как описано в [Раздел 2.1](#). Чтобы избежать любого смещения положения при переходе от одного режима к другому, всегда поддерживается электрический угол между различными режимами. Это гарантирует, что, даже изменяя микрошаговый режим «на лету», движение будет максимально плавным, избегая любого «скачка» электрического угла. Как следствие, при переключении с одного более высокого разрешения на более низкое электрические углы, составляющие управляющую последовательность, могут быть изменены (см. пример в [Рисунок 10](#)).

Рисунок 10. Пример изменения последовательности электрического угла в STSPIN820



Чтобы сохранить последовательность неизменной при переходе от одного разрешения к другому, переключение режимов должно происходить при одном электрическом угле, доступном в нижнем микрошаговом режиме. В примере Рисунок 10, когда изменение от 1/8й ($M=8$) в полушаговый режим ($M=2$), изменение должно происходить при θ_e кратно 45° (то есть $90^\circ/M$).

Единственным исключением из закона сохранения электрического угла является полношаговый режим. Полношаговый режим не может использовать два разных уровня тока, поэтому электрический угол всегда равен $45^\circ + 90^\circ \cdot k$ (где k — целое число $k = 0, 1, 2, 3, \dots$) или, другими словами, когда фазные токи в модуле равны. Предпочтительно, чтобы угол оставался постоянным, переключаться в полношаговый режим только тогда, когда магнитное поле находится в вышеупомянутых электрических углах.

Переход в полношаговый режим позволяет не только снизить частоту STCK, но и увеличить крутящий момент, создаваемый двигателем. Переход в полношаговый режим при правильных электрических углах не может управляться STSPIN820, поэтому он должен управляться микропрограммой управления MCU.

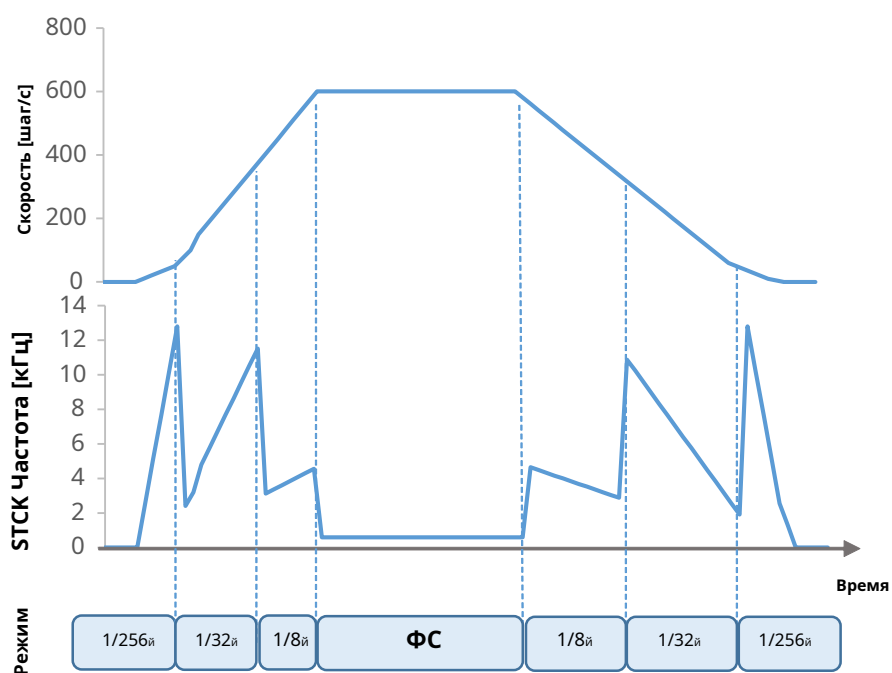
2.4

Пример: профиль скорости и выбор режима

Пример динамического управления микрошаговым режимом приведен в Рисунок 11, показывающий типичный профиль скорости, состоящий из трех частей: ускорение, постоянная скорость и замедление. Режим микрошага изменяется в зависимости от скорости: в фазе ускорения движение плавное с использованием максимального разрешения STSPIN820, то есть 1/256 микрошага. По мере увеличения скорости разрешение уменьшается, пока не будет достигнута максимальная целевая скорость (600 шагов/с в этом примере). Движение с постоянной скоростью выполняется в полношаговом режиме, чтобы иметь более высокий крутящий момент и более низкую тактовую частоту шага (600 Гц в данном случае).

пример). Если 1/256 разрешение микрошагового режима использовалось на этой максимальной скорости, потребовалась бы тактовая частота шага более 153 кГц. Изменение разрешения может быть выполнено в любое время без остановки драйвера или потери шага, поэтому можно управлять любым профилем скорости, оптимизируя разрешение и тактовую частоту шага.

Рисунок 11. Пример профиля скорости и соответствующие часы шага, изменение режима микрошага



Лист регистраций изменений

Таблица 3.История изменений документа

Дата	Версия	Изменения
01 октября 2019 г.	1	Изначальный выпуск.

Содержание

1	Обзор шаговых двигателей.....	2
1.1	Полношаговая операция.....	3
1.2	Микрошаговая операция.....	5
1.2.1	ШИМ управление током.....	6
1.3	Электрический угол и механический угол.....	7
1.3.1	Пример гибридного шагового двигателя.....	9
2	Выбор режима микрошага.....	11
2.1	Выбор пошагового режима в STSPIN820.....	11
2.2	Компромисс между скоростью и разрешением.....	12
2.3	Управление электрическим углом в STSPIN820.....	12
2.4	Пример: профиль скорости и выбор режима.....	13
	Лист регистраций изменений.....	15
	Содержание.....	16
	Список таблиц.....	17
	Список рисунков.....	18

Список таблиц

Таблица 1.	Выбор пошагового режима в STSPIN820.	11	Обзор
Таблица 2.	параметров.	12	История изменений
Таблица 3.	документа.	15	

Список рисунков

Рисунок 1.	Упрощенная схема двухфазного биполярного шагового двигателя.	2
Фигура 2.	Представление магнитных полей статора и ротора.	3
Рисунок 3.	Последовательность токов в полношаговом режиме.	4
Рисунок 4.	Представление фазных токов в полношаговом режиме.	5
Рисунок 5.	Представление электрического угла с использованием двух квадратурных токов.	5
Рисунок 6.	Электрический угол и фазные токи – пример с использованием 1/4-микрошаговый режим.	6
Рисунок 7.	ШИМ-управление током — пример с использованием 1/4-микрошаг.	7
Рисунок 8.	Представление электрического угла и механического угла ротора.	9
Рисунок 9.	Схематическое изображение гибридного шагового двигателя и смещения зубьев.	10
Рисунок 10.	Пример изменения последовательности электрического угла в STSPIN820.	13
Рисунок 11.	Пример профиля скорости и соответствующих шаговых часов, изменение режима микрошага.	14

ВАЖНОЕ ЗАМЕЧАНИЕ – ПОЖАЛУЙСТА, ПРОЧИТАЙТЕ ВНИМАТЕЛЬНО

STMicroelectronics NV и ее дочерние компании («ST») оставляют за собой право вносить изменения, исправления, усовершенствования, модификации и усовершенствования продуктов ST и/или данного документа в любое время без предварительного уведомления. Покупатели должны получить последнюю актуальную информацию о продуктах ST, прежде чем размещать заказы. Продукция ST продается в соответствии с условиями продажи ST, действующими на момент подтверждения заказа.

Покупатели несут единоличную ответственность за выбор, выбор и использование продуктов ST, и ST не несет ответственности за помощь в применении или разработку продуктов Покупателей.

Компания ST не предоставляет никаких лицензий, явных или подразумеваемых, на какие-либо права на интеллектуальную собственность.

Перепродажа продуктов ST с условиями, отличными от информации, изложенной в настоящем документе, аннулирует любую гарантию, предоставленную ST для такого продукта.

ST и логотип ST являются товарными знаками ST. Дополнительную информацию о товарных знаках ST см. www.st.com/topговые_марки. Все остальные названия продуктов или услуг являются собственностью их соответствующих владельцев.

Информация в этом документе отменяет и заменяет информацию, ранее представленную в любых предыдущих версиях этого документа.

© 2019 STMicroelectronics – Все права защищены