

УДК 681.3.068

Ю.В. Киричук, к.т.н., доц.
В.В. Кононенко, магістрант

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Національний технічний університет України “КПІ”

В работе производится сравнение между шаговым приводом и сервоприводом с описанием их преимуществ и недостатков.

Ключевые слова: шаговый двигатель, серводвигатель.

Введение

Исполнительные механизмы (приводы) включают в себя двигатель, систему управления, передаточные механизмы, тормозные устройства, датчики обратной связи и коммуникации. Коммуникации необходимы для передачи энергии к приводам и передачи сигналов управления, а также для выполнения обратной связи.

Выбор типа привода зависит от его функционального назначения. Основными факторами, определяющими выбор типа привода являются: назначение и условия эксплуатации, грузоподъемность и требуемые динамические характеристики конструкции, а также вид системы управления.

Анализ исследований и публикаций

Сегодня в литературе отсутствуют сведения, посвященные сравнению между шаговым приводом и сервоприводом с описанием их преимуществ и недостатков.

Постановка задачи

Частой проблемой при выборе приводов для современных исполнительных механизмов является выбор между шаговым приводом и сервоприводом. Данная проблема заслуживает серьезной проработки разработчика, так как неверный выбор может стать причиной снижения качества устройства, либо неоправданному повышению стоимости.

Изложение основного материала

В современных системах управления широко используются устройства, с цифровой обработкой сигналов. Цифровые системы управления привели к созданию нового типа исполнительных механизмов - шаговых двигателей (ШД). Они широко используются в дисководах, принтерах, плоттерах, сканерах, факсах, а также в разнообразном промышленном и специальном оборудовании.

Шаговые двигатели относятся к классу бесколлекторных двигателей постоянного тока, которые имеют высокую надежность и большой срок службы, что позволяет использовать их в системах, работающих в тяжелых производственных условиях.

При проектировании конкретных систем приходится делать выбор между серводвигателем и шаговым двигателем. Когда требуется прецизионное позиционирование и точное управление скоростью, а требуемый момент и скорость не выходят за допустимые пределы, то шаговый двигатель является наиболее экономичным решением. Как и для обычных двигателей, для повышения момента шагового двигателя может быть использован понижающий редуктор. Решить эту задачу для шаговых двигателей с помощью редуктора не всегда удастся. В отличие от коллекторных двигателей, у которых момент растет с увеличением скорости, шаговый двигатель имеет больший момент на низких скоростях. К тому же, шаговые двигатели имеют гораздо меньшую максимальную скорость по сравнению с коллекторными двигателями, что ограничивает максимальное передаточное число и, соответственно, увеличение момента с помощью редуктора. Поэтому шаговые двигатели с редукторами хотя и выпускаются, но в сравнительно небольшом количестве.

Шаговые двигатели с переменным магнитным сопротивлением имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы из магнитомягкого материала. Намагниченность ротора отсутствует. Для простоты изложения на рисунке 1 ротор имеет 4 зубца, а статор имеет 6 полюсов. Двигатель имеет 3 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет шаг 30°. При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять положение, когда магнитный поток замкнут, т.е. зубцы ротора будут находиться напротив тех полюсов, на которых находится запитанная обмотка. Если затем выключить эту обмотку и включить следующую, то ротор поменяет положение, снова замкнув своими зубцами магнитный поток.

Таким образом, чтобы осуществить непрерывное вращение, нужно включать фазы попеременно. Двигатель не чувствителен к направлению тока в обмотках. Реальный двигатель может иметь большее количество полюсов статора и большее количество зубцов ротора, что соответствует большему количеству шагов на оборот. Иногда поверхность каждого полюса статора выполняют зубчатой, что вместе с соответствующими зубцами ротора обеспечивает очень маленькое значения угла шага, порядка нескольких градусов. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением довольно редко используют в промышленных применениях.

Двигатели с постоянными магнитами состоят из статора, который имеет обмотки, и ротора, содержащего постоянные магниты (рис. 2). Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Благодаря намагниченности ротора в таких двигателях обеспечивается больший магнитный поток и, как следствие, больший момент, чем у двигателей с переменным магнитным сопротивлением.

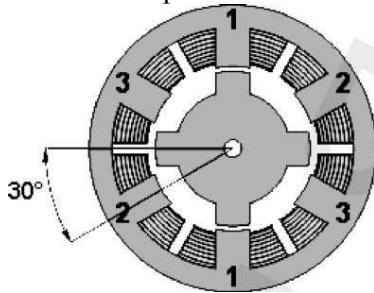


Рис. 1. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

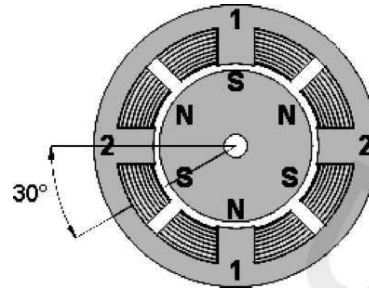


Рис. 2. Двигатель с постоянными магнитами

Показанный на рисунке двигатель имеет 3 пары полюсов ротора и 2 пары полюсов статора. Двигатель имеет 2 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель, как и рассмотренный ранее двигатель с переменным магнитным сопротивлением, имеет величину шага 30° . При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга. Для осуществления непрерывного вращения нужно включать фазы попеременно. На практике двигатели с постоянными магнитами обычно имеют 24 - 48 шагов на оборот (угол шага $15 - 7,5^\circ$).

Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает максимальную скорость. Для работы на высоких скоростях используются двигатели с переменным магнитным сопротивлением.

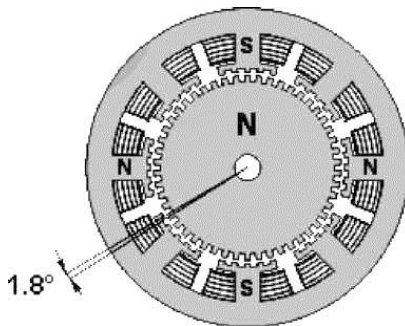


Рис. 3. Гибридный двигатель

Гибридные двигатели являются более дорогими, чем двигатели с постоянными магнитами, зато они обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость. Типичное число шагов на оборот для гибридных двигателей составляет от 100 до 400 (угол шага $3.6-0.9^\circ$). Гибридные двигатели сочетают в себе преимущество двигателей с

переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами. Ротор гибридного двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении (рис. 3). Ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит. Таким образом, зубцы верхней половинки ротора являются северными полюсами, а зубцы нижней половинки - южными. Кроме того, верхняя и нижняя половинки ротора повернуты друг относительно друга на половину угла шага зубцов. Число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половинок. Зубчатые полюсные наконечники ротора, как и статор, набраны из отдельных пластин для уменьшения потерь на вихревые токи.

Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большое количество эквивалентных полюсов, в отличие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются 4 основных полюса для $3,6^\circ$ двигателей и 8 основных полюсов для $1,8^\circ$ и $0,9^\circ$ двигателей. Зубцы ротора обеспечивают меньшее сопротивление магнитной цепи в определенных положениях ротора, что улучшает статический и динамический момент.

Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными. По сути гибридный двигатель является двигателем с постоянными магнитами, но с большим числом полюсов. По способу управления такие двигатели одинаковы. Чаще всего на практике двигатели имеют 100 или 200 шагов на оборот, соответственно шаг равен $3,6^\circ$ или $1,8^\circ$. Большинство контроллеров позволяют работать в полушаговом режиме, где этот угол вдвое меньше, а некоторые контроллеры обеспечивают микрошаговый режим.

Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, которая для изменения направления магнитного поля должна переполюсовываться драйвером. Для такого типа двигателя требуется мостовой драйвер, или полумостовой с двухполярным питанием. Всего биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода (рис. 4,а).

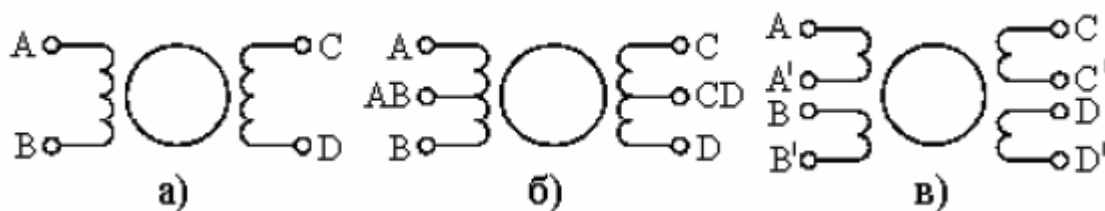


Рис. 4. Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырехобмоточный(в)

Униполярный двигатель также имеет одну обмотку в каждой фазе, но от середины обмотки сделан отвод. Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, простым переключением половинок обмотки. При этом существенно упрощается схема драйвера. Драйвер должен иметь только 4 простых ключа. Таким образом, в униполярном двигателе используется другой способ изменения направления магнитного поля. Средние выводы обмоток могут быть объединены внутри двигателя, поэтому такой двигатель может иметь 5 или 6 выводов (рис. 4,б). Иногда униполярные двигатели имеют отдельные 4 обмотки, по этой причине их ошибочно называют 4-х фазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего выводов 8 (рис. 4,в). При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать как униполярный или как биполярный. Униполярный двигатель с двумя обмотками и отводами тоже можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными. В любом случае ток обмоток следует выбирать так, чтобы не превысить максимальной рассеиваемой мощности.

Если сравнивать между собой биполярный и униполярный двигатели, то биполярный имеет более высокую удельную мощность. При одних и тех же размерах биполярные двигатели обеспечивают больший момент. Момент, создаваемый шаговым двигателем, пропорционален величине магнитного поля, создаваемого обмотками статора. Путь для повышения магнитного поля - это увеличение тока или числа витков обмоток.

В связи с постоянным сокращением продолжительности циклов и времени переналадки при производстве машин и оборудования современные сервосистемы - это нечто намного большее, чем просто серводвигатель с соответствующим сервоусилителем. Особенно в приводной технике этот факт ставит повышенные требования к функциональности и совместимости интерфейсов с контроллерами верхнего уровня.

Принцип действия синхронных серводвигателей

При подключении двигателя к соответствующему сервоусилителю в обмотках статора создается так называемое вращающееся поле статора. Это вращающееся поле оказывает магнитную силу на ротор. За счет сцепления магнитных полей статора и ротора последний разгоняется и вращается с такой же угловой скоростью, что и вращающееся поле, то есть синхронно.

Если двигатель нагружен, происходит сдвиг вращающегося поля ротора относительно вращающегося поля статора. Полюса ротора отстают от полюсов вращающегося поля статора на роторный угол α . С увеличением роторного угла вращающий момент двигателя возрастает. Максимальный вращающий момент достигается в тот момент, когда роторный угол $\alpha=90^\circ$. В этом случае полюса ротора находятся точно между двух полюсов статора. При этом полюс статора перед полюсом ротора "тянет" за собой ротор, а полюс статора за полюсом ротора "толкает" ротор. Если роторный угол α принимает значение $>90^\circ$, вращающий момент снижается. Двигатель находится в нестабильном рабочем режиме и может остановиться. Это может привести к его перегреву и повреждению.

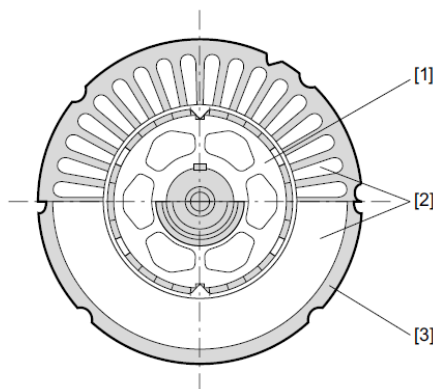


Рис. 5. Схематическое изображение петлевой обмотки

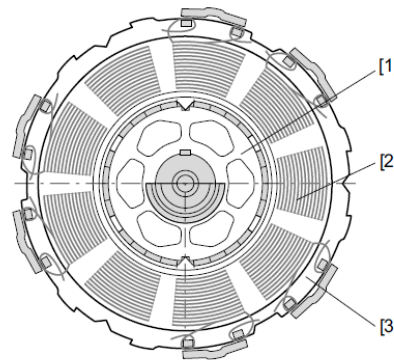


Рис. 6. Схематическое (шаблонное) изображение зубцовой обмотки

Чтобы синхронный двигатель работал с максимальным вращающим моментом, роторный угол α должен составлять 90° . Соответственно, в двигательном режиме полюс статора должен опережать полюс ротора на 90° , а в генераторном режиме - отставать на 90° . Система управления двигателем выполняет расчет трех фазных токов двигателя по заданному моменту и уставке тока в соответствии с моделью двигателя, чтобы создавать в нем нужное результирующее магнитное поле.

Для этого необходимо контролировать положение ротора с помощью соответствующего датчика. К действительному положению ротора прибавляется (или вычитается, в зависимости от направления вращающего момента) 90° и рассчитываются соответствующие фазные токи.

Для каждого положения ротора определяется соответствующее положение вращающегося поля статора. При этом рассчитываются величина и распределение поля статора по ротору, т. е. поле статора зависит от ротора.

Статоры асинхронного и синхронного серводвигателей имеют принципиально одинаковую конструкцию, а их роторы существенно различаются. Асинхронный серводвигатель имеет ротор с короткозамкнутой обмоткой, в котором магнитное поле создается за счет индукции.

Статор состоит из трех катушек, намотанных на каркас из пластин трансформаторной стали и расположенных с интервалом в 120° (электрических градусов). Выводы катушек могут быть соединены по схеме "звезда" или "треугольник".

Принцип действия асинхронных серводвигателей

Обмотка ротора асинхронного серводвигателя имеет форму цилиндрической клетки. С торцов отдельные стержни клетки удерживаются замыкающими кольцами. При работе ток протекает через замыкающее кольцо в стержни. Каждый проводник, через который протекает ток, создает магнитное поле. Если это магнитное поле смещено относительно магнитного поля статора, на ротор действует сила. Эта сила максимальна в том случае, если магнитное поле ротора расположено перпендикулярно магнитному полю статора. За счет векторного алгоритма управления (с ориентацией по векторам магнитного потока ротора и статора) оба магнитных поля рассчитываются таким образом, что асинхронный серводвигатель может работать намного динамичнее, чем при параметрическом управлении U/f . Векторное управление – это управление взаиморасположением двух существующих магнитных полей. На синхронных и асинхронных серводвигателях оно реализуется одинаково. Чтобы добиться постоянного намагничивания ротора асинхронного серводвигателя, необходимо учитывать множество физических ограничений, обусловленных конструкцией ротора. Асинхронные серводвигатели не имеют постоянных магнитов, поэтому магнитный поток в роторе должен создаваться магнитным полем статора. То есть, создание магнитного потока и вращающего момента зависит от тока статора. По аналогии с трансформатором, первичная обмотка которого через шихтованный магнитопровод связана с вторичной обмоткой и индуцирует в ней напряжение, в асинхронном серводвигателе статорная обмотка связана с короткозамкнутым ротором через воздушный зазор. По закону электромагнитной индукции справедливо:

$$U_i = -N \cdot \Delta \Phi / \Delta t,$$

где U_i - индуцированное напряжение, В; N - число витков; $\Delta \Phi / \Delta t$ - изменение магнитного потока во времени, Вб/с.

Из этого уравнения видно, что для поддержания вторичного напряжения и вместе с ним вторичного тока необходимо изменение магнитного потока. Эта закономерность аналогична условиям работы

трансформатора, где передача постоянного напряжения невозможна. При подаче тока на статор возникает магнитный поток, который пронизывает ротор. Согласно правилу Ленца индукционный ток всегда имеет такое направление, что его собственный магнитный поток компенсирует изменения внешнего магнитного потока, вызвавшие этот ток. То есть, возникающий в роторе ток противодействует изменению внешнего магнитного потока. За счет активных потерь в роторе этот ток затухает, если ток статора больше не изменяет своего магнитного потока. Ток в роторе затухает в течение электрической постоянной времени T_r ротора:

$$T_r = L_r / R_r,$$

где T_r - электрическая постоянная времени ротора; L_r - индуктивность ротора; R_r - сопротивление ротора.

Ниже в таблице 1 приведены сравнения некоторых параметров шаговых двигателей и сервоприводов.

Таблица 1

	Шаговые двигатели	Сервоприводы
Надежность	Шаговые двигатели отличаются высокой надежностью, так как в их конструкции отсутствуют изнашивающиеся детали. Рабочий ресурс двигателя зависит только от ресурса примененных в нем подшипников.	Большинство современных бесколлекторных сервоприводов от известных производителей (Mitsubishi, Siemens, Omron) отличаются высокой надежностью, порой сравнимой с надежностью шаговых двигателей, даже не смотря на значительно более сложное устройство сервопривода. Имеются более простые модели сервоприводов - коллекторной конструкции (со щетками).
Эффект потери шагов	Данный эффект проявляется при выходе за допустимые характеристики двигателя, при неправильном управлении двигателем, а также при "проблемах" с механикой. Применение современных технологий управления шаговыми двигателями, с применением современной электроники, позволяет полностью устранить данный эффект.	Эффект потери шагов у сервоприводов полностью отсутствует. Потому, что в каждом сервоприводе имеется датчик положения (энкодер), который постоянно отслеживает положение ротора двигателя и при необходимости выдает команды коррекции положения, на основании которых управляющая электроника, проанализировав данные, полученные с энкодера, вырабатывает необходимые сигналы управления на двигатель. Данный механизм называется обратной связью.
Преимущества	- Высокая надежность - Низкие требования к обслуживанию и к обслуживающему персоналу - Относительно низкая цена - Высокая динамическая точность	- Высокие динамические характеристики - Отсутствие эффекта потери шагов - Высокая перегрузочная способность
Недостатки	- Падение крутящего момента на высокой скорости - Низкая ремонтопригодность - Возможность эффекта потери шагов	- Высокая цена - Более сложное устройство - Повышенные требования к обслуживающему персоналу - Низкая ремонтопригодность - Требуется более бережное отношение к двигателю

Выводы

Сервопривод и шаговый двигатель не являются конкурентами, а каждый занимает свою определенную нишу. В целом можно сделать вывод, что окончательное решение можно принять только после взвешивания всех достоинств и недостатков в каждом конкретном случае, обязательно учитывая такие показатели, как стоимость решения и его эффективность в данном приложении. В конце концов, именно экономическая эффективность от внедрения технических устройств в производство является в большинстве случаев ключевым фактором при выборе решения. При выполнении исследования, стоял выбор между шаговым двигателем и сервоприводом, в результате был сделан выбор в пользу сервопривода, его цена значительно больше за шаговый двигатель, но эффективность его намного лучше.