

К вопросу о точности угловых энкодеров

Энкодеры вокруг нас

Энкодеры – преобразователи линейных или угловых перемещений – неотъемлемая часть любых технических устройств, имеющих дело с прецизионными перемещениями. Будь то обрабатывающие станки с поворотными осями или оборудование для резки и проверки кремниевых пластин, устройства для поверхностного монтажа, гониометры или машины барабанного типа по изготовлению печатных форм (технология СТР): все они в той или иной форме используют круговые датчики или угловые энкодеры*.



Угловой энкодер, установленный на двигатель с прямой передачей момента вращения

Требования, предъявляемые к рабочим характеристикам поворотных осей, определяются назначением устройств, в состав которых эти оси входят. В одном случае требуется высокая точность, в другом – повторяемость, высокое разрешение или низкая периодическая ошибка (ошибка подразбиения) для обратной связи по скорости. Обычно при попытке найти энкодер, который бы являлся золотой серединой с точки зрения технических характеристик, функциональности и стоимости, конструктор сталкивается с таким богатством выбора, что у него разбегаются глаза. Вместе с тем, крайне редко удается найти энкодер, который бы удовлетворял сразу всем требованиям.

Например, точность – отнюдь не единственная характеристика прецизионной автоматической системы позиционирования: не менее важны динамические характеристики этой системы. Безусловно, точность определения положения исполнительного узла является очень важной характеристикой, однако система, которая не в состоянии обеспечить надлежащую динамическую точность автоматического позиционирования, просто никому не нужна.

Именно по этой причине все чаще и чаще находят применение двигатели с прямой передачей момента вращения, которые развивают большой крутящий момент и позволяют организовать сервоуправление, обеспечивающее высокую точность автоматического позиционирования даже при перемещении на очень малые углы. Эти двигатели отличаются превосходными динамическими характеристиками, поскольку нагрузка передается непосредственно на исполнительный элемент, вследствие чего отпадает необходимость в системе передачи, которая является источником люфтов, механического гистерезиса, ошибок зубчатого зацепления или растяжения ремня передачи. В связи с тем, что двигатели с прямой передачей момента вращения имеют безрамную конструкцию и большой внутренний диаметр, их практически невозможно связать с датчиком положения вала, в то время как установка 'кольцевого' энкодера (энкодера в форме кольца) никакой сложности не представляет. Более того, кольцевой энкодер, так же как и нагрузка, оказывается жестко связан с приводом, что исключает возникновение 'люфтов' в системе. Кроме того, в любой измерительной системе или системе с обратной связью предпочтительно, чтобы энкодер находился как можно ближе к приводу, так как это позволяет уменьшить вероятность возникновения резонансов, которые негативным образом влияют на технические характеристики системы сервоуправления, в особенности при увеличении ее полосы пропускания.



Двигатель с прямой передачей момента вращения (производство компании Shinko Electric)

*Строго говоря, угловыми энкодерами называются преобразователи угловых перемещений, имеющие 10 000 и более масштабных штрихов на оборот, точность которых не хуже 5 угловых секунд, а под 'круговыми датчиками' подразумеваются энкодеры, которые не удовлетворяют этим критериям. Вместе с тем, зачастую угловым энкодером называют любой преобразователь угловых перемещений.

Иными словами, надежная обратная связь при позиционировании имеет первостепенное значение для любой технической задачи...

Угловой энкодер – это первое, что приходит в голову, когда заходит речь об обеспечении прецизионной обратной связи по углу поворота. Так же как и при выборе двигателя, конструктор подбирает оптимальный угловой энкодер, исходя из его реальных технических характеристик, имеющейся информации о факторах, которые влияют на точность энкодера, и четкого понимания того, каким образом можно компенсировать недостатки рабочих характеристик энкодера. В настоящей статье обсуждаются основные факторы, влияющие на рабочие характеристики угловых энкодеров, с тем, чтобы помочь конструкторам сделать правильный выбор при выборе энкодера для разрабатываемого ими оборудования.

При выборе углового энкодера было бы в высшей степени неразумно гнаться за высокой точностью и разрешением, упуская при этом из вида такие факторы как быстродействие энкодера, его размер, сложность установки и стоимость. На сегодняшний день промышленность выпускает линейные энкодеры, точность и разрешение которых достигают нескольких десятков нанометров. Аналогично, разрешение угловых энкодеров может быть в диапазоне долей угловой секунды (* угловой секунде соответствует линейное разрешение 1 мкм при радиусе 206,25 мм)

Когда идет разговор о требуемой точности, имеет смысл разделять такие понятия как разрешение, повторяемость и собственно точность.

- I В том случае если нужна высокая повторяемость (как, например, в случае различного рода манипуляторов), способность устройства останавливаться при одном и том же сигнале счета энкодера является намного более важной характеристикой нежели точность определения угловой координаты каждой точки останова.
- I Для обеспечения плавного непрерывного перемещения выбранные разрешение и точность должны быть такими, чтобы в пределах полосы пропускания привода подачи не возникало 'шумов'.
- I Для приборов с медленным перемещением исполнительных узлов, таких, например, как астрономический телескоп, точное определение угла поворота гораздо важнее, чем максимальная частота выдачи данных.
- I Штатив вертолетной камеры переднего обзора должен обеспечить точность ручного позиционирования, поэтому в этом случае разрешение играет гораздо более важную роль, нежели повторяемость или абсолютная точность. В то же время важность точности многократно возрастает, если эта камера является частью системы вооружения и используется для наведения.
- I Для быстродействующих систем приходится искать компромисс между точностью позиционирования и быстродействием. Энкодеры с большим интервалом между масштабными штрихами (с меньшим количеством штрихов) обеспечивают более высокую частоту выдачи данных, в то время как энкодеры с меньшим интервалом между штрихами (большим количеством штрихов), как правило, имеют более низкие ошибки интерполяции.

Таким образом, если определены технические требования к конструируемому устройству в целом, то задача выбора подходящего энкодера сильно упрощается. Тем не менее, несмотря на оптимистичные утверждения некоторых

производителей, конструктивное обеспечение точности угловых перемещений редко бывает задачей, решаемой просто установкой энкодера, поэтому без понимания источников ошибок углового позиционирования добиться оптимальных технических характеристик всего устройства практически невозможно.

Источники угловых ошибок

На Рисунке 1 элемент, угловое перемещение которого нужно измерять/контролировать, закреплен на валу, установленном на двух подшипниках. Угловой энкодер со встроенным подшипником соединен с валом, а его считывающая головка установлена на неподвижном элементе конструкции. Чтобы энкодер был в состоянии отслеживать реальное угловое положение исполнительного элемента, должны выполняться следующие условия:

1. В подшипниках, на которых установлены вращающиеся элементы системы, не должно быть радиального биения, которое неизбежно приводит к боковым смещениям осей вращения.
2. Не должно быть деформаций кручения вала, соединяющего контролируемый элемент с энкодером.
3. Конструкция соединительной муфты должна обеспечивать равенство угла поворота вала энкодера, имеющего отдельный подшипник, и угла поворота контролируемого элемента, установленного на своей системе подшипников. Иными словами, муфта должна обеспечивать передачу скорости без искажений.
4. Расстояние между соседними масштабными штрихами должно быть неизменным вдоль всей шкалы энкодера, а его считывающая головка должна обеспечивать линейную интерполяцию (подробление) сигнала, соответствующего смещению на одно деление шкалы.
5. Шкала энкодера должна быть нанесена на идеальную окружность, центр которой находится на оси вращения, перпендикулярной плоскости шкалы.
6. Считывающая головка должна быть жестко установлена на неподвижную часть конструкции, причем так, чтобы при считывании оптического сигнала от масштабных штрихов отсутствовал параллакс и другие геометрические ошибки.

Если хотя бы одно из этих условий не выполнено, реальный угол поворота контролируемого элемента будет отличаться от показаний измерительной системы, в состав которой входит энкодер. Имея представление о каждом из потенциальных источников ошибок, можно определить вклад каждой из них в общую ошибку всего устройства в целом.

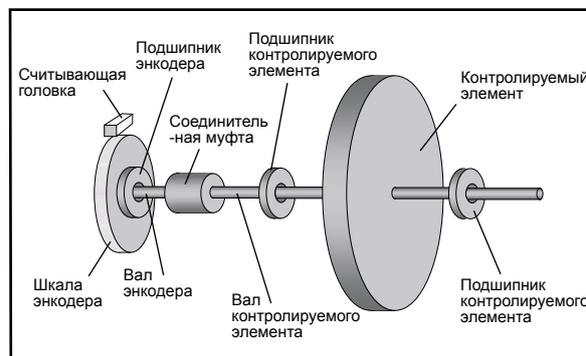


Рисунок 1. Принципиальная схема устройства с поворотной осью.

Детальное обсуждение каждой из этих ошибок не является целью настоящей статьи, поэтому ограничимся краткой информацией о каждой из них:

‘Радиальные биения’

Под радиальными биениями мы понимаем боковые смещения оси вращения контролируемого элемента и/или оси энкодера, источниками которых по большей части является несовершенство системы подшипников.

Радиальные биения включают в себя люфты и гармоники более высоких порядков (например, связанные с дефектами шариков/роликов/дорожки качения подшипников), но, предположительно, не эксцентриситет.

Ошибки соединительной муфты

На рисунке 1 показано устройство со встроенным угловым энкодером, который имеет свой подшипник и соединен с контролируемым элементом с помощью муфты. Преимущество такой конструкции состоит в том, что вклад в ошибку определения угла поворота будет давать только подшипник энкодера. Тем не менее, к этому преимуществу нужно относиться с осторожностью, так как биение, возникающее в несущих подшипниках, будет влиять на угловую точность устройства, если оно предназначено для определения угла поворота какой-либо точки контролируемого устройства, а не для определения угловых смещений удаленного объекта.

Конструкция соединительной муфты может оказывать существенное негативное влияние на точность системы как сама по себе, так и в совокупности с такими ошибками как люфт, деформации кручения вала и угловое рассогласование.

Ошибки, обусловленные деформациями кручения вала

Недостаточно высокая жесткость вала/валов между контролируемым элементом и угловым энкодером приводит к возникновению динамических ошибок, которые ухудшают технические характеристики устройства в целом и аналогичны ошибкам, вызванным наличием соединительной муфты.

Для того чтобы избавиться от этого эффекта, рекомендуется использовать бесконтактный энкодер, который нужно установить как можно ближе к контролируемому элементу или непосредственно на нем (см. Рисунок 2).

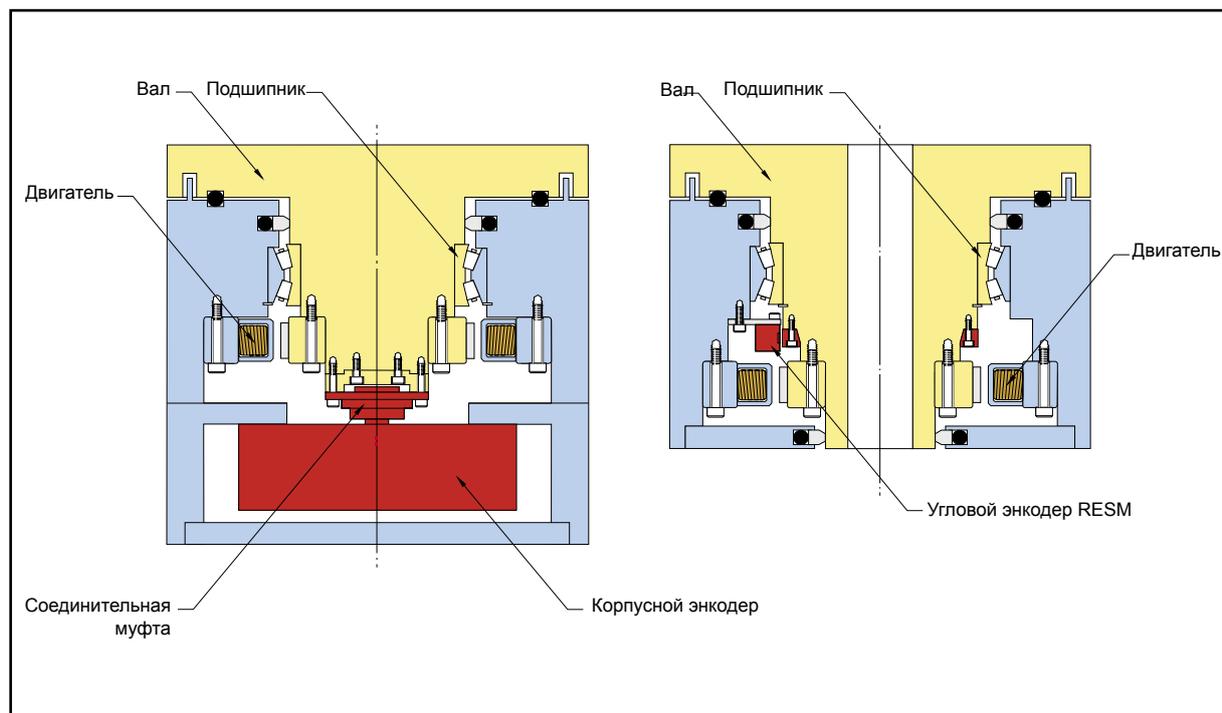


Рисунок 2. Сравнение корпусных и открытых кольцевых энкодеров

Эксцентриситет и деформация шкалы

В принципе, точную масштабную шкалу можно получить, нанося неравномерные деления на поверхность переменного радиуса. Для прецизионных угловых измерений, тем не менее, следует взять энкодер с равномерной масштабной шкалой и установить его на вал так, чтобы все участки шкалы были на одинаковом расстоянии от оси вращения. Любые радиальные отклонения, обусловленные эксцентриситетом идеальной круглой шкалы энкодера относительно оси вращения, приводят к ошибкам, которые повторяются при повороте на 1 оборот. Вместе с эксцентриситетом, как правило, появляются ошибки другого типа, связанные с деформацией шкалы и отклонением ее формы от идеальной окружности. Эти ошибки повторяются 2 и более раз за один оборот.

Перекося шкалы

Под перекосям понимается наклон геометрической оси круговой шкалы, установленной с нулевым эксцентриситетом, относительно оси вращения контролируемого элемента (см. Рисунок 3). Вид сбоку позволяет понять, что перекося приводит к синусоидальному аксиальному движению периферийной части шкалы углового энкодера.

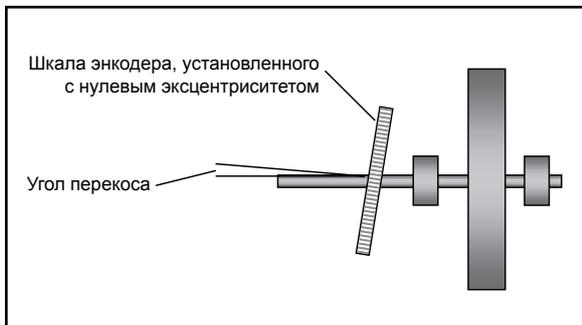


Рисунок 3. 'Перекося'.

Ошибки, обусловленные считывающей головкой

До сих пор мы, в основном, обсуждали шкалу энкодера и ошибки, связанные с ее несовершенством. Масштабная шкала, однако, только часть энкодера: считывающая головка также вносит вклад в общую ошибку. Ниже описаны наиболее существенные ошибки, обусловленные несовершенством считывающей головки.

Ошибка подразбиения (периодическая ошибка) - Цена деления шкалы кругового энкодера, имеющей 3 600 масштабных штрихов, составляет $0,1^\circ$ или 360 угловых секунд. Если требуется более высокое разрешение, то придется прибегнуть к интерполяции. Любая нелинейность интерполяции ведет к возникновению периодической ошибки, которую также называют ошибкой подразбиения (sub-divisional error/SDE).

Влияние параллакса - Если расстояние между шкалой и считывающей головкой изменяется (например, из-за эксцентриситета круговой шкалы, изменения ее температуры и пр.), дополнительные ошибки при считывании будут возникать до тех пор, пока считывающая головка не будет правильно выровнена по отношению к оси вращения шкалы. Наклон считывающей головки по отношению к плоскости шкалы приведет к возникновению ошибки, величина которой пропорциональна синусу угла наклона.

Устойчивость установки - Это может показаться банальным, но для реализации точных и повторяемых угловых измерений чрезвычайно важно жесткое и надежное крепление считывающей головки и нулевой метки. Конструкция устройства должна быть такой, чтобы считывающая головка все время оставалась неподвижной по отношению к оси вращения масштабной шкалы при изменении ее ориентации в пространстве, возникновении нагрузки, изменении температуры, возникновении вибрации и т. п.

Точность градуировки шкалы - Если масштабные штрихи энкодера наносятся непосредственно на заготовку, то ее логично закрепить на валу, который раз за разом поворачивается на угол, соответствующий цене деления шкалы. Степень неточности нанесения шкалы (разница между фактическим и предполагаемым положением ее штрихов), измеренная по окончании процесса градуировки, однако до снятия круговой шкалы с вала, называется '**Ошибка градуировки**' (Graduation Error). Если это измерение теперь повторить, но на этот раз считать положения штрихов с помощью правильно установленной считывающей головки энкодера, получающаяся ошибка будет складываться из ошибки градуировки и ошибки, вносимой считывающей головкой (в основном, ошибки подразбиения). Такая ошибка энкодера (системы "кольцо + считывающая головка") называется '**Ошибка системы**' (System Error).

Если теперь угловой энкодер снять с вала, на котором он находился во время изготовления, и затем установить его на прежнее место или на другой вал и вновь проверить точность энкодера (системы "кольцо + считывающая головка"), величина полученной ошибки будет другой. Это и неудивительно: изменение ошибки будет обусловлено изменением эксцентриситета и деформацией шкалы энкодера более высоких порядков, которые произошли при перестановке энкодера с вала, на котором выполнялась его градуировка, на другой вал для использования. Общую ошибку, которая будет измерена в этом случае, логично назвать '**Ошибкой после установки**' (Installed Error), и именно эта ошибка наиболее адекватно описывает величину ошибки устройства, которую увидят пользователи после установки энкодера (разумеется, до выполнения калибровки устройства, в состав которого входит энкодер, - *примеч. переводчика*).

Таким образом, имеем:

Ошибка градуировки = Ошибка нанесения штрихов при изготовлении масштабной шкалы.

Ошибка системы = Ошибка градуировки + ошибка подразбиения

Ошибка после установки = Ошибка системы + Эффекты, связанные с изменением условий установки.

Способы компенсации ошибок

После того как определены все источники ошибок проектируемого устройства, следует сравнить требуемую точность с точностью, которую может обеспечить энкодер в отсутствие компенсации. Если ошибка энкодера превышает ошибку, заложенную в технические требования, предъявляемые ко всему устройству в целом, нужно или найти другой, более точный энкодер, (при условии, что он имеет приемлемую стоимость, срок поставки и вписывается в конструкцию устройства) или применить тот или иной метод компенсации ошибок, чтобы ликвидировать недостаток точности изначально выбранного энкодера. Два наиболее мощных метода компенсации ошибок – это использование нескольких считывающих головок и калибровка.

Использование нескольких считывающих головок:

Использование двух диаметрально противоположных считывающих головок позволяет скомпенсировать эксцентриситет и другие нечетные составляющие повторяемой ошибки более высокого порядка (повторяющиеся 3, 5, 7 и т. д. раз за оборот – *примеч. переводчика*). Основное достоинство этого метода состоит в том, что он не требует выполнять калибровку, что выгодно как с точки зрения временных затрат, так и с точки зрения отсутствия необходимости разрабатывать методику калибровки. Увеличение числа считывающих головок позволяет еще больше уменьшить повторяемую ошибку, но усложнение конструкции и повышение ее стоимости, связанное с установкой более четырех головок, обычно не оправдывает получаемый выигрыш в точности. Этот метод также позволяет бороться с влиянием радиального биения подшипников на точность угловых измерений, однако для того, чтобы справиться с влиянием этого биения на точность углового позиционирования, как правило, требуются четыре считывающие головки или более точный подшипник.

Таблицы компенсации: Строить и применять таблицы компенсации можно как при использовании нескольких считывающих головок, так и в случае, если система управления сконфигурирована под использование только одной головки. Чтобы этот метод был эффективен, производитель комплектного оборудования должен откалибровать изготовленное устройство, в состав которого входит угловой энкодер, с помощью интерферометра или другого общепризнанного калибровочного оборудования. Он не может в полной мере полагаться на сертификат поверки, предоставляемый производителем энкодера, и отказаться от ввода поправок, поскольку любая ошибка, неизбежно возникающая при установке энкодера, останется неучтенной. Также имеет смысл остановиться на оптимизации числа точек компенсации. Для периодической ошибки, изменяющейся по синусоидальному закону, семь точек на один цикл позволят убрать 90% ошибки на этой частоте. Сто точек компенсации, таким образом, позволят избавиться от большинства ошибок, связанных с первыми четырнадцатью гармониками. Справедливости ради, однако, следует отметить, что существует вероятность возрастания общей величины ошибки, связанной с оставшимися гармониками. Кроме того нужно помнить, что создание таблицы компенсации не позволяет избавиться от биений в подшипниках, эффектов, связанных с кручением вала, и других случайных ошибок.

Заключение

В настоящей статье рассмотрен ряд соображений, которые следует принять во внимание для определения реальных технических характеристик устройства, в состав которого входит угловой энкодер. Также рассмотрены наиболее существенные факторы, которые ограничивают достижимую точность конструируемого устройства, и подробно разобран ряд методов, позволяющих увеличить точность устройства. Дополнительную информацию по этому вопросу можно найти в стандарте ISO230-7 DIS Axes of rotation (Поворотные оси). Дополнительную информацию об энкодерах, упомянутых в этой статье, можно найти на сайте www.renishaw.ru