

## Техническая статья

# Точность угловых энкодеров

Поворотные (угловые\*) энкодеры применяются на огромном количестве станков и приборов. Поворотный энкодер состоит из измерительной считывающей головки и точной поворотной шкалы, размеченной по периферии кольца или по плоскости диска. Считывающая головка определяет координаты путем оптического считывания равномерно распределенных делений шкалы и выдает эту информацию в виде аналогового или цифрового сигнала. Затем устройство цифровой индикации (DRO) или контроллер перемещений преобразует сигнал в координаты. Данная техническая статья рассматривает наиболее важные факторы, влияющие на рабочие характеристики поворотных энкодеров, чтобы облегчить проектировщикам выбор оптимальной энкодерной системы для решения поставленных ими задач.

Точное поворотное движение необходимо во многих современных системах автоматизации, таких как ротационные допечатные системы СТР (компьютер-печатная форма), оси металлорежущего станка А, В и С, машины поверхностного монтажа, системы формометрии, устройства обработки полупроводниковых пластин, контрольно-измерительные и угломерные приборы. Для оптимального решения разных задач от энкодеров требуются разные сочетания характеристик и функций. Одним необходима точность, другим — повторяемость, высокое разрешение или малая периодическая ошибка для цепи управления скоростью. Выбор энкодера, обеспечивающего оптимальный баланс технических характеристик и функциональных показателей, очень непрост, и лишь немногие энкодеры способны удовлетворить все требования.

Точное управление перемещением зависит как от точности, так и от динамических характеристик системы. Безошибочное измерение координат немаловажно, однако без точного позиционирования система не может функционировать. Поворотные двигатели прямого привода (моментные двигатели) развивают большой крутящий момент и позволяют организовать точное сервоуправление при самых малых углах. Они обладают превосходными динамическими характеристиками, поскольку непосредственное соединение нагрузки с приводом устраняет необходимость в коробке передач, которая является источником люфтов, запаздывания, ошибок

зубчатого зацепления или растяжения ремня передачи. Бескорпусная конструкция поворотных двигателей и большой внутренний диаметр не позволяют организовать простую связь с датчиком положения вала, что легко решается применением поворотного кольцевого энкодера. Более того, поворотный энкодер, так же как и нагрузка, оказывается жестко связан с приводом, что исключает нежелательные люфты в системе. В любой измерительной системе или системе управления предпочтительно, чтобы энкодер находился как можно ближе к приводу, так как это помогает снизить вероятность резонансов вала, влияющих на характеристики сервопривода, в особенности при увеличении его полосы пропускания.

Поворотный энкодер является отличным решением для обеспечения прецизионной обратной связи по углу поворота. Так же как и при выборе двигателя, правильность выбора поворотного энкодера зависит от реалистичности технических требований, знания факторов, влияющих на точность энкодера, и глубокого понимания способов компенсации недостатков рабочих характеристик энкодера. При выборе поворотного энкодера целесообразно рассмотреть ряд параметров, лежащих за пределами точности и разрешения, таких как скорость передачи данных, а также габариты, сложность и стоимость системы. Точность и разрешение современных линейных энкодеров измеряются десятками нанометров, а угловые энкодеры способны обеспечить показатели измерений в пределах угловой секунды. Угловая секунда соответствует малому углу, который:

- опирается на дугу длиной 1 мкм с радиусом 206,25 мм;
- опирается на дугу длиной 30 м, лежащую на поверхности земли;
- можно определить при скорости передачи данных 1,3 МГц и частоте 1 об/с.

При определении необходимых характеристик измерений полезно учесть точность, разрешение и повторяемость:

- В случаях, требующих повторяемости (например, в манипуляторах), точное угловое положение каждой позиции вторично по отношению к возможности системы периодически прекращать движение при одних и тех же показаниях энкодера.



Рисунок 1. Поворотный энкодер RESOLUTE™ RESA от компании Renishaw, установленный на двигатель прямого привода (SOLPOWER, Тайвань)

\* Обычно на угловых энкодерах нанесено 10 000 и более делений с точностью не хуже  $\pm 5$  угловых секунд. Строго говоря, термин «поворотный энкодер» описывает энкодеры, которые не удовлетворяют этим критериям, но его часто используют в качестве общего наименования, характеризующего все круговые энкодеры.



Рисунок 2. Считывающие головки энкодера ATOM™ на дисковой шкале RCDM

- Для плавного непрерывного перемещения выбранное разрешение и точность энкодера не должны допускать колебаний в пределах полосы пропускания сервоуправления.
- Для устройств медленного перемещения, таких как астрономический телескоп, точное измерение угла гораздо важнее, чем максимальная скорость передачи данных в системе.
- Для высокоскоростных систем возможны компромиссы между скоростью и точностью позиционирования; энкодеры с крупным шагом (меньшим количеством делений) обеспечивают высокую скорость передачи данных, а энкодеры с более мелким шагом (большим количеством делений) обычно имеют меньшую ошибку интерполяции.

Выбор подходящего энкодера существенно упрощается при понимании требований к точности системы. Несмотря на заявления некоторых производителей, достижение высокой точности измерений редко решается простой установкой энкодера, поэтому понимание суммарной ошибки является ключом к оптимизации характеристик. Хотя данная техническая статья рассматривает поворотные кольца энкодеров, показанные на рисунке 3, те же самые рассуждения применимы и к поворотным дисковым шкалам, подобным шкале энкодера RCDM от компании Renishaw, изображенной на рисунке 2.

## Формирование суммарной ошибки

Представьте себе школьника, измеряющего пластмассовым транспортиром угол между двумя линиями, проведенными карандашом на листе бумаги. Он положит транспортир непосредственно на бумагу так, чтобы его базовая линия находилась прямо над одной из линий, и будет двигать транспортир, пока начало отсчета не совпадет с точкой пересечения этих линий. Затем ученик определит величину угла между линиями по градуированной шкале, при необходимости выполнив интерполяцию, обеспечивающую нужное ему разрешение. Поначалу результаты его измерений могут отличаться от результатов учителя, которому придется подчеркнуть важность точного совмещения транспорта с линиями. Скорее всего, на результат измерения угла больше влияют эти ошибки юстировки, чем любые неточности угловой шкалы, отформованной на поверхности

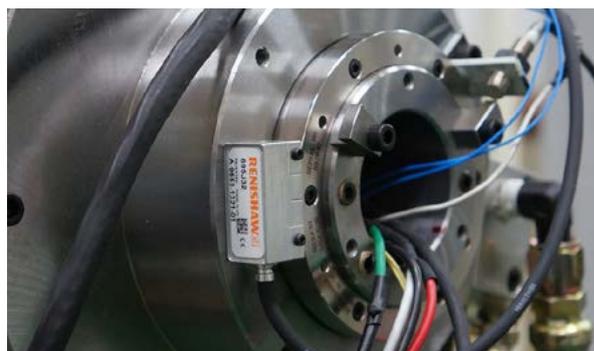


Рисунок 3. Использование поворотного стола DDR с установленным энкодером RESOLUTE (ITRI, Тайвань)

Наш ребенок освоил три правила точного измерения угла:

1. Как можно точнее совместить центр поворотной шкалы транспорта с вершиной измеряемого угла.
2. Держать измерительную шкалу как можно ближе к объекту измерения.
3. Минимизировать (угловое) перемещение шкалы относительно объекта измерения.

Здесь не учтены еще три фактора:

4. Расстояние по дуге между делениями шкалы должно быть постоянным в пределах окружности.
5. Расстояние по радиусу между центром круговой шкалы и ее краем, где и происходит измерение, должно быть постоянным для любого угла.
6. Для минимизации ошибки от параллакса при измерении угла следует смотреть на линию через транспортир перпендикулярно его поверхности.

Эти обязательные требования в равной степени относятся и к поворотному энкодеру, и к школьному транспорту на листе бумаги.

На рисунке 5 контролируемый элемент, угловое перемещение которого нужно измерять или регулировать, вращается на валу, установленном на двух подшипниках. Угловой энкодер со встроенным подшипником соединен с этим валом и снимает показания при помощи считывающей головки, установленной на неподвижном элементе конструкции. С учетом описанных выше правил к выходным данным энкодера, отражающим фактическое поворотное перемещение элемента, должны применяться следующие требования:

1. Каждый элемент системы должен вращаться в своих подшипниках без радиального биения (т. е. поперечного перемещения) его оси вращения.
2. Система вала, соединяющая контролируемый элемент с энкодером, должна быть жесткой на кручение.
3. Конструкция муфты должна обеспечивать равенство угла поворота энкодера в своем подшипнике и угла поворота контролируемого элемента, установленного в собственном подшипниковом узле, т. е. необходим шарнир равных угловых скоростей.

4. Шаг линий на кромке шкалы энкодера должен быть постоянным, а считывающая головка должна обеспечивать линейную интерполяцию между ними.
5. Шкала энкодера должна быть идеально круглой, а ось вращения должна проходить через ее центр перпендикулярно плоскости.
6. Считывающая головка должна снимать показания со шкалы без параллакса или иных геометрических ошибок и быть жестко соединенной с неподвижной системой координат.

В случае невыполнения любого из этих условий угловое положение контролируемого элемента будет отличаться от угловых координат, выдаваемых энкодером. Исследуя каждый из этих потенциальных источников ошибок, можно определить его величину, следовательно, общую накопленную ошибку всей системы.

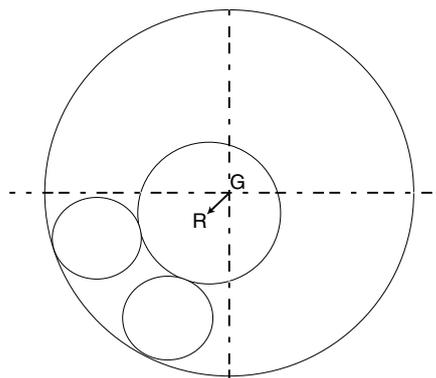


Рисунок 4. Износ подшипника вносит свой вклад в полный эксцентриситет и обеспечивает смещение оси вращения (R) относительно геометрического центра (G).

## Влияние смещения подшипника

Термин «смещение подшипника» используется для описания множества свойств системы, приводящих к радиальному биению (поперечному перемещению) оси вращения элемента и/или энкодера. Радиальное биение состоит из повторяемых и неповторяемых компонентов, которые можно объяснить недостатками подшипникового узла: люфт, высшие гармоники (например, дефекты шариков и дорожки качения) и эксцентриситет (см. рисунок 4).

Величина радиального биения вала, вращающегося в подшипниках качения, зависит от конструкции и регулировки подшипникового узла, но обычно бывает больше  $\pm 1$  мкм. Энкодер способен определять угловое положение своей поворотной шкалы с точностью как минимум до одной десятой его величины, поэтому понятно, что ошибки, вызванные смещением подшипника, способны перевесить остальные ошибки удачно спроектированной системы. Составляющая ошибки от смещения подшипника вычисляется по формуле:

Ошибка углового измерения (угловые секунды) = смещение подшипника (мкм)  $\times 412,5/D$ ,

где D — диаметр шкалы энкодера, мм.

Несмотря на явные циклические составляющие, оценка этой ошибки измерений может быть затруднена, поскольку любая использованная для ее компенсации таблица ошибок должна содержать большое количество оборотов вала.

В высокоточных системах предпочтительно использовать хорошо разработанные аэростатические подшипники, поскольку правильный подбор радиальной жесткости подшипника позволяет снизить радиальное биение до субмикронного уровня.

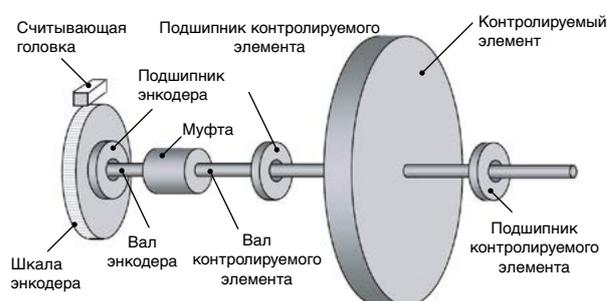


Рисунок 5. Универсальная станочная система

При использовании аэростатических подшипников следует учесть влияние неуравновешенных сил: при низких оборотах вал будет вращаться вокруг своей геометрической оси, а при высоких оборотах, когда неуравновешенная центробежная сила превышает радиальную жесткость подшипника и его опоры, вал будет вращаться вокруг своего центра масс.

Несмотря на возникновение такого эффекта только на высоких скоростях, он может создать разницу между статической и динамической осями в несколько микрон. Такое радиальное биение является повторяемым и поэтому предсказуемо в одном цикле на оборот вала.

Независимо от используемых подшипников следует отметить, что:

- На ошибку смещения подшипника в системе, показанной на рисунке 5, будут влиять только подшипники, на которые опирается энкодер. Однако все преимущества такой схемы могут быть снижены дополнительными ошибками, вносимыми муфтой.
- Несмотря на существование технических приемов, устраняющих влияние смещения подшипника (в частности, использование двух и более считывающих головок с одной шкалой энкодера), необходимо учитывать цель угловых измерений:
  - например, при использовании теодолита для измерения углового расстояния между точками на горизонтальной или вертикальной плоскости; даже значительное смещение подшипника можно легко компенсировать путем использования двух считывающих головок;

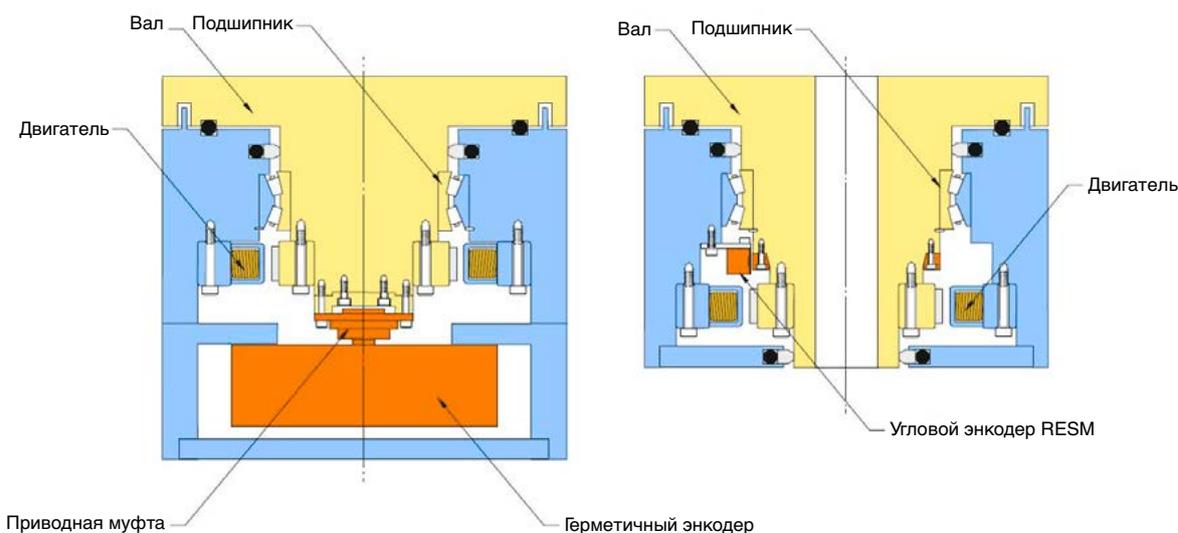


Рисунок 6. Герметичный энкодер и открытый кольцевой энкодер

- если для определения положения заданной точки на поворотном элементе в полярных координатах (как у контрольно-измерительной машины для полупроводниковых пластин) необходима обратная связь по положению, то любое смещение оси подшипника, на который опирается контролируемый элемент, будет влиять на точность позиционирования, за исключением систем с тремя и более считывающими головками и одним кольцом энкодера.

При отсутствии возможности избавиться от большого смещения подшипника следует уделить особое внимание выбору подходящего шага шкалы. Опыт показывает, что если инкрементальный сигнал является средним значением показаний двух или более считывающих головок при контрольной точке, полученной с одной головки, то шаг шкалы должен в 3–4 раза превышать смещение подшипника. В противном случае возможны значительные проблемы с повторяемостью контрольной точки, если не применять такие средства компенсации, как технология *propoZ™* от компании Renishaw.

## Влияние ошибок соединения

На рисунке 5 показано устройство с изолированным угловым энкодером на собственных подшипниках, соединенным с контролируемым элементом при помощи муфты. Преимущество такой конструкции состоит в том, что на точность угловых измерений будет влиять только смещение подшипника энкодера. Тем не менее к этому преимуществу нужно относиться с осторожностью, поскольку смещение основных подшипников будет влиять на точность позиционирования, если система предусматривает определение полярных координат точки, которая находится на контролируемом элементе, а не на радиально-упорном подшипнике удаленного объекта.

Сама конструкция муфты также может существенно влиять на точность системы. Данная статья не предусматривает подробное описание недостатков различных конструкций муфт, поэтому рассмотрим только наиболее важные факторы.

### Люфт

Любой люфт в приводах вращения создает разницу зарегистрированных угловых координат, зависящую от направления поворота и способную оказывать наиболее значительное влияние на повторяемость системы.

### Жесткость на кручение

Муфта может не обладать такой жесткостью, как присоединенные к ней валы, и поэтому может подвергаться влиянию вибраций/резонанса и скручивания валов, следовательно, ее использование в цепи обратной связи может существенно повлиять на переходные характеристики, время успокоения, допустимый коэффициент усиления замкнутого контура и ширину полосы пропускания.

### Угловая ошибка

Большинство муфт в определенных условиях юстировки могут создавать угловую ошибку между ведущим и ведомым валом (например, при непараллельности осей двух валов муфты Oldham приводят к ошибке с периодом 1/4 оборота). В высокоточных системах угловой энкодер следует жестко соединить с валом, на котором находится контролируемый элемент, чтобы они вращались на одних и тех же подшипниках.

### Влияние скручивания вала

Недостаточная жесткость при кручении вала между контролируемым элементом и шкалой углового энкодера порождает динамическую ошибку, ухудшающую характеристики системы. Для снижения такого влияния рекомендуется устанавливать бесконтактный энкодер как можно ближе к контролируемому элементу (см. рисунок 6).

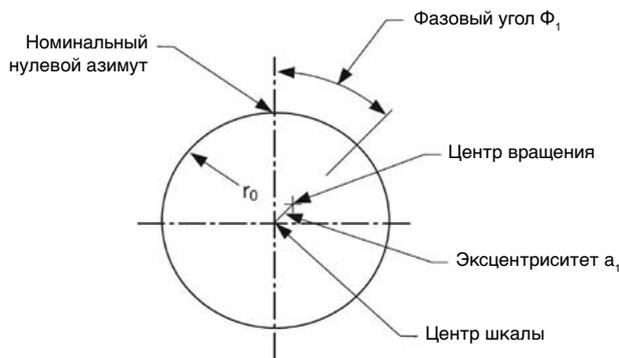


Рисунок 7. Ошибка эксцентриситета шкалы, возникающая при смещении центра вращения поворотной шкалы относительно ее геометрического центра

## Влияние эксцентриситета и искажений шкалы

Проще всего добиться точности угловых измерений, считывая данные с метрологической шкалы с равномерно нанесенными делениями, расположенными на постоянном расстоянии от оси вращения. Отклонения радиуса такой градуировки шкалы, обусловленные эксцентриситетом монтажа идеально круглой шкалы, могут генерировать ошибки, изменяющиеся с каждым оборотом. Искажения шкалы могут порождать другие ошибки, изменяющиеся два и более раза на каждый оборот.

Рассмотрим идеально круглую шкалу радиуса  $r_0$ . Она установлена так, что поворачивается вокруг точки, расположенной на расстоянии  $a_1$  от теоретического центра шкалы с фазовым углом  $\Phi_1$  (см. рисунок 7). При произвольном азимутальном угле  $\theta_1$  расстояние от центра вращения до поверхности шкалы  $R_\theta$  определяется по формуле:

$$R_\theta = r_0 - a_1 \cos(\theta - \Phi_1)$$

Поэтому истинный радиус будет меняться по закону синуса с периодом один оборот и амплитудой, равной эксцентриситету.

Чтобы добавить влияние искажений шкалы, следует принять во внимание общую форму кольца, представляющую собой совокупность синусоид различной частоты  $n$ , фазы  $\Phi_n$  и амплитуды  $a_n$ , при которой радиус шкалы в азимутальном угле  $\theta$  определяется по формуле:

$$R_\theta = r_0 - a_1 \cos(\theta - \Phi_1) - a_2 \cos(2\theta - \Phi_2) - a_3 \cos(3\theta - \Phi_3) - \dots - a_n \cos(n\theta - \Phi_n)$$

Можно показать, что максимальная круговая ошибка  $E_n$ , вызванная синусоидально изменяющимся искажением с



Рисунок 8. Ошибка с периодом 1/12 оборота из-за выступов на кольце поворотного энкодера.

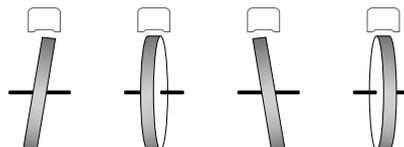
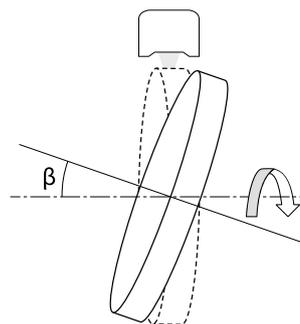


Рисунок 9. Ошибка перекоса при наклоне геометрической оси энкодера относительно оси вращения.

амплитудой  $a_n$  (средняя), периодически повторяющаяся  $n$  раз на оборот, определяется по формуле:

$$\pm E = a_n/n$$

В простейшем случае эксцентриситет (т. е.  $n = 1$ ) в 1 мкм будет вызывать на периферии синусоидальную линейную ошибку в  $\pm 1$  мкм.

Искажения шкалы более высокого порядка, имеющие значительно меньшую амплитуду, будут все меньше влиять на точность шкалы. Нижние гармоники будут иметь существенный эффект: влияние ошибки, вызванной эксцентриситетом, может принимать масштабы, сопоставимые с влиянием смещения подшипника.

Кольцевые шкалы поворотных энкодеров Renishaw при установке на коническую поверхность демонстрируют небольшие геометрические искажения, что может наводить на мысль о зависимости измерений от эксцентриситета и искажений вообще и о влиянии потенциальных выступов, возникающих под воздействием нескольких зажимных болтов и конической опоры, в частности (как показано на рисунке 8). Тем не менее при стандартной установке кольца диаметром 200 мм, закрепленного с надлежащим моментом затяжки 12 болтами, существенной ошибки не возникает, а шумовая ошибка с периодом 1/12 оборота составляет приблизительно  $\pm 0,05$  мкм.

В типовых схемах установки эксцентриситет отвечает за 60 % общей ошибки и более (в зависимости от способа установки), в то время как нижние гармоники (преимущественно от второго до четвертого порядка) формируют гораздо меньшую долю установочной ошибки.

К счастью, ошибки, вызванные эксцентриситетом и искажением, легко поддаются методам компенсации, наиболее действенным из которых является использование нескольких считывающих головок. Применение двух считывающих головок избавит от ошибки, связанной с эксцентриситетом и остальными нечетным гармониками. Использование в некоторых установках четырех считывающих головок имело благотворный эффект, но добавление дополнительных

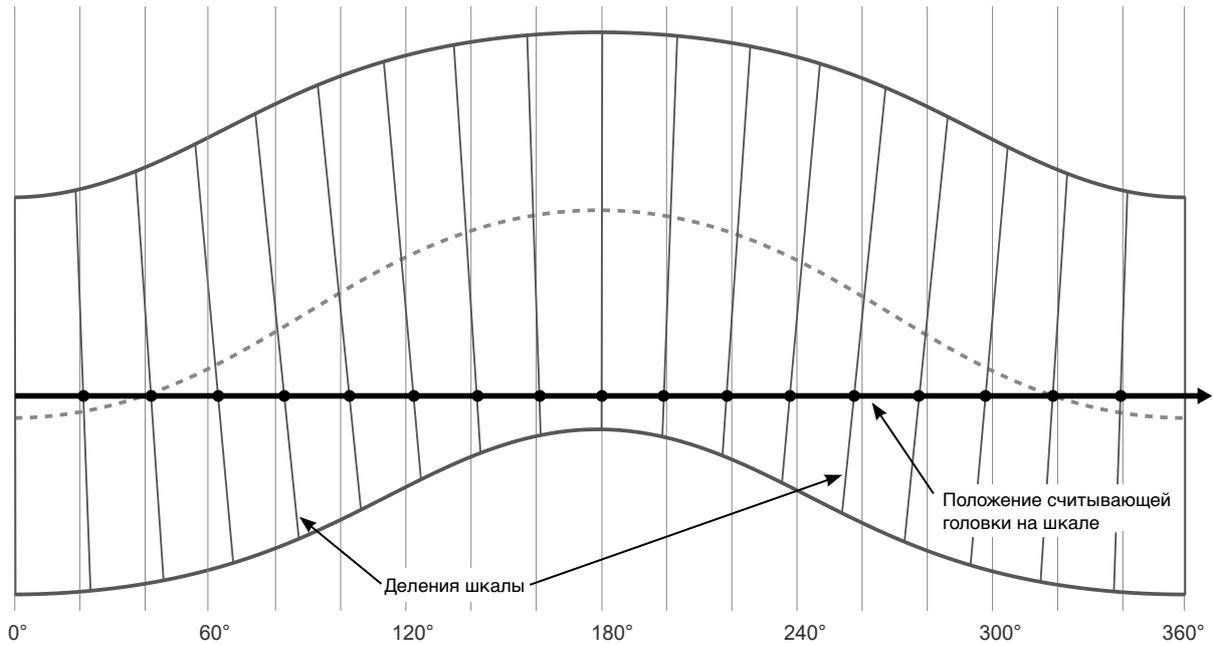


Рисунок 10. Колебания шкалы при разных углах поворота под влиянием перекоса. Сплошная линия обозначает положение на шкале считывающей головки / циферблатного индикатора, пунктирная линия — центр шкалы. Точками обозначены кажущиеся положения каждого деления шкалы при ее вращении под считывающей головкой.

головки неуклонно ведет к снижению рентабельности капиталовложений, а тщательный подбор поперечного сечения кольца представляет более действенный способ ограничения высших гармоник искажений.

Запатентованный компанией Renishaw способ установки кольцевых шкал на коническую поверхность практически превращает потенциально эксцентрическое и искаженное кольцо в деталь с малым перекосом, оказывающим значительно меньшее влияние на точность. Например, коническая поверхность превращает кольцо диаметром 200 мм с эксцентриситетом 1 мкм в концентрическое кольцо с перекосом  $0,002^\circ$ , тем самым повышая точность измерений без необходимости использования нескольких считывающих головок.

## Влияние перекоса шкалы

Перекосом называется такое состояние, при котором шкала углового энкодера установлена концентрично контролируемому элементу, но с наклоном геометрической оси относительно оси вращения (как показано на рисунке 9). На виде сбоку, т. е. при радиальном направлении взгляда, понятно, что перекосок приводит к однократному на оборот синусоидальному движению периферии шкалы углового энкодера вдоль оси.

Перекосок порождает два ощутимых, но едва различимых механизма ошибки. Для первого механизма предположим, что шкала углового энкодера диаметром 200 мм (с делениями в осевом направлении) установлена с перекоском  $0,1^\circ$ .

В процессе установки концентричность шкалы была отрегулирована при помощи циферблатного индикатора, касающегося ее поверхности. За один оборот шкала не только будет перемещаться относительно считывающей головки в осевом направлении на  $\pm 0,175$  мм, но и угол рысканья делений шкалы будет меняться до  $\pm 0,1^\circ$  в обе стороны от номинального значения. Если считывающая головка установлена в той же точке, что и циферблатный индикатор (как показано на рисунке 10), то возникнет ошибка второго порядка малости. Однако, если считывающую головку сдвинуть из этой точки в осевом направлении на 1 мм, комбинация осевого перемещения, а также изменений угла рысканья и положения головки уже приведет к ошибке приблизительно  $\pm 1,74$  мкм ( $\pm 3,6$  угловой секунды), синусоидально изменяющейся на каждый оборот.

Второй механизм состоит в следующем: монета при перпендикулярном взгляде кажется кругом. Если посмотреть на эту монету под некоторым углом, она превратится в эллипс. При перекоксе поворотной шкалы происходит то же самое, что приводит к двукратному

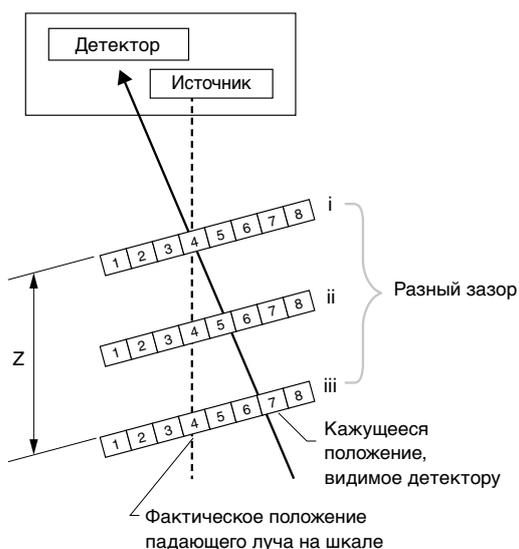


Рисунок 11. Ошибка от параллакса — ошибка измерения, вызванная изменением зазора на считывающей головке энкодера при наклоненной шкале (относительно считывающей головки). Как показано на рисунке, свет от источника падает на шкалу в точке 4, но детектор с увеличением зазора считывает точки 5 и 6.

на оборот возникновению ошибки, величина которой обратно пропорциональна косинусу угла перекоса. Это эффект второго порядка малости, который в обсуждаемом выше примере приводит к ошибке порядка  $\pm 0,16$  угловой секунды, поэтому в большинстве случаев этим механизмом ошибки можно пренебречь.

## Влияние ошибок, связанных с несовершенством считывающей головки

Метрологическая шкала является лишь частью энкодера, а считывающая головка тоже вносит свой вклад в общую накопленную ошибку. Ниже описаны наиболее существенные погрешности, обусловленные несовершенством считывающей головки.

### Ошибка подразбиения

Цена деления шкалы поворотного энкодера с 3600 штрихами составляет  $0,1^\circ$  или 360 угловых секунд. При необходимости в разрешении, меньшем, чем шаг шкалы, потребуется считывающая головка с интерполяцией. Любая нелинейность интерполяции приводит к возникновению периодической ошибки, которую также называют ошибкой подразбиения (SDE).

Рассмотрим в качестве примера считывающую головку энкодера Renishaw: штриховые меры шкалы и считывающей головки создают оптические интерференционные полосы, перемещающиеся в поперечном направлении через фотодетектор считывающей головки при движении шкалы. Эти полосы имеют интенсивность, меняющуюся по синусоидальному закону, и декодируются считывающей головкой в два синусоидальных напряжения, сдвинутых по фазе друг относительно друга на  $90^\circ$ .

Если эти сигналы одновременно вывести на экран осциллографа, на нем появится фигура Лиссажу круглой формы, которая будет делать полный оборот при смещении на одно деление шкалы. Если эта фигура Лиссажу имеет идеально круглую форму, а центр ее расположен в начале координат, то скорость ее вращения точно соответствует скорости движения шкалы; если интерполяция по углу имеет постоянное угловое разрешение, то интерполяция считывающей головки идеальна, а в противном случае возникнет ошибка подразбиения.

На ошибку разбиения влияет юстировка считывающей головки (относительно центра вращения шкалы), регулировка масштаба и чистота шкалы — важно соблюдать чистоту и аккуратно установить систему. Кроме того, характеристики ошибки подразбиения определяются оптической схемой считывающей головки: для систем TONiC от компании Renishaw с шагом 20 мкм ошибка подразбиения обычно оставляет  $\pm 30$  нм ( $\pm 0,06$  угловых секунд на кольце диаметром 200 мм).

Из-за склонности ошибки подразбиения к появлению на высоких частотах сопоставление плохо помогает устранить ее влияние, однако в ряде случаев может оказаться эффективным усреднение на небольших расстояниях.

### Ошибка от параллакса

Если расстояние между шкалой и считывающей головкой изменяется (например, из-за эксцентриситета кольца, изменения температуры и т. п.), то ошибки будут возникать до тех пор, пока считывающая головка не будет правильно выставлена относительно оси вращения шкалы. При наклоне считывающей головки изменение величины зазора приводит к возникновению ошибки измерения, пропорциональной синусу угла наклона, как показано на рисунке 11.

### Устойчивость установки

Жесткое и надежное крепление считывающей головки чрезвычайно важно для точных и повторяемых угловых измерений. Конструкция устройства должна предотвращать перемещение считывающей головки относительно оси вращения шкалы при изменении ее пространственного положения, нагрузки, температуры, вибрации и т. п.

В случае появления в системе неожиданно больших неповторяющихся ошибок стоит проверить затяжку крепежных болтов считывающей головки и убедиться в отсутствии люфта сопряженных кронштейнов и установочных приспособлений.

### Влияние точности делений шкалы

Рассмотрим технологию изготовления углового энкодера с нанесением делений непосредственно на подложку, а не на линейную шкалу, которая затем закрепляется на периферии диска или кольца. Изготовитель может закрепить заготовку для шкалы на оправке, поворачивающейся для нанесения каждого деления. Точность шкалы (разница между фактическим и намеченным положениями делений), измеренная по окончании процесса градуировки, но до снятия градуированной шкалы с оправки, называется ошибкой градуировки. Если повторить это измерение, но на этот раз при помощи правильно установленной считывающей головки, то ошибка будет, помимо ошибки градуировки, содержать составляющие, вызванные несовершенством считывающей головки (в основном, ошибки подразбиения). Такая ошибка называется ошибкой системы.

Если теперь угловой энкодер снять и переустановить на ту же или другую оправку, а также проверить его точность при помощи считывающей головки, то величина полученной ошибки будет другой. Эта разница будет соответствовать ошибке, возникшей в результате изменения эксцентриситета и отклонения от круглости шкалы энкодера более высокого порядка, существующей между ее начальной установкой для градуировки и переустановкой для эксплуатации.

Общая измеренная ошибка в этом случае называется ошибкой монтажа, что наиболее точно определяет характеристики, достигаемые пользователем в условиях эксплуатации.

## Подведем итоги

*Ошибка градуировки* = ошибка интервала между делениями при изготовлении.

*Ошибка системы* = ошибка градуировки + ошибка подразделения.

*Ошибка монтажа* = ошибка системы + влияние изменений условий установки.

В типовых системах эти ошибки обычно принимают различающиеся значения. Результаты, полученные в ходе испытаний значительного количества поворотных энкодеров Renishaw диаметром 200 мм, приведены в таблице 1. При таком диаметре один микрон соответствует 2,06 угловой секунды.

Таблица 1. Составляющие полной ошибки монтажа на кольце

Тип ошибки	Типичная ошибка на кольце Ø 200	
	мкм	угловые секунды
Ошибка градуировки	0,5	1,0
Ошибка системы	0,53	1,1
Стандартная ошибка монтажа (1 считывающая головка)	2,5	5,2
Стандартная ошибка монтажа (2 считывающие головки)	1,0	2,1

Ошибка градуировки и ошибка системы зависят от производителя, но ответственность за дополнительные  $\pm 2$  мкм ошибки монтажа возлагается и на изготовителя, и на пользователя. Даже при наличии у пользователя возможности идеального монтажа энкодера в смысле эксцентриситеты и круглости все равно останется разница между ошибкой системы и ошибкой монтажа (только если пользователь не установил кольцо именно в то положение, что и изготовитель при градуировке).

Причины ошибки градуировки определяются технологией изготовления:

1. У угловых энкодеров, осевые линии которых наносятся по окружности кромки диска или кольца гравировкой или травлением, ошибка градуировки вызвана ошибками угловой индексации.
2. У энкодеров с радиальной стеклянной шкалой, изготавливаемой травлением через маску, ошибка градуировки вызвана неточностью изготовления маски и ошибками ее установки в процессе травления.
3. У угловых энкодеров, линейная шкала которых крепится по окружности подготовленного вала, ошибка градуировки вызвана неточностью изготовления линейной шкалы, отклонениями ее толщины и радиуса подготовленного вала, а также неравномерностью натяжения линейной шкалы при ее креплении на валу.

В последнем случае ошибка градуировки может меняться после изготовления, поскольку изменение температуры вместе с разницей коэффициентов теплового расширения шкалы и вала может привести к сползанию шкалы относительно поверхности вала. Ослабление клея, если он использовался для крепления шкалы, может усилить этот эффект.

Рассмотрим кольца и диски энкодеров Renishaw, а также прочие поворотные шкалы, ошибка градуировки которых не меняется с течением времени. В этом случае эта ошибка предсказуема от оборота к обороту и для пользователя неотличима от влияния точности монтажа, поэтому поддается снижению аналогичными способами.

Ошибка градуировки едва заметно проявляется при рыскании осевых делений на кромке углового энкодера или при их недостаточном совпадении с осью вращения. Все это не имеет значения в случае чисто поворотного движения, однако любое осевое перемещение шкалы энкодера относительно считывающей головки (например, из-за осевого люфта подшипников) приводит к росту неправильных показаний поворота шкалы. Этот механизм ошибки аналогичен описанному ранее третьему типу ошибки перекоса. К аналогичным последствиям приводит неверный угол наклона считывающей головки (т. е. параллакс), используемой с радиальной шкалой.

## Способы компенсации ошибок

После определения влияния всех источников ошибок в системе управления движением можно сравнить требуемую точность, необходимую для достижения заданных технических характеристик прибора, с показателями, ожидаемыми от некомпенсированного поворотного энкодера. В случае невозможности достижения от некомпенсированного энкодера требуемой точности следует сделать выбор между использованием другого более высококачественного энкодера (если существует прибор, удовлетворяющий требованиям к габаритам, сроку поставки и стоимости) или применением способа компенсации ошибок, устраняющего недостатки рабочих параметров. Два наиболее действенных способа компенсации ошибок: использование нескольких считывающих головок и таблицы ошибок.

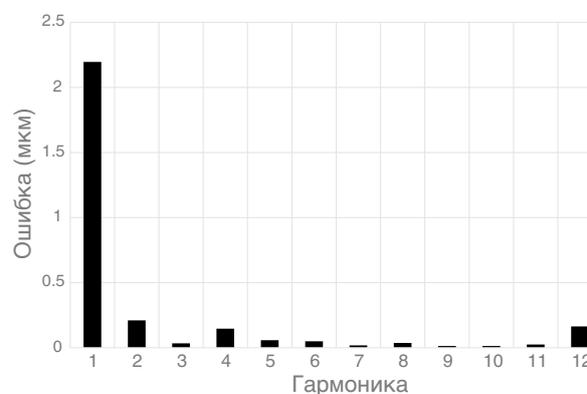


Рисунок 12. Быстрое преобразование Фурье в таблице ошибок для кольца поворотного энкодера; первая гармоника соответствует эксцентриситету кольца и является крупнейшей составляющей полной ошибки монтажа.

### Использование нескольких считывающих головок

Использование двух диаметрально расположенных считывающих головок исключает влияние эксцентриситета и других высших нечетных гармоник повторяемой ошибки. Этот метод также устраняет влияние на угловые измерения смещения подшипников, однако обычно для борьбы со смещением подшипника и точного углового позиционирования требуются четыре считывающие головки. Увеличение количества используемых считывающих головок позволяет еще больше уменьшить повторяемую ошибку, но обычно полагают, что преимущества от установки более четырех головок перевешивает сложность и стоимость. Такой метод с использованием нескольких считывающих головок эффективен без необходимой калибровки, что выгодно как с точки зрения временных затрат, так и с точки зрения проектирования системы контроля.

### Таблицы ошибок

Таблицу ошибок можно использовать для уменьшения повторяемых ошибок, если выбранная система управления сконфигурирована под ее применение. Для результативности данного метода поворотный энкодер должен быть откалиброван производителем оборудования при помощи интерферометра или другого общепризнанного калибровочного оборудования после окончательной сборки прибора.

Сборщик не может полагаться ни на какой поверочный сертификат, предоставляемый производителем энкодера, поскольку любая возникающая в процессе монтажа ошибка останется неучтенной и обесценит таблицу ошибок. Полезно оптимизировать количество точек в таблице ошибок: для синусоидально изменяющейся периодической ошибки семь точек на цикл позволяют устранить приблизительно 90 % ошибок на этой частоте (как показано на рисунке 12). Таблица ошибок на сотню точек позволяет компенсировать большинство ошибок в первых четырнадцати гармониках, но следует заметить, что она способна увеличить ошибки, вызванные оставшимися высшими гармониками. Стоит напомнить, что данный метод не оказывает влияния на смещение подшипника, скручивание вала и другие зависимые от времени источники ошибок.

## Заключение

В настоящей статье кратко проанализированы некоторые компромиссы, на которые необходимо пойти для определения реалистичных технических характеристик системы с угловым энкодером. Здесь также рассмотрены некоторые наиболее существенные факторы, способные ограничить достижимую точность, и подробно разобран ряд методов, позволяющих ее увеличить. Дополнительная информация по данной теме содержится в стандарте ISO 230-7:2015 (Часть 7. *Геометрическая точность осей вращения*).

Дополнительную информацию об изделиях можно найти на сайте [www.renishaw.ru/encoder](http://www.renishaw.ru/encoder)