

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В. Г. Шухова
Кафедра технической кибернетики

Утверждено
научно-методическим советом
университета

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Измерение угловых перемещений и скоростей вращательного движения

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 220301 - Автоматизация
технологических процессов и производств и направлений
бакалавриата 220400 «Управление в технических системах»,
220700 «Автоматизация технологических процессов и производств»,
221000 «Мехатроника и робототехника»

Белгород
2012

УДК 004.3 (07)

ББК 32.81 я7

Т38

Составители: ст. преп. Д.А. Бушуев
д-р техн. наук, проф. В.Г. Рубанов

Рецензент канд. техн. наук, доц. О.В. Луценко

Т38 **Технические измерения и приборы:** Измерение угловых перемещений и скоростей вращательного движения: методические указания к выполнению лабораторных работ / сост.: Д.А. Бушуев, В.Г. Рубанов – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 64 с.

В методических указаниях рассматриваются различные типы измерительных преобразователей угловых перемещений и скоростей вращательного движения, их принципы действия, характеристики, достоинства и недостатки, а также возможные области применения. Содержатся краткие теоретические сведения, рекомендации к выполнению, контрольные вопросы для подготовки к защите, порядок выполнения и структура отчета по каждой лабораторной работе.

Методические указания предназначены для студентов 3-го курса специальности 220301 – Автоматизация технологических процессов и производств по дисциплине «Технические измерения и приборы» и направлений бакалавриата 220400 «Управление в технических системах», 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств», 221000 «Мехатроника и робототехника» по дисциплине «Средства автоматизации и управления», а также могут быть использованы при проведении лабораторных работ по другим дисциплинам, при изучении измерительно-преобразовательных устройств.

Издание публикуется в авторской редакции.

УДК 004.3 (07)

ББК 32.81 я7

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2012

Содержание

Введение	4
Теоретические сведения.....	5
Лабораторная работа № 1 Исследование датчиков углового перемещения	32
Лабораторная работа № 2 Исследование датчиков частоты вращения.....	41
Библиографический список	47

Введение

Датчики угловых перемещений служат для измерения и стабилизации основных кинематических параметров вращения: скорости и положения вала и наибольшее применение находят в системах управления различных типов электроприводов. За счет контроля данных показателей существенно повышается плавность хода и точностные характеристики приводов. А при построении систем управления позиционно-контурного типа с использованием сервопривода использование в последнем обратной связи по угловому положению является необходимым условием обеспечения требуемого уровня точности позиционирования.

Существуют различные измерительные преобразователи угловых перемещений в информационный сигнал.

В данных методических указаниях исследуются потенциометрические преобразователи углового перемещения, вращающиеся трансформаторы, инкрементальные энкодеры и тахогенераторы.

Исследуя данные типы датчиков, студентам предоставляется возможность понять, за счет каких преимуществ в последнее время в подавляющем большинстве современных систем регулируемого привода, позиционирования и контроля углового положения используются инкрементные и абсолютные энкодеры, а также в каких отраслях все еще используются преобразователи, основанные на использовании электрических микромашин постоянного и переменного тока.

Теоретические сведения

Потенциометрические измерительные преобразователи

Потенциометрический измерительный преобразователь или датчик, представляет собой электрическое сопротивление, величина выходного напряжения которого зависит от положения токоъемного контакта.

Потенциометрические датчики предназначены для измерения и преобразования линейных и угловых перемещений в электрический сигнал, а также для воспроизведения простейших функциональных зависимостей в автоматических и вычислительных устройствах непрерывного типа. Иногда потенциометр применяется как преобразовательный элемент. В этом случае он сопрягается с каким-нибудь чувствительным элементом.

Измерительные преобразователи углового перемещения с изменяющимся активным сопротивлением находят широкое применение в конструкциях приборов и средств автоматизации. В качестве реохордов вторичных измерительных приборов, реостатов обратной связи исполнительных механизмов, в устройствах дистанционной передачи показаний и устройствах дистанционного управления, а также в качестве преобразователей перемещения различных механизмов и устройств, например, гироскопах, автопилотах, гирокомпасах.

Принцип действия датчика углового перемещения с непрерывной намоткой состоит в следующем: к зажимам потенциометра прикладывается напряжение: постоянного или переменного тока неизменной величины. При перемещении движка потенциометра выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ меняется пропорционально входной величине α . Каркас углового потенциометрического датчика имеет тороидальную форму (Рис.1). Такие потенциометрические датчики по траектории движения скользящего контакта относятся к круговым, т.е. $\alpha_{\text{max}} < 360^\circ$.

Для режима холостого хода статическая характеристика датчика линейна, т.к. справедливо соотношение:

$$U_{\text{вых0}} = \frac{U}{R} \cdot r, \quad (1)$$

где U – напряжение питания потенциометра, R – сопротивление обмотки, r – сопротивление части обмотки, приходящейся угол поворота α движка потенциометра (Рис.2а),

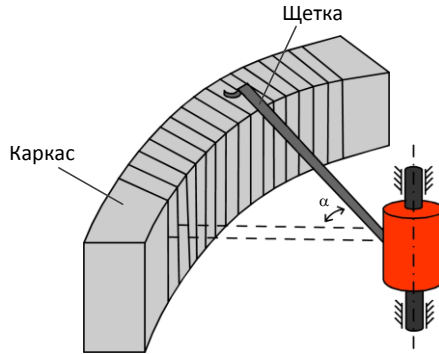


Рис. 1. Потенциометрический преобразователь углового перемещения

Учитывая, что $\frac{r}{R} = \frac{\alpha}{l}$, где l - общая длина намотки, получим:

$$U_{\text{вых0}} = \frac{U}{l} \cdot \alpha = k\alpha, \quad (2)$$

где k - коэффициент преобразования потенциометра.

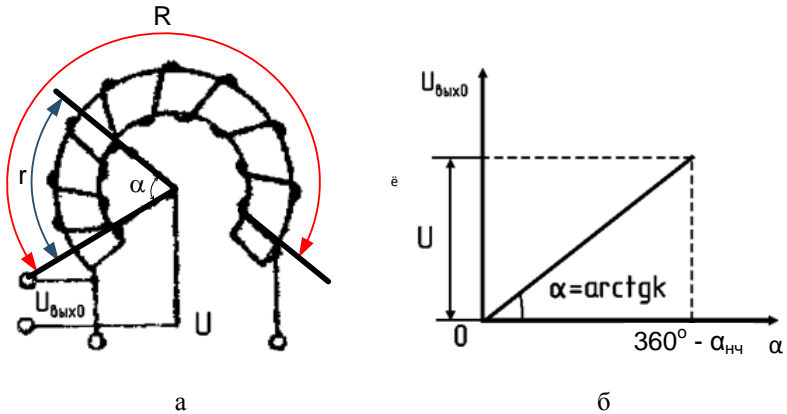


Рис. 2. Потенциометрический датчик: а – углового перемещения, б – его статическая характеристика

Полученное выражение (2) показывает, что статическая характеристика угловых потенциометров при отсутствии нагрузки представляет прямую, проходящую через начало координат, с коэффициентом наклона k (Рис.2б). При приближении к 360° возникает падение сопротивления, обусловленное началом нового оборота вращения токосъемника, за счет чего возникает $\alpha_{\text{нч}}$.

Приведенная статическая характеристика позволяет заключить, что рассмотренные потенциометрические измерители – преобразователи, не реагируют на знак входного сигнала, т.е. они относятся к классу одноктактных элементов. Однако на основе одноктактных потенциометров можно построить двухтактные измерители - преобразователи, реагирующие на знак входного сигнала.

Существует несколько схем включения потенциометров, образующих двухтактный потенциометрический датчик (Рис. 3).

Рассмотрим статические характеристики этих датчиков при отсутствии нагрузки.

Для схем (Рис.3, а и б) статическая характеристика представляет прямую I, а для схем (Рис.3, в и г) - прямую II (Рис.4). Отличие характеристик состоит в их крутизне, которая определяется тем, что при изменении входного сигнала последний обрабатывается в схемах в и г двумя движками, отклоняющимися от нейтрального положения в противоположные стороны на величину α . При этом потенциал точки γ возрастает на величину U_γ , а потенциал точки β получает приращение, равное по абсолютной величине приращению потенциала точки γ , но обратное по знаку.

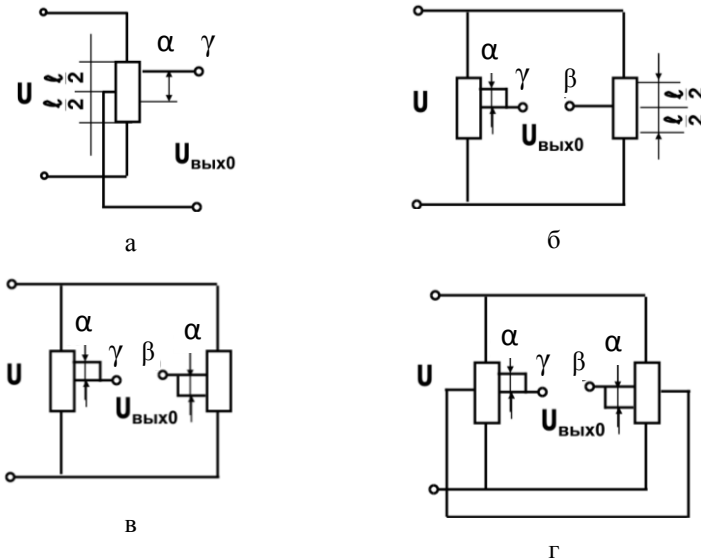


Рис. 3. Схемы двухтактных потенциометрических измерителей - преобразователей

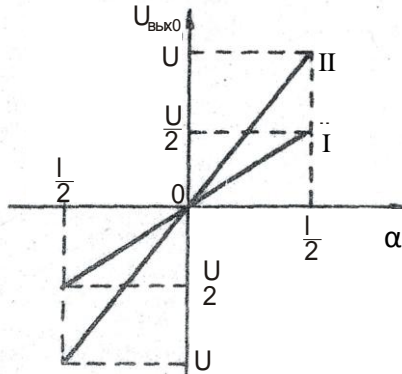


Рис. 4. Статическая характеристика двухтактных потенциометрических измерителей - преобразователей

В результате разность потенциалов $U_\gamma - U_\beta$ увеличивается вдвое по сравнению со схемами (Рис.3, а и б), где потенциал одной из точек все время сохраняет постоянное значение. Отсюда следует, что схемы с двумя щетками имеют при тех же параметрах вдвое больший коэффициент преобразования сигнала по сравнению со схемами с одной щеткой.

Идеальные характеристики потенциометрических датчиков могут сильно отличаться от реальных за счет наличия различного рода погрешностей, которые необходимо учитывать при проектировании систем автоматизации. Различают следующие погрешности датчиков:

- Зона нечувствительности;
- Неравномерность статической характеристики;
- Погрешность от люфта;
- Погрешность от трения;
- Погрешность от нагрузки (При схеме включения, показанной на Рис.5)

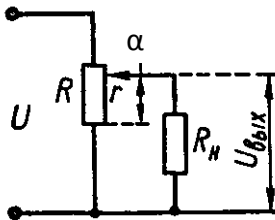


Рис. 5. Схема нагруженного потенциометра

Напряжение на выходе потенциометрического датчика при наличии нагрузки:

$$U_{\text{вых}} = \frac{Ur}{R + \frac{R}{R_n}r - \frac{r^2}{R_n}} \quad (3)$$

Абсолютная погрешность от нагрузки вычисляется по формуле:

$$\Delta U = U_{\text{вых}0} - U_{\text{вых}} = U \frac{r^2(R-r)}{R^2R_n + (R^2r - Rr^2)} \quad (4)$$

Относительная погрешность от нагрузки вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} = \frac{r^2(R-r)}{R^2R_n} \quad (5)$$

Более детально источники возникновения погрешностей описываются в [1], а применение потенциометрических датчиков в робототехнических системах в [2].

К достоинствам потенциометрических датчиков следует отнести простоту построения измерительных схем, высокий уровень выходного сигнала и малые габаритные размеры. Следует также отметить, что они обладают радиационной стойкостью и низкой стоимостью. Недостатками являются нелинейность характеристики при нагрузке, наличие зоны нечувствительности и малая износостойкость. Для них характерны также сравнительные невысокие допустимые значения угловых скоростей (до 2..3 об/с), а также чувствительность к вибрациям и загрязнению.

Оптические энкодеры

На практике в средствах автоматизации, промышленной робототехнике, средствах числового программного управления и других промышленных системах управления и контроля широко используются оптические угловые (поворотные) энкодеры (шифраторы). Ведь точное измерение скорости, ускорения и положения ротора электродвигателя – неперемное условие нормальной работы систем управления электродвигателями. В петле управления в качестве сигнала обратной связи могут использоваться, например, потребляемый двигателем ток или противо-ЭДС обмотки. Однако для высокоточного управления скоростью или положением ротора электродвигателя лучше всего использовать энкодеры механически связанные с валом ротора [3].

Существует два основных типа оптических угловых кодирующих устройств [4]:

- относительные (инкрементальные) энкодеры, в которых происходит последовательный счет меток перемещения;

- абсолютные энкодеры, когда для каждого положения вала существует индивидуальный бинарный код.

Принцип работы оптических кодирующих устройств основан на пересечении светового луча оптопары (светодиоды и фототранзисторы) с размеченным диском, установленным на валу (рис.6).

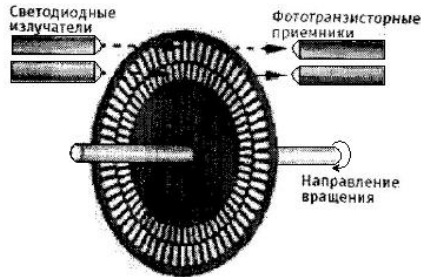


Рис.6. Принцип действия оптического инкрементального энкодера

В зависимости от частоты разметки диска определяется разрешающая способность датчика и, как следствие, точность измерения перемещения.

В абсолютных энкодерах углового положения используется электромеханический способ аналого-цифрового преобразования, предполагающий непосредственное преобразование угла поворота вала в соответствующий цифровой выходной сигнал, который может быть использован для обработки и интерпретации информации любым измерительным комплексом.

Абсолютные шифраторы применяются в тех случаях, когда устройство бездействует в течение продолжительных интервалов времени или перемещается с небольшой скоростью. Примерами таких устройств могут быть задвижки управления, телескопы, грузовые краны и т. д.

В традиционном абсолютном шифраторе маска на диске состоит из ряда концентрических дискретных дорожек с числом периодов на один оборот, удвоенным на каждой следующей дорожке увеличенного радиуса. Каждая дорожка имеет собственные фотодетекторы, и расположены дорожки так, что показания всех детекторов генерируют параллельный двоичный код (рис. 7), обычно код Грея, преимущество которого заключается в изменении только одного разряда при переходе в последовательном счёте от одного числа к другому. Например, шифратор с 12 дорожками будет генерировать 4096 слов за один оборот вала. Оптомеханика и электроника считывания кода такого шифратора являются значительно более сложными и дорогостоящими, чем

у шифратора приращений. Тем не менее, он имеет существенное преимущество: предоставление информации тотчас же после запуска, без процедуры возврата в исходное положение. Алгоритм построения кода Грея может быть формально представлен как результат сложения по модулю два исходной комбинации двоичного кода с такой же комбинацией, но сдвинутой на один разряд вправо.

Двумя другими характерными свойствами абсолютных шифраторов являются следующие:

1) так как шифратор генерирует параллельный двоичный код, просто и непосредственно обеспечивается сопряжение с любым микропроцессорным оборудованием или устройством индикации;

2) так как шифратор «запоминает» данные о положении посредством кодированной маски диска, нет необходимости постоянно накапливать данные с его выхода; данные просто считываются всякий раз, когда необходимо определить текущее положение.

Абсолютный энкодер относится к типу энкодеров, который имеет уникальный код для каждой позиции вала. Счетчик импульсов в таком энкодере не нужен, т.к. угол поворота всегда известен. Абсолютный энкодер формирует сигнал, как во время вращения, так и в режиме покоя. Диск абсолютного энкодера отличается от диска пошагового энкодера, так как имеет несколько концентрических дорожек (рис. 7). Каждой дорожкой формируется уникальный двоичный код для конкретной позиции вала.

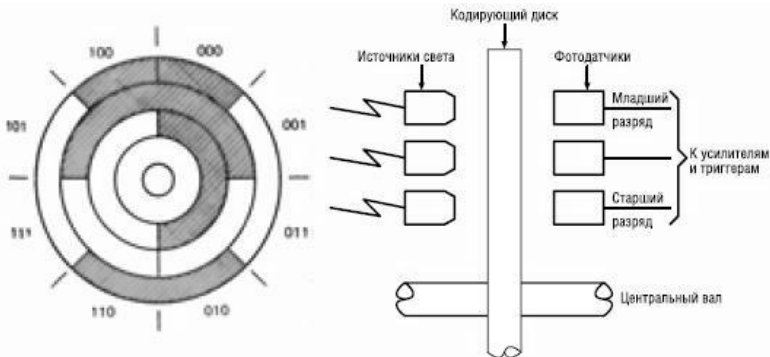


Рис. 7. Кодированный диск для генерации 3-х разрядного кода Грея и упрощенная схема абсолютного энкодера

Абсолютный энкодер не теряет своего значения при потере питания и не требует возвращения в начальную позицию. Сигнал абсолютного энкодера не подвержен помехам и для него не требуется точная установка вала. Кроме того, даже если кодированный сигнал не может

быть прочитан энкодером, если, например, вал вращается слишком быстро, правильный угол вращения будет зарегистрирован, когда скорость вращения уменьшится. Абсолютный энкодер устойчив к вибрациям.

Инкрементальные оптические энкодеры используются в тех случаях, когда сохранение абсолютного углового положения вала при выключении питания не требуется. Например, для контроля скорости вращения или для точного позиционирования ротора двигателя. Внешний вид инкрементального энкодера, исследуемого в лабораторной работе показан на рис. 8.



Рис. 8. Внешний вид инкрементального оптического энкодера TRD-S

Инкрементальный оптический энкодер, как правило, состоит из пяти компонентов: источника света, пошагового диска, маски, фотодетекторной сборки, и сигнального процессора. Внутри энкодера жестко с валом закреплен прозрачный диск с темными рисками (Рис. 5). Количество рисок определяет количество импульсов за поворот. К примеру, если на диске нанесено 1000 отметок, тогда после 250 импульсов вал должен повернуться на 90 градусов. Источник света и фотоприемник расположены по разные стороны от диска. Количество света, проходящего на фотоприемник, меняется в зависимости от положения рисок. Электронная плата преобразует сигнал с фотоприемника в дискретный выходной сигнал.

Шифраторы приращений могут быть классифицированы следующим образом.

Одноканальные (тахометрические шифраторы), применяемые для измерения скорости или частоты, не могут быть использованы для определения направления перемещения. Выходной сигнал обычно представляет собой периодическую импульсную последовательность (рис. 9).



Рис. 9. Выходной сигнал одноканального шифратора

Двухканальные (квадратурные) энкодеры, генерирующие сдвинутые относительно друг друга по фазе на 90° (рис. 10) выходные периодические импульсные последовательности, позволяют с помощью внешних логических цифровых устройств определять направление вращения вала и таким образом делают возможным двунаправленное позиционирование. Сигнальные последовательности, предоставляющие информацию, закодированную в соотношении фаз двух выходных сигналов, называются квадратурными сигналами.

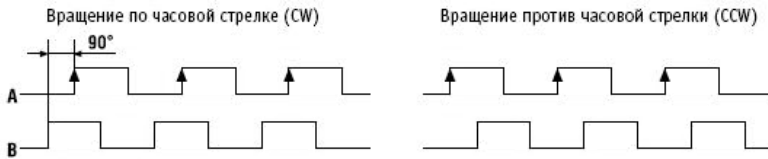


Рис. 10. Выходные сигналы двухканального шифратора

Направление вращения определяется по наличию опережения или отставания по фазе сигнала канала А относительно сигнала канала В. В случае применения шифратора тахометрического типа может возникнуть ошибка, если шифратор остановится на границе чувствительного элемента. В результате воздействия сил вибрации устройство будет пересекать эту границу в прямом и обратном направлениях счётчик будет подсчитывать каждый переход, даже несмотря на фактическую остановку системы (явление позиционного дрожания). В двухканальном шифраторе, благодаря использованию квадратурного определения и выявлению изменений взаимного состояния противоположных каналов, генерируется достоверная информация о направлении вращения. Величина скорости определяется посредством измерения либо интервала времени между импульсами, либо числа импульсов в пределах временного интервала.

Квадратурное измерение обеспечивает получение одно (1X), двукратной (2X) или четырёхкратной (4X) разрешающей способности диска абсолютного кода.

Трёхканальные энкодеры приращений генерируют так называемый нулевой импульс, который вырабатывается один раз за оборот вала и который также называется сигналом реперной точки, маркерным сигналом, сигналом исходной точки, Z-сигналом (рис.11). Он используется как опорный сигнал в процессе обслуживания оборудования или для запуска его после выключения энкодера.

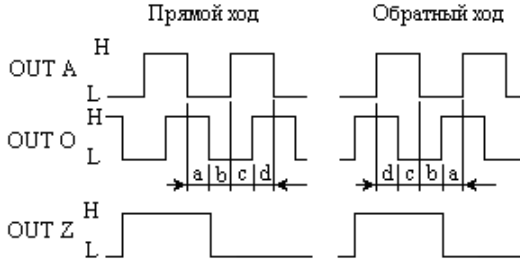


Рис. 11. Выходные сигналы трехканального инкрементального энкодера

Дифференциальные выходы применяются для надёжной передачи информационной посылки между достаточно удалёнными устройствами и/или в условиях помех (рис. 12). Энкодер с комплиментарными выходами и схемой управления на операционных усилителях может минимизировать влияние внешнего шума. Когда сигнал канала A находится в высоком состоянии, его комплиментарный канал A переключается в низкое состояние. Электрический шум будет влиять на оба канала одинаково, поэтому легко вычищается дифференциальными операционными усилителями.

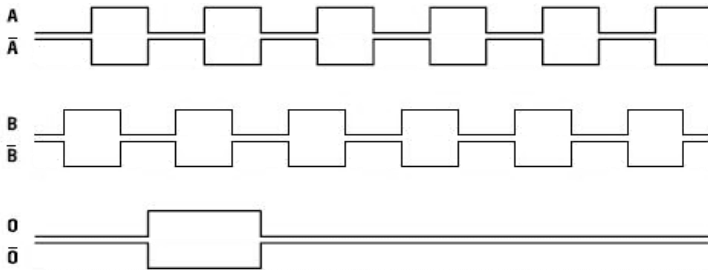


Рис. 12. Дифференциальные выходы шифратора

Число измерительных интервалов может быть удвоено посредством выполнения операции сложения по модулю 2 (исключающее ИЛИ) сигналов A и B (рис. 13). Это создаёт возможность для увеличения разрешающей способности в 2 раза.

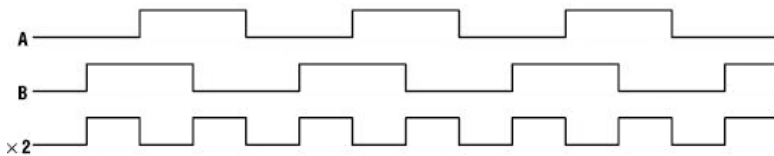


Рис. 13. Увеличение разрешающей способности в 2 раза

Увеличение разрешающей способности в 4 раза может быть выполнено посредством измерений нарастающих и спадающих фронтов периодических импульсных последовательностей каналов А и В (рис. 14). В рамках проведённой классификации покажем отдельные особенности шифраторов.

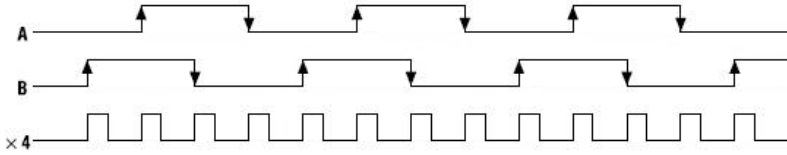


Рис. 14. Увеличение разрешающей способности в 4 раза

Обработка сигналов энкодеров

Для получения параметров вращений (угол поворота, частота вращения, ускорение) при помощи оптических энкодеров необходимо использовать вспомогательные цифровые устройства обработки сигналов.

Так при определении углового перемещения ротора с помощью одноканального энкодера необходимо устройство подсчитывающее количество импульсов и, учитывая разрешающую способность, переводящее это количество импульсов в измеряемое перемещения.

Для измерения угловой скорости и ускорения с помощью квадратурных энкодеров можно, например, подсчитывать число импульсов за определенный промежуток времени. При этом точность измерений, очевидно, будет определяться числом импульсов за один полный оборот и длительностью интервала измерений по сравнению с ожидаемым периодом вращения. Скорость вращения будет составлять [об/мин]:

$$V = \frac{n / dT}{N}, \quad (6)$$

где n — число импульсов за промежуток времени dT (измеренный в минутах), а N — число импульсов на один полный оборот ротора (pulses per revolution).

Для измерения ускорения требуется подсчет импульсов в двух последовательных одинаковых интервалах времени и вычисляется по формуле:

$$A = \frac{(n_i - n_{i-1}) / N}{dT^2}, \quad (7)$$

где n_i и n_{i-1} — количество импульсов за текущий и предыдущий интервалы измерений.

В случае реверсивного движения ротора для обработки сигналов с квадратурных шифраторов можно использовать метод, основанный на обнаружении фронта. Нарастающие и спадающие фронты сигналов, поступающих с шифраторов, служат своего рода спусковым крючком, вызывающим формирование отсчёта счетчика. По каждому фронту электронная схема не только генерирует одиночный импульс счёта, но и определяет направление перемещения (что определяет знак счёта), используя информацию о текущем направлении отсчёта (прямое или обратное), о характере перепада сигнала и состоянии сигнала другого канала. На рис. 15 дано пояснение метода обнаружения фронта при помощи микропроцессорного устройства. При определении восходящего фронта на одном канале энкодера, например, настроив, пользовательское прерывание на срабатывание по восходящему фронту, в обработчике прерывания анализируется логическое состояние в другом канале. Если там низкий уровень – то счетчику сообщается $+1$, если высокий, то -1 .

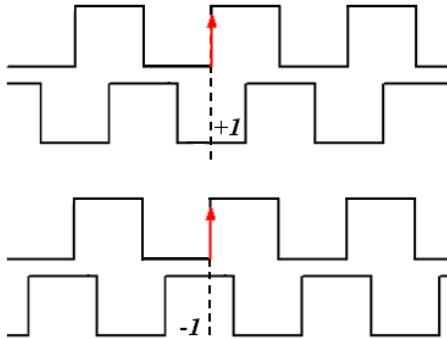


Рис. 15. Пояснение к обработке сигналов с квадратурного энкодера

В современных цифровых устройствах чаще используются не фронты, а изменения логических состояний. Как правило, цифровые счётные устройства имеют в своём составе высокоскоростной генератор тактовых сигналов, и постоянно производится опрос состояний сигналов каналов А и В. В случае, когда обнаруживается изменение, счётное устройство выбирает прямое или обратное направление счёта по логике, показанной в табл. 1. Вместо того чтобы ожидать запускающий фронт от шифратора, цифровое устройство генерирует собственный сигнал запуска, исходя из результатов анализа изменения состояния каналов шифратора.

Таблица 1

Перемещение, направленное вперёд		Перемещение в обратном направлении	
Канал А	Канал В	Канал А	Канал В
Счёт в прямом направлении	Высокий уровень (логическая 1)	Счёт в прямом направлении	Низкий уровень (логический 0)
Счёт в обратном направлении	Низкий уровень (логический 0)	Счёт в обратном направлении	Высокий уровень (логическая 1)
Низкий уровень (логический 0)	Счёт в прямом направлении	Высокий уровень (логическая 1)	Счёт в прямом направлении
Высокий уровень (логическая 1)	Счёт в обратном направлении	Низкий уровень (логический 0)	Счёт в обратном направлении

Наряду с этими восемью разрешёнными изменениями состояний (А, В), существуют также четыре комбинации, которые означают возникновение ошибки: $(0,0) \rightarrow (1,1)$, $(1,1) \rightarrow (0,0)$, $(0,1) \rightarrow (1,0)$, и $(1,0) \rightarrow (0,1)$. Данные ошибки означают, что, по крайней мере, одно состояние было пропущено. Схема пользователя должна вырабатывать сигнал, предупреждающий о подобных ошибках.

Так как существуют четыре различных состояния (или фронта) за период, то обычно используют преимущества собственной разрешающей способности шифратора. В настоящее время есть готовые микросхемы, осуществляющие квадратурное декодирование, поэтому пользователю нет необходимости синтезировать собственную цифровую схему.

Вращающиеся трансформаторы

Вращающиеся трансформаторы - это индукционные электрические машины, предназначенные для преобразования механического перемещения (угла поворота ротора) в электрический сигнал - выходное напряжение, амплитуда которого находится в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора.

Вращающиеся трансформаторы применяются в аналого-цифровых преобразователях, системах передачи угла высокой точности, в качестве датчиков обратной связи в следящих системах, бортовой аппаратуре.

В настоящее время наибольшее распространение получили двухполюсные вращающиеся трансформаторы, изготовленные аналогично двухфазным асинхронным двигателям с фазным ротором и контактными кольцами (Рис. 16 а). Пакеты стали статоров и роторов таких вращающихся трансформаторов (ВТ) изготавливают из тщательно изолированных листов электротехнической стали, изготовленных с высокой точностью. В пазах статора и ротора располагаются двухфазные обмотки, сдвинутые на 90° , друг от друга (рис.16 б, где S_1-S_2 – главная

статорная обмотка; K_1-K_2 – вспомогательная статорная обмотка; A_1-A_2 – синусная роторная обмотка; B_1-B_2 – косинусная роторная обмотка).

Обычно обе обмотки статора, K и S , имеют одинаковое число витков ($w_K=w_S$) и одинаковые сопротивления. Обмотки ротора A и B также выполняются одинаковыми ($w_A=w_B$, $r_A=r_B$, $X_A=X_B$).

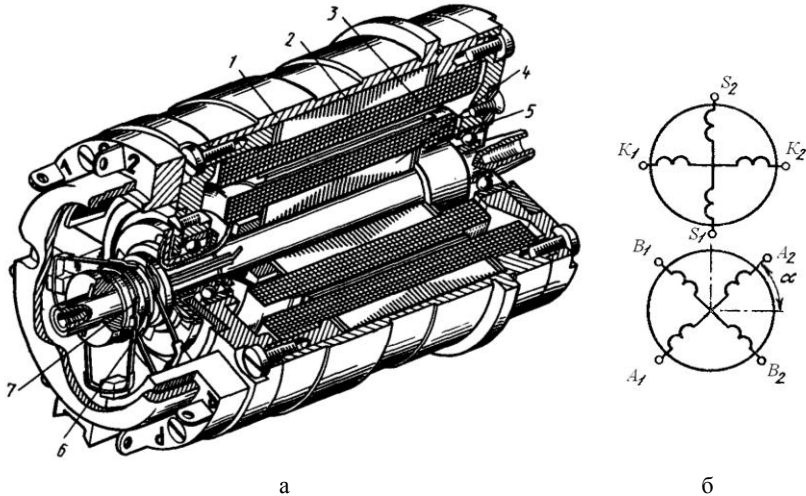


Рис.16. Устройство вращающегося трансформатора: 1 – корпус; 2 – статор; 3 – обмотка статора; 4 – ротор; 5 – обмотка ротора; 6 – контактные кольца; 7 – щетки

У большинства вращающихся трансформаторов концы обмотки ротора присоединяются к контактным кольцам, по которым скользят щетки. Кольца и щетки обычно изготавливаются из сплавов серебра. В некоторых ВТ, предназначенных для работы с ограниченным углом поворота ротора, кольца и щетки заменяются спиральными пружинами из латуни (аналогично токосъему в измерительных приборах). В ряде случаев бесконтактные ВТ изготавливаются с кольцевыми трансформаторами (по типу сельсинов).

Взаимная индуктивность между первичными обмотками (статора) ВТ и вторичными обмотками (ротора) изменяются строго по синусоидальному или косинусоидальному закону угла поворота α , что при выполнении некоторых условий обеспечивает такой же закон изменения амплитуды ЭДС.

В зависимости от того, какой функцией угла поворота ротора является выходное напряжение U , ВТ можно разделить на:

- синусно-косинусные ВТ, у которых выходное напряжение одной обмотки пропорционально синусу угла поворота ротора, а другой обмотки - косинусу угла поворота ротора (СКВТ);

- линейные ВТ, у которых выходное напряжение пропорционально углу поворота ротора (ЛВТ); получение линейной в определенном угловом диапазоне выходной характеристики сводится к аппроксимации прямой линии функцией типа $f(\theta) = \sin \theta / (1 + C \cos \theta)$, где C - постоянный коэффициент;

- масштабные ВТ, у которых выходное напряжение пропорционально входному, и коэффициент пропорциональности (масштаб) определяется углом поворота ротора;

- датчики и приемники трансформаторных дистанционных передач угла (ВТДП), выполняющие функции, аналогичные трансформаторным сельсином;

- преобразователи координат, осуществляющие поворот осей декартовой системы координат или переход к полярной системе координат (построители);

- индукционные фазовращатели, осуществляющие преобразование пространственного угла во временной.

Последние четыре функции могут быть реализованы с помощью четырехобмоточных ВТ, имеющих по две обмотки на статоре и роторе. Один и тот же ВТ практически может выполнить различные функции в зависимости от схемы соединения обмоток.

Синусный вращающийся трансформатор (рис.17а) может работать при наличии всего двух обмоток: обмотки статора S , подключенной к сети переменного тока (обмотка возбуждения) и обмотки ротора A , являющейся вторичной выходной обмоткой (рис.17а).

При холостом ходе, когда $Z_{AH} \Rightarrow \infty$ и $I_A = I_H = 0$, вследствие того, что взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора изменяется по синусоидальному закону от угла поворота ротора α , ЭДС E_{A0} выходной обмотки, наводимая потоком первичной обмотки Φ_S , будет синусоидальной функцией угла α :

$$E_{A0} = E_{Am} \sin \alpha, \quad (8)$$

где E_{Am} - максимальная ЭДС обмотки A , наводимая в ней в случае совпадения осей обмоток A и S ($\alpha=90^\circ$).

Максимальную ЭДС E_{Am} можно выразить через ЭДС E_S , наводимую потоком Φ_S в первичной обмотке статора S и отношение эффективных чисел витков w_S и w_A .

Эффективные числа витков, по сравнению с истинными равны соответственно:

$$w_S = w'_S k_{обS}, w_A = w'_A k_{обA},$$

где $w'_S, w'_A, k_{обS}, k_{обA}$ - истинные числа витков обмоток S и A и обмоточные коэффициенты.

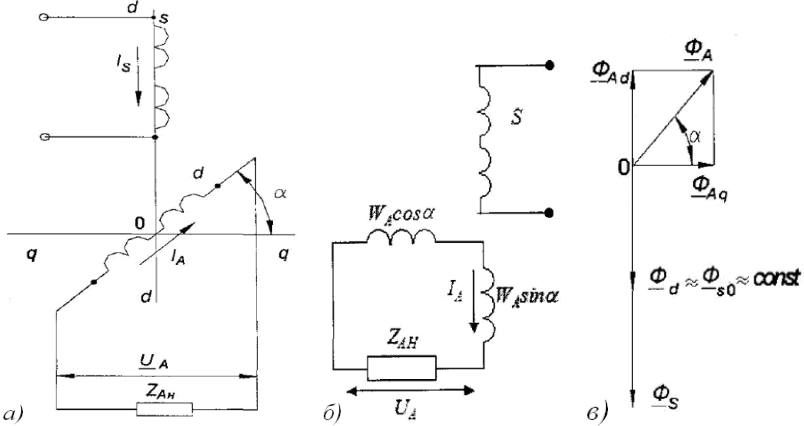


Рис. 17. Синусный вращающийся трансформатор: а - схема включения, б - эквивалентная схема, в - векторная диаграмма

Как и в обычном трансформаторе так как $E_{Am} = \frac{w_A}{w_S} E_S$, то коэффициент трансформации равен

$$\frac{U_A}{U_S} = \frac{E_{Am}}{E_S} = \frac{w_A}{w_S} = K_m, \quad (9)$$

причем w_A/w_S - максимальный коэффициент трансформации.

С учетом (9) выражение ЭДС (8) при холостом ходе имеет вид:

$$\underline{E}_{A0} = \underline{E}_S k_m \sin \alpha = \underline{E}_S k(\alpha).$$

Отсюда

$$k(\alpha) = \frac{\underline{E}_{A0}}{\underline{E}_S}. \quad (10)$$

Полное число витков обмотки w_A можно рассматривать как геометрическую сумму «продольных витков» ($w_A \sin \alpha$), ось которых совпадает с осью обмотки S, и «поперечных витков» ($w_A \cos \alpha$), ось которых перпендикулярна оси обмотки S, что позволяет заменить схему (рис 17а) на эквивалентную (рис 17б).

Если не учитывать падения напряжения на обмотке возбуждения S

$$E_{A0} \approx U_S k_m \sin \alpha = U_S k(\alpha), \quad (11)$$

где $k(\alpha) = (w_A / w_S) \sin \alpha$.

При подключении роторной обмотки к нагрузке, когда $Z_{AH} \neq \infty$, по вторичной обмотке протекает ток I_A , величина определяется величиной ЭДС обмотки А, а также суммой собственного сопротивления обмотки А и сопротивления нагрузки Z_{AH} :

$$I_A = \frac{E_A}{Z_A + Z_{AH}}. \quad (12)$$

Ток I_A создает поток Φ_A , направленный по оси обмотки А (Рис.17в), который можно разложить на два потока: поток Φ_{Ad} , размагничивающий ВТ, образованный током I_A , протекающим по «продольным виткам» и направленный против потока статора Φ_S , и поток Φ_{Aq} , образованный током I_A , протекающим по «поперечным виткам» и направленный по поперечной оси:

$$\Phi_{Ad} = \Phi_A \sin \alpha, \quad \Phi_{Aq} = \Phi_A \cos \alpha.$$

Размагничивающее действие потока Φ_{Ad} компенсируется увеличением тока I_S в статорной обмотке. Суммарный поток по продольной оси, как при холостом ходе, так и при нагрузке остается практически постоянным ($\Phi_d \approx \Phi_{S0} = \text{const}$). Этот поток наводит в обмотке А («продольных витках») ЭДС самоиндукции E_{AM} , приблизительно равную ЭДС холостого хода:

$$E_{AM} = E_{A0} = E_S k_m \sin \alpha = E_S k(\alpha) \quad (13)$$

Поперечный поток Φ_{Aq} в ВТ с двумя обмотками ничем не компенсируется, он является потоком самоиндукции для «поперечных витков» и наводит в них ЭДС самоиндукции E_{Aq} , значение которой можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{Aq} &= -j I_A \omega L_{Aq} = -j I_A \omega w_{Aq}^2 \Lambda_m = -j I_A \omega w_A^2 \cos^2 \alpha \Lambda_m = \\ &= -j \frac{E_A}{Z_A + Z_{AH}} \omega w_A^2 \cos^2 \alpha \Lambda_m = -j \frac{\omega w_A^2 \Lambda_m}{Z_A + Z_{AH}} E_A \cos^2 \alpha = \\ &= \underline{a} E_A \cos^2 \alpha \end{aligned} \quad (14)$$

где $\underline{a} = \frac{j \omega w_A^2 \Lambda_m}{Z_A + Z_{AH}}$ - комплексный коэффициент, зависящий от параметров ВТ и частоты сети, I_A -ток, определяемый по (12), Λ_m - магнитная проводимость, которая при равномерном воздушном зазоре не зависит угла поворота α .

Таким образом, ЭДС E_A обмотки А может быть определена как сумма ЭДС взаимной индукции E_{AM} и ЭДС самоиндукции E_{Aq} :

$$\underline{E}_A = \underline{E}_{AM} + \underline{E}_{Aq} = \underline{E}_S k_m \sin \alpha - a \underline{E}_A \cos^2 \alpha .$$

Следовательно:

$$\underline{E}_A = \frac{\underline{E}_S k_m \sin \alpha}{1 + a \cos^2 \alpha} . \quad (15)$$

Согласно (14), ЭДС E_A обмотки А при нагрузке не является синусоидальной функцией угла поворота α , что связано с наличием поперечного потока Φ_{Aq} . На рис.18 представлены ЭДС E_{A0} при холостом ходе, ЭДС E_A при нагрузке и ΔE_A - погрешность, вносимая поперечным Φ_{Aq} как функции угла поворота ротора. Величина погрешности ΔE_A зависит от значения a , поэтому в реальных ВТ она значительно ниже, чем на рис.18, где $a=1$.

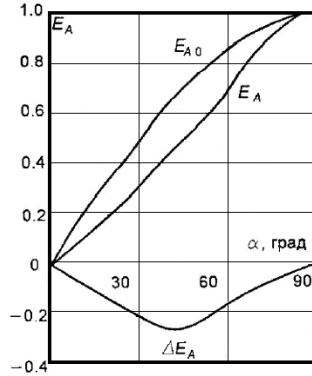


Рис.18. Зависимости ЭДС обмотки А при холостом ходе E_{A0} , ЭДС при нагрузке E_A и погрешности ΔE_A от угла поворота ротора α

Из-за наличия погрешности такие ВТ применяются лишь в тех случаях, когда режим их работы близок к холостому ходу. Чаще всего применяются СКВТ.

Синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы имеют четыре обмотки (рис.19 а) и $\underline{Z}_S = \underline{Z}_k, \underline{Z}_A = \underline{Z}_B$. При подключении обмотки S статора к сети переменного тока, ее магнитный поток, сцепляясь с витками обмоток А и В ротора, наводит в них ЭДС. Так как обмотка S сдвинута в пространстве на 90° , относительно обмотки А, то ЭДС обмотки В изменяется по закону $\cos \alpha$. ЭДС обмотки В равна при холостом ходе:

$$\underline{E}_{B0} = \underline{E}_S \frac{w_B}{w_S} \cos \alpha = \underline{E}_S k_m \cos \alpha , \quad (16)$$

а ток равен

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_{BH}}. \quad (17)$$

Этот ток создает магнитный поток Φ_B , направленный по оси обмотки В. Данный поток, как и ранее, можно разложить на продольную Φ_{Bd} и поперечную Φ_{Bq} составляющие (Рис.19б):

$$\Phi_{Bd} = \Phi_B \cos \alpha,$$

$$\Phi_{Bq} = \Phi_B \sin \alpha.$$

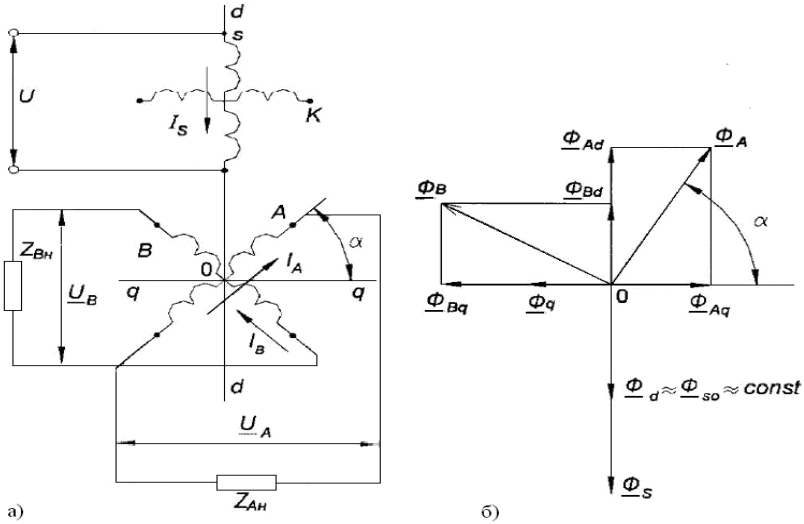


Рис. 19. Схема включения синусно-косинусного вращающегося трансформатора (а) и векторная диаграмма его магнитных потоков (б)

По аналогии с (14-15)

$$\underline{E}_{Bq} = -b\underline{E}_B \sin^2 \alpha; \underline{E}_B = \underline{E}_{Bn} + \underline{E}_{Bq}; \underline{E}_B = \underline{E}_S k_m \cos \alpha - b\underline{E}_B \sin^2 \alpha;$$

$$\underline{E}_B = \frac{\underline{E}_S k_m \cos \alpha}{1 + b\underline{E}_B \sin^2 \alpha}. \quad (18)$$

Как следует из (18), ЭДС E_B , как и ЭДС E_A , не является гармонической функцией угла α . Отклонение от этой функции в обеих обмотках объясняется наличием потока Φ_{Aq} .

Из диаграммы (рис.19б) видно, что поперечные потоки Φ_{Aq} и Φ_{Bq} направлены встречно. Это значит, что при наличии двух обмоток суммарный поперечный поток $\underline{\Phi}_q = \underline{\Phi}_{Aq} + \underline{\Phi}_{Bq}$ будет меньше, чем при на-

личии одной обмотки. Выполняя определенные условия $\underline{\Phi}_{Aq} = -\underline{\Phi}_{Bq}$ можно устранить вызванную этими потоками погрешность.

Симметрирование синусно-косинусных вращающихся трансформаторов (СКВТ) - это подбор сопротивления цепей статорных или роторных обмоток, при котором амплитуды ЭДС выходных обмоток изменяются строго по гармоническому закону от угла поворота α . Цель любого симметрирования - компенсация поперечного потока Φ_q , вносящего погрешность в выходную характеристику. Симметрирование СКВТ осуществляется либо со стороны ротора - вторичное симметрирование, либо со стороны статора - первичное симметрирование.

Вторичное симметрирование состоит в подборе цепей роторных обмоток, при которых $\Phi_q = 0$. Для этого необходимо, чтобы нулю была равна сумма МДС, создаваемых «поперечными витками обмоток», т.е. чтобы $\underline{F}_{Aq} + \underline{F}_{Bq} = 0$ или $\underline{F}_{Aq} = -\underline{F}_{Bq}$.

Согласно рис.19 имеем:

$$\underline{I}_A w_A \cos \alpha = -\underline{I}_B w_B \sin \alpha$$

или, выражая токи через ЭДС и сопротивления, получим:

$$\begin{aligned} \frac{E_A}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AH}} w_A \cos \alpha &= -\frac{E_B}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_{BH}} w_B \sin \alpha \\ \frac{E_S k_m \sin \alpha \cos \alpha}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AH}} &= -\frac{E_S k_m \sin \alpha \cos \alpha}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_{BH}}, \end{aligned} \quad (19)$$

так как $w_A = w_B$. Следовательно, условием вторичного симметрирования является равенство полных сопротивлений цепей обмоток ротора:

$$\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AH} = \underline{Z}_B + \underline{Z}_{BH}. \quad (20)$$

Так как обычно $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B$, то для осуществления вторичного симметрирования необходимо, чтобы сопротивление нагрузки обмотки А было равно сопротивлению нагрузки обмотки В:

$$\underline{Z}_{AH} = \underline{Z}_{BH}. \quad (21)$$

Особенностью вторичного симметрирования является то, что входное сопротивление \underline{Z}_{ex} и потребляемый из сети ток $\underline{I}_S = \frac{U_S}{\underline{Z}_S}$ при постоянном напряжении \underline{U}_S не зависит от угла поворота и равен соответственно:

$$\underline{I}_S = \frac{E_S k_m^2}{\underline{Z}_R + \underline{Z}_{RH}} \approx \frac{U_S k_m^2}{\underline{Z}_R + \underline{Z}_{RH}} = \frac{U_S}{\underline{Z}_{ex}} = const, \quad (22)$$

где $\underline{Z}_{ex} = \frac{\underline{Z}_R + \underline{Z}_{RH}}{k_m^2}$ - входное сопротивление ВТ, $\underline{Z}_R = \underline{Z}_A = \underline{Z}_B$, а $\underline{Z}_{RH} = \underline{Z}_{AH} = \underline{Z}_{BH}$.

Однако при вторичном симметрировании выходное сопротивление зависит от угла поворота, что ограничивает применение СКВТ с вторичным симметрированием.

Наличие вторичного симметрирования проверяется либо с помощью амперметра, включенного в цепь обмотки S, либо с помощью вольтметра, включенного на зажимы обмотки K статора.

Метод амперметра основан на том, что входное сопротивление \underline{Z}_{ex} при вторичном симметрировании не зависит от α . Это значит, что при повороте ротора ток (в пределах погрешности) не изменяется.

Метод вольтметра основан на том, что при вторичном симметрировании отсутствует поперечный поток, то есть ЭДС квадратурной обмотки, а, следовательно, и показания вольтметра, при этом равны нулю (в пределах погрешности).

Первичное симметрирование СКВТ сводится к включению в цепь квадратурной обмотки K определенного сопротивления \underline{Z}_{KH} . Условием первичного симметрирования является равенство полных сопротивлений цепей обмоток статора S и K.

$$\underline{Z}_{ист} + \underline{Z}_л + \underline{Z}_S = \underline{Z}_K + \underline{Z}_{KH},$$

где $\underline{Z}_{ист}, \underline{Z}_л, \underline{Z}_S$ - соответственно сопротивления источника питания, линии передачи и сопротивления, сопротивление, подключаемое к обмотке K.

Обычно сопротивление линии весьма мало ($\underline{Z}_K \approx 0$), собственные сопротивления обмоток S и K равны, поэтому условием первичного симметрирования является равенство: $\underline{Z}_{ист} = \underline{Z}_{KH}$.

В этом случае, если СКВТ питается от источника большой мощности, сопротивление которого равно $\underline{Z}_{ист} = 0$, то и $\underline{Z}_{KH} = 0$, то есть для осуществления первичного симметрирования необходимо замкнуть накоротко квадратурную обмотку.

При первичном симметрировании выходное сопротивление не зависит от угла поворота ротора ($\underline{Z}_{вых} = \text{const}$). Однако входное сопротивление зависит от угла поворота α .

На практике, там, где это возможно, применяют и первичное, и вторичное симметрирование,

Основным требованием, предъявляемым к ВТ, является точность воспроизведения тех или иных функциональных зависимостей. ВТ, как

и любые другие информационные машины, имеют погрешности, которые в зависимости от физической природы делятся на четыре группы:

1) принципиальные погрешности ВТ - это отклонение выходных характеристик от синусоидальной и косинусоидальной вследствие неточности симметрирования; у линейных - отклонение выходной характеристики от линейной вследствие неточности аппроксимации;

2) конструктивные погрешности вызываются в основном несинусоидальностью распределения МДС обмоток вдоль окружности машины, изменением магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие наличия пазов на поверхности статора и ротора, нелинейностью кривой намагничивания и явлением гистерезиса. Уменьшение этих погрешностей достигается путем применения специальных «синусных» схем обмоток, за счет скоса пазов статора и ротора, выполнения магнитопровода ВТ ненасыщенным из пермаллоя с узкой петлей намагничивания;

3) основными источниками технологических погрешностей являются эксцентриситет расточек статора и ротора, асимметрия магнитопровода, неточность расположения и скоса пазов, наличие короткозамкнутых витков в обмотках и листов в магнитопроводе, ошибки при выполнении обмотки. Для уменьшения этих погрешностей устанавливаются жесткие технологические допуски. Влияние технологических погрешностей можно представить как появление некоторой добавочной ЭДС $E_{доб}$ в выходных обмотках. ЭДС $E_{доб}$ имеет в общем случае две составляющие: ЭДС (напряжение) ошибки $E_{ош}$, совпадающую по фазе с выходной ЭДС, и остаточную ЭДС $E_{ост}$, сдвинутую по фазе на 90° . При этом в расчетных точках с нулевым выходным напряжением (нулевых положениях) ЭДС становится отличной от нуля. ЭДС ошибки $E_{ош}$ может быть скомпенсирована основной выходной ЭДС путем дополнительного поворота ротора на угол, при котором $E_{вых} = -E_{ош}$, т.е. обуславливает асимметрию нулевых положений. Остаточная ЭДС $E_{ост}$ не компенсируется дополнительным поворотом ротора. Поэтому во вращающихся трансформаторах выходное напряжение не обращается в нуль в пределах оборота, а лишь приобретает некоторое минимальное значение. Остаточная ЭДС приводит к изменению фазы выходной ЭДС при изменении угла поворота ротора. Технологические погрешности приводят также к тому, что поток возбуждения наводит ЭДС в квадратурной обмотке ВТ;

4) к эксплуатационным погрешностям относятся, например, температурная погрешность, связанная с изменением активных сопротивлений обмоток при изменении температуры. Колебание частоты напряжения питания вызывает изменение индуктивных сопротивлений.

Класс точности вращающихся трансформаторов устанавливается для нормальных условий эксплуатации. При определении класса точности учитываются следующие показатели:

1) погрешность отображения функциональной зависимости, определяемая по отношению к наибольшей выходной ЭДС; у СКВТ различных классов погрешность допускается от 0,005 до 0,2 %, у ЛВТ - от 0,02 до 0,2 %.

2) асимметрия нулевых положений ротора ВТ, под которой понимается отклонение действительных нулевых положений ротора от теоретических 0° , 90° , 180° и 270° ; у СКВТ различных классов асимметрия допускается от $10''$ до $6' 40''$;

3) ЭДС квадратурной обмотки, определяемая по отношению к напряжению возбуждения; у СКВТ различных классов допускается от 0,04 до 1,2%;

4) остаточная ЭДС, определяемая по отношению к наибольшей выходной ЭДС; у СКВТ различных классов допускается от 0,03 до 0,1 %; у ЛВТ - от 0,02 до 0,3 %;

5) разность коэффициентов трансформации выходных обмоток, определяемая по отношению к наибольшему из этих коэффициентов; у СКВТ различных классов допускается от 0,005 до 0,2 %.

Класс точности устанавливается по наихудшему из параметров.

В лабораторном стенде для изучения применяется отечественный синусно-косинусный вращающийся трансформатор типа 2.5ВТ. Основные технические характеристики данного типа ВТ представлены в [5]. Для более подробного изучения теории ВТ следует изучить следующие источники [6,7]. Применение вращающихся трансформаторов в робототехнике смотрите в [2].

Тахогенератор постоянного тока

Тахогенератор постоянного тока - это машина постоянного тока с независимым электромагнитным возбуждением (рис. 20а) или возбуждением постоянными магнитами (рис. 20б), работающая в генераторном режиме.

Тахогенераторы используются для измерения и преобразования скорости вращения валов рабочих механизмов, а также в качестве корректирующих элементов выполняющих функции электромеханического дифференцирования, если за входной сигнал принять угол поворота ротора или введения обратной связи по скорости. Помимо тахогенераторов постоянного тока существуют тахогенераторы переменного тока, или асинхронные тахогенераторы. Принцип их действия изложен в [1].

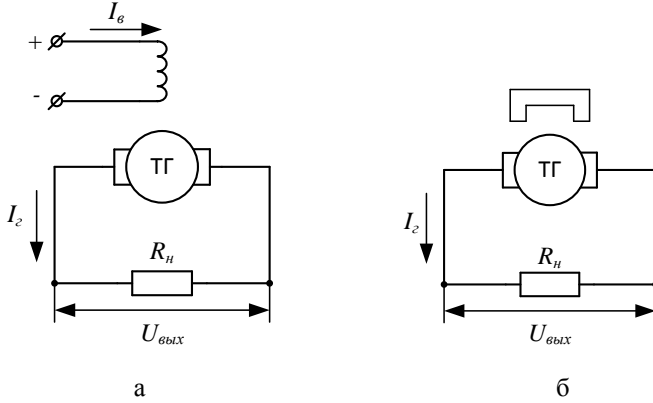


Рис. 20. Схемы тахогенераторов постоянного тока

Особенность работы тахогенератора состоит в том, что якорь обычно включен на постоянное сопротивление R_n . Ток в цепи якоря

$$I_z = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R_n} = \frac{c \cdot n \cdot \Phi_g}{R_{\text{вн}} + R_n}, \quad (23)$$

где $R_{\text{вн}}$ - внутреннее сопротивление тахогенератора; c - конструктивная постоянная тахогенератора; n - скорость вращения якоря; Φ_g - поток возбуждения.

Выходное напряжение тахогенератора

$$U_{\text{вых}} = \frac{c \cdot \Phi_g \cdot R_n}{R_{\text{вн}} + R_n} \cdot n = \frac{c \cdot \Phi_g \cdot R_n}{R_{\text{вн}} + R_n} \cdot \frac{30}{\pi} \omega \quad (24)$$

Величины числителя и знаменателя дроби выражения (24) постоянны, поэтому можно записать

$$U_{\text{вых}} = k \cdot \omega = k \frac{d\alpha}{dt}, \quad (25)$$

где k - коэффициент преобразования тахогенератора

$$k = \frac{30 \cdot c \cdot \Phi_g}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{вн}}}{R_n}}, \quad (26)$$

Главное требование, предъявляемое к тахогенераторам, заключается в линейности статической характеристики (Рис.21), задаваемой уравнением (25). Анализируя выражение (24) можно сделать вывод, что статическая характеристика тахогенератора линейна, если $\Phi_g = \text{const}$. Однако, магнитный поток возбуждения может изменяться

под действием реакции якоря. Отклонение характеристики 2 от линейного закона вызвано тем, что с увеличением скорости вращения возрастает ток якоря, поперечные ампер-витки якоря под сбегаящим краем полюса увеличивают индукцию, которая при $\omega > \omega_0$ достигает стадии насыщения, т.е. в дальнейшем изменяется непропорционально ампер-виткам.

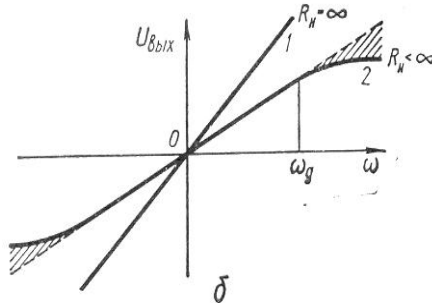


Рис.21. Статическая характеристика тахогенератора

Кроме того, на линейность статической характеристики влияет погрешность от наличия переходного контакта щеток. Особенно заметно искажение при малых скоростях.

Появляется нелинейность типа зоны нечувствительности (рис. 22). Граница зоны нечувствительности может быть определена как

$$\omega_{\min} = \frac{\Delta U_{щ}}{k_{\max}},$$

где $\Delta U_{щ}$ - падение напряжения на щеточном контакте;

k_{\max} - максимальное значение коэффициента преобразования. Для уменьшения зоны нечувствительности применяют щетки с малым переходным сопротивлением. Более подробно о данных источниках погрешностей приводится в [1].

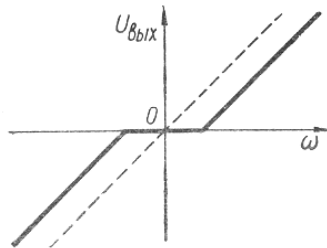


Рис.22. Статическая характеристика тахогенератора

При использовании тахогенераторов помимо погрешности от зоны нечувствительности и влияния якоря необходимо учитывать следующие погрешности:

1. *Температурная погрешность* связана с изменением сопротивления обмотки якоря и особенно обмотки возбуждения, если последняя имеется. (При увеличении температуры меди на 50°C ее сопротивление увеличивается на 20%). При увеличении сопротивления обмотки возбуждения уменьшается ток, магнитный поток и выходное напряжение тахогенератора. Температурную погрешность можно уменьшить различными путями. Например, включением последовательно с обмоткой возбуждения терморезистора, стабилизирующего сопротивление всей цепи. Достаточно эффективный способ - сильное насыщение магнитной цепи. В этом случае даже значительные колебания тока возбуждения весьма слабо отражаются на колебаниях магнитного потока возбуждения.

В тахогенераторах с постоянными магнитами подобной проблемы практически не существует, а изменение сопротивления обмотки якоря приводит к очень небольшим погрешностям.

2. *Асимметрия выходного напряжения* в тахогенераторах возникает из-за смещения щеток с геометрической нейтрали (при сдвиге щеток с нейтрали, возникает продольная реакция якоря, которая носит намагничивающий характер при одном направлении вращения и размагничивающий при другом. Для устранения этой погрешности надо очень точно устанавливать и надежно закреплять щеточный узел, не допускать люфтов в щеткодержателях.

3. *Пульсация выходного напряжения* является специфической погрешностью тахогенератора постоянного тока. Различают зубцовые, якорные и коллекторные пульсации.

Зубцовые пульсации обуславливаются зубчатым строением якоря, что приводит к периодическому изменению проводимости воздушного зазора. С целью устранения зубцовых пульсаций выполняют скос пазов, выбирают такую ширину полюсного наконечника, в пределах которой укладывается целое число зубцовых делений (рис. 23). Иногда применяют магнитные клинья.



Рис.23. Зубцовые пульсации тахогенераторов постоянного тока

Якорные пульсации обуславливаются неравномерным воздушным зазором, неодинаковой магнитной проводимостью вдоль и поперек

проката. Для ослабления этой причины выполняют относительно большой зазор, по высокому классу точности обрабатывают посадочные поверхности, применяют высококачественные подшипники, выполняют веерообразную шихтовку сердечника якоря.

Коллекторные пульсации возникают из-за конечного числа коллекторных пластин, неплотного прилегания щеток, вибраций щеточного узла. Для их устранения выполняют максимально возможное число коллекторных пластин, тщательно подбирают ширину щеток, улучшают качество изготовления щеткодержателей, коллектора и т.д.

В лабораторной работе №2 будет исследоваться тахогенератор постоянного тока ТГП-1. Технические характеристики данного типа ТГ приводятся в [5].

Для глубокого освоения студентам рекомендуется ознакомиться с дополнительной литературой [6,7].

Лабораторная работа № 1 Исследование датчиков углового перемещения

Цель работы

Изучение устройства, принципа действия и основных характеристик однотактного и двухтактного потенциометрического датчика, инкрементального оптического энкодера, вращающегося трансформатора, работающего в синусно-косинусном режиме, а также методов экспериментального исследования данных устройств и определения точности преобразования угла поворота в электрический сигнал;

Содержание работы

- В лабораторной работе будут исследоваться следующие датчики:
- потенциометрический датчик ПТП5К1 (однотактная схема включения);
 - одинарный потенциометрический датчик с коррекцией ПТП5К1 (двухтактная схема включения)
 - синусно-косинусный вращающийся трансформатор 2,5 ВТ ЛШЗ 010.399
 - инкрементальный энкодер TRD-2000S

Описание лабораторной установки

Прежде, чем приступить к экспериментальному исследованию потенциометрического датчика, необходимо ознакомиться с принципом их действия и схемой расположения обмоток и гнезд по мнемограмме на стенде. Необходимо также изучить назначение элементов стенда.

Субблок «Датчики положения» лабораторного стенда представлен на рис.24. Данный блок представляет собой ВТ, оптический энкодер и потенциометрический датчик угла поворота, соединенные ременными передачами. Кроме того, на валу энкодера жестко закреплена ручка с меткой для грубого определения угла поворота.

Гнезда А, В и \perp - необходимы для подключения выходов оптического энкодера к измерителю PF2.

В левой части функционального блока «Датчики положения» установлены переключатели магазинов сопротивлений, позволяющие ступенчато изменять сопротивления нагрузочных резисторов $R_{нагр1}$ и $R_{нагр2}$.

На панели также расположены гнезда В1 и В2, К1 и К2, U_{cos} и U_{sin} , соединенные соответственно с концами первичной, компенсационной, косинусной и синусной обмоток ВТ для сборки схемы эксперимента и подключения вольтметра или осциллографа.

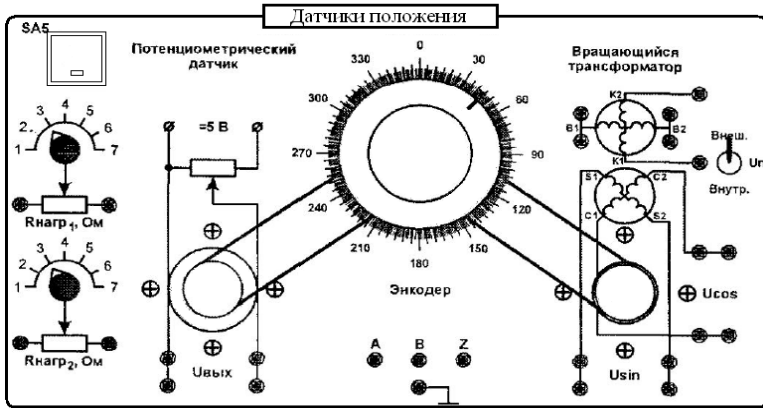


Рис.24. Субблок для исследования датчиков углового положения

На панели также расположены гнезда $B1$ и $B2$, $K1$ и $K2$, U_{\cos} и U_{\sin} , соединенные соответственно с концами первичной, компенсационной, косинусной и синусной обмоток ВТ для сборки схемы эксперимента и подключения вольтметра или осциллографа.

Исследуемый потенциометрический датчик включен по схеме делителя напряжения. На панели расположены гнезда $L/вых$, соединенные соответственно с общим выводом и выводом движка потенциометрического датчика для сборки схемы эксперимента и подключения вольтметра. При этом вольтметр и нагрузка включаются параллельно нижнему плечу потенциометра.

На положительный и общий выводы потенциометра подано постоянное напряжение 5 В.

Для питания ВТ в схеме стенда предусмотрен встроенный генератор синусоидальных колебаний амплитудой 10В и частотой 400 Гц. Кроме того, в конструкции стенда предусмотрен переключатель режима питания ВТ: в положении «Внутр.» ВТ питается от встроенного генератора, в режиме «Внеш.» - от внешнего источника переменного напряжения. Конструкцией ВТ и лабораторного стенда предусмотрено первичное и вторичное симметрирование.

Лабораторная установка для исследования потенциометрических измерителей-преобразователей в двухтактном режиме работы собрана на типовом лабораторном столе и содержит наборное поле с гнездами для коммутации элементов схемы при помощи гибких проводников, измерительные элементы $PV1$ и $PV2$, расположенные на наборном поли, блок источник питания.

Измерительные приборы PV1 и PV2 предназначены соответственно для измерения входного и выходного напряжений. Потенциометры RP1, RP2 углового перемещения применяются для исследования двухтактной схемы, а потенциометр RPS углового перемещения применяется для исследования одноактной схемы потенциометрических измерителей-преобразователей. Резисторы $R1 = 1 \text{ кОм}$, $R2 = 4,7 \text{ кОм}$ представляют собой нагрузку потенциометрических измерителей - преобразователей.

Рекомендации к выполнению исследования

Перед выполнением исследования необходимо ознакомиться с лабораторной установкой, изучить паспортные данные исследуемых в лабораторной работе датчиков. Повторить следующие разделы теории соответствующих дисциплин:

- физика (электромагнетизм): заряды и токи в магнитном поле; магнетики; электромагнитная индукция;
- электротехника: законы Ома и Кирхгофа; цепи постоянного и переменного тока, теория трансформаторов и машин переменного тока;
- информатика: системы счисления, логические функции и элементы;
- метрология: оценка погрешности результатов измерения.

Далее необходимо изучить теорию из данной лабораторной работы и дополнительную литературу.

Порядок выполнения исследования

1. Снятие и построение передаточной характеристики инкрементального оптического энкодера

Для снятия экспериментальной передаточной характеристики энкодера подключить Входы А, В и \perp индикатора PF2 соответственно к выходам А, В и \perp энкодера. Вращая ручку от 0° до 360° , снять не менее 20 точек через равные промежутки, как по часовой стрелке, так и против нее, обязательно включая 0-90-180-360. При этом фиксировать значения угла поворота на индикаторе в режиме « α , град» и тут же фиксировать число импульсов на том же индикаторе, переключившись в режим «имп». Данные занести в табл. 2.

Таблица 2

α , град				
N, число импульсов				

По итогам эксперимента построить передаточную характеристику $N=f(\alpha)$. По формуле $N_0 = N/\alpha$ определить разрешающую способность оптического энкодера.

Подключив электронный осциллограф к выходам А, В и \perp энкодера, наблюдать за разностью фаз выходных сигналов А и В при вращении в разные направления. Зарисовать эпюры сигналов.

Сравнить полученные данные с паспортными.

2. Снятие и построение характеристики холостого хода для синусной обмотки

Для снятия экспериментальной характеристики подключить вольтметр к зажимам обмотки U_{\sin} . Входы А, В и \perp индикатора PF2 подключить соответственно к выходам А, В и \perp энкодера. Установить тумблером режим индикации « α , град». Вращая ручку от 0° до 360° , снять $U_{\sin} = E_{A0}$ и $E_s (B_1 \text{ и } B_2)$ и α в не менее чем 20 точках через равные промежутки, как по часовой стрелке, так и против нее, обязательно включая 0-90-180-270-360. Отметить положение ручки (α_{\min}) при котором U_{\sin} минимально. В дальнейших экспериментах учитывать $\Delta\alpha = \alpha_{\min}$ как постоянную погрешность и определить фактическое значение угла поворота ротора. Значение $k(\alpha)$ вычислить по формуле (10). Данные занести в табл. 3.

Таблица 3

Измерение	α , град			
	E_{A0} , В			
	E_s , В			
Расчет	α , град			
	$k(\alpha)$			

Найти коэффициент трансформации K_m для максимального значения E_{A0} и ЭДС E_s , наводимой в первичной обмотке статора. Построить зависимость $E_{A0} = f(\alpha)$. Эта зависимость должна практически не отличаться от идеальной синусоиды.

3. Снятие и построение характеристики холостого хода для косинусной обмотки

Для снятия экспериментальной характеристики подключить вольтметр к зажимам обмотки U_{\cos} . Дальнейшие действия производятся согласно последовательности, представленной в п.3 ($U_{\cos} = E_{B0}$) и

заносятся в табл. 4. Значение K_m необходимо определить для $E_{B0 \max}$ и $\alpha=0$.

Таблица 4

Измерение	α , град			
	E_{B0} , В			
	E_s , В			
Расчет	α , град			
	$k(\alpha)$			

Следует убедиться в равенстве коэффициентов K_m для обеих обмоток.

4. Снятие характеристик синусной обмотки при нагрузке

Для этого подключить нагрузку $R_{нагр1}=1000, 470$ Ом к синусной обмотке, установив соответствующие переключки. Вольтметр подключается к гнездам U_{\sin} . Вращая ручку, изменять угол α в диапазоне $0 \div 360^\circ$, снять значения $E_A = U_{\sin} = f(\alpha)$ при нагрузке. Результаты занести в табл. 5.

Таблица 5

Измерение	α ,град			
	E_A , В			
	R_H , Ом			
Расчет	E_{A0} , В			
	ΔE_A , В			
	$\Delta E_A \%$, %			

Значения ΔE_A и $\Delta E_A \%$ определить по формулам:

$$E_{A0} = U_{\sin M} \cdot \sin \alpha, U_{\sin M} = E_{A0 \max} \text{ из п.2 при } \alpha=90^\circ;$$

$$\Delta E_A = E_{A0} - E_A;$$

$$\Delta E_A \% = 100(\Delta E_A) / E_{A \max}$$

По данным табл. 5 построить опытную кривую $E_A = f(\alpha)$, а также расчетные кривые E_{A0} , ΔE_A , $\Delta E_A \%$. Для наглядности, аналогично рис. 18 построить в диапазоне $\alpha=0 \div 90^\circ$.

5. Снятие характеристик косинусной обмотки при нагрузке

Для этого подключить нагрузку $R_{нагр1}=1000, 470$ Ом к косинусной обмотке, установив соответствующие переключки. Вольтметр подключается к гнездам U_{\cos} .

Характеристики снимаются аналогично 4, $U_{\cos \max} = E_{B0 \max}$ из 3 при $\alpha=0^\circ$. Результаты занести в табл. 6.

Таблица 6

Измерение	α , град				
	E_B , В				
	R_{H1} , Ом				
Расчет	E_{B0} , В				
	ΔE_B , В				
	ΔE_B %, %				

6. Снятие характеристик ВТ при первичном симметрировании

Собрать при помощи перемычек схему ВТ с первичным симметрированием, соединив коротко гнезда К1 и К2.

Вращая ручку в диапазоне $\alpha=0\div 360^\circ$ снять характеристики E_A , $E_B = f(\alpha)$. Результаты свести в табл. 7.

Таблица 7

Измерение	α , град					
	E_A , В					
	E_B , В					
Расчет	E_{A0} , В					
	E_{B0} , В					
	ΔE_A , В ΔE_B , В					

7. Снятие характеристик ВТ при вторичном симметрировании

Собрать при помощи перемычек схему ВТ с вторичным симметрированием, установив $R_{\text{нагр}1 \sin} = R_{\text{нагр}2 \cos} = 1000, 470 \text{ Ом}$.

Вращая ручку в диапазоне $\alpha=0\div 360^\circ$ снять характеристики E_A , $E_B = f(\alpha) = f(\alpha)$. Результаты свести в табл. 8.

Таблица 8

Измерение	α , град					
	E_A , В					
	E_B , В					
Расчет	E_{A0} , В					
	E_{B0} , В					
	ΔE_A , В ΔE_B , В					

Убедиться в близости полученных характеристик к синусоидальным, построив $E_A, E_B, \Delta E_A, \Delta E_B = f(\alpha)$.

8. Снятие и построение характеристики холостого хода потенциометрического датчика угла поворота (однотактная схема включения)

Для снятия экспериментальной характеристики подключить вольтметр PV1 к клеммам потенциометрического датчика $U_{\text{вых}}$. Вращая ручку от 0° до 360° снять не менее 20 точек через равные промежутки по часовой стрелке и после этого против нее, обязательно включая 0-90-180-360. Данные занести в табл. 9.

Таблица 9

По часовой стрелке	α , град				
	$U_{\text{вых0}}$, В				
Против часовой стрелки	α , град				
	$U_{\text{вых0}}$, В				

Построить зависимость $U_{\text{вых0}} = f(\alpha)$. Эта зависимость должна быть практически линейная. На одном графике зависимость, полученная при вращении рукоятки по часовой стрелке. На другом - против часовой.

9. Снятие и построение характеристики однотактного потенциометрического датчика угла поворота под нагрузкой (однотактная схема включения)

Для снятия экспериментальной характеристики подключить вольтметр PV1 к зажимам обмотки $U_{\text{вых}}$. К этим же клеммам подключить нагрузочное сопротивление $R_{\text{нагр1}}$, величина которого изменяется с помощью галетного переключателя от 100 до 10000 Ом. Вращая ручку от 0° до 360° снять не менее 20 точек через равные промежутки по часовой стрелке и после этого против нее, обязательно включая 0-90-180-360. Данные занести в табл. 10.

Построить зависимости $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$ на тех же графиках, что и зависимости $U_{\text{вых0}} = f(\alpha)$.

По построенным экспериментальным характеристикам $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$ определить абсолютные и относительные погрешности, обусловленные только нелинейностью характеристик $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$, соответствующих $R_{\text{нагр1}} \neq \infty$, при этом за идеальную характеристику $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$ необходимо принять характеристику, соответствующую $R_{\text{нагр1}} \neq \infty$ (10000 Ом).

Таблица 10

Нагрузка, Ом	470	По часовой стрелке	α , град			
			$U_{\text{вых0}}$, В			
		Против часовой стрелки	α , град			
			$U_{\text{вых0}}$, В			
	...	По часовой стрелке	α , град			
			$U_{\text{вых0}}$, В			
		Против часовой стрелки	α , град			
			$U_{\text{вых0}}$, В			
	10000	По часовой стрелке	α , град			
			$U_{\text{вых0}}$, В			
		Против часовой стрелки	α , град			
			$U_{\text{вых0}}$, В			

По формулам (2), (3) рассчитать и построить графики теоретических характеристик преобразования $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$. Эти графики следует построить на тех же графиках, что и экспериментальные. Сравнить теоретические и экспериментальные характеристики.

Рассчитать значения погрешности по формулам (4) и (5).

10. Снятие и построение характеристик потенциметрического датчика угла поворота (двухтактная схема включения)

Собрать последовательно схемы двухтактных потенциметрических измерителей-преобразователей на базе потенциметров RP1 и RP2 (см. рис. 3) типового лабораторного стенда см. описание лабораторной установки. Включить тумблер "сеть".

Выполнить действия согласно последовательности описанной в п.8 и п.9. В качестве сопротивления нагрузки использовать резисторы R_1 и R_2 .

Построить табл. 9 и табл.10 для каждой из схем включения, и сопротивлений нагрузки.

Требования к оформлению и содержанию отчета об исследовании

В отчете должны быть представлены:

1. Схемы включения вращающегося трансформатора (в рассматриваемых режимах работы), потенциометрического датчика (однотактного и двухтактных).
2. Таблицы результатов измерений по п.1-10 и соответствующие графики.
3. Оценка метрологических характеристик
4. Эпюры выходных напряжений по п.1.
5. Выводы (со ссылками на результаты измерений) по точности преобразования, удобству использования и согласованию датчиков с последующими каскадами управления.

Контрольные вопросы для подготовки к защите

1. Расскажите о конструктивном устройстве потенциометрического датчика, о схемах его включения.
2. Как снимаются передаточные характеристики на холостом ходу и под нагрузкой? Поясните причины их различия.
3. Какие существуют погрешности потенциометрических измерительных преобразователей? Назовите способы их устранения.
4. Какова зависимость погрешности потенциометрических измерительных преобразователей от коэффициента нагрузки?
5. Какой вид передаточных функций имеют исследуемые потенциометрические измерительные преобразователи с активной и индуктивной нагрузкой?
6. Каковы преимущества и недостатки рассматриваемых потенциометрических измерительных преобразователей?
7. Расскажите о конструктивном устройстве ВТ, о схемах включения обмоток и принципах действия в синусно-косинусном и линейном режимах работы, об областях применения.
8. Перечислите возможные причины погрешности измерений ВТ. Какие применяются меры для уменьшения погрешности?
9. С какой целью применяется симметрирование ВТ?
10. Каким образом осуществляется первичное (со стороны статора) и вторичное (со стороны ротора) симметрирование ВТ?
11. Как снимаются синусно-косинусные и линейная характеристики ВТ? Поясните вид этих характеристик.
12. Объясните отличия в виде характеристик в случаях отсутствия и наличия нагрузок на выходных обмотках ВТ.
13. Как устроен инкрементальный оптический энкодер?
14. Какой алгоритм определения угла поворота с помощью энкодера?

Лабораторная работа № 2 **Исследование датчиков частоты вращения**

Цель работы

Изучение режимов работы и основных характеристик тахогенератора постоянного тока и оптического энкодера, а также методов экспериментального исследования данных устройств и определения точности преобразования скорости и угла поворота в электрический сигнал.

Содержание работы

В лабораторной работе будут исследоваться:
- тахогенератор постоянного тока ТПП-1;
- инкрементальный энкодер TRDS-500.

Описание лабораторного стенда

Прежде, чем приступить к экспериментальному исследованию тахогенератора постоянного тока и оптического энкодера, необходимо ознакомиться с принципом их действия и схемой расположения обмоток и гнезд по мнемограмме на стенде. Необходимо также изучить назначение элементов стенда.

Субблок «Датчики частоты вращения» лабораторного стенда представлен на рис. 1. Данный блок представляет собой двигатель постоянного тока, оптический энкодер и тахогенератор постоянного тока, соединенные ременными передачами. Кроме того, в субблоке расположен потенциометр для плавного регулирования скорости приводного двигателя от 0 до 2500-3000 об/мин.

Индикация скорости вращения осуществляется с помощью индикатора «n, об/мин», расположенного в блоке индикации.

Индикация скорости вращения осуществляется при помощи вспомогательного прибора цифрового тахометра (см. руководство по эксплуатации).

Гнезда А, В и \perp необходимы для подключения выходов оптического энкодера к измерителю PF2 или осциллографу. Гнезда $U_{\text{вых}}$ необходимы для подключения выхода тахогенератора к измерителю PV1, работающему в режиме измерения постоянного напряжения или осциллографу.

В ходе лабораторной работы необходимо будет использовать переключатели магазинов сопротивлений, позволяющие ступенчато изменять сопротивления нагрузочных резисторов $R_{\text{нагр1}}$ и $R_{\text{нагр2}}$ и установленные в левой части функционального блока «Датчики положения».

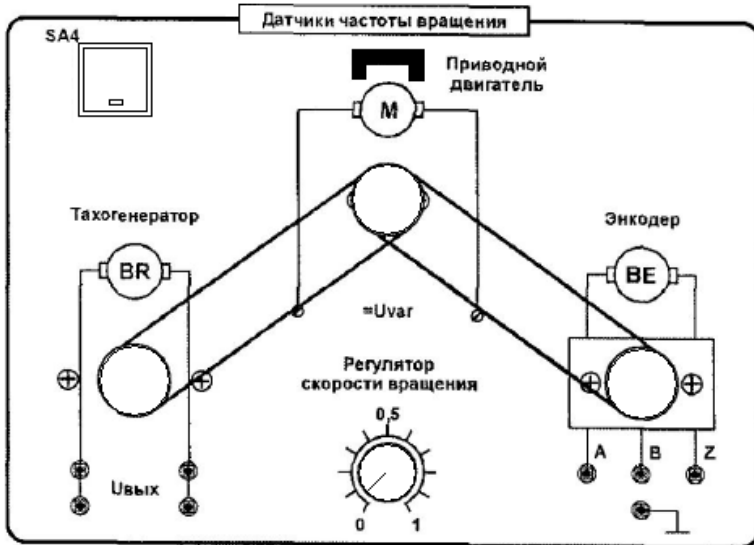


Рис. 25. Субблок для исследования датчиков частоты вращения

Для питания системы управления приводного электродвигателя, самого электродвигателя, а также оптического энкодера осуществляется от встроенного импульсного источника питания.

Для проверки работоспособности необходимо;

- подключить стенд с помощью сетевого кабеля к сети 220 В, 50 Гц;

- включить стенд выключателем SA1 при этом должен загореться встроенный в него индикатор «Питание»;

- включить питание функционального блока «Датчики частоты вращения» выключателем SA4, при этом должен загореться встроенный в него индикатор;

- подключить вольтметр PV1 в режиме измерения постоянного напряжения к выходам тахогенератора, а входы A, B и \perp индикатора PF2 - к выходам оптического энкодера. Изменяя скорость вращения приводного двигателя, необходимо наблюдать изменение показаний вольтметра в диапазоне 0,01... 15 В, а на индикаторе PF2 - изменение количества отсчитываемых энкодером импульсов.

Однофазный источник питания G1 предназначен для безопасного питания блоков счетчика импульсов A2 (409) и мультиметров A3 (509.3). Для измерения выходного напряжения резистивного датчика

можно использовать любой из мультиметров блока АЗ (509.3). После включения питания цепь готова к работе.

Рекомендации к выполнению исследования

Перед выполнением исследования необходимо ознакомиться с лабораторной установкой, с паспортными данными исследуемых устройств и повторить следующие разделы теории соответствующих дисциплин:

- электротехника: законы Ома и Кирхгофа; цепи постоянного и переменного тока, теория машин постоянного тока;
- метрология: оценка погрешности результатов измерения.

Далее необходимо изучить теорию из данной лабораторной работы и дополнительную литературу.

Порядок выполнения исследования

1. Снятие и построение передаточной характеристики холостого хода тахогенератора постоянного тока

Для снятия экспериментальной характеристики подключить вольтметр к выходным клеммам $U_{\text{вых0}}$ тахогенератора. Плавно изменяя скорость приводного двигателя с помощью ручки регулятора скорости, снять не менее 20 точек через равные промежутки, как в сторону увеличения скорости, так и в сторону ее уменьшения.

Данные занести в табл. 11.

Таблица 11

n, об/мин				
$U_{\text{вых}}$, В				

Построить зависимость $U_{\text{вых}}=f(n)$. Эта зависимость должна быть практически линейной.

2. Снятие и построение передаточной характеристики тахогенератора постоянного тока при нагрузке

Для снятия передаточной характеристики при нагрузке на выходе тахогенератора необходимо подключить к выходам тахогенератора нагрузку $R_{\text{нагр1}}$ (100 - 470 -1000 - 4700 - 10000 Ом). Плавно изменяя скорость приводного двигателя с помощью ручки регулятора скорости, снять не менее 20 точек через равные промежутки, как в сторону увеличения скорости, так и в сторону ее уменьшения. Данные занести в табл. 12.

Таблица 12

Нагрузка, Ом	100	п, об/мин			
		$U_{\text{вых}}$, В			
	...	п, об/мин			
		$U_{\text{вых}}$, В			
	10000	п, об/мин			
		$U_{\text{вых}}$, В			

Построить зависимости $U_{\text{вых}}=f(n)$ на тех же графиках, что и зависимости $U_{\text{вых0}}=f(n)$.

По построенным экспериментальным характеристикам $U_{\text{вых}}=f(n)$ определить абсолютные и относительные погрешности, обусловленные только нелинейностью характеристик $U_{\text{вых}}=f(n)$, соответствующих $R_{\text{нагр1}} \neq \infty$. при этом за идеальную характеристику $U_{\text{вых}}=f(n)$ необходимо принять характеристику, соответствующую $R_{\text{нагр1}} \neq \infty$ (10000 Ом).

Проанализировать паспортные данные исследуемого тахогенератора, изучить его характеристики.

3. Определение частоты вращения при помощи инкрементального энкодера

Для нахождения частоты вращения ротора при помощи энкодера необходимо подключить к выходам А, В и \perp энкодера щупы цифрового осциллографа.

Далее необходимо пригласить преподавателя для того чтобы настроить осциллограф на измерение частоты по двум каналам.

После настройки осциллографа можно наблюдать последовательности импульсов, частота которых зависит от скорости вращения приводного двигателя. С помощью частотомера встроенного в осциллограф сделать 3 измерения частоты импульсов обоих каналов, одновременно измеряя частоту вращения при помощи цифрового тахометра (**Не выставлять частоту вращения более 3000 об/мин**). Занести данные в табл. 13. Используя описание принципа действия инкрементального энкодера, определить количество импульсов за один оборот (pulse per revolution), т.е. разрешающую способность. По техническому описанию инкрементального энкодера подтвердить марку энкодера, зная, что выход у него дифференциальный. После определения разрешающей способности вычислить и занести в таблицу частоту вращения ротора двигателя, вычисленную по энкодеру в соответствии с формулой (6). Сравнить показания частоты вращения, получаемые с энкодера и тахометра. Заполнить таблицу 13.

Таблица 13

Частота вращения по тахометру, об/мин	Частота появления импульсов энкодера (выход А), Гц	Частота появления импульсов энкодера (выход В), Гц	Разрешающая способность, отсчетов/оборот	Частота вращения ротора двигателя вычисленная по энкодеру, об/мин

Подключившись с помощью щупа осциллографа к выходу Z энкодера пронаблюдать появление нулевого импульса на малых частотах вращения одновременно с импульсами канала А. С разрешения преподавателя сделать скриншоты осциллограмм, с каналами А и В, и с каналами А и Z и записать их на съемные flash-накопители.

Требования к оформлению и содержанию отчета об исследовании

В отчете должны быть представлены:

1. Схема включения тахогенератора
2. Таблицы результатов измерений по п.1, п.2 и п.3.
3. Графики статических характеристик по п.1 и п.2
4. Оценка диапазона нелинейности тахогенератора
5. Оценка метрологических характеристик и влияния нагрузки на выходное напряжение тахогенератора датчика
6. Эпюры напряжений по п.3
7. Выводы (со ссылками на результаты измерений) по точности преобразования и об источниках возникновения погрешностей исследуемых датчиках и об особенностях применения.

Контрольные вопросы для подготовки к защите

1. Какие приборы и субблоки необходимо использовать при исследовании работы тахогенератора и энкодера;
2. Опишите порядок проведения лабораторной работы. Какие эксперименты необходимо провести. Какие характеристики датчиков нужно снять?
3. Опишите, какой вид, на ваш взгляд, должны иметь экспериментальные характеристики тахогенератора и энкодера

4. Какие машины называются тахогенераторами, каков принцип их работы?
5. Назовите основные погрешности ТГ постоянного тока, их причины и пути снижения.
6. Какие характеристики имеют тахогенераторы? Что они означают?
7. Каковы причины нелинейности передаточных характеристик ТГ при нагрузке?
8. Выведите передаточную функцию тахогенератора постоянного тока.
9. Приведите примеры использования тахогенераторов в системах автоматизации (со схемами).
10. Какие устройства называют энкодерами? Объясните принцип работы абсолютного и инкрементального оптических энкодеров?
11. Каковы преимущества абсолютных и инкрементальных энкодеров?
12. За счет чего удваивается разрешающая способность в квадратурном энкодере по сравнению с одноканальным?
13. Что такое квадратурный декодер?
14. Как определяются параметры вращения (угол поворота, частота вращения) при помощи абсолютных и инкрементальных энкодеров с использованием микропроцессорных систем? Привести примеры.
15. Постройте код Грея для десятичных чисел от 0 до 15. Покажите его преимущества по сравнению с двоичным кодом при измерении перемещений с помощью абсолютного энкодера.
16. Как можно увеличить разрешающую способность энкодера?
17. Определите линейную скорость перемещения заданной точки ременной передачи (по заданию преподавателя)

Библиографический список

1. *Подлесный, Н.И.* Элементы систем автоматического управления и контроля / Н.И. Подлесный, В.Г. Рубанов – Киев.: Политехника, 1991. – 461 с. - ISBN 5-11-002445-6
2. *Воротников С.А.* Информационные устройства робототехнических систем / С.А. Воротников // Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.; (Робототехника / под ред. С.Л. Зенкевича, А.С. Ющенко). – ISBN 5-7038-2207-6
3. *Янг, Г.* Использование ПЛИС в системе управления двигателями с квадратурным энкодером / Глен Янг // Электронные компоненты – 2007.
4. *Жданкин, В.* Поворотные шифраторы. Основные типы и некоторые особенности применения / В. Жданкин // Компоненты и технологии. – 2001. - №8. – С. 90-96.
5. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т. 2/С74 Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.: ил. – ISBN 5-283-00531-3 (Т. 2)
6. *Брускин Д.Э.* Электрические машины и микромашины: Учеб. для электротехн. спец. вузов / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. –528 с.: ил. – ISBN 5-06-000725-1
7. *Волков Н.И.* Электромашинные устройства автоматики / Н.И. Волков, В.П. Миловзоров; Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 335 с.: ил.

Учебное издание

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Измерение угловых перемещений и скоростей вращательного движения

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности 220301 - Автоматизация технологических процессов и производств и направлений бакалавриата 220400 «Управление в технических системах», 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств», 221000 «Мехатроника и робототехника»

Составители: **Бушуев** Дмитрий Александрович
Рубанов Василий Григорьевич

Подписано в печать . Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. . Усл. печ. л. .
Тираж 49 экз. Заказ Цена
Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В. Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В. Г. Шухова

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Измерение угловых перемещений и скоростей вращательного движения

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 220301 - Автоматизация
технологических процессов и производств и направлений
бакалавриата 220400 «Управление в технических системах»,
220700 «Автоматизация технологических процессов и производств»,
221000 «Мехатроника и робототехника»

Белгород
2012