

Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений

Владимир Ануфриев, Александр Лужбинин,
Сергей Шумилин (Москва)

Статья посвящена обзору индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений, методов преобразования их сигналов в цифровую форму, а также архитектуре микросхемы преобразователя угол–код, создаваемой компанией ЗАО «ПКК Миландр».

Типы индуктивных датчиков

Индуктивные датчики линейных перемещений

Наиболее простым датчиком (по принципу работы) является индуктивный датчик линейных перемещений (LVDT), структура которого представлена на рисунке 1. Датчик состоит из первичной обмотки, двух вторичных обмоток на неподвижном статоре и подвижного магнитного сердечника [1, 2]. Первичная обмотка установлена симметрично между двумя идентичными вторичными обмотками и запитана возбуждающим синусоидальным сигналом A . Если сердечник находится точно посередине первичной обмотки, то магнитное поле создаёт равные магнитные потоки во вторичных обмотках, и результиру-

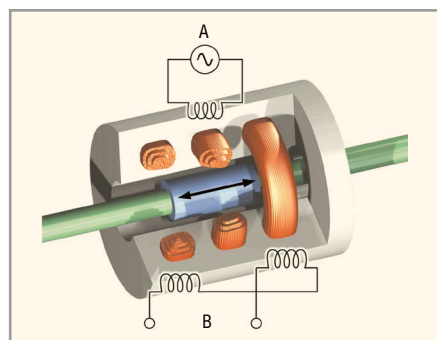


Рис. 1. LVDT-датчик перемещения

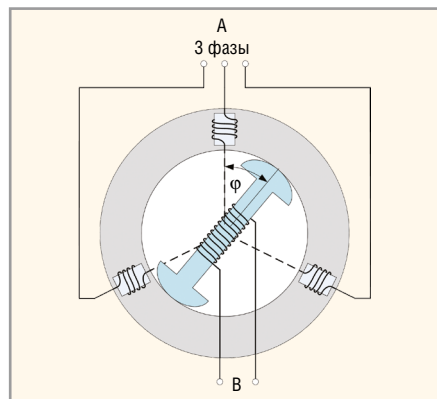


Рис. 2. Сельсин

ющее дифференциальное напряжение равно нулю. Если сердечник смещается к одной из вторичных обмоток, то магнитный поток через неё увеличивается, и, как следствие, появляется выходной сигнал B . Абсолютное значение амплитуды сигнала B пропорционально смещению сердечника относительно центральной обмотки, а изменение фазы относительно возбуждающего сигнала A указывает направление сдвига.

Индуктивные датчики угловых перемещений

Аналогично датчикам LVDT могут быть реализованы датчики, фиксирующие угловое перемещение объектов (RVDT). Но угловые датчики имеют ограничение рабочей зоны и позволяют определять угол поворота не более чем ± 90 градусов, что затрудняет их использование, например, для определения положения ротора двигателя. Для решения этой задачи применяются другие типы индукционных датчиков [1].

Сельсины

Сельсином называется информационная электрическая машина переменного тока, вырабатывающая напряжение, фаза которого определяется угловым положением ротора [1, 2]. Сельсин содержит три первичных обмотки, расположенные на статоре со смещением 120 градусов, и одну вторичную обмотку, находящуюся на роторе (см. рис. 2). Первичные обмотки запитаны 3-фазным синусоидальным сигналом A . При этом на вторичной обмотке ротора возникает результирующий сигнал B , смещение фазы которого определяется углом поворота ротора φ относительно осей расположения первичных обмоток. Возможно и обратное включение сельсина, когда возбуждающий сигнал подаётся на обмотку ротора, а результирующий снимается с трёх обмоток, расположенных

на статоре. В этом случае угол поворота ротора будет определяться амплитудами результирующих сигналов.

Синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы

Синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ) построены на тех же принципах, что и сельсины, но позволяют обойтись меньшим числом фаз возбуждающих сигналов [1, 2]. Это упрощает конструкцию и математические вычисления для определения угла поворота или скорости вращения ротора. Если в качестве возбуждающих сигналов используются сигналы $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$, подаваемые на первичные обмотки, расположенные под углом 90 градусов друг к другу, то возникает вращающееся магнитное поле. Это поле формирует во вторичной обмотке на роторе результирующий сигнал $V\cos = A\cos(\omega t + \varphi)$. При реализации двух обмоток (см. рис. 3), расположенных на роторе под углом 90 градусов, на второй обмотке формируется сигнал $V\sin = A\sin(\omega t + \varphi)$.

Чтобы определить угол поворота ротора, необходимо измерить сдвиг фазы результирующего сигнала. Для упрощения системы можно использовать только одну первичную возбуждающую обмотку, но в этом случае формируется не вращающееся магнитное поле, а пульсирующее (см. рис. 4). Для однозначного определения положения ротора требуются две вторичных обмотки, расположенные под углом 90 градусов. В этом случае во вторичных обмотках формируется сигнал, совпадающий по фазе с возбуждающим, а угол поворота определяется по амплитуде выходного сигнала.

Возможны и обратные схемы включения обмоток, когда возбуждающее напряжение подаётся на обмотки ротора. Если на роторе или статоре установлено большее число обмоток, такие СКВТ называются многополюсными. Для повышения точности измерения угла на одном валу устанавливают и многополюсный, и однополюсный СКВТ. При этом сигнал с однополюсного СКВТ используется для грубого

измерения угла, а сигнал с многополюсного СКВТ – для уточнения измерения. Датчики такого типа называются двухотсчётными.

Методы обработки сигналов индуктивных датчиков

При измерении сигналов индуктивных датчиков, выходной сигнал модулирован напряжением возбуждения датчика. Информация о положении объекта может быть передана либо амплитудой, либо сдвигом фазы результирующего сигнала. Существуют различные методы получения этой информации, которые имеют свои преимущества и недостатки [1].

Методы прямого преобразования

Методы прямого преобразования построены на определении угла поворота путём его вычисления из мгновенного текущего состояния.

Метод А. В случае пульсирующего магнитного поля, в моменты его максимального значения производится строго одновременное измерение сигналов V_{\sin} и V_{\cos} . Положение ротора вычисляется по формулам преоб-

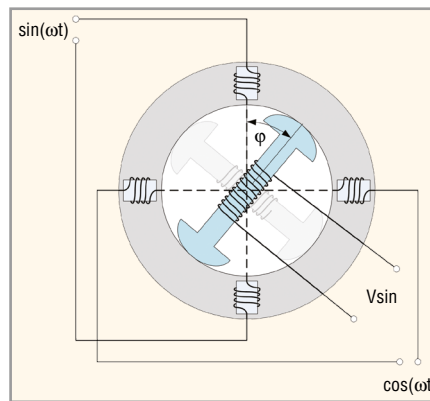


Рис. 3. СКВТ с вращающимся магнитным полем

зования полярных координат в декартовы. Например, в первом квадранте вычисление производится по формуле $\varphi = \arctg(V_{\sin}/V_{\cos})$.

Способ мгновенной выборки напряжений V_{\sin} и V_{\cos} обладает тем недостатком, что вместе с полезным сигналом оцифровываются сигналы помех, которые никак не корректируются. Для борьбы с помехами существуют модифицированные методы измерения V_{\sin} и V_{\cos} .

Метод Б. В момент перехода напряжения V_m через ноль, запускаются два накапливающих АЦП по каналам V_{\sin} и V_{\cos} ,

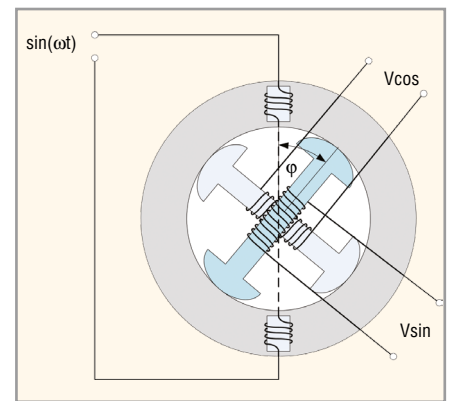


Рис. 4. СКВТ с пульсирующим магнитным полем

и накопление отсчётов производится до следующего момента перехода напряжения V_m через ноль. Вычисление угла по накопленным результатам производится аналогично методу А. В качестве накапливающего АЦП может использоваться любой АЦП интегрирующего типа. Если интегрирование осуществляется на интервале $1/3$ периода сигнала возбуждения, то подавляется паразитная третья гармоника, которая является основной составляющей помехи.

Методы А и Б могут быть модифицированы для вычисления полусум-





...сохраняя достигнутое,
созидая настоящее,
приближая будущее...

www.milandr.ru

Разработка и производство интегральных микросхем

Реклама

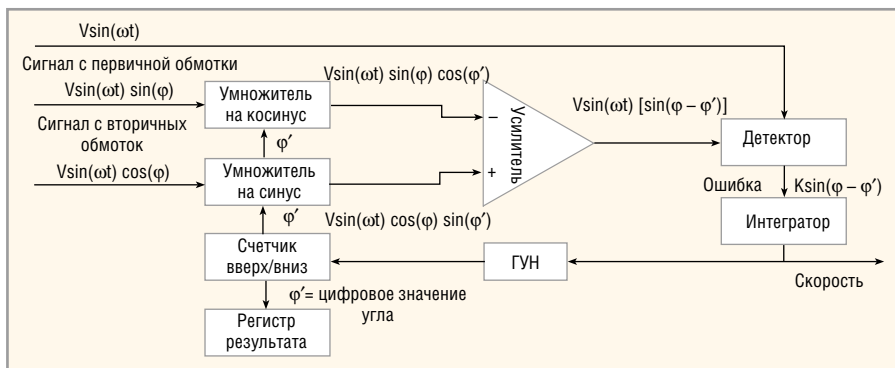


Рис. 5. Функциональная схема следящего преобразователя

мы двух соседних отсчётов, взятых во время положительной и отрицательной полуволны \$V_{in}\$. Этим компенсируется постоянная составляющая в сигналах \$V_{sin}\$ и \$V_{cos}\$.

Метод В применяется для сигналов сельсинов, СКВТ и двухотсчётных СКВТ при организации возбуждения с получением вращающегося магнитного поля. В датчиках типа СКВТ это поле образуется при квадратурном возбуждении первичных обмоток, а в сельсинах – при возбуждении трёхфазным напряжением. В этом случае напряжение на вторичной обмотке сельсина будет иметь вид \$V_{out} = A \sin(\omega t + \varphi)\$, для СКВТ – \$V_{sin} = A \sin(\omega t + \varphi)\$, \$V_{cos} = A \cos(\omega t + \varphi)\$.

Здесь можно использовать метод непосредственного измерения сдвига фазы выходного напряжения относительно опорного. В момент перехода входного напряжения \$V_{in}\$ через ноль запускается счётчик высокой опорной частоты, который останавливается в момент перехода выходного напряжения \$V_{out}\$ через ноль. Значение, накопленное в счётчике, будет пропорционально измеряемому углу. Если опорная частота является кратной \$2^N\$ периодам сигнала возбуждения, то накопленное значение будет соответствовать измеряемому углу с разрядностью \$N\$. Кроме того, в случае вращающегося магнитного поля может применяться метод А с минимальными изменениями.

При последующей обработке информации в преобразователе с целью увеличения отношения сигнал/шум можно столкнуться с проблемой запаздывания выхода преобразователя при движении СКВТ, в том числе, при движении с постоянной скоростью. Чтобы выполнять постобработку и при этом не создавать ошибку по скорости, используется метод следящего преобразования.

Для методов прямого преобразования часто требуется вычислять функцию \$\varphi = \arctg(X)\$.

Вычисление алгоритмическим способом

Разложение в ряд функции \$\arctg(X)\$ осуществляется по формуле [3]:

$$\arctg(X) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \times \frac{X^{2k+1}}{2k+1}$$

В диапазоне углов от 0 до 45 градусов для разрешения 20 разрядов достаточно 5 первых членов ряда, взятых с 32-разрядной точностью. Таким образом, после измерения с помощью АЦП вычисление угла и его представление в форме от 0 до 1 для значений от 0 до \$2\pi\$ займёт 2 операции нормализации, одно деление, 5 умножений, до 8 сложений и до 7 логических переходов по короткому адресу. В общей сложности, не более 40 тактов процессора типа ARM Cortex-M3. Для сокращения вычислений используется формула Герона. Вычисления являются целочисленными (32 разряда) с нормализацией до 16 разрядов.

Вычисление табличным способом

По измеренным значениям \$V_{sin}\$ и \$V_{cos}\$ определяется квадрант, в котором находится искомый угол, и по отношению значений \$|V_{sin}|\$ и \$|V_{cos}|\$ искомый угол вычисляется по одной из формул [4]:

- IF \$V_{sin} > 0\$ и \$V_{cos} > 0\$ и \$|V_{sin}| < |V_{cos}|\$, то \$\varphi = \alpha\$,
- IF \$V_{sin} > 0\$ и \$V_{cos} > 0\$ и \$|V_{sin}| > |V_{cos}|\$, то \$\varphi = \pi/2 - \alpha\$,
- IF \$V_{sin} < 0\$ и \$V_{cos} > 0\$ и \$|V_{sin}| > |V_{cos}|\$, то \$\varphi = -\alpha\$,
- IF \$V_{sin} > 0\$ и \$V_{cos} > 0\$ и \$|V_{sin}| < |V_{cos}|\$, то \$\varphi = -\pi/2 + \alpha\$,
- IF \$V_{sin} > 0\$ и \$V_{cos} < 0\$ и \$|V_{sin}| > |V_{cos}|\$, то \$\varphi = \pi/2 + \alpha\$,
- IF \$V_{sin} > 0\$ и \$V_{cos} < 0\$ и \$|V_{sin}| < |V_{cos}|\$, то \$\varphi = \pi - \alpha\$,
- IF \$V_{sin} < 0\$ и \$V_{cos} < 0\$ и \$|V_{sin}| < |V_{cos}|\$, то \$\varphi = -\pi + \alpha\$,
- IF \$V_{sin} < 0\$ и \$V_{cos} < 0\$ и \$|V_{sin}| > |V_{cos}|\$, то \$\varphi = -\pi/2 + \alpha\$,

где \$\alpha\$ – угол в диапазоне \$0...45\$ градусов (\$0 - \pi/4\$).

Далее вычисляется значение \$\tg(\alpha) = |V_{sin}|/|V_{cos}|\$ и по таблице, в зависимости

от \$\tg(\alpha 1)\$, находится значение \$\alpha 1\$, где \$\tg(\alpha 1)\$ – ближайшее меньшее табличное значение тангенса угла, и искомый угол \$\alpha = (\tg(\alpha) - \tg(\alpha 1))(C_0 + C_1 \times \alpha 1 + C_2 \times \alpha 1^2)\$, где \$C_0, C_1, C_2\$ – поправочные коэффициенты коррекции функции ошибки алгоритма. Такой способ обеспечивает разрешение 16 разрядов при размере таблицы в 256 значений.

Метод следящего преобразования

Этот метод широко применяется в современных интегральных схемах (ИС), например, RDC-19220/2/4 от DDC [5], ACT5028B от Aeroflex [6] или AD2S1210 от Analog Devices [7, 8]. Эти микросхемы применяются только при возбуждении датчиков пульсирующим магнитным полем. Тем не менее, принцип их действия может распространяться и на случай вращающегося магнитного поля. С помощью данного метода можно обрабатывать сигналы сельсинов и СКВТ, линейных и вращающихся дифференциальных трансформаторов.

Основной идеей преобразования является использование контура обратной связи. Последний работает по сигналу ошибки между фазовым углом сигнала на выходе и фазовым углом сигнала на входе преобразователя, а также между скоростью на выходе преобразователя и скоростью, задаваемой сигналами, поступающими на вход. Такая схема даёт нулевую систематическую ошибку по скорости за счёт вычисления её интеграла.

Данный метод позволяет увеличить отношение сигнал/шум за счёт фильтрации сигналов датчиков СКВТ. При непосредственной фильтрации и обработке сигналов СКВТ возникает групповая задержка, дающая ошибку при движении СКВТ. В данном случае фильтрация производится в контуре с обратной связью, производящем интегрирование по скорости и компенсирующем ошибку такого типа.

Структурная схема блока, реализующего метод следящего преобразования, представлена на рисунке 5. В узлах «Умножитель на косинус» и «Умножитель на синус» выполняется операция вычисления значений \$\cos(\varphi)\$ и \$\sin(\varphi)\$, где угол \$\varphi'\$ – это выход преобразователя, а также умножение полученных значений на входные сигналы преобразователя. Затем решающий усилитель выполняет операцию вычитания. В результате получается сигнал ошибки для следящего контура преобразователя \$e = V_{sin}(\omega t)/\sin(\varphi)\cos(\varphi) - \cos(\varphi)\sin(\varphi) = V_{sin}(\omega t)\sin(\varphi - \varphi')\$, что

примерно эквивалентно $V\sin(\omega t)(\varphi - \varphi')$ для малых значений $(\varphi - \varphi')$.

Далее в контуре производится детектирование (демодуляция) сигнала ошибки, вычисляется скорость вращения СКВТ, как интеграл ошибки, и угол поворота СКВТ, как интеграл от скорости. Поскольку интегрирование в контуре обратной связи компенсирует постоянную составляющую ошибки измерения, то метод даёт нулевую систематическую ошибку при неподвижном СКВТ, а также при вращении СКВТ с постоянной угловой скоростью. Ошибка больше заявленной точности преобразователя возникает только при угловом ускорении СКВТ.

Метод следящего преобразования обеспечивает большое разрешение (разрядность) преобразователя, не внося погрешности при вращении с постоянной скоростью, а также устраняет влияние реактивностей СКВТ и аддитивную ошибку измерения сигналов. Одним из недостатков данного метода является ограничение по возбуждающему напряжению: его удвоенная частота, возникающая при детектировании, должна находиться в полосе подавления контура. При этом коэффициент подавления удвоенной частоты влияет на амплитуду ошибки при ускорении СКВТ. Кроме того, метод является чувствительным к неоднородности каналов СКВТ.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ МИКРОСХЕМЫ

Разрабатываемый проект ИС преобразователя угол-код (см. рис. 6) позволяет реализовать методы прямого и следящего измерения. Проектируемая микросхема позволяет работать как с пульсирующим, так и с вращающимся полем СКВТ и сельсинов, а также осуществлять обработку сигналов с датчиков LVDT и RVDT. Для формирования возбуждающих сигналов, в ИС предусмотрено 4 канала ЦАП. Кроме того, могут использоваться внешние источники возбуждения. Проект может быть выполнен в виде отдельной микросхемы или включён в состав микроконтроллера в виде периферийного модуля, который содержит 4 канала АЦП и следящий контур. Это позволит подключать как одно-, так и двухотсчётные датчики с различным числом полюсов, в том числе, использующие вращающееся магнитное поле.

Основные характеристики проектируемой ИС:

- напряжение питания 2,5...3,6 В;
- диапазон рабочих частот датчиков от 47 Гц до 100 кГц;

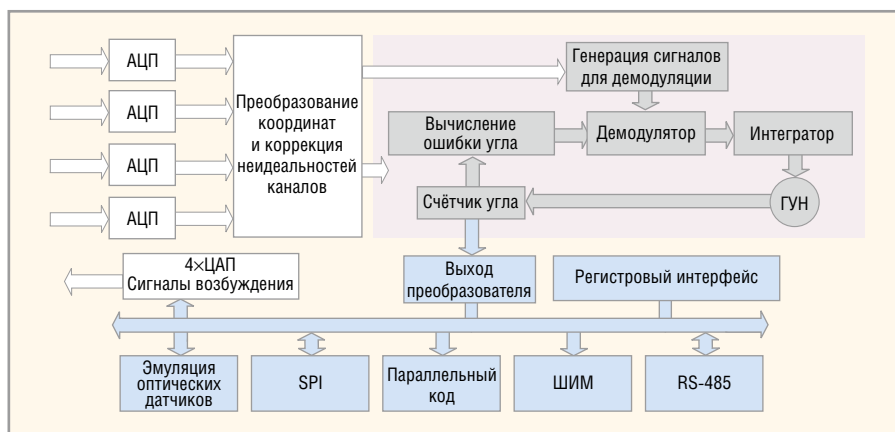


Рис. 6. Структурная схема микросхемы преобразователя угол-код

- диапазон рабочих угловых скоростей датчиков $\pm 10\,000$ об/с;
- разрешающая способность при изменении положения до 16 разрядов (до 19 для двухотсчётных);
- тактовая частота опорного генератора до 20 МГц;
- частота опроса датчика до 40 кГц;
- выход скорости вращения – сигналы в аналоговом и цифровом виде;
- популярные последовательные интерфейсы.

Проектируемая микросхема имеет настраиваемый, следящий контур, производящий интегрирование по углу и по скорости, что позволяет увеличить разрешение и устранить систематическую ошибку измерения. Микросхема может быть настроена для преобразования по методу прямого измерения, при этом следящий контур может быть полностью или частично отключён. Это может быть полезно при использовании СКВТ в следящих системах, движущихся с постоянными знакопеременными ускорениями, где нежелательно ограничение полосы преобразователя, либо когда частота сигнала возбуждения датчика находится вблизи полосы полезного сигнала.

Преобразователь корректирует амплитуды по каналам $V\sin$ и $V\cos$, минимизируя мультипликативную погрешность измерения, например, эксцентриситет СКВТ или неодинаковость обмоток. Кроме того, при использовании совместно с микроконтроллером может производиться калибровка преобразователя вместе с СКВТ путём записи значений в регистровый интерфейс преобразователя. При работе в следящем режиме выходные отсчёты преобразователя могут быть интерполированы на высокую частоту (например, частоту выборки АЦП), что полезно для некоторых динамических систем. Также выход-

ные отсчёты могут быть прорежены до частоты, равной удвоенной полосе пропускания, либо до другой промежуточной частоты, удобной для пользователя.

Сельсины и датчики LVDT могут подключаться непосредственно к преобразователю без использования согласующих трансформаторов. В этом случае преобразователь самостоятельно выполняет преобразование системы координат. Дополнительно преобразователь осуществляет формирование и/или контроль наличия напряжения возбуждения СКВТ, а также может сообщать пользователю об ошибке при ускорении, а также о превышении ошибкой заданного порога, что позволяет повысить надёжность систем управления перемещением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по электрическим машинам (в 2 томах). Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Том 1. Энергоатомиздат. 1988.
2. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технология производства электрических машин. Энергоатомиздат. 1982.
3. Основы обработки данных. Вычисление элементарных функций. <http://bobyeh.ru/referat/69/16419/1.html>
4. Проектирование алгоритма вычисления элементарной функции с использованием таблично-алгоритмического метода. <http://knowledge.allbest.ru/programming/c-2c0b65635b2ad78a5c53a88521306c26.html>
5. RDC-19220/2/4 Series. 16-Bit Monolithic Tracking Resolver (LVDT)-To-Digital Converter. Data Device Corporation. 1999.
6. www.aeroflex.com/ams/pagesproduct/prods-hirel-rdc.cfm
7. AD2S1210. Variable Resolution. 10-Bit to 16-Bit R/D Converter with Reference Oscillator. Rev2. Analog Devices. Inc. 2010.
8. Павел Лагузов. Преобразователи сигнала LVDT-датчика от Analog Devices. Мир электронных компонентов. Выпуск 1. 2009. ©