

# 03, март 2016

УДК 621.317

## Обзор методов обработки синусно-косинусного вращающегося трансформатора

*Сурминский А.С., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Специальная робототехника и мехатроника»*

*Научный руководитель: Кузин Ю.Р.*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Специальная робототехника и мехатроника»*

[kuzin\\_yr@bmstu.ru](mailto:kuzin_yr@bmstu.ru)

### Обзор существующих методов обработки СКВТ

Конструкция СКВТ представлена на рис. 1. Она состоит из двух основных частей: неподвижного статора, закреплённого на некоторой поверхности, и вращающегося ротора. В роторе и статоре установлена пара идентичных, перпендикулярно расположенных обмоток. Обмотки статора, обмотка возбуждения и квадратурная обмотка, предназначены для генерации магнитного поля внутри СКВТ. Обмотки ротора, синусная и косинусная обмотки, являются измерительными обмотками. Напряжение на этих обмотках

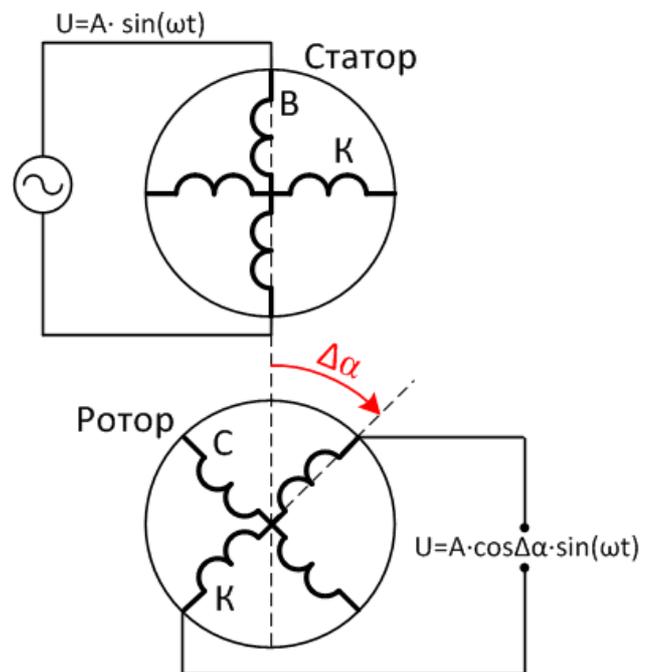


Рис. 1. Конструкция СКВТ

пропорционально косинусу и синусу угла поворота вала ротора. Поле, сгенерированное обмотками статора, пронизывает обмотки ротора. В результате напряжение, индуцированное в синусной и косинусной обмотке, определяется проекцией вектора

магнитной индукции поля статора на эти обмотки. Отсюда следует тригонометрическая зависимость между выходным напряжением и углом поворота вала.

Пусть на обмотку возбуждения подано синусоидальное напряжение вида:

$$U_{OB} = A \cdot \sin(\omega t).$$

Тогда напряжение на синусной и косинусной обмотках ротора имеет вид:

$$U_{sin} = k_1 A \cdot \sin \Delta \alpha \cdot \sin(\omega t + \alpha_1)$$

$$U_{cos} = k_2 A \cdot \cos \Delta \alpha \cdot \sin(\omega t + \alpha_2).$$

Для идеального трансформатора коэффициенты трансформации  $k_1$  и  $k_2$  равны, также равны и фазовые сдвиги выходных сигналов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . В реальных СКВТ эти коэффициенты отличаются, вследствие различия параметров обмоток и погрешности их ориентации. Для обеспечения высокой точности обработки СКВТ данные погрешности необходимо учитывать.

### Классический метод обработки СКВТ

Классический метод работы с СКВТ заключается в совместном использовании сразу двух СКВТ, СКВТ датчика и СКВТ приёмника, синусные и косинусные обмотки которых объединены. На рис. 2. изображена упрощённая схема подключения.

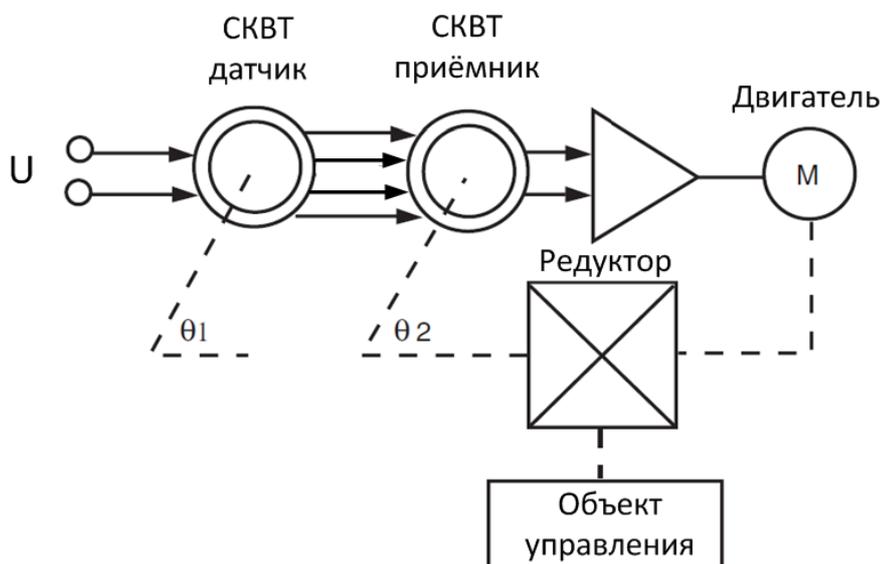


Рис. 2. Классический метод включения СКВТ

СКВТ датчик установлен в пульте оператора, и выполняет роль задатчика. СКВТ приёмник находится внутри управляемой системы, например, монтирован в привод.  $\theta_1$  и  $\theta_2$  угловые положения валов СКВТ. Данная система является следящей, и изменение углового положения вала СКВТ датчика вызывает аналогичное изменение углового положения объекта управления, и связанного с ним углового положения вала СКВТ приёмника. Система работает таким образом, чтобы свести к нулю напряжение на выходе СКВТ приёмника.

Пусть изначально ошибка в системе равна 0. Обмотки СКВТ соединены по схеме, представленной на рис. 3. При выбранной схеме соединения синусных и косинусных обмоток, данное условие выполняется, когда и  $\theta_1 = \theta_2 + 90^\circ$ . Амплитуда сигнала на выходе СКВТ датчика в этом случае равна нулю и следовательно объект управления неподвижен.

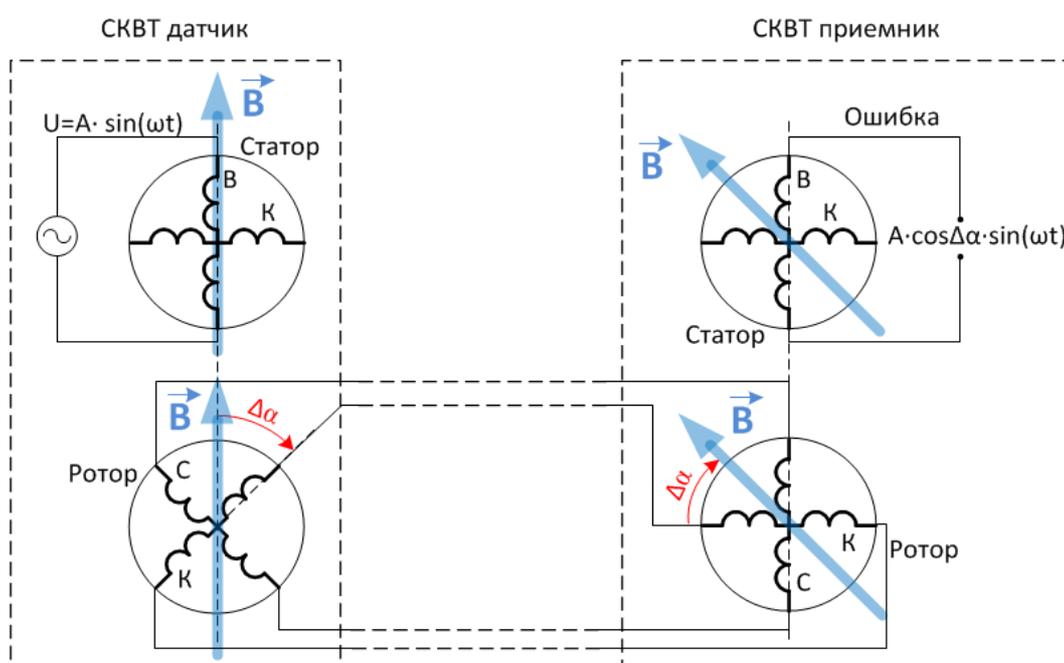


Рис. 3. Схема соединения СКВТ

Когда оператор поворачивает вал СКВТ датчика на некоторый угол  $\Delta\alpha$ , вектор магнитного поля поворачивается относительно синусной и косинусной обмотки СКВТ датчика, в результате на этих обмотках формируется напряжение пропорциональное синусу и косинусу угла поворота. Это же напряжение появляется на синусной и косинусной обмотке СКВТ приемника, а поле в СКВТ приёмнике отклоняется на угол  $\Delta\alpha$ . В результате в обмотке возбуждения СКВТ приемника индуцируется напряжение с амплитудой пропорциональное косинусу угла  $\Delta\alpha$ , что для следящей системы является сигналом ошибки. Знак ошибки определяется по фазовому сдвигу сигнала ошибки

относительно напряжения возбуждения  $U$ . Сигнал ошибки выпрямляется и подаётся на усилитель, вызывая поворот привода на угол  $\Delta\alpha$ , после чего ошибка сводится к нулю.

Несмотря на простоту схемы подключения, добиться высокой точности данным способом очень сложно. Поскольку СКВТ датчик и СКВТ приёмник находятся на некотором удалении друг от друга, например, СКВТ датчик в кабине пилота вертолёта, а СКВТ приёмник в приводе орудия, то для их соединения приходится протягивать многожильный кабель. Кабель, обладая свойствами антенны, создаёт шумы в полезном сигнале, что делает невозможным точное определение угла поворота. Также, часто бывает так, что в системе присутствуют источники низкочастотного излучения, например двигатели и генераторы, которые наводят ЭДС в проводах кабеля. Как правило, спектр излучения этих устройств перекрывает частоту сигнала СКВТ, вследствие чего, даже использование цифровой и аналоговой фильтрации не повышает точность такой системы.

В современных системах используется иной подход при работе с СКВТ. В систему устанавливают лишь один СКВТ, который подключается к специальному преобразователю сигналов ЦАПВТ (D/R converter). Схема включения СКВТ представлена на рис. 4.

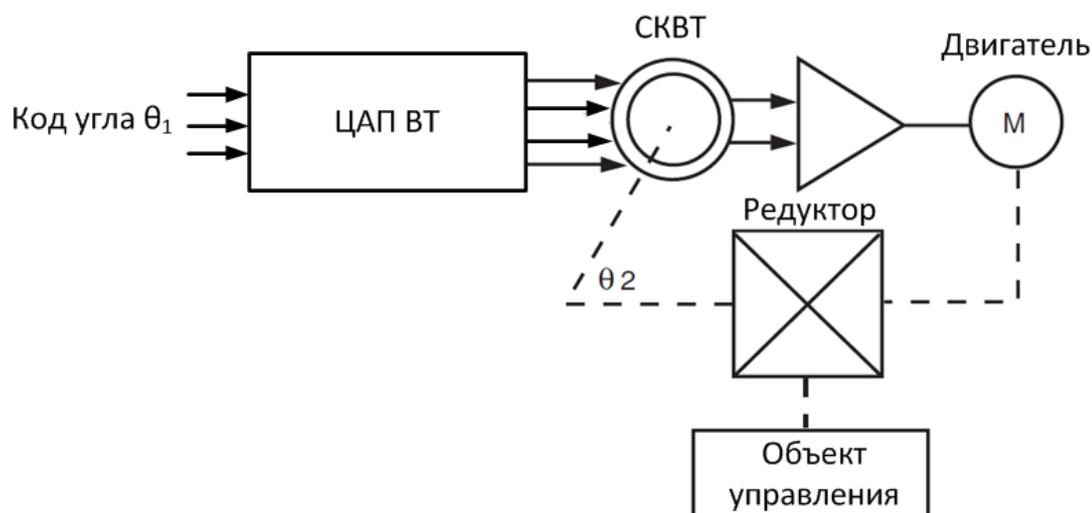


Рис. 4. Схема обработки СКВТ с использованием ЦАПВТ

Существует два типа таких преобразователей: ЦАПВТ (D/R converter) и АЦПВТ (R/D converter). ЦАПВТ предназначен для преобразования цифрового кода угла в соответствующие этому углу напряжения на синусной и косинусной обмотке СКВТ, АЦПВТ работает противоположным образом. Данные преобразователи выпускаются как в виде специализированных установочных устройств, так и в виде интегральных микросхем. Так как данный преобразователь может быть установлен в непосредственной

близости от обрабатываемого СКВТ, то можно минимизировать длину кабеля подключения, снизить зашумлённость полезного сигнала. Также в такие преобразователи часто встраивают схемы фильтрации, что повышает точность системы. Далее пойдёт речь о различных типах таких преобразователей и алгоритмах их работы.

### АЦПВТ на основе фазовращателя

С появлением цифровой электроники стало возможным перейти от чувствительных к помехам аналоговых систем к более надёжным и точным цифровым системам. На рис. 5. представлена схема простейшего преобразователя АЦПВТ.

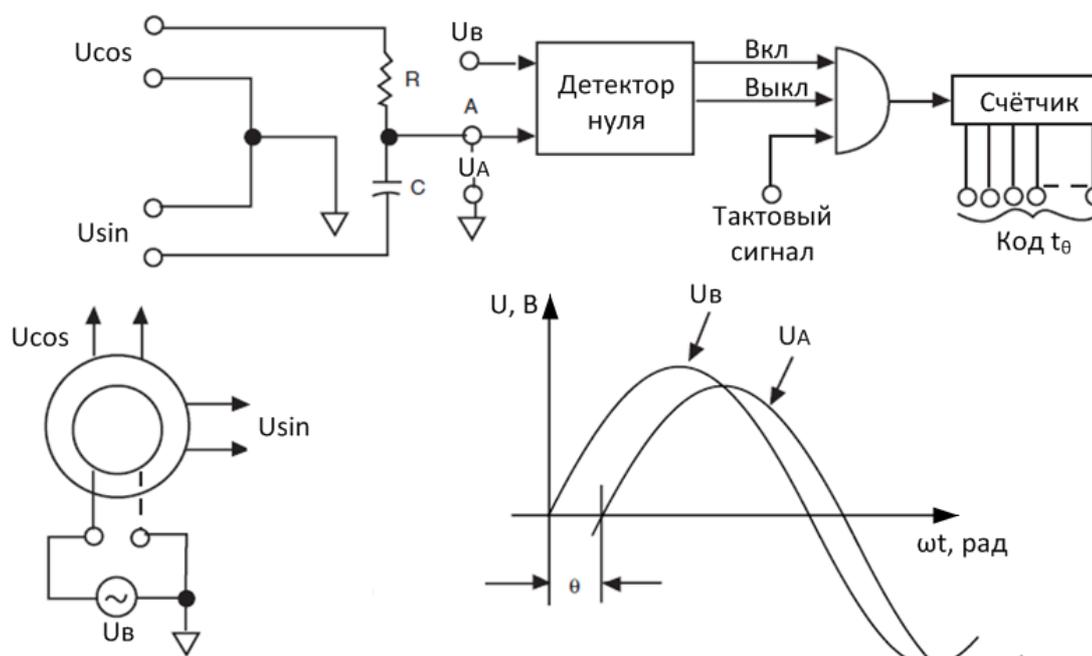


Рис. 5. Схема АЦПВТ на основе фазовращателя

В данной схеме СКВТ работает в режиме фазовращателя. На обмотку возбуждения подан гармонический сигнал  $U_B$ , квадратурная обмотка соединена накоротко, с целью минимизировать поперечную составляющую магнитного поля. При таком включении, если постоянная времени  $t=R \cdot C$  равна периоду сигнала возбуждения, то сдвиг по фазе между напряжением возбуждения и напряжением в точке A линейно зависит от угла поворота вала СКТВ.

Напряжение на обмотках:

$$U_B = A \cdot \sin(\omega t)$$

$$U_{cos} = \frac{A}{k_1} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$U_{sin} = \frac{A}{k_2} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Если  $\omega \cdot R \cdot C = 1$  и трансформатор идеальный, т.е.  $k=k_1=k_2$  и  $\varphi_1=\varphi_2 \approx 0$ , то

$$U_a = \frac{A}{2 \cdot k} \cdot \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{4}\right), \text{ где } \alpha - \text{ угол вала СКВТ.}$$

Когда напряжение на обмотке возбуждения пересекает нулевое значение, на счётчик подаётся тактовый сигнал. Счётчик считает тактовые импульсы до тех пор, пока напряжение в точке А не пересечёт нулевое значение. В итоге на выходе счётчика будет число равное времени запаздывания сигнала  $U_A$  относительно сигнала  $U_B$ . Зная это время  $t_\theta$  и частоту  $\omega$  несложно определить сдвиг по фазе  $\theta$ , и угол вала СКВТ  $\alpha$ .

$$\theta = t_\theta \cdot \omega \quad \Rightarrow \quad \alpha = \theta + \frac{\pi}{4}.$$

Достоинства метода:

- Простота схемы;
- Цифровой выход.

Недостатки:

- Низкая частота обновления данных, определяемая частотой сигнала возбуждения СКВТ;
- Данная схема работоспособна только на определённой несущей частоте;
- Необходимость точной настройки частоты  $\omega$ .

### **АЦПВТ на основе осциллятора**

Ещё один метод измерения углового положения вала СКВТ основан на использовании гармонического осциллятора. Схема представлена на рис. 6.

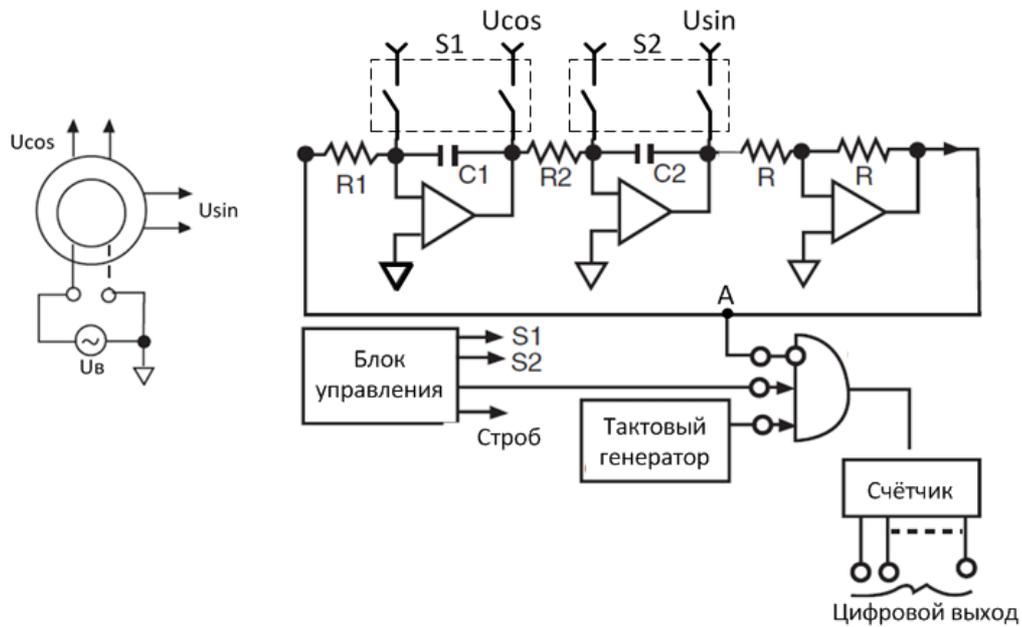


Рис. 6 Схема АЦПВТ на основе осциллятора

Осциллятор в данной схеме состоит из последовательно включённых двух инвертирующих интеграторов и одного инвертора, охваченных положительной обратной связью. Если  $R1=R2=R$ , а  $C1=C2=C$ , то период собственных колебаний данного осциллятора определяется постоянной времени  $t=RC$ . Когда ключи  $S1$  и  $S2$  замкнуты, конденсатор  $C1$  заряжается до напряжения  $U_{cos}$ , а конденсатор  $C2$  до напряжения  $U_{sin}$ . Таким образом, задаются начальные условия для интеграторов, или точка старта осциллятора. Когда ключи размыкаются, запускается осциллятор. На рис. 7. представлена осциллограмма напряжения в точке А.

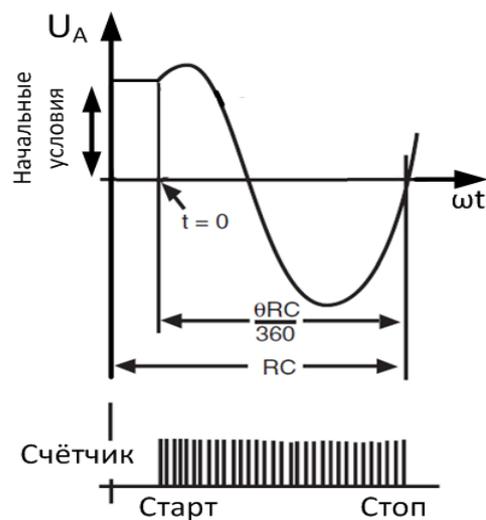


Рис. 7. Осциллограмма напряжение в точке А

Если в момент размыкания ключей напряжения конденсаторов:

$$U_{C1} = A \cdot \cos(\theta)$$

$$U_{C2} = A \cdot \sin(\theta).$$

То напряжение в точка А имеет вид:

$$U_A = A \cdot \sin\left(\frac{1}{RC} \cdot t - \theta\right).$$

Одновременно с размыкание ключей S1 и S2 на вход счётчика начинают поступать импульсы от тактового генератора. Импульсы поступают до тех пор, пока напряжение на выходе осциллятора  $U_A$  не пересечёт нулевое значение в положительном направлении. Как только это происходит, тактовый генератор отключается от счётчика. В итоге на выходе счётчика имеется число пропорциональное углу  $\theta$ . Угол  $\theta$  – угловое положение вала СКВТ.

Достоинства метода:

- Простота изготовления;
- Высокая частота обновления данных.

Недостатки:

- Точность измерений напрямую зависит от точности номиналов R,C элементов.

### Измерение угла с помощью АЦП

Ещё один способ обработки СКВТ заключается в использовании АЦП преобразователей и вычислительного блока. На рис. 8. представлена обобщённая схема данного преобразователя

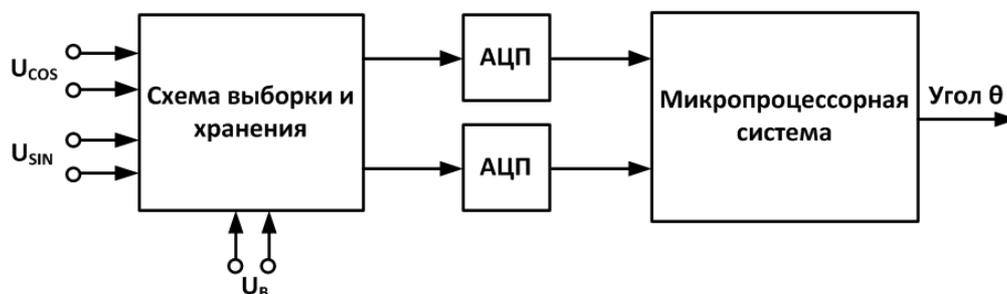


Рис. 8. Измерение угла с помощью АЦП

Схема работает следующим образом. На вход схемы выборки и хранения подаётся напряжение синусной и косинусной обмоток,  $U_{sin}$  и  $U_{cos}$ , а также напряжение возбуждения  $U_{в}$ .  $\theta$  – угол вала СКВТ.

$$U_B = A \cdot \sin(\omega t)$$

$$U_{cos} = \frac{A}{k_1} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \approx \frac{A}{k} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\omega t)$$

$$U_{sin} = \frac{A}{k_2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\omega t + \varphi_2) \approx \frac{A}{k} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\omega t).$$

Схема выборки и хранения фиксирует напряжение синусной и косинусной обмотки, когда оно достигает максимума. В итоге, напряжение на её выходе:

$$U_X = \frac{A}{k} \cdot \cos(\theta)$$

$$U_Y = \frac{A}{k} \cdot \sin(\theta).$$

Полученное напряжение оцифровывается и в цифровом виде передаётся в компьютер, который вычисляет значение угла  $\theta$ .

Достоинства метода:

- Простота схемы. Возможность реализации схемы на одном микроконтроллере оснащённом АЦП.

Недостатки:

- Низкая частота обновления данных, относительно других методов обработки СКВТ;
- Высокие динамические ошибки.

### **АЦПВТ последовательного приближения**

Дальнейшее развитие методов обработки СКВТ привело к появлению более точных и надёжных преобразователей. Очередная разновидность АЦПВТ – так называемые преобразователи последовательного приближения (Successive-approximation R/D converter). На рис. 9. изображена схема такого преобразователя.

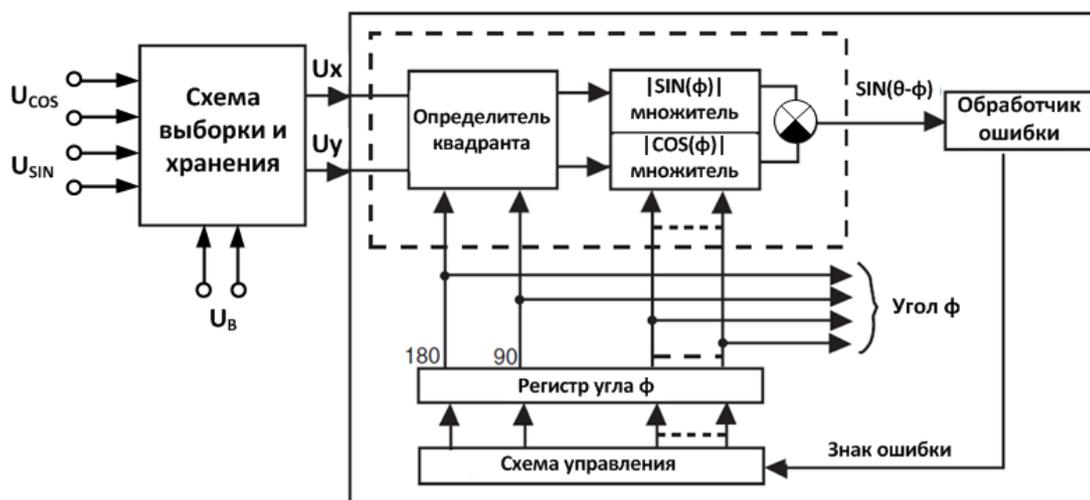


Рис. 9. АЦПВТ последовательного приближения

Схема работает следующим образом. На вход схемы выборки и хранения подаётся напряжение синусной и косинусной обмоток,  $U_{sin}$  и  $U_{cos}$ , а также напряжение возбуждения  $U_B$ .  $\theta$  – угол вала СКВТ.

$$U_B = A \cdot \sin(\omega t)$$

$$U_{cos} = \frac{A}{k_1} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \approx \frac{A}{k} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\omega t)$$

$$U_{sin} = \frac{A}{k_2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\omega t + \varphi_2) \approx \frac{A}{k} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\omega t).$$

Схема выборки и хранения фиксирует напряжение синусной и косинусной обмотки, когда оно достигает максимума. В итоге, напряжение на её выходе:

$$U_X = \frac{A}{k} \cdot \cos(\theta)$$

$$U_Y = \frac{A}{k} \cdot \sin(\theta).$$

В схеме есть специальный регистр угла  $\phi$ . После того, как схема выборки и хранения обновила выходные напряжения, биты этого регистра сбрасываются в «0», за исключением старшего бита, который выставляется в «1». Таким образом, в регистр угла  $\phi$  записано значение, соответствующее  $180^\circ$ . Сигналы  $U_X$ ,  $U_Y$  и два старших бита регистра  $\phi$  поступают в схему определения квадранта, в которой меняется полярность сигналов  $U_X$  и  $U_Y$  в зависимости от значения битов. Затем, с уже изменённой полярностью, сигналы  $U_X$

и  $U_Y$  умножаются на множители  $|\sin(\varphi)|$  и  $|\cos(\varphi)|$  соответственно и вычитаются. Значение множителей  $|\sin(\varphi)|$  и  $|\cos(\varphi)|$  программируется регистром  $\varphi$ . В итоге, на выходе сумматора будет сигнал ошибки  $U_{\text{ошибки}}$ .

$$U_{\text{ошибки}} = U_X \cdot \sin(\varphi) - U_Y \cdot \cos(\varphi) = \frac{A}{k} \cdot \sin(\theta - \varphi).$$

Затем, проверяется знак ошибки. Если знак «+», то  $\theta > \varphi = 180$ , тогда второй по старшинству бит в регистре угла  $\varphi$  устанавливается в «1», а старший бит не меняется. В итоге в регистре  $\varphi$  записано значение 0b1100...00, что соответствует углу  $270^\circ$ . Если знак «-», то  $\theta < \varphi = 180$ , тогда второй по старшинству бит в регистре угла  $\varphi$  устанавливается в «1», а старший бит сбрасывается в «0». В итоге в регистре  $\varphi$  записано значение 0b0100...00, что соответствует углу  $90^\circ$ .

На следующей такой итерации будет определено значение третьего по старшинству бита в регистре  $\varphi$ , затем четвертого и т.д. В итоге, если в регистре угла  $\varphi$  бит, то будет выполнено  $n$  итераций, после чего в регистре  $\varphi$  будет такое значение, при котором  $|U_{\text{ошибки}}|$  минимальна, т.е.  $\varphi = \theta$ . Таким образом будет определено угловое положение вала СКВТ. Затем, схема выборки и хранения снова обновляет выходные сигналы, и цикл опять повторяется.

Достоинства метода:

- Высокая статическая точность;
- Высокая разрешающая способность.

Недостатки:

- Не высокая частота обновления, определяемая частотой сигнала возбуждения СКВТ;
- Высокие динамические ошибки.

### **Следящий АЦП ВТ**

Наиболее быстродействующими и точными АЦП ВТ считаются, так называемые, следящие АЦП ВТ (Tracking R/D converter). На рис. 10. представлена схема такого преобразователя.

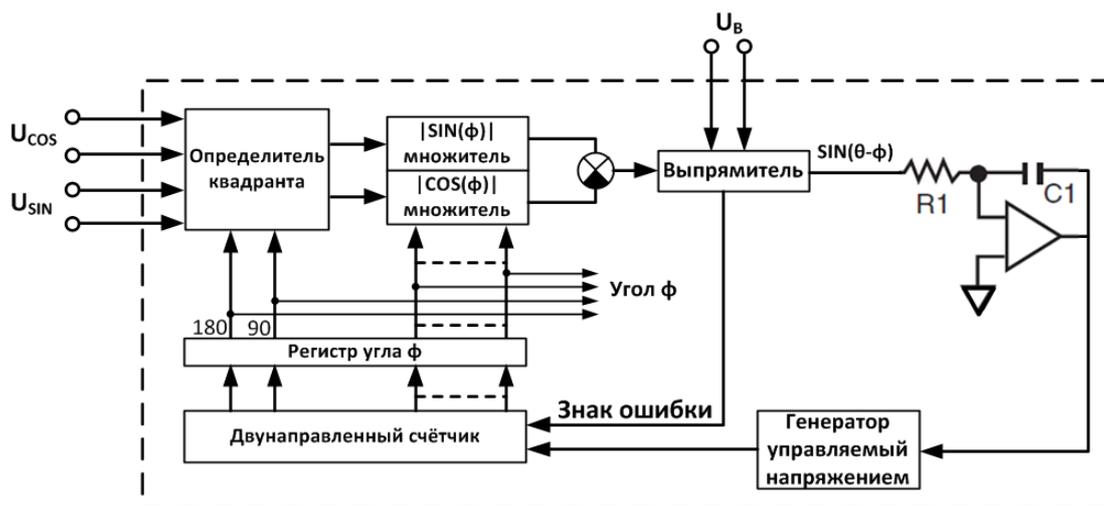


Рис. 10. Структурная схема следящего АЦПВТ

Схема работает следующим образом. На вход схемы подаётся напряжение синусной и косинусной обмоток,  $U_{sin}$  и  $U_{cos}$ , а также напряжение возбуждения  $U_B$ .  $\theta$ – угол вала СКВТ.

$$U_B = A \cdot \sin(\omega t)$$

$$U_{cos} = \frac{A}{k_1} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\omega t + \alpha_1) \approx \frac{A}{k} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\omega t + \alpha)$$

$$U_{sin} = \frac{A}{k_2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\omega t + \alpha_2) \approx \frac{A}{k} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\omega t + \alpha).$$

Рассмотрим пошагово работу данного преобразователя. Изначально, при подаче питания на схему состояние счётчика и регистра угла  $\phi$  сбрасывается в нулевое состояние. Сигналы синусной  $U_{SIN}$  и косинусной  $U_{COS}$  обмотки поступают в схему определения квадранта, где меняют свою полярность, в зависимости от состояния двух старших битов в регистре угла  $\phi$ . Затем, с уже изменённой полярностью, сигналы  $U_{SIN}$  и  $U_{COS}$  умножаются на множители  $|\cos(\phi)|$  и  $|\sin(\phi)|$  соответственно и вычитаются. Умножитель представляет программируемую матрицу сопротивления или перемножающий ЦАП. Значение множителей  $|\sin(\phi)|$  и  $|\cos(\phi)|$  программируется регистром  $\phi$ . В итоге, на выходе сумматора будет гармонический сигнал  $U_{\epsilon, AC}$ .

$$U_{\epsilon, AC} = U_{COS} \cdot \sin(\phi) - U_{SIN} \cdot \cos(\phi) = \frac{A}{k} \cdot \sin(\theta - \phi) \cdot \sin(\omega t + \alpha).$$

Затем полученный сигнал поступает на схему демодулятора, которая выполняет две функции: определяет значение ошибки  $\sin(\theta-\varphi)$  и по знаку ошибки настраивает режим работы счётчика. Выходное напряжение демодулятора  $\sin(\theta-\varphi)$  заводится на вход аналогового интегратора. С выхода интегратора напряжение поступает на вход управляемого генератора, который генерирует тактовые импульсы с частотой пропорциональной входному напряжению. Тактовые импульсы поступают на вход счётчика, который их инкрементирует или декрементирует, в зависимости от знака ошибки  $\sin(\theta-\varphi)$ . Если  $\theta > \varphi$ , то счётчик инкрементирует импульсы, увеличивая значение в регистре угла  $\varphi$  и уменьшая рассогласования  $\theta-\varphi$ . Если  $\theta < \varphi$ , то счётчик декрементирует импульсы, уменьшая значение в регистре угла  $\varphi$  и уменьшая рассогласования  $\theta-\varphi$ . В итоге, система работает таким образом, чтобы свести ошибку  $\sin(\theta-\varphi)$  к нулю. Если  $\sin(\theta-\varphi)=0$ , то  $\theta=\varphi$ , а значение в регистре угла  $\varphi$  есть угловое положение вала СКВТ.

Поскольку в данной системе последовательно включены два интегратора, аналоговый, на операционном усилителе, и цифровой, в виде счётчика, то статическая и скоростная ошибка в данной системе стремится к нулю.

Достоинства метода:

- Высокая точность;
- Высокое быстродействие;
- Низкие динамические ошибки.

Недостатки:

- Сложность схемы;
- Необходимость использования точных перемножающих ЦАП.

### **Обзор существующей элементной базы для обработки СКВТ**

Ниже представлен краткий обзор флагманов российской и зарубежной элементной базы, специализирующейся на обработки СКВТ. Все представленные ниже компоненты имеют военную приёмку и на данный момент, вероятно, используются в отечественной и зарубежной военной технике.

#### **1. Гибридная сборка SD-14550**

- Производитель: Data Device Corporation, США;
- Тип преобразователя: следящий АЦПВТ;
- Разрядность: 16 бит;
- Частота возбуждения: 500 Гц;
- Максимальная динамическая точность:  $\pm 2$  угл. мин;

- Максимальное ускорение вращения вала СКВТ: 30 рад/с<sup>2</sup>;
- Время установления при ошибке 180°: 360 мс;
- Тип исполнения: микросхема.

## 2. Микросхема AD2S80A

- Производитель: Analog Devices, США;
- Тип преобразователя: следящий АЦПВТ;
- Разрядность: 16 бит;
- Частота возбуждения: 500 Гц;
- Максимальная динамическая точность: ±2 угл. мин;
- Максимальное ускорение вращения вала СКВТ: 35 рад/с<sup>2</sup>;
- Время установления при ошибке 180°: 330мс;
- Тип исполнения: микросхема.

## 4. Гибридная сборка Ф020

- Производитель: НПО «Физика», Россия;
- Тип преобразователя: на основе АЦП;
- Разрядность: 16 бит;
- Частота возбуждения: 400Гц;
- Максимальная статическая точность: ±3 угл. мин;
- Время преобразования: 250 мкс;
- Тип исполнения: гибридная сборка.

## 4. Печатная плата АЦПВТ-22П-Д1-03

- Производитель: ЗАО «Ривас», Россия;
- Тип преобразователя: следящий АЦПВТ;
- Разрядность: 22 бит;
- Частота возбуждения: не указано;
- Максимальная точность: не указано;
- Максимальная скорость вращения вала СКВТ: 0.8 рад/с;
- Время установления при ошибке 180°: не указано;
- Тип исполнения: электронная плата.

## 5. Микросхема АЦПВТ (в разработке)

- Производитель: ЗАО «ПКК Миландр», Россия;
- Тип преобразователя: следящий АЦПВТ;
- Разрядность: 16 бит;
- Частота возбуждения: 400 Гц;
- Максимальная точность:  $\pm 3$  угл. мин.;
- Максимальное ускорение вращения вала СКВТ:  $19 \text{ рад/с}^2$ ;
- Время установления при ошибке  $180^\circ$ : не указано;
- Тип исполнения: микросхема.

### Заключение

В статье были представлены различные схемотехнические решения, используемые для обработки данного датчика. Каждому рассмотренному методу дана оценка точности, описаны достоинства и недостатки. В работе представлен краткий обзор флагманов зарубежной и отечественной элементной базы для обработки СКВТ. Указаны их точностные характеристики и алгоритмы работы.

### Список литературы

- [1]. Kessier J. Synchro/resolver conversion handbook. Режим доступа: <http://www.ddc-web.com> (дата обращения 02.03.2015).
- [2]. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1989. 301 с.
- [3]. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1989. 255 с.
- [4]. Поляков, К.Ю. Основы теории цифровых систем управления: учеб. пособие. СПб.: СПбГМТУ, 2006. 162 с.
- [5]. Кацман М.М. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2001.-464 с
- [6]. Официальный сайт ООО «Ривас». Режим доступа: <http://rivas-spb.ru/produkcija> (дата обращения 02.03.2015).
- [7]. Микросборки преобразователя «угол-код». Режим доступа: <http://npofizika.ru/pdf/F020.pdf> (дата обращения 02.03.2015).
- [8]. Data device corporation. Available at: [http://www.ddc-web.com/Products/Synchro\\_Resolver.html](http://www.ddc-web.com/Products/Synchro_Resolver.html), accessed 02.03.2015.

[9]. Synchro/Resolver to Digital Converters. Available at:  
<http://www.analog.com/en/products/analog-to-digital-converters/integrated-special-purpose-converters/synchroresolver-to-digital-converters.html>, accessed 02.03.2015.