

# Теория и практика применения датчиков угла поворота на основе СКВТ

Виктор САФРОНОВ,  
к. т. н.  
vik.saf@yandex.ru

**Актуальные до сих пор датчики угла поворота типа СКВТ (синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы) отличаются надежностью в работе, стойкостью к воздействию факторам окружающей среды и очень высокой точностью измерения. Однако они нуждаются в сложных электрических схемах подключения, управления и формирования данных. Предложенные новые схемотехнические решения существенно упрощают процесс получения данных из СКВТ и устраняют указанные недостатки. В них можно использовать как распространенные дешевые радиочастотные аналоговые, так и цифровые микросхемы.**

## Введение

СКВТ, изобретенные еще в 1930-х годах, до сих пор остаются актуальными и успешно применяются в качестве датчиков угла поворота.

Свою известность СКВТ обрели благодаря относительно простой конструкции, надежной работе в самых тяжелых условиях эксплуатации и очень высокой точности измерения (в двухотсчетном варианте) угла

поворота вала в следящих системах сервисных прецизионных приводов. Конструкция и принцип работы СКВТ изложены в литературе [1, 2]. Примеры внешнего вида показаны на рис. 1.

Современные датчики угла поворота, использующие альтернативные физические принципы (фотоэлектрический, магнито-резистивный, эффект Холла, вибро-, гироскопический и др.), привлекательны, но, к сожалению, не могут конкурировать с СКВТ ни по диапазонам, ни по совокупности параметров условий эксплуатации. Поэтому именно СКВТ сегодня наиболее востребованы в специальной и военной аппаратуре: до сих пор им нет равных по указанным параметрам.

Главные проблемы СКВТ, всегда сдерживавшие их широкое практическое применение,

заключаются в необходимости разработки сложных схемотехнических приемов подсоединения и способов выделения результатов измерений.

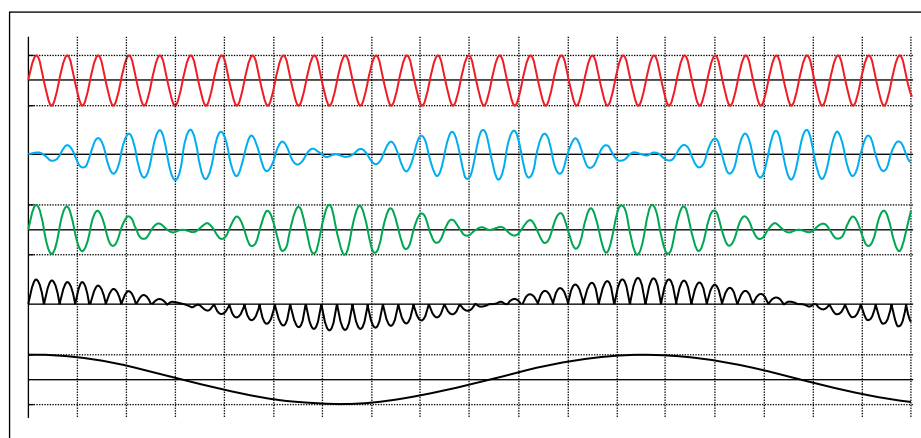
Напомним кратко, с привлечением временных диаграмм, суть известных способов применения СКВТ для измерения углов поворота выходного исполнительного вала.

## Амплитудный способ получения данных СКВТ

Этот способ традиционно используется чаще других и заключается в возбуждении первичной обмотки синусоидальным током, полученным от генератора высококачественного гармонического сигнала с частотой от 1 до 20 кГц в зависимости от типа СКВТ. Далее, для выделения данных, заложенных



**Рис. 1.** Внешний вид синусно-косинусных вращающихся трансформаторов СКВТ: а) в корпусном варианте BT-2.5; б) в бескорпусном варианте BT-71



**Рис. 2.** Временные диаграммы напряжений на обмотках СКВТ:  
1. Красный график — сигнал модуляции на первичной обмотке возбуждения.  
2. Синий график — ФКМ-сигнал на выходной синусной обмотке.  
3. Зеленый график — ФКМ-сигнал на выходной косинусной обмотке.  
4. Черный график — косинусный сигнал СКВТ на выходе фазового демодулятора.  
5. Черный график — косинусный сигнал СКВТ после фильтрации модулирующей частоты

в амплитудах считанных сигналов с косинусной и синусной обмоток, необходимо их демодулировать.

Временные диаграммы возбуждающего и выходных напряжений на обмотках СКВТ показаны на рис. 2.

По виду сигналы на рис. 2 (второй и третий сверху) принято называть фазо-кодоманипулированными (ФКМ). Они описываются известными формулами:

$$\begin{cases} U_{\sin}(t) = U_0 \sin(\varphi(t)) \times \sin(\omega t) \\ U_{\cos}(t) = U_0 \cos(\varphi(t)) \times \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi(t)$  — угол поворота выходного вала СКВТ. (Показан случай равномерного вращения.)

Функциональная схема формирования сигналов управления и обработки данных СКВТ показана на рис. 3а, а на рис. 3б приведена схема одного из главных узлов фазового демодулятора.

Ведущий генератор меандра Gen2 синхронизирует генератор синусоидального тока Gen1 и, кроме того, передает этот меандр в фазовые демодуляторы. Фазовый демодулятор представляет собой повторитель напряжения с управляемой полярностью сигнала на выходе. Отфильтрованный выходной косинусный сигнал (пятый график на рис. 2) и есть результат работы СКВТ.

Аналогично поступают с ФКМ-синусным сигналом.

Ответственными узлами за точность полученных результатов работы, а потому и схемотехнически сложными, являются генераторы модуляции Gen1 и Gen2, формирующие меандр и высококачественный гармонический сигнал со стабилизированной амплитудой, фазовые демодуляторы и фильтры.

Полная электрическая схема обработки сигналов СКВТ оказывается непростой и обычно вызывает у разработчиков желание поискать какой-нибудь датчик попроще...

## Способ фазового сдвига сигналов СКВТ

Этот способ используют гораздо реже, чем первый, хотя бы из-за того, что в нем требуется не один, а два высококачественных гармонических сигнала: синусоидальной и косинусоидальной формы со стабилизированными амплитудами и с частотой от 1 до 20 кГц в зависимости от типа СКВТ.

В отличие от первого способа возбуждения СКВТ производят гармоническими токами синусной и косинусной формы, подавая их на соответствующие «синусную» и «косинусную» обмотки. Они порождают в магнитопроводе СКВТ вращающееся магнитное поле, в которое помещена еще одна, выходная обмотка. В ней-то и индуцируется выходное напряжение, сдвинутое по фазе

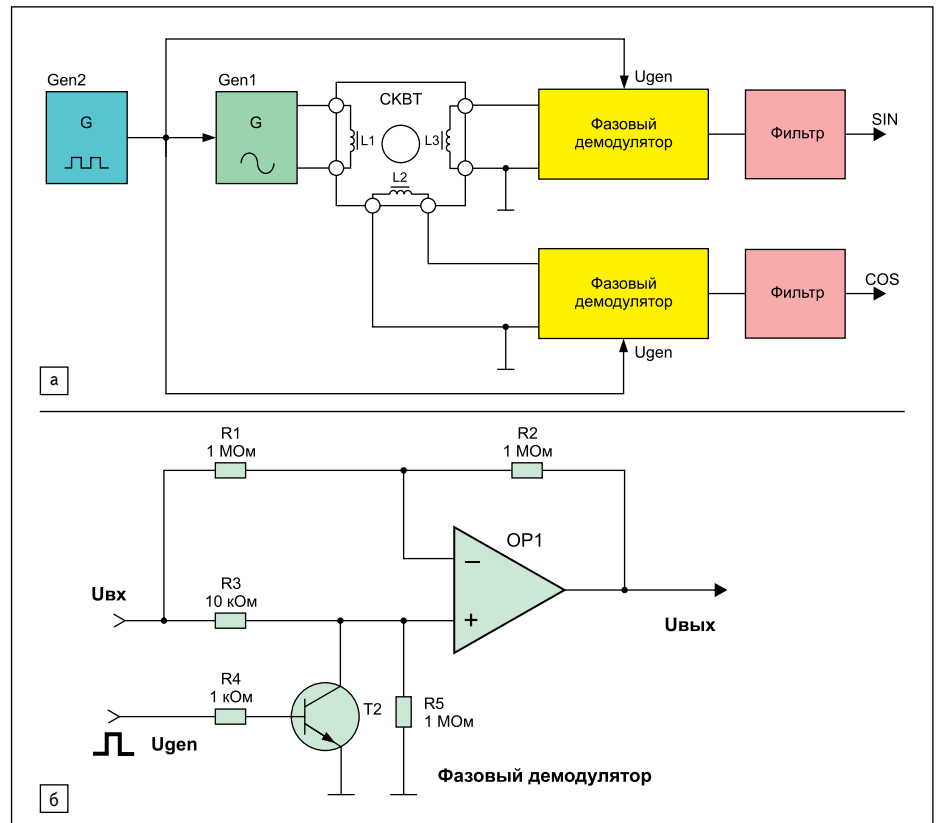


Рис. 3. а) Функциональная схема обработки сигналов СКВТ; б) схема фазового демодулятора

на угол поворота вала датчика относительно опорного сигнала, например относительно сигнала «синусной» обмотки.

В качестве опорного можно использовать сигнал «косинусной» обмотки с соответствующими поправками в расчетах.

Затем фазовый сдвиг, как правило, измеряют подсчетом заполняющих высокочастотных импульсов (рис. 4, четвертый график). Чем выше частота их следования, тем выше точность измерений СКВТ. Временные диаграммы возбуждающих и выходных напряжений на обмотках СКВТ показаны на рис. 4.

Видно, что выходной сигнал «меандр» счетных импульсов нужно синтезировать по формуле:

$$Y = f \text{ and } (\sin(\omega t) > 0) \text{ и } (U_0 \sin(\omega t + \varphi) < 0), \quad (2)$$

где  $f$  — логический сигнал, формируемый высокочастотным генератором счетных импульсов с частотой, стабилизированной кварцем.

Полная электрическая схема, построенная по этому способу, ничуть не проще схемы предыдущего варианта.

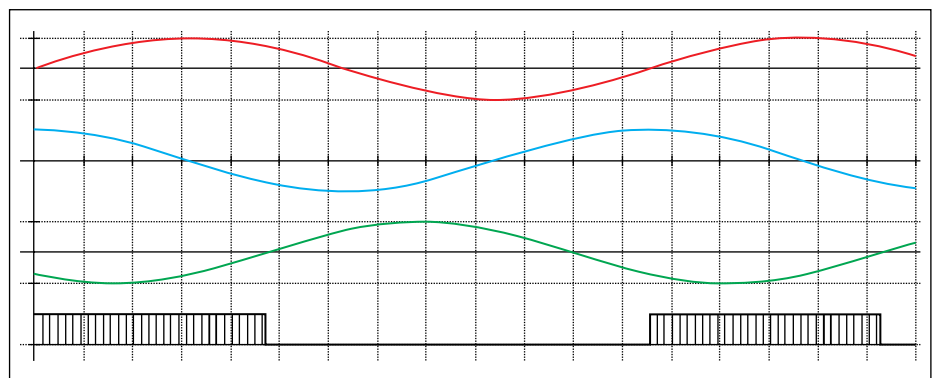


Рис. 4. Временные диаграммы возбуждающих и выходных напряжений на обмотках СКВТ:  
1. Красный график  $Y = U_0 \sin(\omega t)$  — сигнал возбуждения, подаваемый на выходную «синусную» обмотку.  
2. Синий график — сигнал возбуждения, подаваемый на выходную «косинусную» обмотку.  
3. Зеленый график  $Y = U_0 \sin(\omega t + \varphi)$  — выходной сигнал СКВТ на входной «возбуждающей» обмотке, сдвинутый по фазе на угол  $\varphi$  поворота выходного вала.  
4. Черный график — выходной сигнал «меандр», модулированный частотой генератора счетных импульсов

## Следящий способ выделения сигналов СКВТ

Analog Devices — единственная в мире компания, которая для реализации этого способа выпускает серию AD2S аналого-цифровых микросхем, например AD2S90, применив в них следящий принцип. Стоимость этих микросхем сегодня немалая, в диапазоне от \$50 до 300, но других фирм-конкурентов на рынке нет!

В России есть компании (например, «Военмех», Санкт-Петербург), выпускающие с приемкой «5», под заказ, единичные изделия в виде одноплатных контроллеров в формате плат PC-104 и Micro-PC со следящим принципом обработки, аналогичным применяемому в микросхемах AD2S90 фирмы Analog Devices. Стоимость этих плат еще выше и составляет от \$200 до 700 при стоимости самого СКВТ от \$500 до 1500.

Способ реализуется «хитро» и достаточно сложно. Не будем на нем останавливаться, так как он подробно описан в литературе [3] и своему практическому применению, вероятно, обязан тем, что основные узлы следящей системы изготовлены в виде самостоятельного набора микросхем, приобретаемых у фирмы Analog Devices по монопольным ценам. На рис. 5 показан вариант построения такого преобразователя сигналов СКВТ по следящему способу [3].

Все описанные выше известные способы построения схем для управления и выделения данных СКВТ не вызывали у разработчиков большого энтузиазма их применения ни раньше, ни потом, когда на заводе «Фиолент»

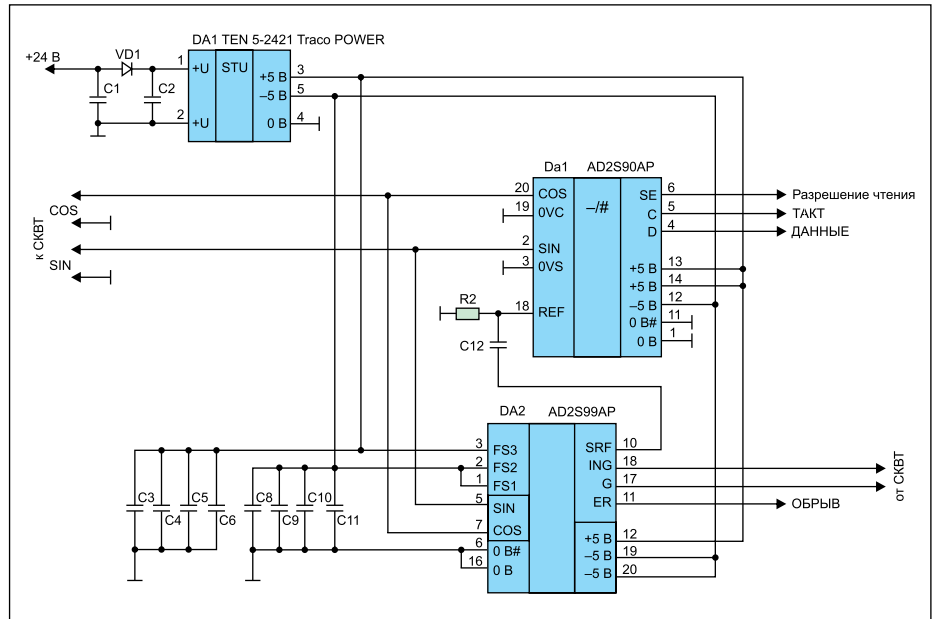


Рис. 5. Вариант построения преобразователя сигналов СКВТ по следящему способу

(СССР, г. Симферополь, 1980–2000 гг.) было освоено изготовление по гибридной технологии микросхем специальных серий «Поле» и «Колос». В них использовался следящий алгоритм работы, как позже и в упомянутых микросхемах AD2S90 (США).

Учитывая высокие цены на комплектующие детали и сложность схем, в этой статье автором предложены иные схемы подключения и способы выделения данных СКВТ, принципиально отличающиеся от известных способов.

## Способ преобразования вида модуляции сигналов СКВТ из ФКМ в АМ

Необычность предлагаемого способа заключается в предварительном преобразовании ФКМ-сигналов, формируемых СКВТ, в вид АМ (амплитудной модуляции) этих же сигналов.

Напомним, что в общем виде АМ-сигнал описывается известной формулой:

$$U_{AM} = U_0(1 + \lambda \sin(\varphi(t))) \times \sin(\omega t), \quad \text{причем } \lambda < 1. \quad (3)$$

При  $\lambda \geq 1$  возникает так называемый эффект «перемодуляции» сигнала. Раскрыв скобки, перепишем (3) так:

$$U_{AM} = U_0 \sin(\omega t) + (U_0 \times \lambda) \sin(\varphi(t)) \times \sin(\omega t), \quad \text{при } \lambda < 1. \quad (4)$$

Сравнивая формулы (4) и (1), можно заметить, что первое слагаемое в формуле (4) имеет вид гармонического сигнала возбуждения (рис. 2, первый график). Второе слагаемое в формуле (4) имеет почти такой же вид, но дополнительно каждый из ФКМ-сигналов в формуле (1) умножен на  $\lambda < 1$ . Таким образом, «синусный» и «косинусный» АМ-сигналы могут быть получены алгебраическим сложением сигнала возбуждения СКВТ с соответствующим ФКМ-сигналом, аттенуированным с помощью резистивного делителя, то есть умножением на  $\lambda < 1$ .

На рис. 6 приведены графики, показывающие реализацию этого способа.

Последующие методы обработки АМ-сигналов хорошо известны радиоинженерам, так как АМ-модуляция давно применяется почти во всех радиоприемниках. По этому

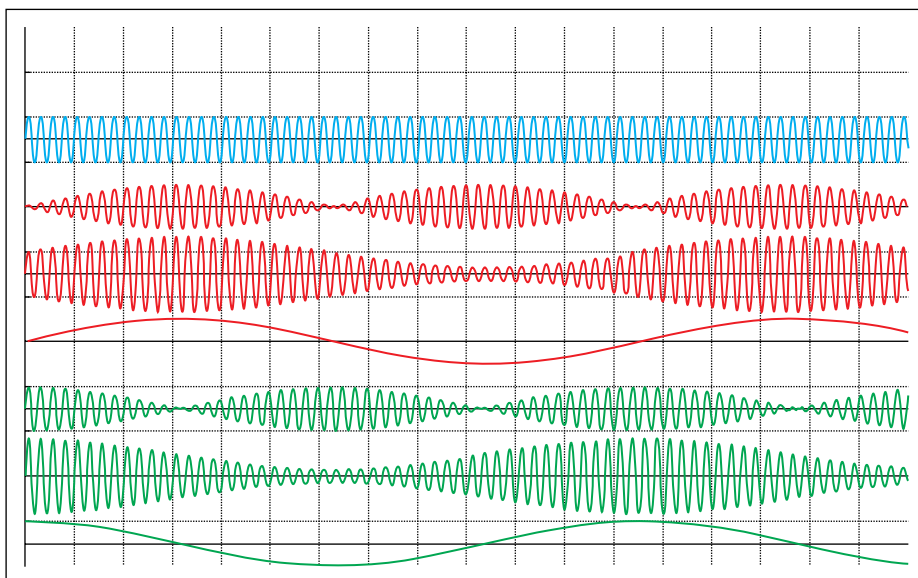


Рис. 6. Преобразование вида модуляции выходных сигналов СКВТ из ФКМ в АМ:

1. Синий график — сигнал модуляции, подаваемый в первичную обмотку возбуждения.
2. Красный график — ФКМ-выходной синусный сигнал.
3. Красный график — АМ-сигнал на выходной синусной обмотке.
4. Красный график — выходной синусный сигнал СКВТ после детектирования.
5. Зеленый график — ФКМ-выходной косинусный сигнал.
6. Зеленый график — АМ-сигнал на выходной косинусной обмотке.
7. Зеленый график — выходной косинусный сигнал СКВТ после детектирования

способу были построены и проверены в работе несколько оригинальных электрических схем с использованием СКВТ типа ВТ-2,5 и распространенных серий (например, 174) радиочастотных интегральных микросхем: АМ-детекторов, синхронных АМ-детекторов, УВЧ и УНЧ.

### Способ преобразования ФКМ в АМ и рефлективного усиления сигналов СКВТ

Этот, предлагаемый автором, способ отличается тем, что в схеме один и тот же усилитель выполняет сразу несколько операций: преобразования ФМ в АМ, детектирования, фильтрации и рефлективного усиления выпрямленного выходного косинусоидального напряжения СКВТ, тем самым дополнительно уменьшается количество элементов в электрической схеме.

Вариант функциональной схемы, работающей по этому способу, показан на рис. 7. Синусоидальное напряжение СКВТ следует подать на компаратор для определения знака синусного выходного напряжения.

Номинал резистора R3 задает коэффициент усиления, а резистором R8 можно, при необходимости, регулировать глубину АМ-модуляции.

По этому способу были построены и проверены в работе несколько оригинальных электрических схем на базе СКВТ типа ВТ-71 с использованием распространенных серий радиочастотных интегральных ми-

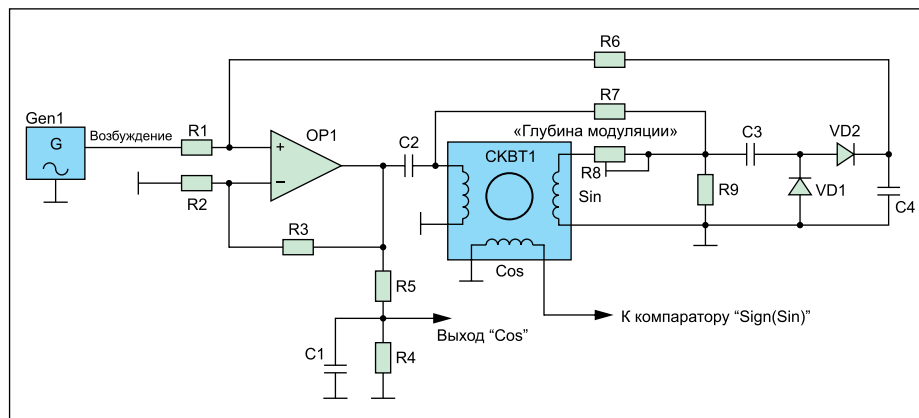


Рис. 7. Функциональная схема преобразователя ФКМ в АМ с детектированием, фильтрацией и рефлективным усилением сигналов СКВТ на одном операционном усилителе

кросхем: АМ-детекторов, синхронных АМ-детекторов, УВЧ и УНЧ.

### Способ формирования сигналов СКВТ с возбуждением от генератора тока пилообразной формы

Этот способ концептуально отличается от известного «амплитудного» способа тем, что вместо возбуждающего генератора гармонического напряжения в нем применен генератор периодического тока пилообразной формы.

Идея основана на том, что полный магнитный поток в магнитопроводе СКВТ при та-

ком возбуждении будет также периодически линейно изменяться. СКВТ является дифференцирующим элементом. Поэтому напряжения на синусной и косинусной обмотках будут пропорциональны первым производным по времени от их соответствующих нормальных проекций полного магнитного потока, то есть ЭДС на них пропорциональны, соответственно,  $\sin\varphi$  и  $\cos\varphi$  угла поворота выходного вала.

На рис. 8 приведены временные диаграммы работы СКВТ по предложенному способу.

С помощью этого способа можно непосредственно, без дополнительной обработки, формировать выходные синусные и косинусные сигналы СКВТ в виде импульсов прямоугольной формы с амплитудами, пропорциональными, соответственно,  $\sin\varphi$  и  $\cos\varphi$  поворота вала. Постоянное «плато» сигналов прямоугольной формы позволяет увеличить время их апертюры до полупериода и подавать их на входы АЦП для считывания без предварительного традиционного сохранения в устройстве выборки-хранения (УВХ).

### Способ формирования данных СКВТ с возбуждением от гиратора

Уникальность этого способа в том, что в электрической схеме вообще отсутствует генератор (генераторы) возбуждения. Вместо него (вместо них) в схему введены элементы положительной обратной связи по напряжению, образующие совместно с элементами СКВТ схему гиратора.

Гиратором называют электронную схему, позволяющую с помощью положительной обратной связи перераспределить энергию в электрической цепи с целью преобразования импеданса (R-L-C, активно-реактивного сопротивления) присоединенного к ней элемента [5]. Кроме того, с помощью гиратора и дополнительного источника питания можно устранить влияние любого из элементов (R, L, C) на величину и форму протекающего в цепи тока.

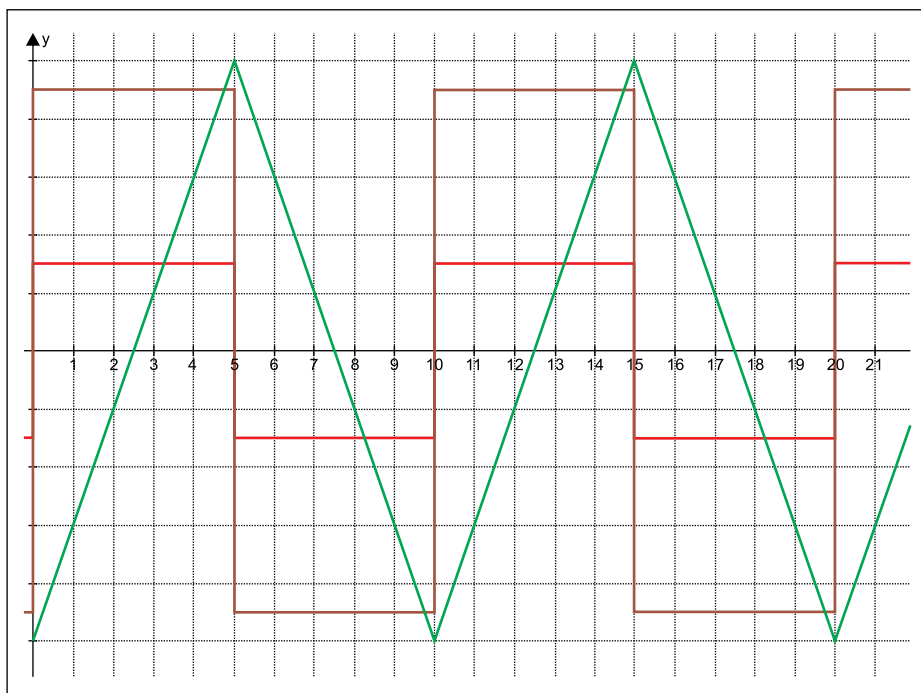


Рис. 8. Временные диаграммы работы СКВТ с возбуждением от генератора пилообразного тока

(в эксперименте соответствовали  $\varphi = 18^\circ 30'$ ):

- зеленый график — ток возбуждения СКВТ;
- коричневый график — напряжение на выходной «косинусной» обмотке;
- красный график — напряжение на выходной «синусной» обмотке

Датчик тока, установленный в цепи обмотки возбуждения СКВТ, совместно с гиратором и импульсным источником питания компенсирует энергетические потери на активном сопротивлении ( $R$ ) и преобразует активно-индуктивный ( $R$ - $L$ ) импеданс обмотки возбуждения СКВТ в идеальное реактивное сопротивление индуктивности ( $L$ ). При этом по обмотке возбуждения СКВТ станет протекать периодический ток пилообразной формы (а не экспоненциальной).

Этот способ позволяет получить гораздо более качественное возбуждение СКВТ, не зависящее от параметров конкретного образца и даже его марки. А это, в свою очередь, повышает точность работы СКВТ.

Графики, характеризующие работу СКВТ по этому способу, такие же, как на рис. 8. На рис. 9 показана функциональная схема способа формирования данных СКВТ с возбуждением от гиратора.

Этот способ может быть описан следующими формулами (по рис. 9). Уравнение для цепи первичной обмотки СКВТ запишем в виде:

$$E + k \times \alpha \times R_{\text{дат}} \times i(t) = U_L + r_L \times i(t) + R_{\text{дат}}, \quad (5)$$

где  $E$  — импульсный разнополярный источник напряжения с амплитудой  $E$ ;  $k = (1 + R3/R4)$  — коэффициент усиления усилителя ОП1 (устанавливается указанными резисторами);  $\alpha$  — глубина регулировки резистора  $R4$ , которая принимает значения от 0 до 1;  $R_{\text{дат}}$  — датчик тока, который на схеме имеет обозначение  $R4$ ;  $i(t)$  — ток в первичной обмотке СКВТ;  $U_L$  — индуктивная составляющая напряжения на обмотке СКВТ;  $r_L$  — активное сопротивление обмотки СКВТ.

При выполнении условия:

$$k \times \alpha \times R_{\text{дат}} = r_L + R_{\text{дат}} \quad (6)$$

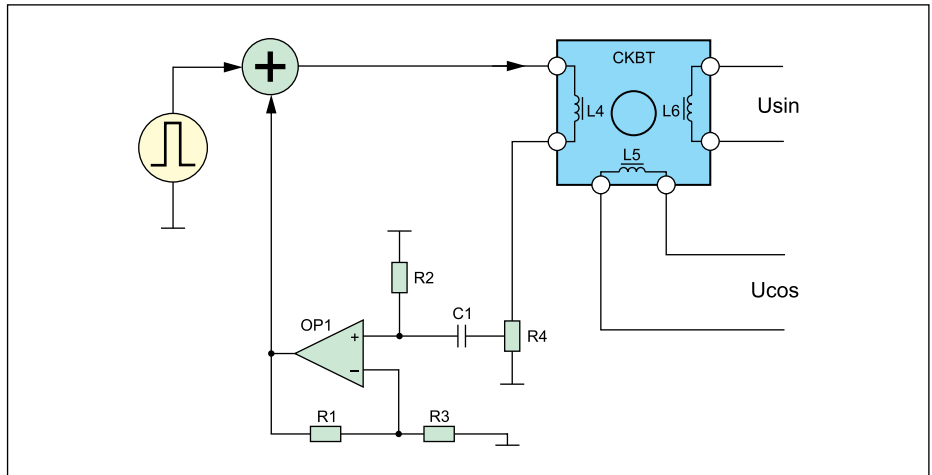


Рис. 9. Функциональная схема формирования данных СКВТ с возбуждением от гиратора

уравнение (5) станет таким:

$$E(t) = U_L,$$

а ему соответствует дифференциальное уравнение:

$$L(di/dt) = E(t). \quad (7)$$

Условие (6) можно выполнить подбором величин  $k$ ,  $\alpha$ ,  $R_{\text{дат}}$ . Решением дифференциального уравнения (7) при разнополярном значении импульсного источника питания  $E(t)$  будет  $i(t)$  — периодический ток пилообразной формы (рис. 8, зеленый график).

### Заключение

Главный недостаток СКВТ — сложные электрические схемы подключения и дорогие способы выделения результатов измерений.

Применение предложенных новых способов управления и считывания данных СКВТ дадут им «вторую» жизнь, сделав их удобными для использования совместно с цифровыми микросхемами и микроконтроллерами, например, типов AVR и PIC со встроенными аналоговыми усилителями/компараторами и АЦП. ■

### Литература

1. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электромеханика». М.: Высшая школа, 1988.
2. Арменский Е. В., Фалк Р. Б. Электрические микромашины. М.: Высшая школа, 1979.
3. High Performance, 10-bit to 16-bit Resolver to digital Converter — [www.analog.com/CN0276](http://www.analog.com/CN0276)
4. Достал И. Операционные усилители: Пер. с англ. М.: Мир, 1982.