

## **РАЗДЕЛ 6**

### **ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ**



## **РАЗДЕЛ 6: ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ**

Уолт Кестер

- **Линейные дифференциальные трансформаторы**
- **Магнитные датчики на основе эффекта Холла**
- **Оптические кодировщики**
- **Сельсины и синус-косинусные вращающиеся трансформаторы**
- **Индуктосины**
- **Векторное управление двигателями переменного тока**
- **Акселерометры**

Для измерения положения и перемещения в настоящее время широко используются линейные и цифровые интегральные схемы. Применение интегральных схем привело к эффективному стоимостному разрешению проблем, которые ранее решались с использованием дорогостоящих электромеханических средств. Системы измерения положения и перемещения широко используются в следующих приложениях: робототехника, компьютеризованное производство, автоматизированное производство, авиация и автомобилестроение.

В этом разделе рассматриваются линейные и поворотные датчики положения и связанные с ними схемы нормирования сигналов. Интересное приложение, связанное с применением аналого-цифровых интегральных микросхем, иллюстрируется на примере управления двигателем переменного тока. Раздел заканчивается обсуждением использования акселерометров.

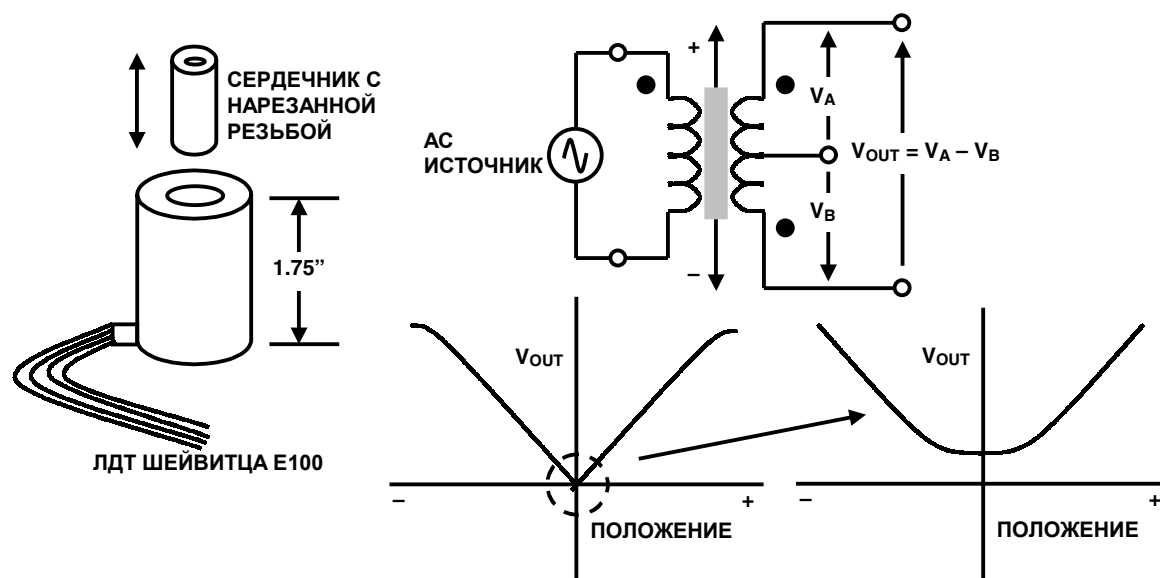
- ◆ Линейные измерения: линейные дифференциальные трансформаторы
- ◆ Датчики на основе эффекта Холла
  - ◆ Датчики приближения
  - ◆ Датчики напряженности магнитного поля с линейным выходом
- ◆ Угловые измерения:
  - ◆ Вращающиеся дифференциальные трансформаторы
  - ◆ Оптические кодировщики угла поворота
  - ◆ Сельсины и синус-косинусные вращающиеся трансформаторы
  - ◆ Индуктосины (линейные и угловые)
  - ◆ Приложения, связанные с управлением двигателями
- ◆ Ускорение и углы крена: акселерометры.

**Рис.6.1. Датчики положения и перемещения.**

## Линейные дифференциальные трансформаторы

Линейные дифференциальные трансформаторы (ЛДТ) являются точным и надежным средством для измерения линейного перемещения. ЛДТ широко используются в современной механообработке, робототехнике, авиации и компьютеризированном производстве. К концу второй мировой войны линейные дифференциальные трансформаторы приобрели распространение в качестве чувствительного элемента в управлении при промышленном производстве на основе опыта использования их в военной авиации, в торпедах и системах управления оружием. Герман Шейвитц (Herman Schaevitz) опубликовал в 1946 году работу «Линейные дифференциальные трансформаторы» (труды SASE, Volume IV, No.2), что ознакомило общественность с областью применения и возможностями ЛДТ.

ЛДТ (см. Рис.6.2) являются датчиками, выходное напряжение с которых пропорционально положению перемещающегося магнитного сердечника. Сердечник перемещается по линейному закону внутри трансформатора, состоящего из центральной, первичной обмотки и двух вторичных обмоток цилиндрической формы. Первичная обмотка возбуждается источником переменного напряжения (частота обычно составляет несколько КГц), наводя при этом во вторичных обмотках напряжения, которые меняются с изменением положения магнитного сердечника внутри сборки. Обычно, сердечник снабжается изнутри резьбой, для того чтобы облегчить крепление немагнитного штока, который в свою очередь прикрепляется к объекту, перемещение и смещение которого будет измеряться.



**Рис.6.2. Линейный дифференциальный трансформатор (ЛДТ).**

Вторичные обмотки наматываются встречно, и когда сердечник находится в центре, напряжения на вторичных обмотках равны и противоположны по знаку, а выходное результирующее напряжение равно нулю. Когда сердечник смещается от центра, напряжение во вторичной обмотке, в сторону которой этот сердечник смещается, возрастает, в то время как напряжение на противоположной обмотке уменьшается. В результате выходное дифференциальное напряжение меняется линейно в зависимости от положения сердечника. Линейность такой системы по диапазону перемещения весьма высока 0.5 % или лучше. ЛДТ обеспечивает хорошую точность, линейность, чувствительность и разрешение, а также работу без трения и высокую жесткость.

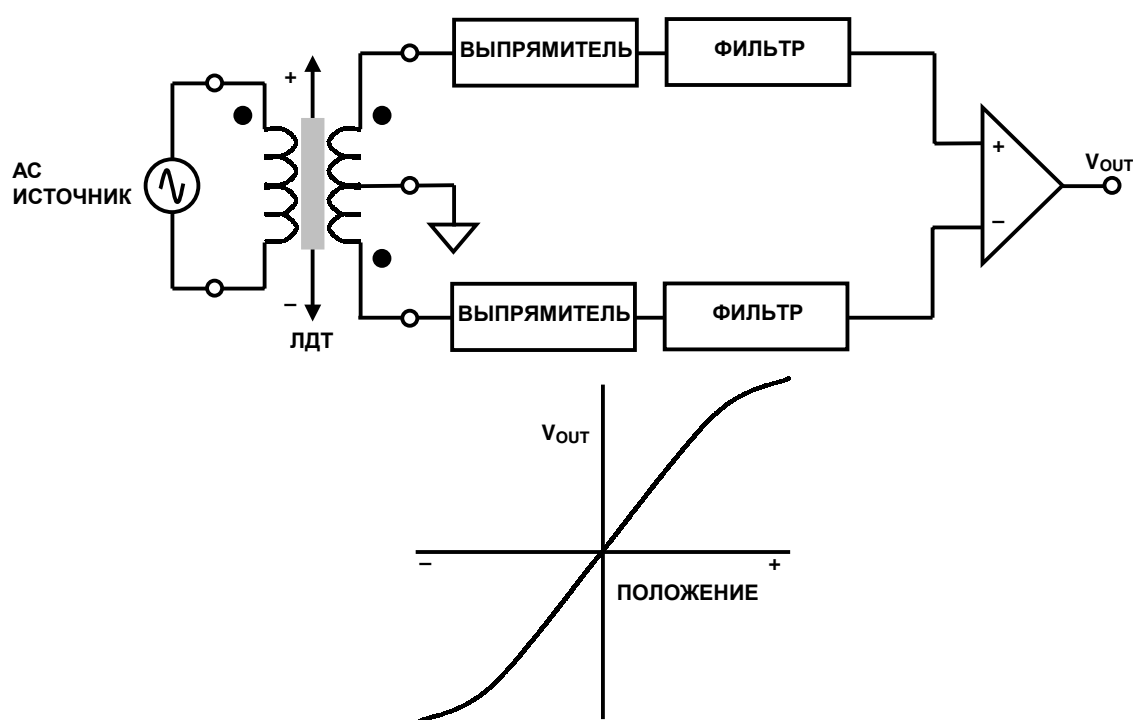
ЛДТ обладает широким спектром диапазонов измерения перемещения, обычно от  $\pm 100$  мкм до  $\pm 25$  см. Типовые напряжения возбуждения лежат в области от 1 В до 24 В по среднеквадратичной величине (СКВ), и с частотами от 50 Гц до 20 КГц. Основные спецификации для ЛДТ Шейвитца E100 приведены на Рис.6.3.

- ◆ Номинальный линейный диапазон:  $\pm 0.1$  дюйма ( $\pm 2.54$  мм)
- ◆ Напряжение возбуждения: 3 В СКВ
- ◆ Рабочие частоты: 50 Гц до 10 КГц (2.5 КГц номинальная)
- ◆ Линейность: 0.5 % от верхнего предела
- ◆ Чувствительность: 2.4 мВ/0.001 дюйма/В возбуждения
- ◆ Входной импеданс первичной обмотки: 660Ω
- ◆ Выходной импеданс вторичной обмотки: 960Ω

**Рис.6.3. Спецификация ЛДТ Шейвитца E100.**

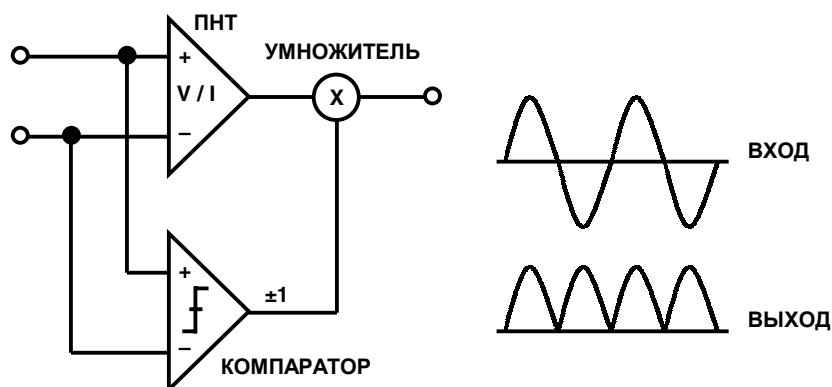
Отметим, что, когда сердечник находится в центре, истинного нуля на выходе не будет, вследствие рассогласования вторичных обмоток и наличия индуктивности рассеяния. К тому же простое измерение выходного напряжения  $V_{OUT}$  не даст информации о том, по какую сторону от нулевой позиции находится сердечник.

Цепь нормирования, которая ликвидирует указанные проблемы, и в которой величины выходных напряжений вычитаются, показана на Рис.6.4. Использование данного метода позволяет измерять перемещение сердечника в положительном или отрицательном направлении от центра конструкции.



**Рис.6.4. Улучшенная схема обработки выходных сигналов с ЛДТ.**

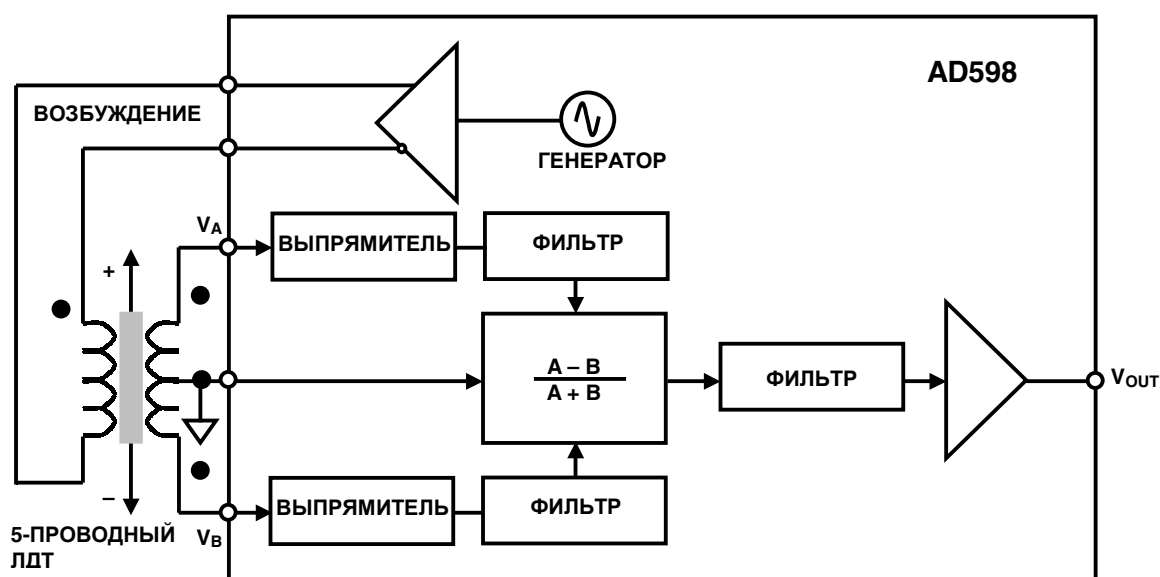
В качестве цепи измеряющей абсолютную величину напряжения можно использовать диодно-емкостной выпрямитель, в то же время для большей точности и линейности лучше использовать прецизионный выпрямитель, как продемонстрировано на Рис.6.5.



**Рис.6.5. Цепь прецизионного выделения абсолютного значения напряжения (двухполупериодный выпрямитель)**

Входной сигнал прикладывается к преобразователю напряжение/ток (ПНТ), который, в свою очередь, подает свой выходной сигнал на вход аналогового перемножителя. Знак сигнала на дифференциальном входе определяется компаратором, выход которого изменяет знак выходного сигнала ПНТ через аналоговый перемножитель. Результирующее выходное напряжение является точной копией абсолютной величины входного напряжения. Эта схема хорошо известна разработчикам интегральных схем (ИС) и она хорошо вписывается в современные биполярные процессы.

На Рис.6.6 показана микросхема нормирования сигналов с ЛДТ AD598 индустриального стандарта, которая выполняет всю необходимую обработку сигналов с данных устройств. С помощью единственного внешнего конденсатора можно менять частоту возбуждения внутреннего генератора от 20 Гц до 20 КГц. Для детектирования амплитудных значений входов каналов А и В используются цепи измерения абсолютной величины, за которыми следуют два фильтра. Для того чтобы сгенерировать относительную функцию  $[A - B]/[A + B]$  используются специальные аналоговые цепи. Отметим, что данная функция не зависит от амплитуды напряжения возбуждения на первичной обмотке, безусловно, предполагая, что сумма выходных напряжений ЛДТ остается постоянной по всему рабочему диапазону.

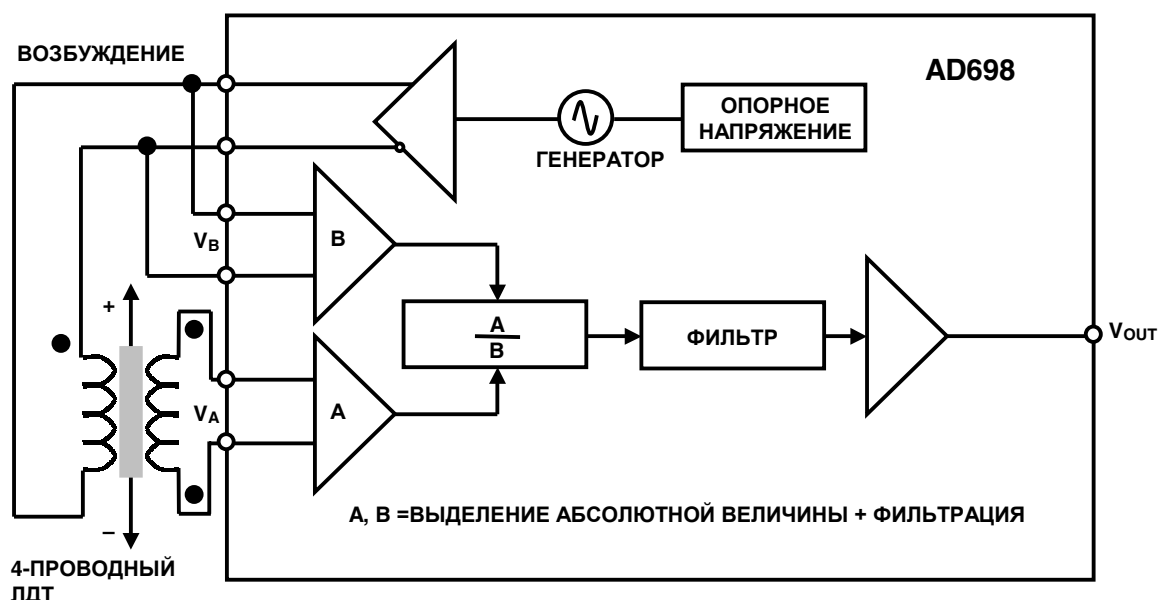


**Рис.6.6. Микросхема нормирования сигналов с ЛДТ AD598 (упрощенная).**

Последнее является истиной для большинства ЛДТ, но пользователь должен всегда консультироваться с производителем, если данная спецификация ЛДТ отсутствует в техническом описании. Отметим также, что данный метод требует использования 5-проводного ЛДТ.

С помощью единственного внешнего резистора можно устанавливать напряжение возбуждения на выходе AD598 от 1 В до 24 В СКВ. Нагрузочная способность ИС составляет 30 мА СКВ. AD598 может возбуждать ЛДТ по кабелю длиной до 300 футов, и при этом, схема не вносит фазовых сдвигов и не изменяет абсолютной величины значения сигналов. Диапазон выходных сигналов  $V_{OUT}$  составляет  $\pm 11$  В при токе 6 мА и выходные сигналы могут передаваться по кабелю длиной до 1000 футов. Величины входных напряжений в точках  $V_A$  и  $V_B$  могут уменьшаться до 100 мВ СКВ.

Устройство нормирования сигналов AD698 (см. Рис.6.7) имеет такие же спецификации как AD598, но процесс обработки сигналов несколько отличен. Отметим, что AD698 работает с 4-проводным ЛДТ и использует метод синхронной демодуляции. Каждый процессор по каналам А и В состоит из устройства выделения абсолютной величины и фильтра. Далее значение выходного сигнала канала А делится на значение выходного сигнала канала В, с тем чтобы конечный выходной сигнал был относительным и не зависел от амплитуды напряжения возбуждения. Отметим, что для AD698 сумма вторичных напряжений с ЛДТ не обязательно должна оставаться постоянной.



**Рис.6.7. Устройство нормирования сигналов с ЛДТ AD698 (упрощенно).**

Как показано на Рис.6.8, AD698 можно использовать с полумостовым включением ЛДТ. В этой конфигурации все вторичное напряжение прикладывается к процессору канала В, в то время как напряжение центрального вывода прикладывается к процессору канала А. ЛДТ в полумостовом включении не дает нулевого напряжения и отношение  $A/B$  дает сигнал о перемещении сердечника по диапазону.

Следует отметить, что концепция ЛДТ может быть распространена на устройства с вращением, и такие устройства называются вращающимися дифференциальными трансформаторами (ВДТ). Ось ВДТ эквивалентна сердечнику ЛДТ, а обмотки мотаются на неподвижной части сборки - статоре. Однако ВДТ линейны только в относительной узкой области углов и не способны измерять все  $360^\circ$ . Обычно ВДТ линейны в диапазоне  $\pm 40^\circ$  от нулевого положения ( $0^\circ$ ).

Типичная чувствительность составляет 2 - 3 мВ на вольт выходного напряжения, на градус угла поворота при входном напряжении 3 В СКВ на частотах от 400 Гц до 20 КГц. Нулевое положение отмечается особыми метками на оси и на статоре.

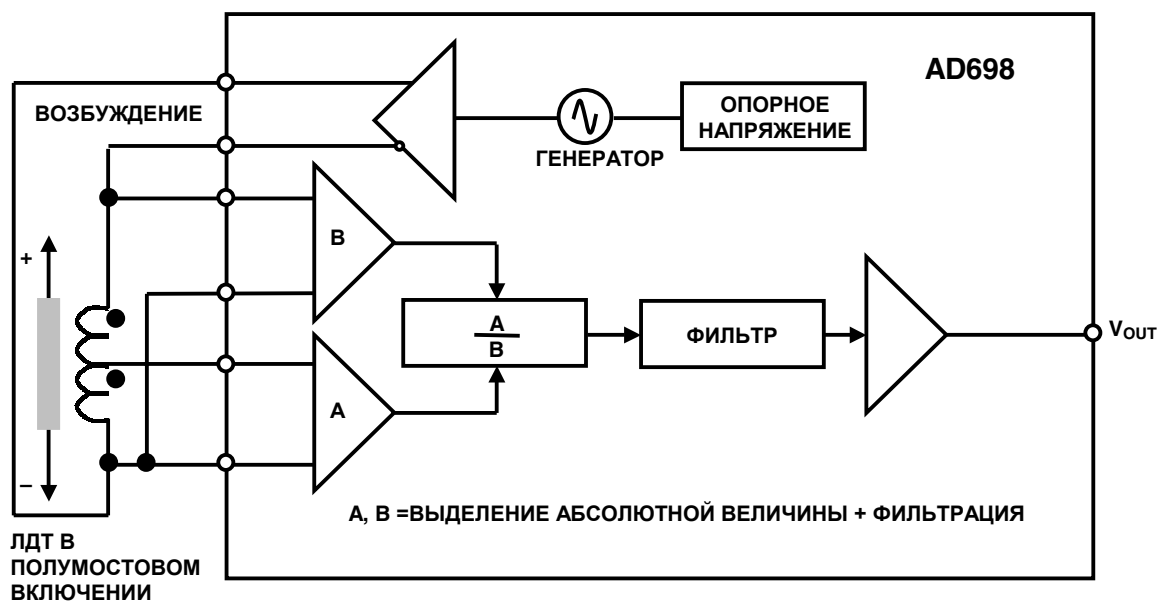
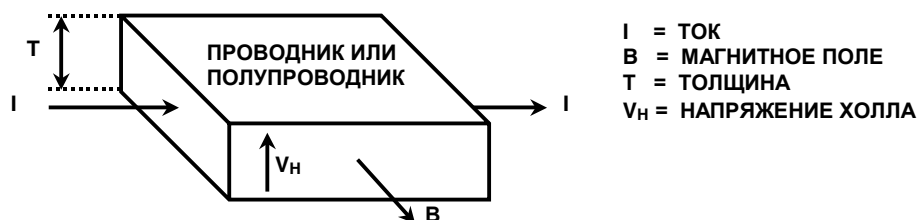


Рис.6.8. Полумостовая конфигурация включения ЛДТ.



## Магнитные датчики на основе эффекта Холла

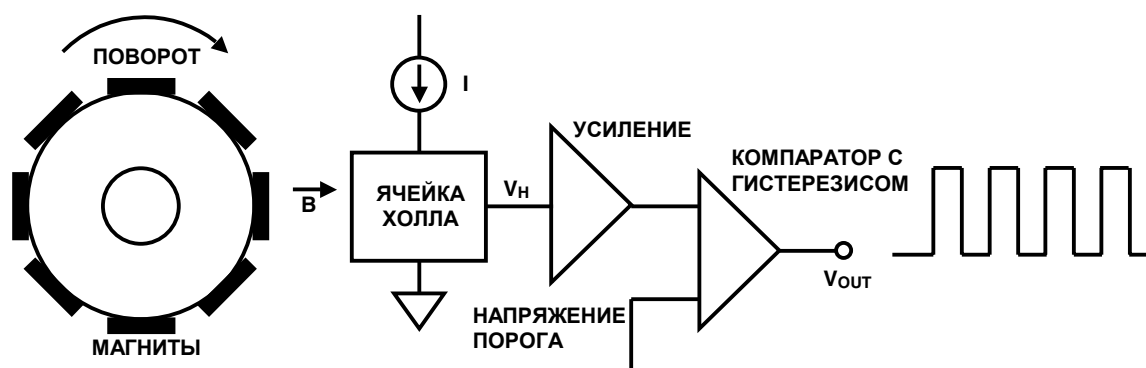
Если пропускать ток в проводнике (или полупроводнике) в присутствии перпендикулярного магнитного потока, то в перпендикулярной плоскости будет сгенерировано напряжение (см. Рис.6.9). Этот эффект называется эффектом Холла и был открыт Е.Н.Холлом в 1879 году. Напряжение  $V_H$  известно как напряжение Холла.  $V_H$  является функцией плотности тока, магнитного поля, плотности переносимого заряда и подвижности носителей в проводнике.



**Рис.6.9. Датчик на основе эффекта Холла.**

Эффект Холла можно использовать для измерения магнитного поля (и следовательно измерять ток бесконтактным способом), но более общим применением является контроль перемещения, где имеется неподвижный датчик Холла и маленький магнит, прикрепленный к движущейся части, перемещение которой необходимо определить, например, в распределительном устройстве. Датчик Холла заменяет кулачки распределительного устройства и его электрические контакты, что в существенной мере увеличивает надежность этого устройства (ликвидируются: влияние износа кулачков распределительного устройства, искрение и загрязнение его контактов). Поскольку  $V_H$  пропорционально магнитному полю, а не скорости изменения магнитного поля, как в случае индукционных датчиков, датчики Холла являются более надежными устройствами при низких скоростях перемещения по сравнению с индукционными.

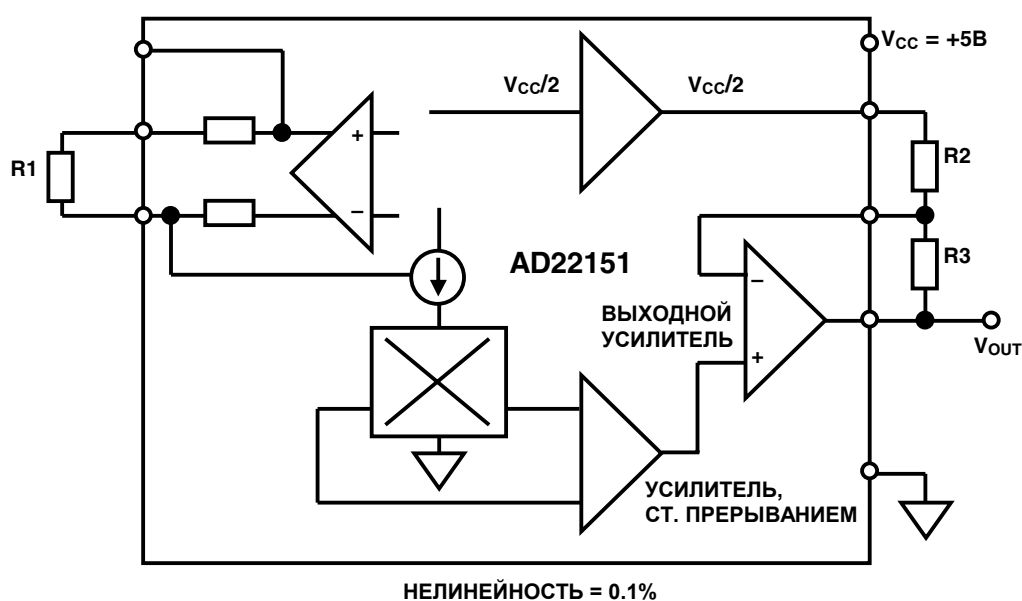
Многие материалы можно использовать для создания датчиков с эффектом Холла, однако, кремний является предпочтительным материалом, поскольку на одном и том же кристалле можно изготовить как датчик, так и цепи нормирования его сигналов. КМОП-процессы являются общими для такого приложения. С помощью датчика Холла можно сделать простое устройство измерения скорости вращения, включающего в себя датчик, усилительный каскад и компаратор, как показано на Рис.6.10. Эта цепь предназначена для определения скорости вращения применительно к автомобилю. Датчик реагирует на малое изменение магнитного поля, а компаратор имеет встроенный гистерезис для предотвращения осцилляций. Эти устройства широко распространены и выпускаются многими компаниями.



**Рис.6.10. Датчик Холла, используемый в качестве датчика вращения.**

Существует множество других приложений особенно в автомобилестроении, связанных с измерением перемещения заслонок, педалей, подвески и для измерения положения клапанов. AD22151 является линейным датчиком магнитного поля, выходное напряжение которого пропорционально магнитному полю, приложенному перпендикулярно к верхней части его корпуса (см. Рис.6.11). Для минимизации температурных дрейфов характеристик ячейки Холла, объемный элемент Холла и нормирующая электроника объединены в одном кристалле ИС AD22151.

Данная архитектура обладает достаточной универсальностью и для различных приложений требуется минимальное количество внешних компонентов. Основные характеристики ИС включают в себя компенсацию динамического дрейфа смещения путем использования операционного усилителя стабилизированного прерыванием и встроенного датчика температуры. Устройство предназначено для работы с однополярным питанием + 5 В, имеет низкое смещение и малый температурный дрейф и допускает эксплуатацию в диапазоне температур – 40°C до 150°C. Температурная компенсация (устанавливаемая внешним резистором  $R1$ ) может адаптировать ряд магнитных материалов, употребляемых обычно в позиционных датчиках. Диапазон выходных напряжений и усиление можно с легкостью изменять с помощью внешних резисторов. Типовой диапазон усиления составляет от 2 мВ/Гаусс до 6 мВ/Гаусс. Диапазон выходного напряжения можно настраивать на измерение как биполярного (переменного) магнитного поля так и униполярного. Выходное напряжение имеет динамический диапазон приблизительно от-питания-до-питания (+0.5 В до +4.5 В) и может управлять индуктивной нагрузкой током до 1 мА. Во всех конфигурациях выходной сигнал образуется от положительной шины источника питания.



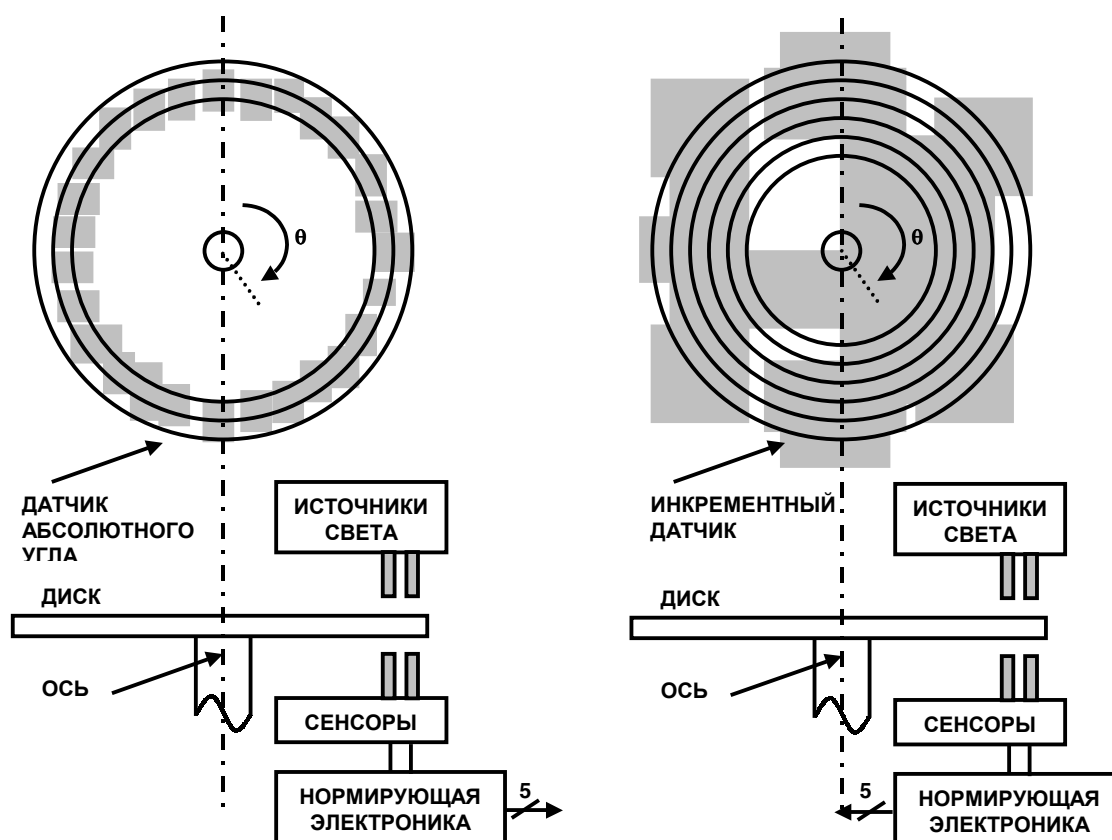
**Рис.6.11. Датчик магнитного поля с линейным выходом.**

$$V_{out} = \left[ 1 + \frac{R3}{R2} \right] \cdot [0.4 \text{ мВ}] / \text{Gauss}$$

## Оптические кодировщики

Среди наиболее популярных датчиков измерения положения оптические кодировщики нашли использование в приложениях, где требуется относительно низкая надежность и невысокое разрешение. Инкрементный оптический кодировщик (в левой части Рис.6.12) представляет собой диск разделенный на секторы, которые выполняются поочередно прозрачными и непрозрачными. Источник света располагается с одной стороны диска, а световой приемник – с другой. При вращении диска выход детектора попеременно переходит то во включенное, то в выключенное состояние, в зависимости от того, какой сектор находится между источником и приемником света, прозрачный или непрозрачный. Таким образом, кодировщик дает поток прямоугольных импульсов, которые, при последующем подсчитывании, указывают на угловое положение оси датчика.

Разрешение существующих кодировщиков (число прозрачных и непрозрачных секторов на диске) составляет от 100 до 65000, при абсолютной точности около 30 дуговых секунд (1/43200 на оборот). Большинство инкрементных кодировщиков содержат второй источник света и приемник, расположенные под углом к основным, для указания направления вращения. А многие кодировщики имеют еще третий источник и приемник для указания одного полного оборота (маркер). При отсутствии маркера абсолютный угол определить чрезвычайно трудно. Потенциально серьезный недостаток состоит в том, что инкрементные датчики требуют внешних счетчиков для определения угла внутри данного одного оборота, если питание кратковременно выключится, или если датчик потеряет некоторые импульсы из-за шумов или грязи на диске, результирующая угловая информация будет ошибочной.



**Рис.6.12. Оптические кодировщики: инкрементный и абсолютного угла поворота.**

Оптический кодировщик абсолютного угла поворота (справа на рисунке 6.12) обходит эти недостатки, но он более дорогостоящий. Диск оптического кодировщика абсолютного угла поворота делится на  $N$ -секторов (в примере  $N=5$ ), и каждый сектор еще делится радиально на непрозрачные и прозрачные участки, формируя тем самым уникальное  $N$ -битное цифровое слово с максимальным числом отсчетов  $2^N - 1$ . Сформированное таким образом цифровое слово инкрементируется при переходе от одного сектора к другому, обычно используется код Грея. Можно было бы использовать и двоичное кодирование, но оно дает большие ошибки, если одиночный бит неправильно интерпретируется приемниками. Код Грея обходит этот дефект: максимальная ошибка, получаемая из кода Грея, составляет только один младший значащий разряд после того, как код Грея будет превращен в двоичный код. Набор из  $N$  светоприемников дает  $N$ -битное цифровое слово, которое соответствует абсолютному углу поворота. Промышленные оптические кодировщики достигают 16-битного разрешения с абсолютной точностью около 20 дуговых секунд. В то же время оптические кодировщики (абсолютного угла и инкрементные) подвержены опасности повреждения в жестких промышленных условиях.

## Сельсины и синус-косинусные вращающиеся трансформаторы

За получением более точной информации об угле поворота и вращении производители систем механообработки и робототехники в настоящее время обращают свое внимание в сторону синус-косинусных вращающихся трансформаторов (СКВТ) и сельсинов. Данные устройства зарекомендовали себя весьма хорошо в промышленных приложениях, требующих от применяемых устройств малых размеров, долговременной надежности, измерения абсолютного положения, высокой точности и малой величины шумов.

На Рис.6.13 показана структура сельсина и СКВТ. Как сельсин, так и СКВТ используют роторы с одной обмоткой, которые вращаются внутри неподвижных статоров. В случае простейшего сельсина, статор имеет три обмотки расположенных под углом  $120^\circ$  одна относительно другой и соединенных звездой. СКВТ отличается от сельсинов только тем, что их статор содержит две обмотки ориентированных друг относительно друга под углом  $90^\circ$ .

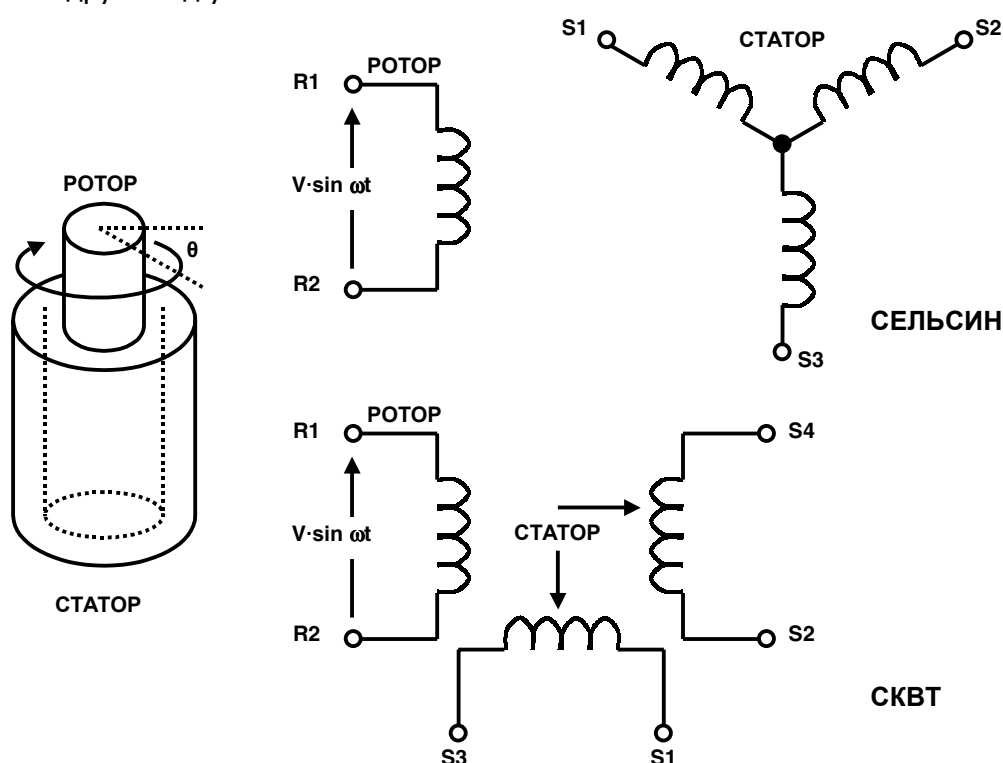


Рис.6.13. Сельсины и СКВТ.

Вследствие того, что сельсины содержат три статорных обмотки, расположенных под  $120^\circ$ , они более сложны в производстве, чем СКВТ и поэтому более дорогостоящи. В настоящее время область применения сельсинов сужается, и исключения составляют некоторые устаревшие приложения в военной технике и авиации.

Современные СКВТ производятся в бесколлекторном исполнении, при этом, они используют трансформатор для подачи сигналов на ротор. Первичная обмотка такого трансформатора располагается на статоре, а вторичная на роторе. Другой тип использует традиционное решение для подачи сигналов на обмотку ротора с помощью щеток или коллектора. Бесколлекторные СКВТ более точны, чем сельсины, т.к. не существует щеток, которые ломаются и сдвигаются во время эксплуатации. Продолжительность безотказной работы бесколлекторных СКВТ ограничивается только ресурсом их подшипников.

Большинство СКВТ специфицируется для работы с напряжениями от 2 до 40 В СКВ и с частотами от 400 Гц до 10 КГц. Диапазон угловых точностей составляет от 5 угловых минут до 0.5 угловой минуты. (60 угловых минут составляет 1 градус, 60 угловых секунд содержится в 1 угловой минуте. Следовательно, 1 угловая минута = 0.0167 градуса).

В работе сельсины весьма похожи на вращающиеся трансформаторы. Обмотка ротора возбуждается переменным опорным напряжением с частотой до нескольких КГц. Величина напряжения наведенного на любую статорную обмотку пропорциональна синусу угла  $\theta$  между осями катушки ротора и катушки статора. В случае сельсина, напряжение, получающееся на любой паре статорных зажимов будет векторной суммой напряжений двух соединенных катушек. Например, если ротор сельсина возбуждается опорным напряжением  $V \sin \omega t$ , на зажимах  $R1$  и  $R2$ , на зажимах статора напряжения будут в виде:

$$\begin{aligned} S1 \text{ до } S3 &= V \cdot \sin \omega t \cdot \sin \theta \\ S3 \text{ до } S2 &= V \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\theta + 120^\circ) \\ S2 \text{ до } S1 &= V \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\theta + 240^\circ) \end{aligned}$$

где  $\theta$  - угол поворота оси ротора.

В случае же СКВТ, при подаче на ротор опорного напряжения  $V \sin \omega t$  на зажимах статорных обмоток будут напряжения:

$$\begin{aligned} S1 \text{ до } S3 &= V \cdot \sin \omega t \cdot \sin \theta \\ S4 \text{ до } S2 &= V \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\theta + 90^\circ) = V \cdot \sin \omega t \cdot \cos \theta \end{aligned}$$

Следует заметить, что трех проводной выход сельсина можно легко преобразовать в эквивалентный формат выхода СКВТ с помощью трансформатора Скотта. Поэтому следующие далее примеры по обработке сигналов касаются только СКВТ.

Типовой цифровой преобразователь с СКВТ (СКВТ ЦП) изображен схематично на Рис.6.14. Оба выхода СКВТ подаются на косинусный и синусный перемножители. Эти перемножители содержат в себе синусную и косинусную таблицы преобразования и работают как умножающие цифроаналоговые преобразователи. Начнем с предположения, что текущее содержимое реверсивного счетчика представляет собой число, соответствующее некоторому начальному углу  $\varphi$ . Преобразователь непрерывно старается подстроить цифровой угол  $\varphi$  так, чтобы он был равен углу  $\theta$  (и отслеживал его), измеряемому аналоговым образом. Выходные напряжения статора СКВТ записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} V_1 &= V \cdot \sin \omega t \cdot \sin \theta \\ V_2 &= V \cdot \sin \omega t \cdot \cos \theta \end{aligned}$$

где  $\theta$  - угол поворота ротора СКВТ. Код цифрового угла  $\varphi$  подается на косинусный умножитель, и косинус угла умножается на  $V_1$ , в результате получается равенство:

$$V \cdot \sin \omega t \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi$$

Код цифрового угла  $\varphi$  подается на синусный умножитель и умножается на  $V_2$ :

$$V \cdot \sin \omega t \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi$$

Данные два сигнала вычитаются один из другого с помощью усилителя ошибки, в результате получается выходной сигнал в виде:

$$V \cdot \sin \omega t \cdot [\sin \theta \cdot \cos \varphi - \cos \theta \cdot \sin \varphi]$$

Используя тригонометрические функции, сократим запись:

$$V \cdot \sin \omega t \cdot [\sin(\theta - \varphi)]$$

Синхронный детектор демодулирует этот сигнал ошибки переменного тока, используя напряжение ротора СКВТ в качестве опорного. Эта операция дает сигнал ошибки постоянного тока пропорциональный величине  $\sin(\theta - \varphi)$ .

Сигнал ошибки постоянного тока подается на интегратор, выход которого управляет ГУН (генератор управляемый напряжением), а ГУН в свою очередь управляет направлением счета реверсивного счетчика, с тем чтобы:

$$\sin(\theta - \varphi) \rightarrow 0$$

Из этого следует:

$$\theta - \varphi \rightarrow 0$$

Поэтому  $\varphi = \theta$  внутри одного отсчета. Следовательно, цифровой выход со счетчика  $\varphi$  представляет собой угол  $\theta$ . Регистр-зашелка позволяет передать наружу эти данные не прерывая процесс слежения.

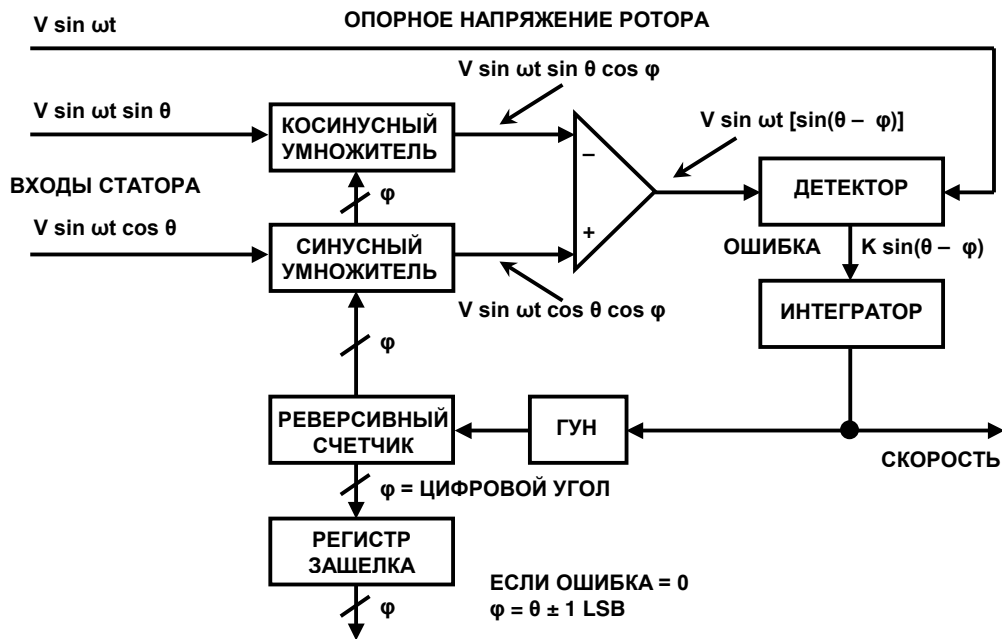


Рис.6.14. Цифровой преобразователь с СКВТ (СКВТ ЦП).

Данная цепь эквивалентна контуру управления (серво цепи) второго порядка поскольку, фактически, она содержит в себе два интегратора. Первым интегратором является счетчик, который накапливает импульсы управления, а вторым является интегратор, на который подается выход с синхронного детектора.

В контуре управления второго порядка с постоянной скоростью вращения на входе, выходное цифровое слово постоянно отслеживает входную величину без дополнительных внешних команд на преобразование и без дополнительного фазового сдвига между выходным цифровым словом и действительными углом поворота оси ротора. Сигнал ошибки появляется только во время ускорения или замедления системы. Интегральная схема (ИС) решающая задачу такого преобразования иногда называется более коротко ротационно цифровым преобразователем (РЦП).

В качестве дополнительного выигрыша следящий РЦП дает выходное аналоговое напряжение постоянного тока прямо пропорциональное скорости вращения оси. Это является весьма полезным качеством, если скорость будет измеряться и использоваться в качестве стабилизирующего элемента в системе управления, при этом, необходимость в постановке тахометра исчезает.

Поскольку работа РЦП зависит только от отношения амплитуд входных сигналов, ослабление в линиях передачи существенно не влияет на работу системы. По подобной же причине конверторы не чувствительны к искажениям формы сигнала. Фактически они могут работать с входными сигналами, гармонические искажения которых могут достигать 10 %; некоторые приложения, на практике, используют прямоугольные опорные сигналы при малых конечных ошибках.

Следящие АЦП по этой причине идеально годятся для реализации РЦП. Другие архитектуры АЦП такие как, например, АЦП последовательного приближения, конечно, можно было бы использовать, однако, следящие конверторы дают наибольшую точность и более эффективны для данного приложения.

Поскольку следящий РЦП дважды интегрирует сигнал ошибки, устройство дает высокую степень помехозащищенности (наклон характеристики составляет 12 дБ/октаву). Полная площадь под любой импульсной помехой дает некоторую ошибку. Однако типичные помехи, наведенные индуктивным образом, имеют равные положительные и отрицательные всплески. При интегрировании таких сигналов, итоговый сигнал ошибки равен нулю. Итоговая устойчивость к помехам, соединенная с нечувствительностью конверторов к падению напряжения, позволяют пользователю размещать РЦП на значительном расстоянии от СКВТ. Ослабление действия шумов усиливается с помощью синхронного детектора, ослабляющего любой сигнал несовпадающий по частоте с опорным, что особенно важно в случае широкополосного шума.

AD2S90 один из ряда интегральных РЦП предлагаемых фирмой Analog Devices. Основные спецификации ИС показаны на рисунке 6.15. Основная архитектура ИС похожа на архитектуру, изображенную на Рис.6.14. Уровень входного сигнала должен составлять 2 В СКВ  $\pm 10\%$  в диапазоне частот от 3 КГц до 20 КГц.

- ◆ 12-битное разрешение ( $1 \text{ МЗР} = 0.08^\circ = 5.3 \text{ угл. мин.}$ )
- ◆ Входы: 2 В СКВ  $\pm 10\%$ , от 3 КГц до 20 КГц
- ◆ Угловая точность:  $10.6 \text{ угл. мин.} \pm 1 \text{ МЗР}$
- ◆ Максимальная скорость отслеживания: 375 об/сек.
- ◆ Максимальная частота выхода ГУН: 1.536 МГц
- ◆ Время установления при возмущении:
  - ◆ на  $1^\circ$ : 7 мс
  - ◆ на  $179^\circ$ : 20 мс
- ◆ Наличие дифференциальных входов
- ◆ Наличие последовательного выходного интерфейса
- ◆ Питание  $\pm 5 \text{ В}$ , рассеиваемая мощность 50 мВт
- ◆ Корпус PLCC 20 контактов

**Рис.6.15. Рабочие характеристики AD2S90 РЦП.**



## Индуктосины

Сельсины и СКВТ предназначены для измерения положения при вращении, но ими можно производить и линейные измерения, если использовать подающий винт в качестве преобразователя вида движения. Альтернативой являются Индуктосины™ (термин официально зарегистрирован фирмой Farrand Controls, Inc.), измеряющие линейное перемещение прямым образом. К тому же индуктосины весьма точны и хорошо приспособлены для эксплуатации в тяжелых промышленных условиях, и не требуют наличия омического контакта между их отдельными частями.

Линейный индуктосин состоит из двух частей связанных между собой магнитным полем; в работе он напоминает многополюсный СКВТ (см. Рис.6.16). Одна часть индуктосина - масштабная линейка, фиксируется (с помощью эпоксидной смолы) к одной из осей механизма, например, к станине. Другая часть - ползунок, движется вдоль масштабной линейки и связана с той частью устройства, положение которой будет изменяться (например, суппорт механизма).

Масштабная линейка изготавливается из материала станины, как сталь, нержавеющая сталь, алюминий или пружинная лента, которые покрываются изолирующим слоем. Печатный проводник в форме длинной прямоугольной гребенки приклеивается к данному слою. Период гребенки обычно берется с шагом 0.1 дюйма, 0.2 дюйма или 2 мм. Ползунок, длиной около 4 дюймов, также содержит два печатных проводника приклеенных к его поверхности обращенной в сторону масштабной линейки. Эти два проводника имеют такую же гребенчатую форму и с тем же шагом, как и на масштабной линейке, но сдвинуты один относительно другого на 1/4 периода. Масштабная линейка и ползунок разделяются воздушным зазором около 0.007 дюйма.

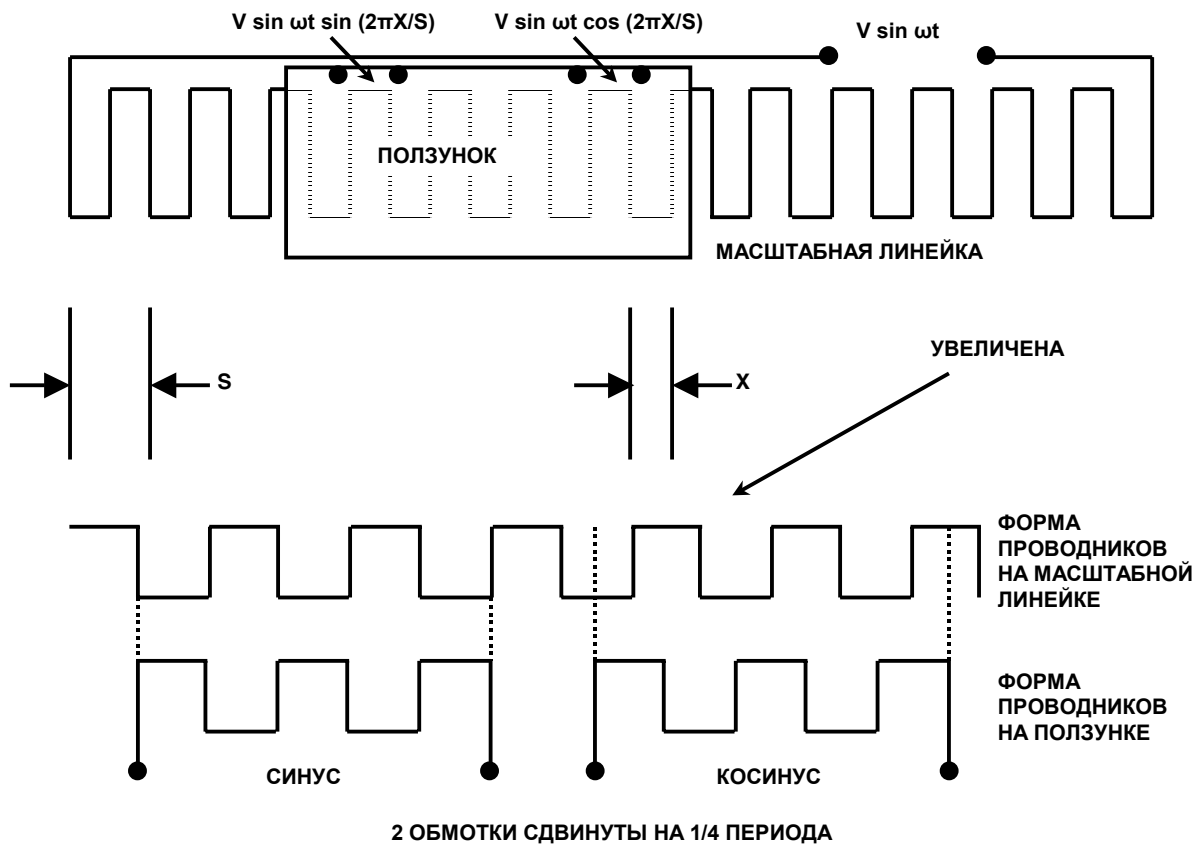


Рис.6.16. Линейный индуктосин.

Работа индуктосина напоминает работу СКВТ. Если на масштабную линейку подать напряжение синусоидальной формы, это напряжение появится на обеих обмотках ползунка и будет пропорционально синусу и косинусу смещения ползунка относительно одного зубца масштабной линейки. Если  $S$  - расстояние между зубцами, а  $X$  - смещение ползунка относительно зубца и масштабная линейка питается напряжением  $V \sin \omega t$ , тогда на обмотках ползунка будут следующие напряжения:

$$V (\text{синусный выход}) = V \cdot \sin \omega t \cdot \sin \left[ \frac{2\pi X}{S} \right]$$

$$V (\text{косинусный выход}) = V \cdot \sin \omega t \cdot \cos \left[ \frac{2\pi X}{S} \right]$$

По мере того, как ползунок движется между соседними зубцами масштабной линейки, напряжения на обеих обмотках ползунка изменяется подобно тому, как напряжения на СКВТ при повороте на  $360^\circ$ . Абсолютное положение индуктосина определяется подсчетом последовательных зубцов в любом направлении от указанной стартовой точки. Поскольку индуктосин содержит большое число периодов гребенки, необходим некоторый способ грубого контроля для того, чтобы избежать неоднозначности в измерениях. Обычный прием подсчета числа пройденных зубцов состоит в использовании для этого СКВТ или сельсина, подключенных через зубчатую пару колесо-рейка или с помощью подающего винта.

В противоположность СКВТ с высоким коэффициентом трансформации 1:1 или 2:1 типовой индуктосин работает с коэффициентами трансформации порядка 100:1. Это приводит к тому, что оба выходных сигнала лежат в милливольтном диапазоне и обычно требуют своего усиления.

Поскольку выходные сигналы ползунка получаются усреднением из большого набора пространственных циклов, малые ошибки в пространственном расположении зубцов имеют весьма малый эффект. Это является весьма важной причиной, по которой индуктосины имеют чрезвычайно высокую точность. В соединении с 12-разрядным РЦП линейный индуктосин обычно достигает разрешения в 25 микродюймов.

Можно создать вращающийся индуктосин, размещая гребенку масштабной линейки на круглом роторе, а гребенки ползунка на круглом статоре. С помощью такого устройства можно получить весьма высокое разрешение. Например, типовой вращающийся индуктосин может содержать гребенку из 360 зубцов на один оборот и можно использовать 12-разрядный РЦП. Конвертер делит каждый шаг гребенки на 4096 секторов. Умножая их на 360 зубцов, можно сказать, что вращающийся индуктосин делит окружность, как целое, на 1 474 560 секторов. Это соответствует угловому разрешению менее чем 0.9 угл.сек. Как и в случае линейного индуктосина, должны быть обеспечены средства для подсчета количества отдельных зубцов по ходу вращения оси. Это может выполняться с помощью дополнительного СКВТ, выполняющего грубые измерения.

## Векторное управление индукционным двигателем переменного тока

Индукционный двигатель переменного тока известен давно по причине своей простоты конструкции, низкой стоимости, высокой эффективности и долговременной стабильности. Однако функции двигателя ограничены из-за невозможности управлять его динамической работой. Это существенно ограничивает спектр приложений индукционных двигателей переменного тока особенно там, где требуется динамически управлять скоростью, вращающим моментом и переходной характеристикой при изменении нагрузки. Однако, последние достижения в цифровой обработке сигналов (ЦОС) и технологии построения интегральных аналого-цифровых схем обеспечивают возможность такой работы индукционных двигателей, которая ранее не представлялась возможной. Изготовители, стараясь достигнуть максимального соотношения затрат/ экономии при реализации векторного управления, могут уменьшить стоимость работ НИОКР и время на внедрение, для спектра приложений от промышленных проводов до электромобилей и локомотивов, применяя стандартные наборы микросхем.

Мало вероятно, чтобы Никола Тесла (1856-1943 гг.), изобретатель индукционного двигателя мог предвидеть, что эта «рабочая лошадка промышленности» могла бы трансформироваться в новый класс двигателей, конкурентно способных в большинстве промышленных приложений. Перед обсуждением преимуществ векторного управления необходимо понять основы работы электрических двигателей различных типов.

До настоящего времени, двигательные приложения, требующие выполнения таких задач автоматического управления как реализация переходных характеристик, настраиваемых на динамическую нагрузку, контроль постоянства момента и скорости вращения в широком динамическом диапазоне значений, были практически исключительно областью коллекторных двигателей постоянного тока и синхронных двигателей постоянного тока с постоянным магнитом. Основной причиной такого предпочтения было наличие хорошо понятных и проверенных схем управления. Несмотря на простоту управления, коллекторные двигатели постоянного тока имеют определенные недостатки; щетки коллекторов изнашиваются и требуют регулярной замены, пускатели изнашиваются и могут быть повреждены из-за неправильной работы щеток, щетки/пускатель являются источниками особого загрязнения, а искры, возникающие на механическом пускателе, могут явиться серьезной пожарной опасностью при работе в некоторых средах.

Появление мощных инверторов, способных управлять мощными двигателями, позволило ввести в практику приложений автоматического управления двигатели с другой структурой, синхронные двигатели постоянного тока с постоянным магнитом (СДПТМ). Несмотря на отсутствие многих проблем, связанных с механикой коллекторных двигателей, данные двигатели требовали более сложных схем управления и обладали собственными недостатками. Оставляя в стороне высокую стоимость, СДПТМ при больших мощностях имеют ротор с чрезвычайно большим моментом инерции, а также они ограничены в приложениях, где требуются высокие скорости вращения, из-за механических ограничений конструкции ротора.

В 1960-х годах успехи теории управления и в особенности в развитии метода *косвенного управления полем* обеспечили теоретическую основу для динамического управления индукционными двигателями переменного тока.

Вследствие большого числа математических вычислений, требуемых при реализации косвенного управления полем, обычно называемого сейчас *векторным управлением*, практическое применение метода было невозможно в течение многих лет. Имевшаяся в то время аппаратура не могла выполнять быстрое и точное измерение положения ротора и вычисление в реальном масштабе времени векторов динамического потока.

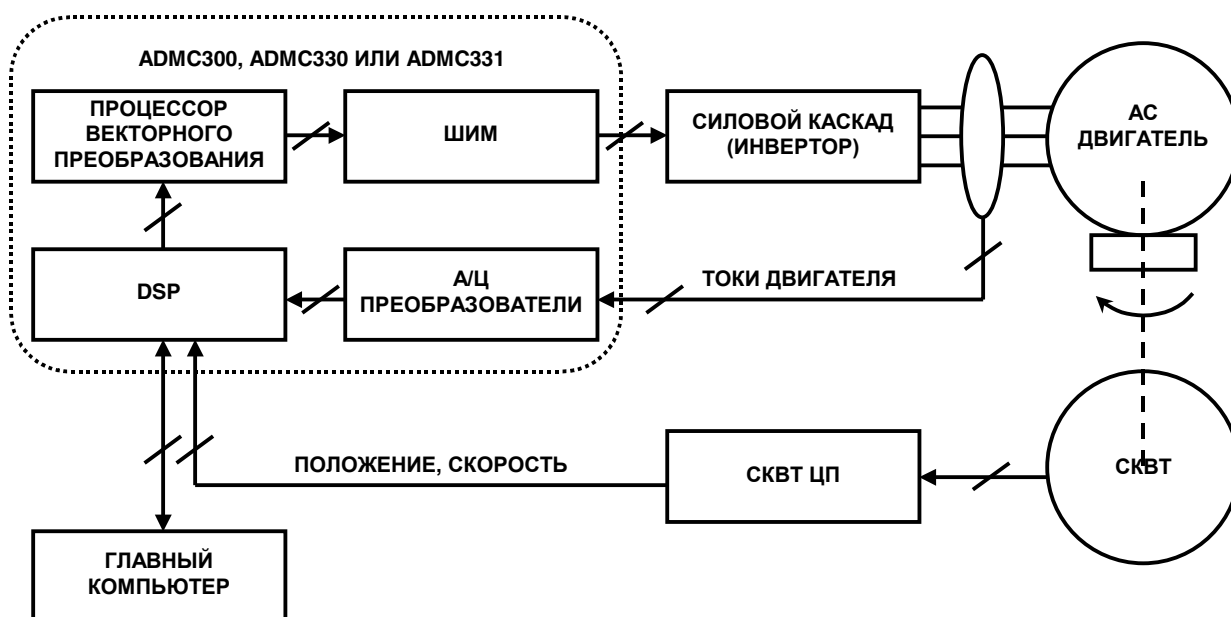
В настоящее время наличие прецизионных оптических кодировщиков, биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), высокоскоростных РЦП и высокоскоростных цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) выдвинули векторное управление на передний край моторостроения, учитывая, в особенности, преимущества, присущие индукционным двигателям переменного тока.

Упрощенная блок-схема системы управления индукционным двигателем переменного тока показана на Рис.6.17. На этом примере функции контроля выполняют ИС (ADMC300, ADMC330 или ADMC331). Входами для микросхемы управления являются токи двигателя (обычно три фазы), положение ротора и скорость двигателя. Для измерения токов часто используются датчики на основе эффекта Холла, а СКВТ и РЦП определяют положение ротора и скорость. Для выполнения необходимых вычислений векторного управления в реальном масштабе времени используются ЦСП. Результаты вычисления используются для управления инверторами. Преобразования, требуемые для векторного управления, также выполняются ЦСП.

ИС ADMC300 включает в себя 5-канальный 16-разрядный АЦП с высоким разрешением, 12-разрядный трехфазный широтно-импульсный модулятор(ШИМ) и гибкий интерфейс кодировщика для датчика положения обратной связи.

ИС ADMC330 включает в себя 7-канальный 12-разрядный АЦП и 12-разрядный трехфазный ШИМ-генератор.

ИС ADMC331 содержит в себе 7-канальный 12-разрядный АЦП и программируемый 16-разрядный трехфазный ШИМ-модулятор. Он также содержит в себе дополнительную возможность коррекции фактора мощности ( $\cos \varphi$ ). Все устройства одержат на кристалле ЦСП (20 МГц) основанный на модифицированном 16-разрядном ядре ЦСП с гарвардской архитектурой от Analog Devices. Возможно использование программного обеспечения ЦСП от поставщиков с третьей стороны для создания систем управления двигателями, на основе данных ИС.



**Рис.6.17. Управление индукционным двигателем переменного тока.**

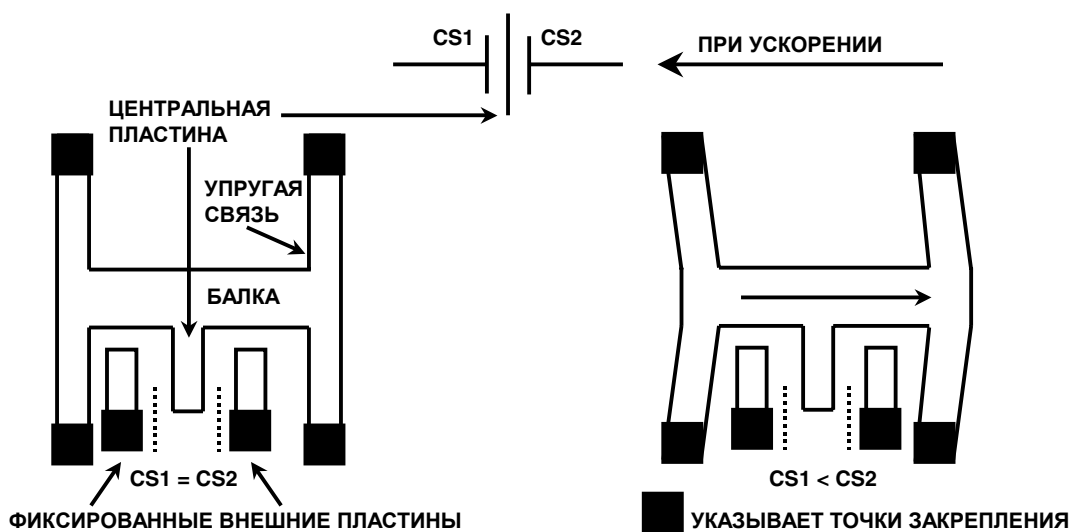
## Акселерометры

В настоящее время акселерометры широко используются для измерения угла крена, сил инерции, ударов и вибрации. Они находят широкое применение в автомобилестроении, медицине, промышленном контроле и других приложениях. Современные методы микрообработки позволяют производить данные акселерометры по КМОП технологии с высокой надежностью и малой стоимостью. Акселерометры, выпускаемые фирмой Analog Devices, выполненные как iMEMS (*Integrated Micro Electro Mechanical Systems* – интегральные микроэлектромеханические системы) представляют собой идеологический прорыв в этой технологии. Значительное преимущество данного типа акселерометров над пьезоэлектрическими акселерометрами состоит в том, что с помощью первых может быть измерена постоянная величина ускорения (т.е. их можно использовать для измерения крена, где величина ускорения является постоянной - 1 g).

- ◆ Измерение крена или наклона
  - ◆ для систем предупреждения в автомобиле
  - ◆ для мониторинга (отслеживания) состояния пациентов
- ◆ Измерение сил инерции
  - ◆ для защиты дисковых накопителей в портативных компьютерах
  - ◆ для создания датчиков аварий воздушных резервуаров
  - ◆ для навигационных систем автомобилей
  - ◆ для контроля подъемных устройств
- ◆ Измерение ударов и вибрация
  - ◆ для контроля механизмов
  - ◆ для проведения специальных испытаний
- ◆ Создание акселерометров в диапазоне ускорений от  $\pm 2g$  до  $\pm 100g$ 
  - ◆ Создание акселерометров в диапазоне частот от DC до 1 КГц

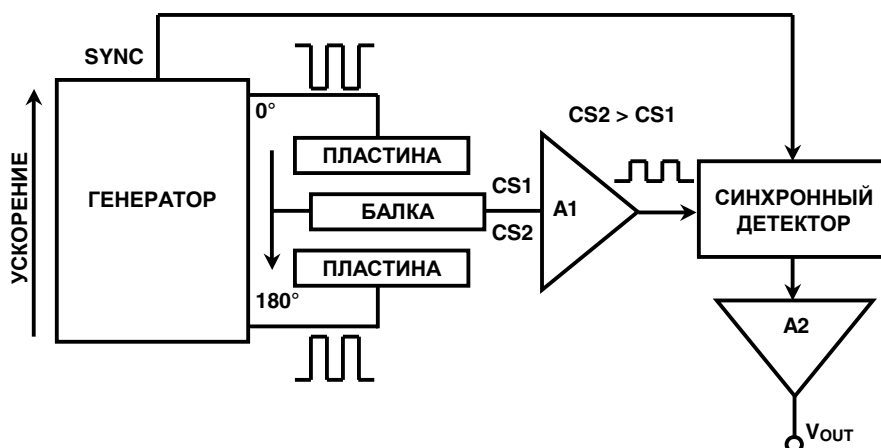
**Рис.6.18. Приложения, где используются акселерометры.**

Элемент ячейки измерения ускорения показан на Рис.6.19. Элемент поверхностного микрообработанного датчика выполняется путем осаждения поликремния на вспомогательный оксидный слой, который затем стравливается, оставляя при этом свободно подвешенный элемент датчика.



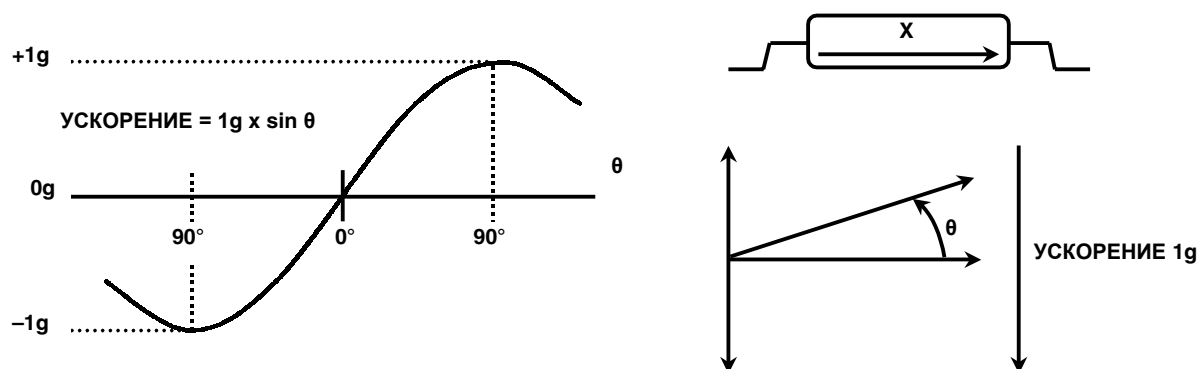
**Рис.6.19. Микрообработанные акселерометры семейства ADXL (вид сверху)**

На самом деле реальный датчик содержит десятки таких элементарных ячеек для измерения ускорения, но на рисунке, для ясности, показана всего одна ячейка. Электрической основой датчика является дифференциальный конденсатор ( $CS1$ ,  $CS2$ ), который образован центральной пластиной, являющейся частью подвижной балки, и двумя фиксированными внешними пластинами. Эти два конденсатора равны по величине в состоянии покоя (при отсутствии ускорения). При приложении ускорения масса балки вызывает ее смещение в сторону одной из фиксированных пластин и удаление от другой. Это изменение дифференциальной емкости является электрической основой для работы нормирующей электроники, показанной на Рис.6.20.



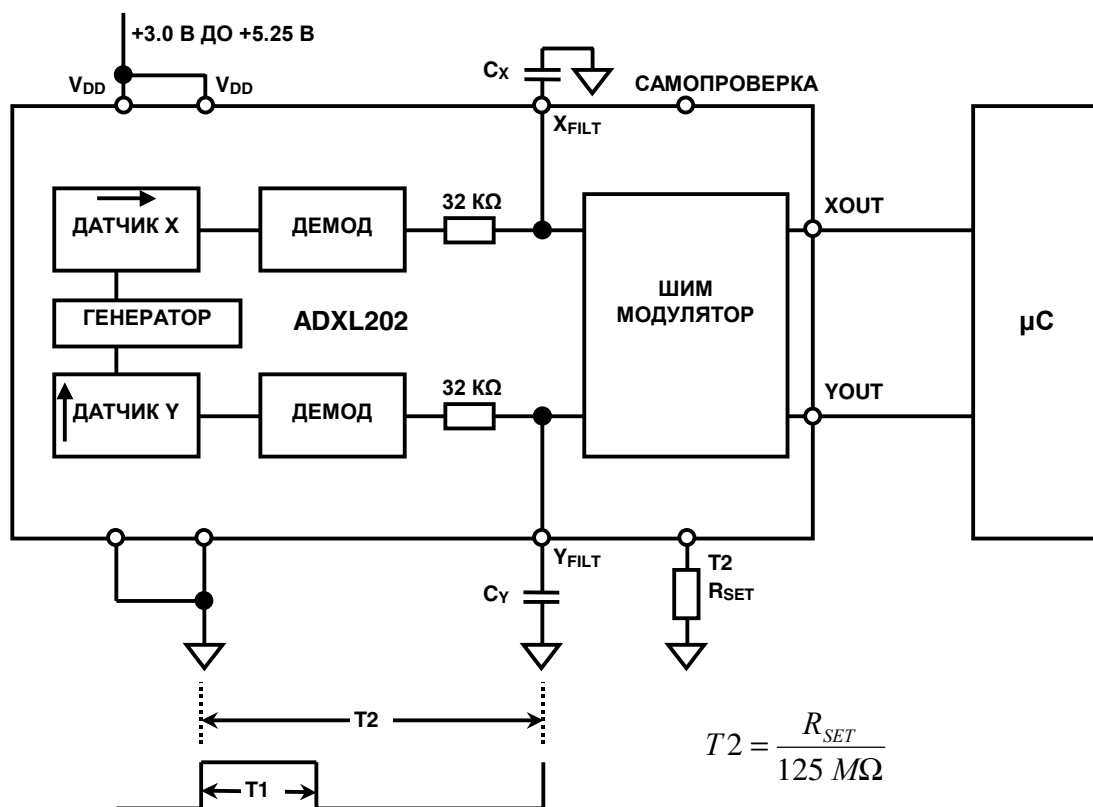
**Рис.6.20. Внутренняя структура устройства нормирования сигналов акселерометров семейства ADXL.**

На фиксированные пластины конденсатора датчика подается дифференциальное напряжение 1 МГц прямоугольной формы: амплитуды напряжения равны, а фазы сдвинуты на 180°. В состоянии покоя величины двух конденсаторов одинаковы и потому выходное напряжение в их электрическом центре (т.е. на центральной пластине, закрепленной на подвижной балке) = 0. Когда балка начинает двигаться, возникает рассогласование емкостей, и оно дает выходной сигнал на центральной пластине. Выходной сигнал будет увеличиваться с ростом ускорения. Сигнал с центральной пластины буферизуется усилителем  $A1$  и подается далее на синхронный детектор. Перемещения балки воздействует на фазу сигнала, и поэтому для получения информации об амплитуде используется синхронное детектирование. Выходной сигнал синхронного детектора подается на усилитель  $A2$ , который дает выходное напряжение  $V_{OUT}$ , пропорциональное ускорению.



**Рис.6.21. Измерение крена с использованием акселерометра.**

Одним из интересных приложений акселерометров рассчитанных на измерение малой величины ускорения является измерение угла крена. На Рис.6.21 показана реакция акселерометра при крене. Выходной сигнал акселерометра на диаграмме нормализован на верхний предел шкалы в 1 g. Выходной сигнал акселерометра пропорционален синусу угла крена по отношению к горизонтальной плоскости. Отметим, что максимальная чувствительность имеет место тогда, когда ось акселерометра перпендикулярна к направлению ускорения. Эта схема позволяет измерять углы крена от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . (поворот на  $180^\circ$ ). Однако, для того, чтобы измерить полный оборот на  $360^\circ$  следует использовать акселерометр чувствительный по двум осям.



**Рис.6.22. Двухосевой акселерометр  $\pm 2$  g ADXL202.**

На Рис.6.22 показана упрощенная блок-схема двух осевого  $\pm 2$  g акселерометра ADXL202. Выходной сигнал представляет собой импульсы, скважность следования которых содержит информацию об ускорении. Данный тип выхода крайне полезен вследствие своей высокой помехозащищенности и той особенности, что данные передаются всего по одному проводу. Стандартные микроконтроллеры недорогой стоимости имеют в своем составе таймеры, которые можно легко использовать для измерения временных интервалов  $T1$  и  $T2$ . Ускорение  $g$  вычисляется с использованием формулы:

$$A(g) = 8 \cdot \left[ \frac{T1}{T2} - 0.5 \right]$$

Отметим, что скважность в 50 % ( $T1 = T2$ ) на выходе дает  $g = 0$ . Величину  $T2$  не следует измерять в каждом цикле измерения. Ее необходимо модифицировать только тогда, когда требуется учесть влияние изменения температурных условий.

Поскольку временной период  $T_2$  присутствует одновременно в каналах  $X$  и  $Y$ , его необходимо измерять только по одному каналу. С помощью внешнего резистора период  $T_2$  можно устанавливать в пределах от 0.5 мс до 10 мс.

В данном акселерометре можно получить аналоговое напряжение, отражающее величину ускорения, путем буферизации сигналов с выходов  $X_{FIL}$  или  $Y_{FIL}$ , или путем пропускания сигналов с выходов «скважности» через RC фильтр для восстановления их постоянной составляющей.

Единственный акселерометр не может удовлетворять всем приложениям. Особенно таким, где требуются акселерометры с низким и высоким пределами по  $g$ . Устройства с низким  $g$  полезны в таких приложениях, как измерение угла крена, а акселерометры с высоким  $g$  требуются в таких приложениях как, например, датчики контроля целостности воздушных резервуаров. На Рис.6.23 показаны акселерометры семейства ADXL Analog Devices на настоящий момент времени. Отметим, что некоторые из указанных устройств являются двух осевыми модификациями и устройствами, где выходная информация представлена скважностью.

	Диапазон $g$	Спектральная плотность шума	Количество обслуживаемых осей	Тип выхода
ADXL202	$\pm 2 g$	0.5 мг/√Гц	2	Скважность
ADXL05	$\pm 5 g$	0.5 мг/√Гц	1	Напряжение
ADXL105	$\pm 5 g$	0.175 мг/√Гц	1	Напряжение
ADXL210	$\pm 10 g$	0.5 мг/√Гц	2	Скважность
ADXL150	$\pm 50 g$	1.0 мг/√Гц	1	Напряжение
ADXL250	$\pm 50 g$	1.0 мг/√Гц	2	Напряжение
ADXL190	$\pm 100 g$	4.0 мг/√Гц	1	Напряжение

**Рис.6.23. Акселерометры семейства ADXL.**



## Литература

1. Herman Schaevitz, *The Linear Variable Differential Transformer*, Proceedings of the SASE, Volume IV, No. 2, 1946.
2. Dr. Ernest D.D. Schmidt, *Linear Displacement - Linear Variable Differential Transformers - LVDTs*, Schaevitz Sensors, <http://www.schaevitz.com>
3. E-Series LVDT Data Sheet, Schaevitz Sensors, <http://www.schaevitz.com>
4. Ramon Pallas-Areny and John G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, John Wiley, New York, 1991.
5. Harry L. Trietley, *Transducers in Mechanical and Electronic Design*, Marcel Dekker, Inc., 1986.
6. AD598 and AD698 Data Sheet, Analog Devices, Inc., <http://www.analog.com>
7. Bill Travis, *Hall-Effect Sensor ICs Sport Magnetic Personalities*, EDN, April 9, 1998, pp. 81-91.
8. AD22151 Data Sheet, Analog Devices, Inc., <http://www.analog.com>
9. Dan Sheingold, *Analog-Digital Conversion Handbook, Third Edition*, Prentice-Hall, 1986.
10. F. P. Flett, *Vector Control Using a Single Vector Rotation Semiconductor for Induction and Permanent Magnet Motors*, PCIM Conference, Intelligent Motion, September 1992 Proceedings (доступно от Analog Devices)
11. F. P. Flett, *Silicon Control Algorithms for Brushless Permanent Magnet Synchronous Machines* PCIM Conference, Intelligent Motion, June 1991 Proceedings, (доступно от Analog Devices)
12. P.J.M. Coussens, et al, *Three Phase Measurements with Vector Rotation Blocks in Mains and Motion Control*, PCIM Conference, Intelligent Motion, April 1992 Proceedings (доступно от Analog Devices)
13. Dennis Fu, *Digital to Synchro and Resolver Conversion with the AC Vector Processor AD2S100*, (доступно от Analog Devices).
14. Dennis Fu, *Circuit Applications of the AD2S90 Resolver-to-Digital Converter*, AN-230, Analog Devices.
15. Aengus Murray and P. Kettle, *Towards a Single Chip DSP Based Motor Control Solution* Proceedings PCIM - Intelligent Motion, May 1996, (доступно от Analog Devices)
16. D. J. Lucey, P. J. Roche, M. B. Harrington, and J. R. Scannell, *Comparison of Various Space Vector Modulation Strategies*, Proceedings Irish DSP and Control Colloquium, July 1994, Dublin, Ireland, pp. 169-175.
17. Niall Lyne, *ADCs Lend Flexibility to Vector Motor Control Applications*, Electronic Design, May 1, 1998, pp. 93-100.
18. Frank Goodenough, *Airbags Boom when IC Accelerometer Sees 50g*, Electronic Design, August 8, 1991.

