

УДК 621.317

**СИНХРОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ
SYNCHRONOUS DETECTORS**

Е.С. Гузов, П.Н. Слепцов

Научный руководитель – Г.А. Михальцевич, старший преподаватель

Белорусский национальный технический Университет, г. Минск

E. Guzov, P. Sleptsov

Supervisor – G. Mikhaltsevich, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: Тема данного исследования – современные способы построения синхронных детекторов, служащих для выделения слабых сигналов от аналоговых датчиков при наличии различных помех.

Abstract: The topic of this research is modern methods for constructing synchronous detectors that serve to isolate weak signals from analog sensors in the presence of various interferences.

Ключевые слова: усилители, синхронные детекторы, помехи, полезный сигнал, опорный сигнал.

Key words: amplifiers, synchronous detectors, interference, useful signal, reference signal.

Введение

Синхронный детектор может извлекать слабые сигналы, которые могут быть ниже уровня шума. Это полезно при измерении очень малых величин, чего либо.

Во многих системах шум увеличивается с уменьшением частоты. Осуществление измерений в низкочастотном шуме увеличивает отношение сигнал/шум. Следовательно, модуляция источника света с частотой в несколько килогерц облегчает измерение отраженного сигнала.

Основная часть

Существует несколько способов модуляции сигнала возбуждения. Самый простой из них – периодически включать/выключать источник сигнала. Этот метод хорошо работает при управлении светодиодами и регулировке напряжения питания мостового тензодатчика и некоторых других цепей.

Узкополосный полосовой фильтр может удалить всю ненужную полосу частот и выделить интересующие полосы частот, и восстановить исходный сигнал. Другим решением является способ, в котором синхронный демодулятор переводит модулированный сигнал в область нулевых частот. Устройства, работающие по этому принципу, называются синхронными усилителями.

На рисунке 1 показана простая схема использования синхронного усилителя. Испытуемую поверхность облучают источником излучения, модулированной частотой 1 кГц. Фотодиод измеряет световой поток, отраженный от заданной поверхности, пропорционально количеству загрязнения. Опорный и измерительный сигналы представляют собой синусоидальные колебания с одинаковой частотой и фазой, но разной

амплитудой. Опорный сигнал, излучаемый источником света, имеет постоянное значение амплитуды, а амплитуда измеряемого сигнала зависит от коэффициента отражения.

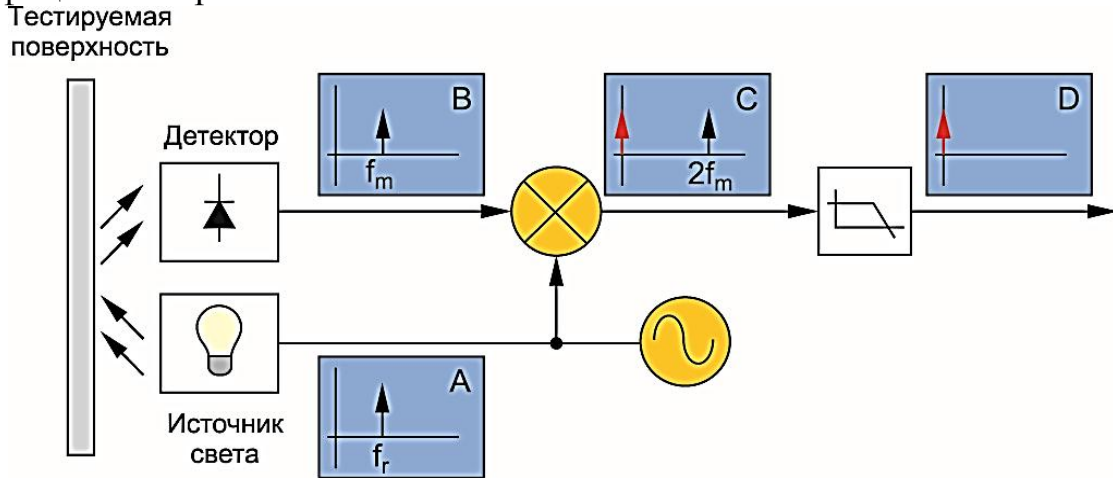


Рисунок 1 – Способ измерения степени загрязнения поверхности, установленный в синхронном усилителе

Результатом умножения 2-х синусоидальных сигналов является сигнал, с суммарной и дифференциальной составляющими. В этом случае исходный сигнал будет иметь ту же частоту, в результате чего можно увидеть сигнал с нулевой частотой и сигнал с частотой, в 2 раза превышающей частоту исходного сигнала

Преимущество этого метода измерения очевидно, когда нужно измерить зашумленные входные сигналы. В результате умножения модулированный сигнал возвращается к нулевой частоте, а остальная часть сигнала перемещается на другие частоты, отличающиеся от нуля.

На рисунке 2 показана ситуация, когда на входе измерительной системы имеется сильный источник шума на частотах 50 Гц и 2,5 кГц.

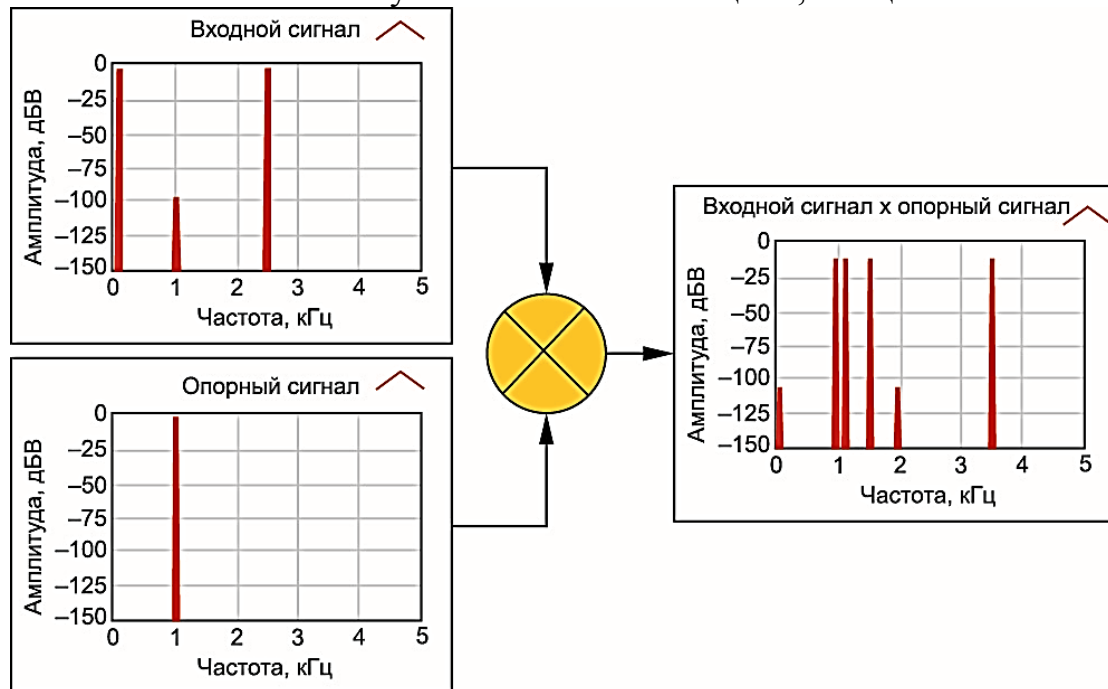


Рисунок 2 – Синхронная демодуляция «вытягивает» слабый сигнал с частотой 2,5 кГц и 1 кГц при наличии на входе сильного источника шума с частотой 50 Гц

Желаемый сигнал на очень низких уровнях модулируется синусоидальной волной с частотой 1 кГц. Входной сигнал системы умножается на опорный сигнал для получения требуемого сигнала на нулевой частоте и требуемого сигнала на частотах 950 Гц, 1050 Гц, 1,5 кГц, 2 кГц и 3,5 кГц. Как упоминалось выше, сигнал нулевой частоты содержит необходимую информацию, а фильтр нижних частот может отфильтровывать все остальные частоты.

Поскольку компоненты шума в частотной области, близкой к полезному сигналу, появляются на частотах, близких к нулю, очень трудно выбрать частоту модуляции без сильного источника шума. Если это невозможно, рекомендуется использовать фильтр нижних частот с очень низкой частотой среза и большой крутизной частотной характеристики, несмотря на длительное время установления сигнала.

Практическое применение системы синхронной обработки сигналов.

Модуляция источника синусоидальным сигналом не всегда возможна, поэтому в некоторых случаях может быть использована модуляция прямоугольной последовательностью импульсов. Генерировать прямоугольный сигнал возбуждения намного проще, чем генерировать синусоидальную волну. Эту проблему можно решить довольно простым способом, например, с помощью микроконтроллера, управляющего МОП-транзистором.

На рисунке 3 показана простая реализация синхронного усилителя. Микроконтроллер или другое устройство генерирует сигнал возбуждения. Это прямоугольная последовательность, которая создает отклик от датчика. 1-й этап усиления – это усилитель при использовании фотодиода в качестве датчика или приборный усилитель при усилении сигнала от тензодатчика.

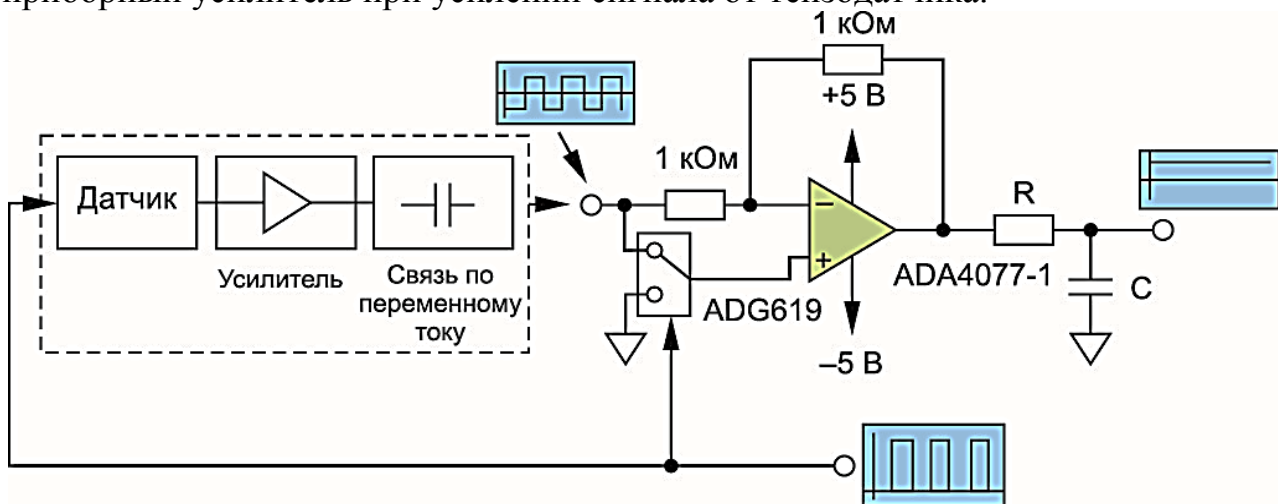


Рисунок 3 – Синхронный усилитель, использующий прямоугольные колебания в качестве сигнала возбуждения

Схема переключения сигнала возбуждения реализована на ключе ADG619. Если сигнал возбуждения принимает положительное значение, коэффициент усиления усилителя устанавливается равным +1. Для отрицательного периода полуволны коэффициент усиления устанавливается равным -1. Математически эта операция аналогична умножению измеренного сигнала на линейную угловую волну. На выходе RC-схемы фильтр удаляет другие частотные составляющие

сигнала, и выходное напряжение сигнала на нулевой частоте равно половине диапазона измеряемой прямоугольной последовательности.

Схема проста, но очень важно правильно выбрать операционный усилитель. Входной каскад, подключенный к переменному току, значительно снижает низкочастотный входной шум, но не устраняет мерцающий шум и погрешность смещения последнего усилителя. Прецизионный усилитель ADA4077-1 идеально подходит для этой схемы с шумом 250 нВ (пиковое значение) и смещением 0,55 мВ/°С в диапазоне частот от 0,1 Гц до 10 Гц.

Синхронные усилители, использующие прямоугольные сигналы, просты, но обладают меньшим подавлением шума, чем усилители, использующие синусоидальные сигналы.

Другим вариантом является использование встроенного синхронного демодулятора, показанного на рисунке 4. Микросхема ADA2200 оснащена буферным входом, программируемым фильтром, умножителем и сдвигом опорного сигнала на 90°, что позволяет синхронизировать опорный и измерительный сигналы.

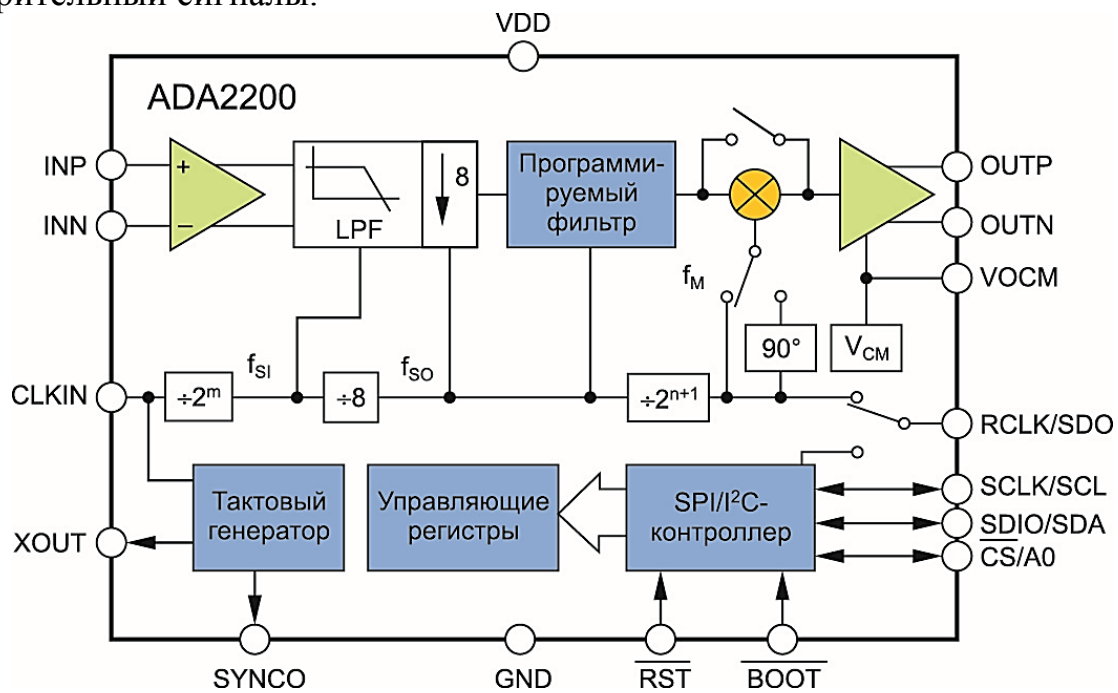


Рисунок 4 – Структурная схема микросхемы ADA2200

Схема на интегрированном синхронном демодуляторе ADA2200 показанная на рисунке 5, проста в реализации и требует только источника тактовых импульсов с частотой, в 64 раза превышающей частоту опорного сигнала. Поскольку программируемый фильтр по умолчанию определен как полосовой фильтр, нет необходимости реализовывать связь по переменному току. Поскольку аналоговый выход выводит компоненты "зеркального" канала (изображения), полученные в результате умножения сигнала на частоту дискретизации, для удаления нежелательных компонентов используется RC-фильтр. Это позволяет с помощью сигма-дельта АЦП измерять только сигналы, демодулированные на нулевой частоте.

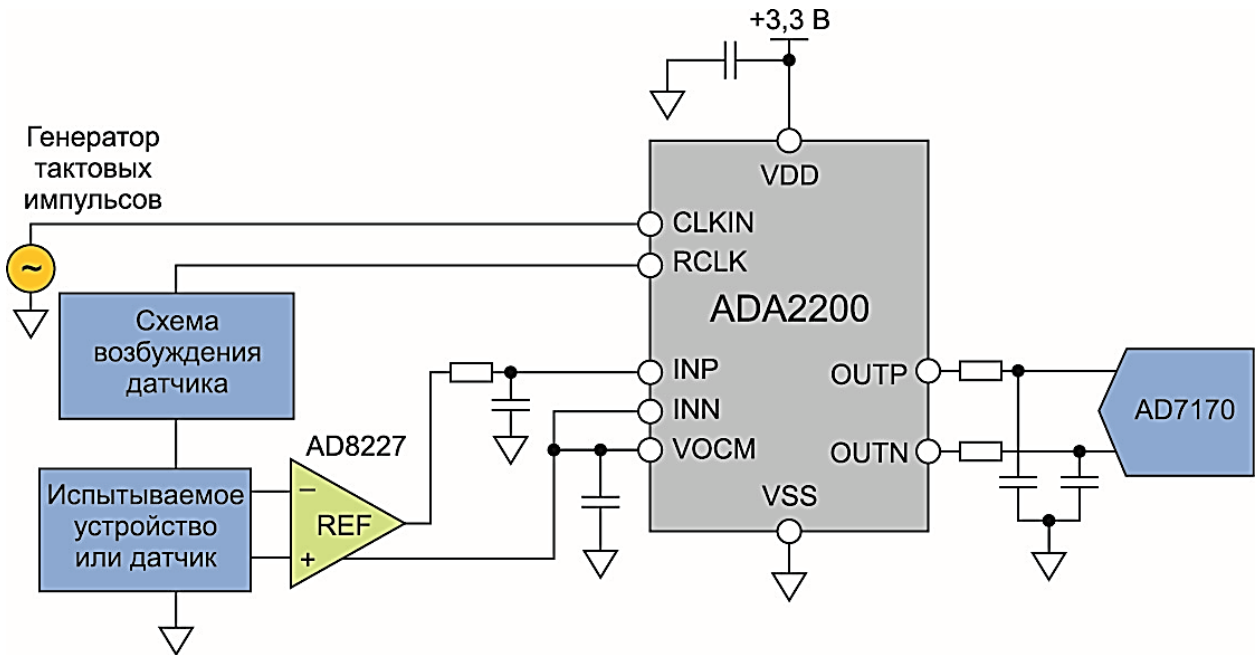


Рисунок 5 – Синхронные усилители, реализованные с микросхемой ADA2200

Усовершенствование метода синхронизации с использованием сигнала прямоугольной последовательности.

На рисунке 6 показано улучшение схемы путем модулирования прямоугольной последовательности. Датчик возбуждается прямоугольной последовательностью, и измеренный сигнал умножается на синусоидальную волну той же частоты и фазы. Затем, когда некоторые сигналы на основной частоте "перемещаются" на нулевую частоту, а все остальные гармоники перемещаются на ненулевую частоту, фильтр нижних частот может фильтровать все сигналы, кроме измеренного сигнала (нулевая частота).

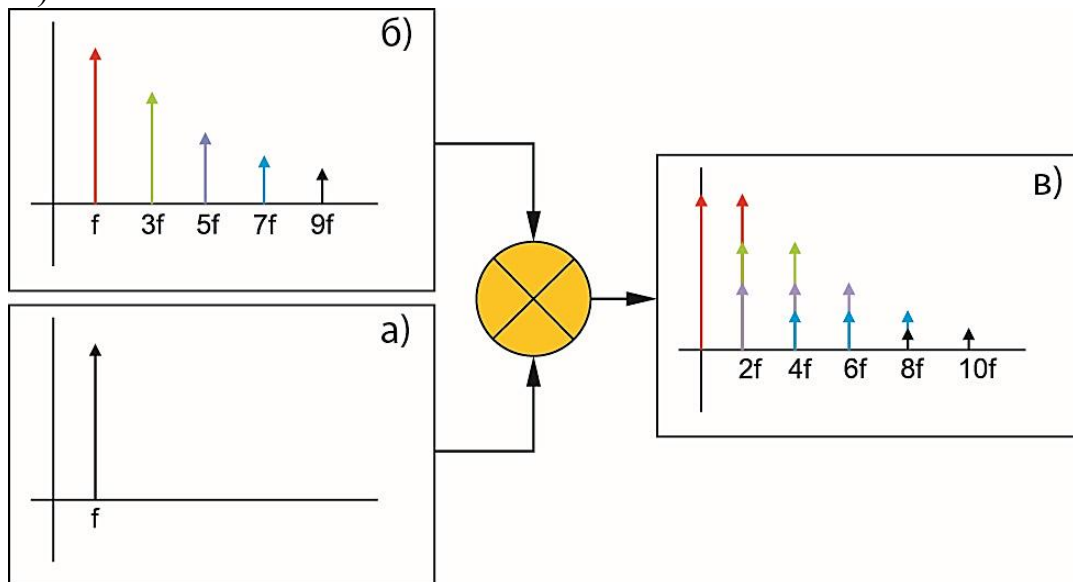


Рисунок 6 – Использование синусоидальной волны в качестве опорного сигнала предотвращает появление шума из-за демодуляции на нулевой частоте

Более сложный фазовый сдвиг между опорным сигналом и измерительным сигналом приводит к уменьшению значения выходного сигнала в отличие от ситуации, когда сигнал полностью согласован по фазе. Это может произойти,

если схема согласования сигнала датчика включает в себя фильтр, который генерирует фазовую задержку. Для схем с аналоговыми синхронными усилителями единственный способ справиться с этим – включить схему компенсации фазы в схему опорного сигнала. Схема должна быть настраиваемой, чтобы иметь возможность компенсировать различные задержки, и эта задача не является тривиальной из-за зависимости от температуры и точности используемых компонентов. Более простой альтернативой является включение в схему 2-го этапа умножения сигнала, дополнительного блока, который реализует умножение сдвинутого на 90° измерительного сигнала и опорного сигнала. Результатом этого изменения является возможность приема сигналов, не зависящих от фазы входного сигнала (рисунок 7) объясняется это решение. Выходной сигнал умножителя (обе операции умножения) выдает сигнал, пропорциональный синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющим входного сигнала. Чтобы вычислить амплитуду входного сигнала, вам просто нужно найти корень из суммы квадратов сигналов I и Q. Дополнительным преимуществом этой архитектуры является то, что может быть вычислена разность фаз между возбуждающим опорным сигналом и входным сигналом.

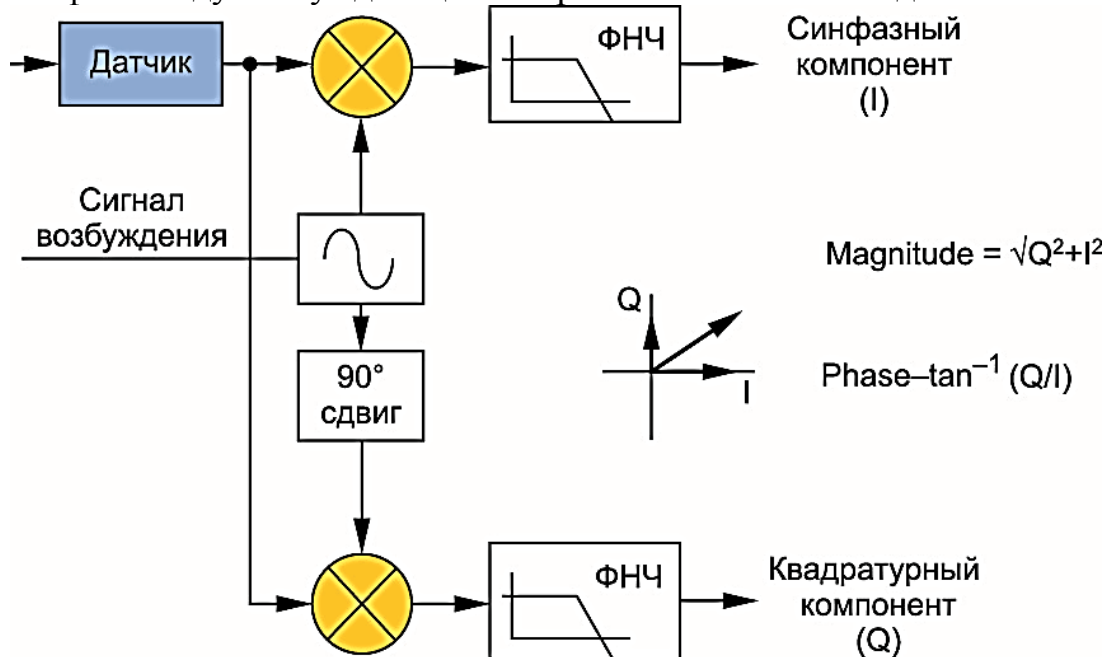


Рисунок 7 – Вычисление амплитуды и фазы с использованием ортогональной версии опорного сигнала

На рисунке 8 показана схема синхронного усилителя, реализованная на алгоритмах для программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с входным каскадом смещения нуля ADA4528-1 и операционным блоком с 24-разрядным сигма-дельта АЦП AD7175. Поскольку это приложение не предназначено для обработки широкополосных сигналов, эквивалентная ширина полосы шумовых частот синхронного усилителя может быть определен при частоте 50 Гц. Это хорошая идея. В качестве тестовых устройств используются датчики, которые могут возбуждаться внешними сигналами. Схема усилителя реализует коэффициент усиления 20, так что динамический диапазон АЦП может быть использован в полной мере. Постоянный уровень погрешности

смещения не влияет на измеряемое значение, но важно минимизировать дрейф смещения и мерцающий шум, особенно если схема усилителя обеспечивает высокое усиление.

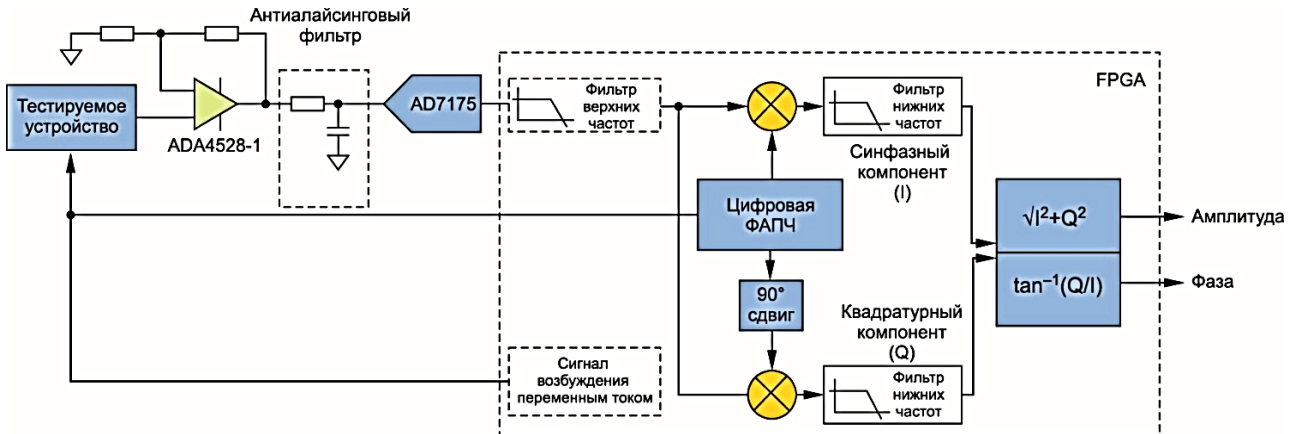


Рисунок 8 – Схема синхронного усилителя, реализованная на ПЛИС

Максимальное смещение усилителя ADA4528-1 достигает 2,5 мВ, при опорном напряжении 2,5 В, равном 10 ppm от полномасштабного входного диапазона аналогового входа AD7175. Чтобы определить уровень выходного шума, сначала необходимо рассчитать плотность AD7175. В технической документации используются фильтр sinc5+sinc1 и входной буфер для отображения среднеквадратичного значения шума 50 мВ при скорости преобразования 5,9кбит/с. Эквивалентная полоса пропускания шума, в этих условиях, составляет 21,7 кГц, а плотность шума - 40 нВ /√Гц.

Широкополосный шум с плотностью 5,9 нВ /√Гц ADA4528 появляется на выходе при значении 118 нВ/√Гц, что приводит к общей плотности шума 125 нВ/√Гц. Эквивалентная полоса пропускания цифрового фильтра составляет 50 Гц, поэтому среднеквадратичное значение выходного шума достигает 881 нВ. При диапазоне входного сигнала ±2,5 В, динамический диапазон системы составляет 126 дБ. Вы можете использовать полосу пропускания системы для изменения динамического диапазона, регулируя время отклика фильтра нижних частот, то есть, регулируя частотную характеристику. Например, если вы установите полосу пропускания равной 1 Гц, вы получите динамический диапазон в 143 дБ, а полоса пропускания в 250 Гц соответствует динамическому диапазону в 119 дБ.

Цифровая схема ФАПЧ улавливает сигнал возбуждения для получения синусоидальной волны, причем сигнал возбуждения может быть как внешним, так и внутренним и иметь различную форму, которая не обязательно является синусоидальной. Все гармонические составляющие синусоидального опорного сигнала умножаются на входной сигнал, так что немодулированный шум и другие нежелательные компоненты сигнала проявляются на гармонических частотах, как в случае умножения 2 сигналов в прямоугольной последовательности. Преимуществом использования цифрового метода для генерации опорного синусоидального сигнала является очень низкий уровень искажений, достигаемый цифровой настройкой.

Заключение

Низкочастотные сигналы низкого уровня, уровень которых ниже уровня шума, очень трудно измерить, но использование методов модуляции сигнала для их восстановления с помощью синхронного усилителя позволяет проводить очень точные измерения. В своей простейшей форме синхронный усилитель представляет собой операционный усилитель, включенный в схему с попеременно изменяемыми коэффициентами усиления. Эта схема не обеспечивает наилучших шумовых характеристик, но, тем не менее, из-за простоты исполнения и низкой стоимости внедрения она предпочтительнее обычных схем измерения сигнала нулевой частоты. Усовершенствования этого метода заключаются в использовании синусоидальной волны в качестве опорного сигнала и включении в схему умножителя, но этот метод ограничен из-за сложной конфигурации аналоговых компонентов. Наилучшая производительность достигается благодаря высокоточному сигма-дельта АЦП с низким уровнем шума для оцифровки входного сигнала, цифровой схеме PLL для генерации опорного сигнала и цифровому формату.

Литература

1. FMUSER International Group INC / [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: <https://ru.fmuser.net/content/?19044.htm> – Дата доступа: 26.09.2023.
2. Синхронные детекторы для прецизионных измерений сигналов низкого уровня / [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: <https://kit-e.ru/sinhronnye-detektory/>. – Дата доступа: 26.09.2023.