

Луис ОРОСКО (Luis OROZCO)  
Перевод: Кирилл КОВАЛЬ  
Kirill.koval@eltech.spb.ru

## Синхронные детекторы для прецизионных измерений сигналов низкого уровня

### Введение

Синхронные детекторы способны извлекать слабые сигналы, находящиеся ниже уровня шума, что может быть полезно при измерении очень малых сопротивлений, поглощения или отражения света от источников на ярком фоне, измерении деформации — во всех случаях, где присутствует значительный уровень шума.

Во многих системах шум нарастает при уменьшении частоты и достигает максимума при нулевой частоте. Для примера: операционные усилители имеют фликкер-шум ( $1/f$  шум), а светотехнические измерения всегда зависят от меняющихся условий окружающей обстановки. Перемещение измерения от низкочастотного шума увеличивает соотношение сигнал/шум, что позволит детектировать сигналы с низким уровнем. Так, модуляция источника света с частотой несколько кГц облегчает измерение отраженного света, что в ином случае было бы затруднено вследствие зашумленности полезного сигнала. На рис. 1 показано, как модуляция делает возможным восстановление сигнала, который в исходном виде был (имел значение) ниже уровня шума.

Существует несколько методов модуляции сигнала возбуждения. Самый простой из них — периодическое включение/выключение источника сигнала. Данный способ хорошо работает при управлении светодиодами, управлении напряжением питания мостовых тензодатчиков и в некоторых других схемах. С лампами накаливания, используемыми в аппаратуре спектроскопии, и в иных источниках возбуждающего излучения, которые нельзя быстро включать и выключать, модуляцию можно реализовать с помощью механического затвора.

Узкополосный полосовой фильтр убирает все, кроме интересующей полосы частот, позволяющей восстановить исходный сигнал,

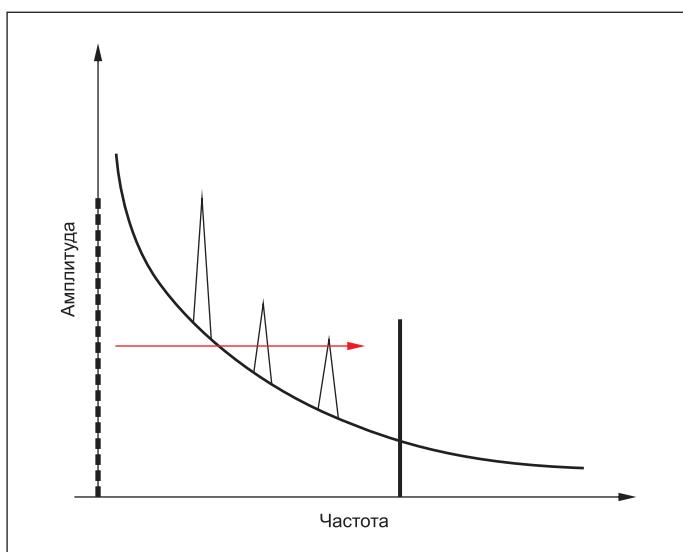


Рис. 1. Модуляция перемещает сигнал (в частотной области) из зашумленной области спектра

однако проектирование фильтра с требуемыми характеристиками на дискретных элементах бывает непростым делом. Альтернативным решением становится схема, в которой синхронный демодулятор выполняет перенос модулированного сигнала в область нулевой частоты, в то время как подавленные частотные составляющие не синхронизируются с опорным сигналом. Устройство, действующее на основе данного принципа, называется синхронным усилителем.

На рис. 2 представлена простая схема применения синхронного усилителя. Источник излучения, модулированный с частотой 1 кГц, облучает тестовую поверхность. Фотодиод измеряет отраженный от данной поверхности световой поток, пропорциональный значению величины загрязнения. Опорный и измеренный сигналы представляют собой синусоидальные волны (гармоники) с одинаковой частотой и фазой, но разными амплитудами. Опорный сигнал, управляющий источником света, имеет фиксированное значение амплитуды, а амплитуда измеренного сигнала зависит от коэффициента отражения.

Результатом перемножения двух синусоидальных сигналов является сигнал, содержащий суммарные и разностные гармоники. В данном случае исходные сигналы имеют одинаковую частоту, то есть в результате появится сигнал с нулевой частотой и сигнал с удвоенной частотой исходных сигналов. Минус указывает на изменение фазы сигнала на  $180^\circ$ . Фильтр нижних частот (low-pass filter) отфильтрует все, кроме сигнала на нулевой частоте.

$$A \sin(2\pi f_m t) \times B \sin(2\pi f_m t) = 1/2 AB - 1/2 AB \cos(4\pi f_m t).$$

Преимущество данного способа измерения наглядно проявляется, когда требуется измерить зашумленный входной сигнал. В результате перемножения модулированный сигнал перемещается обратно к нулевой частоте, в то время как остальные сигналы перемещаются на другие, отличные от нулевой, частоты. На рис. 3 показана ситуация, когда на входе измерительной системы присутствуют мощные источники шума на частотах 50 Гц и 2,5 кГц. Интересующий сигнал с очень низким уровнем модулируется синусоидой с частотой 1 кГц. Результатом умножения сигнала на входе системы с опорным сигналом будет нужный нам сигнал на нулевой частоте и побочные сигналы на частотах 950 Гц, 1050 Гц, 1,5 кГц, 2 кГц и 3,5 кГц. Как указано выше,

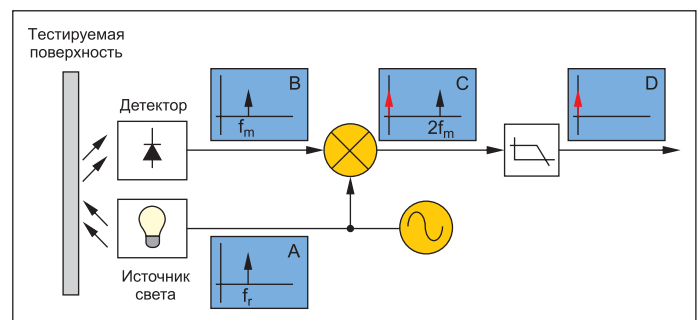


Рис. 2. Схема измерения величины загрязнения поверхности, реализованная на синхронном усилителе

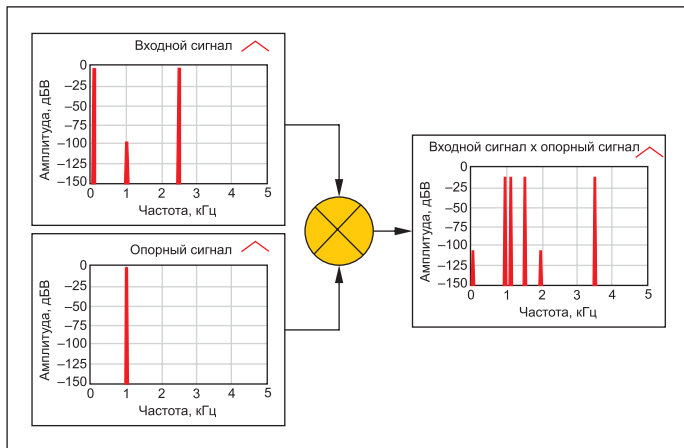


Рис. 3. Синхронная демодуляция «вытаскивает» слабый сигнал с частотой 1 кГц при наличии на входе мощных источников шума с частотой 50 Гц и 2,5 кГц

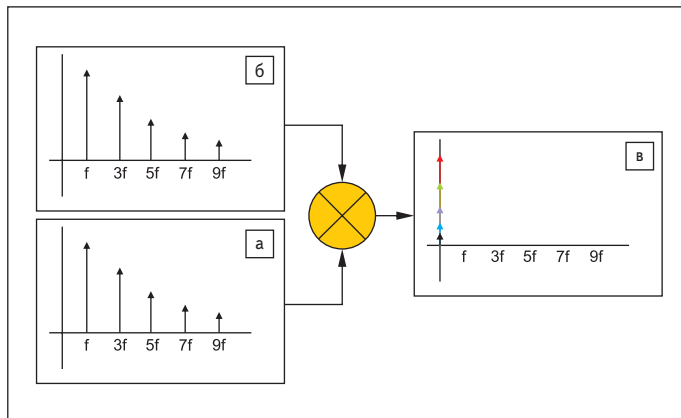


Рис. 5. В случае если входной (а) сигнал и опорный (б) являются прямоугольными последовательностями, их умножение (в) друг на друга позволит эффективно демодулировать каждую гармонику входного сигнала

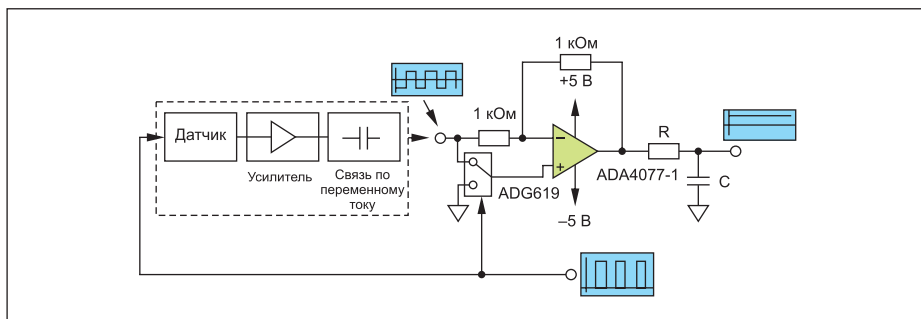


Рис. 4. Синхронный усилитель, использующий прямоугольную волну в качестве сигнала возбуждения

ADA4077-1, имеющий шум 250 нВ (пиковое значение) в полосе частот от 0,1 до 10 Гц и дрейф смещения 0,55 мкВ/°С, является идеальным выбором для данной схемы.

Синхронный усилитель, использующий прямоугольную последовательность, прост, но обладает худшей способностью к устранению шумов, нежели усилитель, применяющий синусоидальную последовательность. На рис. 5 изображена частотная диаграмма сигнала возбуждения — прямоугольной последовательности и опорного сигнала. Прямоугольная последовательность состоит из бесконечной суммы синусоидальных волн, а ее спектр включает все нечетные гармоники. Перемножение двух прямоугольных последовательностей одинаковой частоты представляет собой перемножение каждой синусоидальной составляющей опорного сигнала с каждой синусоидальной составляющей измеряемого сигнала. Результатом будет сигнал с нулевой частотой, содержащий энергию всех гармоник прямоугольной последовательности. Нежелательные сигналы, находящиеся на частотах нечетных гармоник, не будут отфильтрованы, хотя и они уменьшатся на некоторую величину — в зависимости от того, на частоте какой гармоники они находятся. Соответственно, важно выбрать такую частоту модуляции, чтобы частоты ее составляющих не совпадали по частоте с известными источниками шума или гармониками (сигналами). Для устранения шума в линии, например, можно выбрать частоту сигнала модуляции в 1,0375 кГц, которая не совпадет с гармониками сигнала 50 или 60 Гц, а в отличие от сигнала модуляции 1 кГц, который будет иметь совмещение с двадцатой гармоникой 50 Гц периодического сигнала.

Несмотря на описанное выше ограничение, схема проста и имеет малую стоимость. Использование малошумящего усилителя и правильный выбор частоты модуляции делает схему измерения значительно совершеннее, чем попытка достичь подобных параметров, просто измеряя сигнал нулевой частоты.

сигнал с нулевой частотой содержит требуемую информацию, а фильтр низких частот может отфильтровать все остальные составляющие.

Любые шумовые составляющие, расположенные в частотной области близко к полезному сигналу, появятся на частотах, находящихся близко к нулевой частоте, поэтому крайне важно выбрать такую частоту модуляции, вблизи которой нет сильных источников шума. Если это невозможно, рекомендуется применить фильтр нижних частот с весьма малой частотой среза и большой крутизной частотной характеристики, пусть и с большим временем установления сигнала.

### Практическое исполнение синхронных схем обработки сигнала

Модуляция источника сигнала синусоидальным сигналом не всегда возможна, вот почему в некоторых случаях применяют модуляцию прямоугольной импульсной последовательностью. Генерация сигнала возбуждения прямоугольной формы значительно проще, нежели генерация синусоидальной волны, поскольку данная задача может быть решена довольно простым способом — например, с помощью вывода микроконтроллера, управляющего аналоговым ключом, или MOSFET.

На рис. 4 приведен простой вариант реализации синхронного усилителя. Микроконтроллер или иное устройство генерирует сигнал возбуждения — прямоугольную последовательность, который будет создавать отклик с датчика. Первый усилительный каскад является трансимпедансным усилителем в случае, если в качестве датчика используется фотодиод, или инструментальным усилителем, если усиливается сигнал с тензодатчика.

Схема коммутации сигнала возбуждения реализована на SPDT-ключе ADG609. Когда сигнал возбуждения принимает положительное значение, коэффициент усиления усилителя устанавливается равным +1. В периоде отрицательной полуволны коэффициент усилителя устанавливается равным -1. Математически эта операция эквивалентна умножению измеряемого сигнала на прямоугольную волну. На выходе схемы RC-фильтр убирает прочие частотные составляющие сигнала, выходное напряжение сигнала с нулевой частотой равно половине размаха измеренной прямоугольной последовательности.

Несмотря на то, что схема простая, выбор подходящего операционного усилителя весьма важен. Входной каскад со связью по переменному току значительно уменьшает низкочастотный входной шум, но не устраняет фликкер-шум и смещение ошибки последнего усилителя. Прецизионный усилитель

### Альтернативный вариант — простой и интегрированный

Схема, приведенная на рис. 4, содержит операционный усилитель, ключ, несколько дискретных компонентов и требует сигнала тактирования с микроконтроллера. Альтернативный вариант — использовать интегрированный синхронный демодулятор, показанный на рис. 6. Микросхема ADA2200 содержит буферный вход, программируемый БИХ-фильтр, умножитель и блок сдвига опорного сигнала на 90°, делающий возможным измерение или компенсацию фазового сдвига между опорным и измеренным сигналами.

Реализация схемы синхронного детектирования на ADA2200, приведенной на рис. 7, проста и дополнительно требует только источника тактового сигнала с частотой в 64 раза большей частоты опорного сигнала. Исходная настройка программируемого фильтра определяет его как полосовой фильтр, что устраняет необходимость реализации связи по переменному току. Аналоговый выход выводит полученные в результате умножения сигналов составляющие «зеркального» канала (images) относительно частоты выборки, поэтому для устранения нежелательных составляющих используется RC-фильтр, что позволяет измерять сигма-дельта АЦП только демодулированный сигнал на нулевой частоте.

### Улучшение схемы синхронизации, использующей сигнал прямоугольной последовательности

На рис. 8 изображено усовершенствование схемы с модуляцией прямоугольной последовательностью. Датчик возбуждается прямоугольной последовательностью, а измеренный сигнал умножается с синусоидальной волной с такой же частотой и фазой. Затем, когда часть сигнала на основной частоте «переместится» на нулевую частоту, в то время как все остальные гармоники переместятся на частоты, отличные от нулевой, это позволит отфильтровать фильтром ниж-

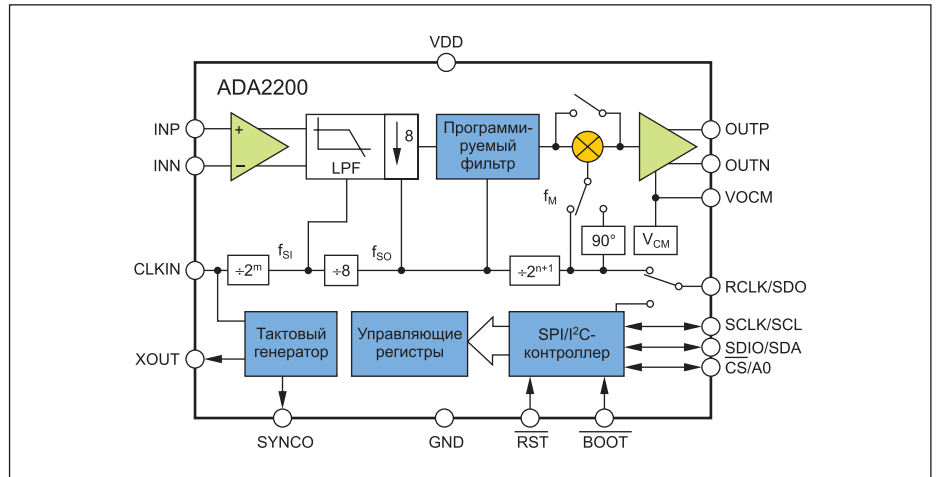


Рис. 6. Структурная схема ADA2200

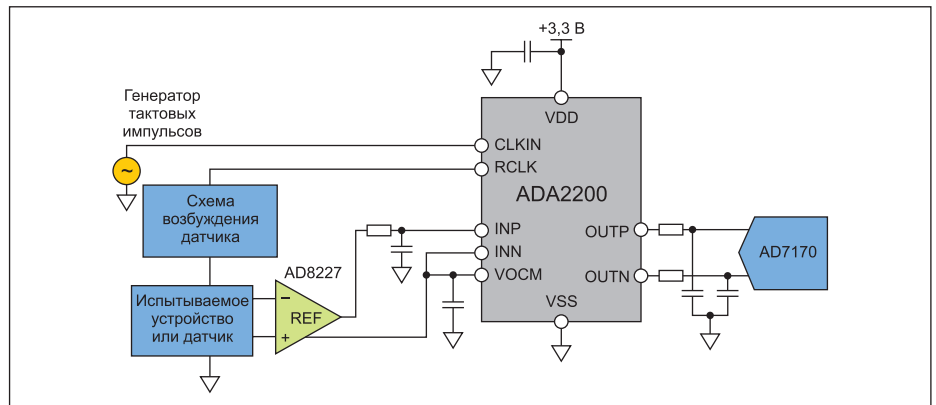


Рис. 7. Синхронный усилитель, реализованный на ADA2200

них частот все сигналы, кроме измеренного сигнала (с нулевой частотой).

Дополнительная сложность состоит в том, что любой фазовый сдвиг между опорным и измеренными сигналами приводит к уменьшению значения выходного сигнала, в отличие от ситуации, когда сигналы полностью совпадают по фазе. Это может произойти, если схема согласования сигнала датчика содержит фильтры, которые вносят фазовую задержку. В схеме с аналоговым синхронным усилителем единственный способ спра-

виться с этим — включить в цепь опорного сигнала схему фазовой компенсации. Задача нетривиальная, поскольку схема должна быть настраиваемой, чтобы можно было компенсировать различную задержку, а также зависимость от температуры и точности используемых компонентов. Более простая альтернатива — включение в схему второй стадии умножения сигналов, дополнительного блока, реализующего умножение измеренного и опорного сигналов, сдвинутого на 90°. Результатом данного изменения ста-

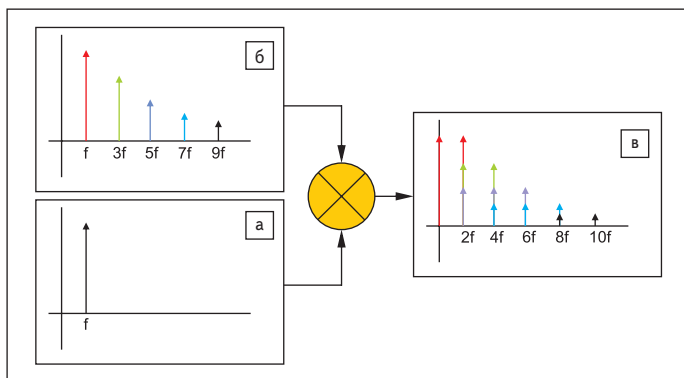


Рис. 8. Использование синусоидальной волны в качестве опорного сигнала предотвращает появление шума от демодуляции на нулевой частоте

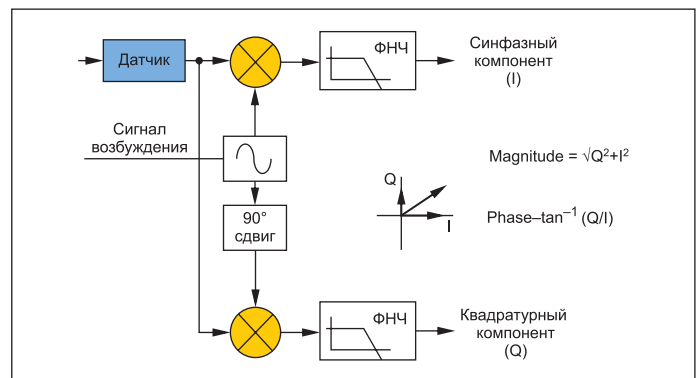


Рис. 9. Использование квадратурной версии опорного сигнала для вычисления амплитуды и фазы

нет возможность получить сигнал, независимый от фазы входного сигнала, рис. 9 поясняет это решение. На выходе умножителя (обеих операций умножения) получают сигналы, пропорциональные синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющей входного сигнала. Для вычисления амплитуды входного сигнала требуется просто найти корень из суммы квадратов I- и Q-сигналов. Дополнительное преимущество данной архитектуры в том, что она позволяет вычислять разность фаз между сигналом возбуждения/опорным и входным сигналом.

Все синхронные усилители, о которых пойдет речь дальше, генерируют опорный сигнал для возбуждения датчика. Окончательное усовершенствование заключается в том, чтобы использовать внешний сигнал в качестве опорного. Например, на рис. 10 показана система, в которой используется широкополосный источник света — лампа накаливания для оценки оптических свойств поверхности. Система измеряет параметры, позволяющие оценить коэффициент отражения зеркала или загрязнение поверхности. В данном случае применение механического затвора (диска) для модуляции значительно проще, нежели построение схемы с электронной модуляцией. С помощью недорогого датчика положения, установленного на механическом затворе, генерируется сигнал прямоугольной последовательности, который подается на синхронный усилитель. Вместо того чтобы использовать данный сигнал непосредственно, с помощью схемы ФАПЧ генерируется синусоидальный сигнал с той же частотой и фазой, что и исходный. Важное условие реализации данной идеи состоит в том, что у сгенерированного синусоидального сигнала должен быть низкий уровень искажений.

Хотя данная схема может быть реализована на дискретных компонентах — ФАПЧ и умножителе, использование FPGA (микросхемы программируемой логики) в построении подобной схемы дает значительные преимущества. На рис. 11 изображена схема синхронного усилителя, реализованная на FPGA, входной каскад которой построен

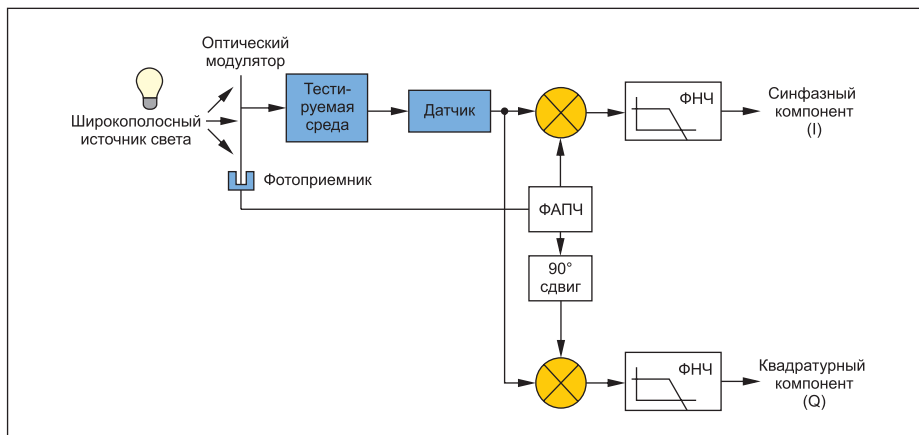


Рис. 10. Использование схемы ФАПЧ для захвата частоты внешнего опорного сигнала

на операционном усилителе с нулевым дрейфом смещения ADA4528-1 и 24-разрядном сигма-дельта АЦП AD7175. Данное приложение не подразумевает работу с широкополосными сигналами, поэтому эквивалентная ширина шумовой полосы частот синхронного усилителя может быть определена в 50 Гц. В качестве тестируемого устройства используется любой датчик, который можно возбуждать внешним сигналом. Схема усилителя реализует коэффициент усиления, равный 20, что позволяет полностью применить динамический диапазон АЦП. Хотя ошибки смещения постоянного уровня не оказывают влияния на измерения, важно минимизировать дрейф смещения и фликкер-шум, так как они уменьшают доступный динамический диапазон, особенно если схема усилителя обеспечивает высокий коэффициент усиления.

Максимальное смещение усилителя ADA4528-1 достигает 2,5 мкВ и равно значению в 10 ppm входного диапазона полной шкалы аналогового входа AD7175 при опорном напряжении в 2,5 В. Цифровой фильтр верхних частот после АЦП устраняет напряжение смещения и низкочастотный шум. Для определения шума на выходе в первую очередь следует вычислить плотность AD7175.

В технической документации указано среднеквадратическое значение шума в 5,9 мкВ при скорости преобразования в 50 kSPS, использовании sinc5+sinc1 фильтра и входного буфера. Эквивалентная ширина полосы шума при этих условиях составляет 21,7 кГц, что дает плотность шума 40 нВ/√Гц.

Широкополосный шум ADA4528 с плотностью 5,9 нВ/√Гц проявляется на выходе с величиной 118 нВ/√Гц, давая в результате суммарную плотность шума в 125 нВ/√Гц. Поскольку цифровой фильтр имеет эквивалентную ширину шумовой полосы частот в 50 Гц, выходной шум достигает среднеквадратического значения 881 нВ. При диапазоне входного сигнала ±2,5 В динамический диапазон системы равен 126 дБ. Ширина полосы частот системы может быть использована для изменения динамического диапазона путем настройки времени отклика фильтра нижних частот, то есть корректировкой его частотной характеристики. К примеру, установка ширины полосы в 1 Гц даст динамический диапазон в 143 дБ, а ширина полосы частот в 250 Гц будет соответствовать динамическому диапазону в 119 дБ.

Схема цифровой ФАПЧ захватывает сигнал возбуждения и генерирует синусоидальную волну, причем сигнал возбуждения

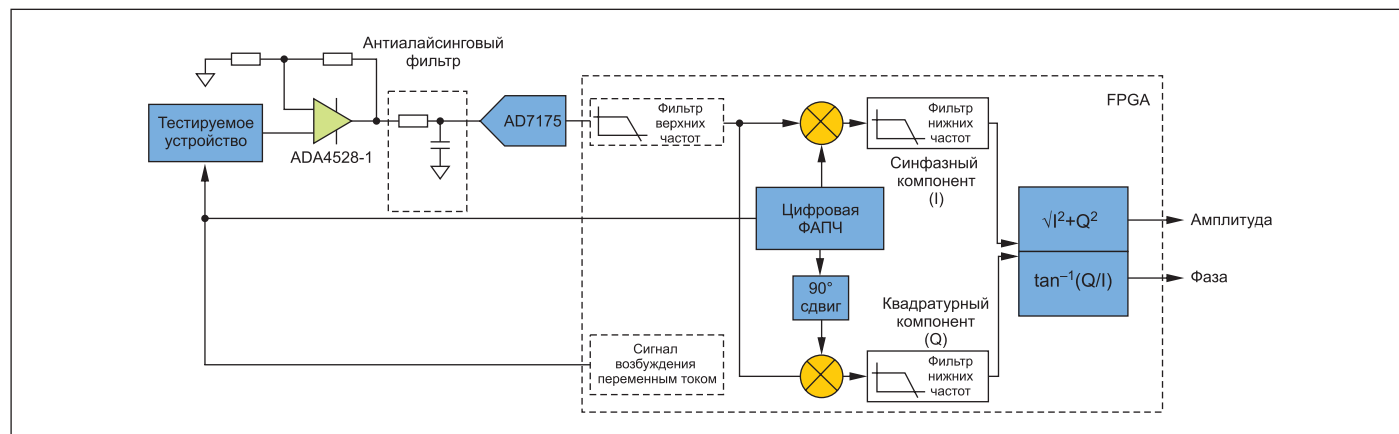


Рис. 11. Реализованная на FPGA схема синхронного усилителя

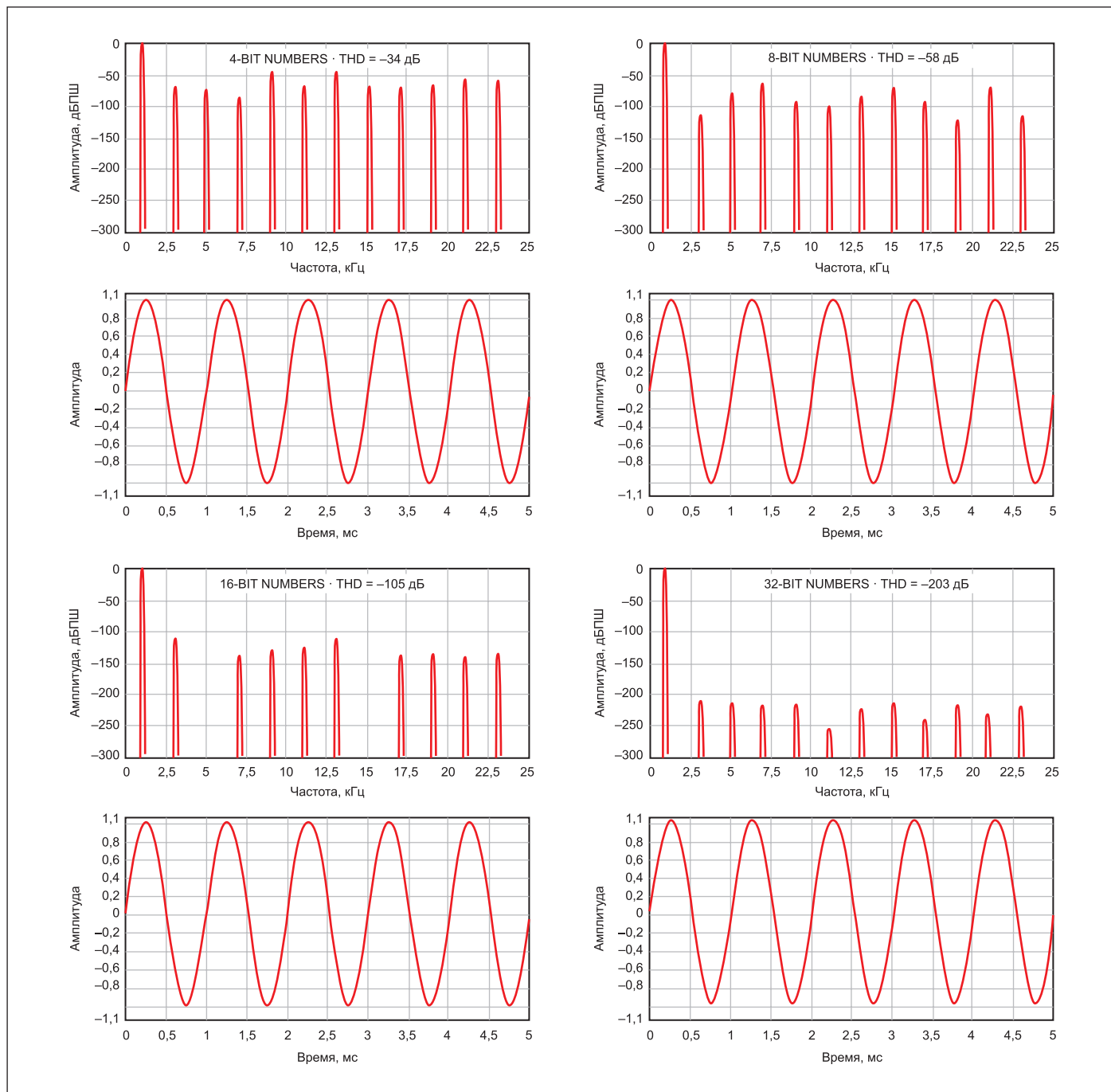


Рис. 12. Синусоидальные волны, сгенерированные цифровой схемой с различной точностью (разрядностью)

может быть как внешним, так и внутренним и иметь различную форму, не обязательно синусоидальную. Все гармонические составляющие опорного сигнала синусоидальной формы перемножаются с входным сигналом, вследствие чего демодулированный шум и другие нежелательные составляющие сигнала появятся на частоте гармоник, как в случае с перемножением двух сигналов прямоугольной последовательности. Преимуществом использования цифровой схемы генерирования опорного синусоидального сигнала является очень малый уровень искажений, который достигается цифровой настройкой.

На рис. 12 изображены диаграммы сгенерированных цифровой схемой синусоидальных сигналов, имеющих 4-, 8-, 16- и 32-разрядную точность. Очевидно, что, используя 4-разрядную точность, можно получить результат, незначительно отличающийся от приведенного на рис. 5, однако ситуация резко изменяется, если повысить точность (разрядность) схемы (генератора). С точностью в 16 разрядов будет достаточно сложно реализовать аналоговую схему генератора с таким малым коэффициентом нелинейных искажений, а достичь результата цифровой схемы с 32-разрядной точностью, которая имеет коэффициент нелиней-

ных искажений менее 200 дБ, с аналоговым генератором просто невозможно. Кроме того, цифровые схемы генераторов имеют прекрасную повторяемость. Однократно сформированные в цифровой форме данные, введенные в FPGA, в дальнейшем не будут изменены вследствие дополнительных шумов или дрейфа.

После умножителей фильтры нижних частот устраняют все высокочастотные составляющие сигнала, и на выходе появляются синфазная и квадратурная составляющие сигнала. С эквивалентной шириной шумовой полосы шума 50 Гц нет необходимости производить выборку данных с частотой

250 kSPS. К фильтрам нижних частот также можно добавить фильтры, выполняющие операцию прореживания, чтобы уменьшить скорость вывода данных. Последний этап вычисления — вычисление из квадратурных составляющих амплитуды и фазы входного сигнала.

### Заключение

Низкочастотные сигналы малого уровня, находящиеся ниже уровня шума, достаточно сложно измерить, однако применение

технологии модуляции сигнала с последующим его восстановлением синхронным усилителем позволяет производить весьма точные измерения. В самом простом исполнении синхронный усилитель представляет собой операционный усилитель, включенный в схему с попеременно изменяемыми коэффициентами усиления. Хотя данная схема не обеспечивает наилучших шумовых характеристик, тем не менее она предпочтительнее обычной схемы измерения сигнала с нулевой частотой в силу простоты исполнения и малой стоимости реализации.

Усовершенствование данной схемы заключается в применении синусоидальной волны в качестве опорного сигнала и включении в схему умножителя, однако эта схема имеет ограничение ввиду сложности ее построения на аналоговых компонентах. Наилучшую производительность реализует система с использованием маломощного прецизионного сигма-дельта АЦП для оцифровки входного сигнала, схемы цифровой ФАПЧ для генерации опорного сигнала, дальнейшая обработка сигналов в которой осуществляется в цифровой форме. ■