

Особенности применения синхронных усилителей SR810, SR830, SR850 STANFORD RESEARCH SYSTEMS

Синхронные усилители используются для обнаружения и измерения очень малых сигналов переменного тока вплоть до нескольких нановольт. Точные измерения могут быть сделаны даже тогда, когда небольшой сигнал затенен источниками шума, которые во много тысяч раз больше. Синхронные усилители используют метод, известный как фазовое детектирование, чтобы выделить компонент сигнала на конкретной опорной частоте и фазе. Шумовые сигналы на частотах, отличных от опорной частоты, вырезаются и не влияют на измерение.

Для чего используются синхронные усилители?

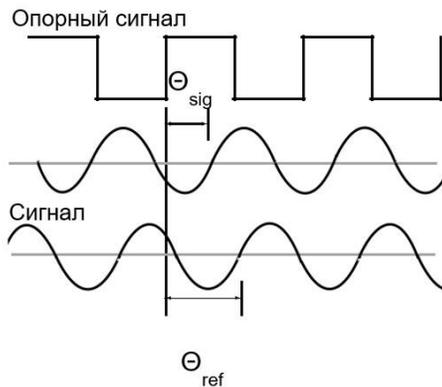
Давайте рассмотрим один пример. Предположим, что сигнал представляет собой синусоиду с напряжением 10 нВ и частотой 10 кГц. Очевидно, что требуется некоторое усиление, чтобы вывести сигнал выше уровня шума. Хороший малозумящий усилитель будет иметь уровень входных шумов около 5 нВ/√Гц. Если полоса пропускания усилителя составляет 100 кГц, а коэффициент усиления 1000, то мы можем ожидать, что на выходе напряжение сигнала будет составлять 10 мкВ ($10 \text{ нВ} \times 1000$) и 1,6 мВ широкополосного шума ($5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} \times \sqrt{100 \text{ кГц}} \times 1000$). Нам не слишком повезет с измерением выходного сигнала, если только мы не выделим интересующую нас частоту.

Если мы поставим за усилителем полосовой фильтр с $Q=100$ (ОЧЕНЬ хороший фильтр), с центральной частотой 10 кГц, то будет обнаружен любой сигнал в полосе пропускания 100 Гц ($10 \text{ кГц}/Q$). Шум в полосе пропускания фильтра будет составлять 50 мкВ ($5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} \times \sqrt{100 \text{ Гц}} \times 1000$), а сигнал по-прежнему будет составлять 10 мкВ. Выходной шум намного больше сигнала, и точное измерение не может быть произведено. Дальнейшее усиление не поможет решить проблему соотношения сигнал-шум.

Теперь попробуем поставить за усилителем фазовый детектор (ФД). ФД может детектировать сигнал на частоте 10 кГц с полосой пропускания до 0,01 Гц! В этом случае шум в полосе обнаружения составит 0,5 мкВ ($5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} \times \sqrt{0,01 \text{ Гц}} \times 1000$), в то время как сигнал все еще составляет 10 мкВ. Отношение сигнал-шум теперь составляет 20, и точное измерение сигнала возможно.

Что такое фазовое детектирование?

Для синхронных измерений требуется опорная частота. Как правило, эксперимент проводится на фиксированной частоте (от генератора сигнала или генератора функций), а синхронный усилитель обнаруживает отклик от эксперимента на опорной частоте. На следующей диаграмме опорный сигнал представляет собой прямоугольную волну с частотой ω_r . Это может быть выход синхронизации от генератора функций. Если для проведения эксперимента используется синусоидальный выход генератора функций, то откликом может быть сигнал, показанный ниже. Сигнал $V_{\text{sig}} \sin(\omega_r t + \theta_{\text{sig}})$, где V_{sig} -это амплитуда сигнала, ω_r - частота сигнала и θ_{sig} фаза сигнала.



Синхронизированный сигнал

Синхронные усилители генерируют свой собственный внутренний опорный сигнал, как правило, с помощью фазовой автоподстройки частоты, привязанной к внешнему опорному сигналу. На диаграмме показаны внешняя опорная частота, опорная частота синхронного усилителя и измеряемый сигнал. Внутренняя опорная частота - $V_L \sin(\omega_L t + \theta_{ref})$.

Синхронный усилитель усиливает сигнал, а затем умножает его на собственный опорный сигнал с помощью фазового детектора или умножителя. Выход ФД - это просто произведение двух синусоидальных волн.

$$V_{ФД} = V_{sig} V_L \sin(\omega_r t + \theta_{sig}) \sin(\omega_L t + \theta_{ref})$$

$$= \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos([\omega_r - \omega_L]t + \theta_{sig} - \theta_{ref}) - \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos([\omega_r + \omega_L]t + \theta_{sig} + \theta_{ref})$$

Выход ФД - это два сигнала переменного тока, один на разностной частоте ($\omega_r - \omega_L$), а другой на суммарной частоте ($\omega_r + \omega_L$).

Если выход ФД пропускается через фильтр нижних частот, то сигналы переменного тока удаляются. Что же тогда останется? В общем случае - ничего. Однако если ω_r равен ω_L , то разностная частотная составляющая будет представлять собой сигнал постоянного тока. В этом случае отфильтрованный выход ФД будет иметь вид:

$$V_{ФД} = \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref})$$

Это очень хороший сигнал, это сигнал постоянного тока, пропорциональный амплитуде сигнала.

Важно учитывать физическую природу процесса умножения и фильтрации в различных типах синхронных усилителей. В традиционных аналоговых синхронных усилителях сигнал и опоры являются аналоговыми сигналами напряжения. Сигнал и опоры умножаются в аналоговом умножителе, а результат фильтруется с помощью одного или нескольких каскадов RC-фильтров. В цифровых синхронных усилителях, таких как SR830 или SR850, сигнал и опоры представлены последовательностями чисел. Умножение и фильтрация выполняются математически с помощью процессора цифровой обработки сигналов (DSP). Мы обсудим это более подробно позднее.

Узкополосное детектирование

Давайте вернемся к нашему общему примеру синхронного усилителя. Предположим, что вместо того, чтобы быть чистой синусоидальной волной, вход состоит из суммы сигнала и шума. ФД и низкочастотный фильтр только обнаруживают сигналы, частоты которых очень близки к опорной частоте синхронного усилителя. Шумовые сигналы на частотах, далеких от частоты опоры, ослабляются на выходе ФД фильтром нижних частот (ни $\omega_{noise} - \omega_{ref}$, ни $\omega_{noise} + \omega_{ref}$ не близки к постоянному току). Шум на частотах, очень близких к опорной частоте, приведет к появлению очень низкочастотных выходных сигналов переменного тока из ФД ($|\omega_{noise} - \omega_{ref}|$ мал). Их затухание зависит от ширины полосы пропускания фильтра нижних частот и его крутизны. Более узкая полоса пропускания удалит источники шума очень близкие к опорной частоте; более широкая полоса пропускания позволяет этим сигналам проходить далее. Полоса пропускания фильтра нижних частот определяет полосу детектирования. Только сигнал на опорной частоте приведет к истинному выходному сигналу постоянного тока и не будет затронут фильтром нижних частот. Это тот сигнал, который мы хотим измерить.

Откуда берется опорный сигнал синхронного усилителя?

Нам необходимо создать опорный сигнал синхронного усилителя такой же, как и частота измеряемого сигнала, т. е. $\omega_r = \omega_L$. Мало того, что частоты должны быть одинаковыми, но и фаза между сигналами не может изменяться со временем. В противном случае $\cos(\theta_{\text{sig}} - \theta_{\text{ref}})$ изменится, и $V_{\text{ФД}}$ не будет сигналом постоянного тока. Другими словами, опорный сигнал синхронного усилителя должен быть привязан по фазе к опорной частоте исследуемого сигнала.

Синхронные усилители используют контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для генерации опорного сигнала. На синхронный усилитель подается внешний опорный сигнал (в данном случае прямоугольный сигнал). ФАПЧ в синхронном усилителе привязывает свой внутренний опорный генератор к этому внешнему опорному сигналу, что приводит к появлению опорного синусоидального сигнала ω_c с фиксированным сдвигом фазы θ_{ref} . Поскольку ФАПЧ активно отслеживает внешнюю опорную частоту, то изменения внешней опорной частоты не влияют на измерение.

Внутренние источники опорного сигнала

В только что рассмотренном случае опорный сигнал обеспечивается источником сигнала возбуждения (генератором функций). Это называется внешним опорным источником. Во многих ситуациях вместо этого может использоваться внутренний генератор синхронного усилителя. Внутренний генератор подобен генератору функций (с переменным синусоидальным выходом и ТТЛ-синхронизацией), который всегда находится в привязке по фазе к опорному генератору.

Амплитуда и фаза

Помните, что выход ФД пропорционален $V_{\text{sig}} \cos\theta$, где $\theta = (\theta_{\text{sig}} - \theta_{\text{ref}})$. θ - разность фаз между сигналом и опорным генератором синхронного усилителя. Регулируя θ_{ref} мы можем сделать θ равным нулю. В этом случае мы можем измерить V_{sig} ($\cos\theta = 1$). И наоборот, если θ равно 90° , то на выходе вообще ничего не будет. Синхронный усилитель с одним ФД называется однофазным синхронным усилителем, а на его выходе будет $V_{\text{sig}} \cos\theta$. Эта фазовая зависимость может быть устранена путем добавления второго ФД. Если второй ФД умножает сигнал со смещением опорного генератора на 90° , т. е. $V_L \sin(\omega_L t + \theta_{\text{ref}} + 90^\circ)$, то его выход после низкочастотного фильтра будет равен:

$$V_{\text{ФД}2} = \frac{1}{2} V_{\text{sig}} V_L \sin(\theta_{\text{sig}} - \theta_{\text{ref}})$$

$$V_{\text{ФД}2} \sim V_{\text{sig}} \sin\theta$$

Теперь у нас есть два выхода: один пропорционален $\cos\theta$, а другой $\sin\theta$. Если мы назовем первый выход X а второй Y, то

$$X = V_{\text{sig}} \cos\theta \quad Y = V_{\text{sig}} \sin\theta$$

эти две величины представляют сигнал в виде вектора относительно опорного генератора синхронного усилителя. X называется 'синфазной' составляющей, а Y 'квадратурной' составляющей. Это происходит потому, что при $\theta = 0$ X измеряет сигнал, а Y равен нулю.

При вычислении амплитуды (R) вектора сигнала, фазовая зависимость снимается.

$$R = (X^2 + Y^2)^{1/2} = V_{\text{sig}}$$

R измеряет амплитуду сигнала и не зависит от фазы между сигналом и опорой синхронного усилителя.

Двухфазный синхронный усилитель имеет два ФД с опорными генераторами с фазой 90° друг относительно друга и может непосредственно измерять X, Y и R. Кроме того, фаза (θ) между сигналом и синхронным усилителем определяется как:

$$\theta = \tan^{-1}(Y/X)$$

Цифровой ФД и аналоговый ФД

Мы уже упоминали ранее, что реализация ФД отличается для аналоговых и цифровых синхронных усилителей. Цифровой синхронный усилитель, такой как SR830, умножает сигнал на опорные синусоиды в цифровом виде.

Усиленный сигнал преобразуется в цифровую форму с помощью 16-битного аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 256 кГц. Аналого-цифровому преобразователю предшествует фильтр сглаживания 102 кГц, чтобы предотвратить попадание более высокочастотных сигналов.

Этот входной поток данных умножается, точка за точкой, на вычисленные опорные синусоидальные волны, описанные ранее. Каждые 4 мкс производится выборка входного сигнала, и результат умножается на обе опорные синусоидальные волны (90° друг от друга).

Фазовые детекторы (ФД) в цифровом синхронном усилителе действуют как линейные множители, то есть они умножают сигнал на опорную синусоиду. Аналоговые ФД (как прямоугольные, так и линейные) имеют много проблем. Основными проблемами являются подавление гармоник, смещение выходного сигнала, ограниченный динамический резерв и погрешность усиления.

Цифровой ФД умножает оцифрованный сигнал с помощью цифровой вычисленной опорной синусоидальной волны. Поскольку опорные синусоидальные волны вычисляются с точностью до 20 бит, они имеют очень низкое содержание гармоник. На самом деле, гармоники находятся на уровне -120 дБ! Это означает, что сигнал умножается на одну опорную синусоиду (вместо опорной и ее многочисленных гармоник) и детектируется только сигнал на этой единственной опорной частоте. Цифровые синхронные усилители SR810, SR830 и SR850 полностью нечувствительны к сигналам на гармониках опоры. Напротив, синхронный усилитель, умножающий на прямоугольный сигнал, будет детектировать все нечетные гармоники опоры (прямоугольный сигнал содержит много больших нечетных гармоник).

Выходное смещение является проблемой, поскольку интересующий сигнал является выходом постоянного тока из ФД, а выходное смещение вносит вклад в ошибку и нулевой дрейф. Проблемы смещения аналоговых ФД устраняются с помощью цифрового множителя. Нет никаких ошибочных смещений выхода постоянного тока от цифрового умножения сигнала и эталона. На самом деле, фактическое умножение практически безошибочно.

Динамический запас аналогового ФД ограничен примерно 60 дБ. Когда присутствует большой шумовой сигнал, в 1000 раз (или на 60 дБ) превышающий полномасштабный сигнал, аналоговый ФД измеряет сигнал с ошибкой. Ошибка вызвана нелинейностью в умножении (погрешность на выходе зависит от амплитуды входного сигнала). Эта ошибка может быть довольно большой (10% от полной шкалы) и зависит от амплитуды шума, частоты и формы сигнала. Поскольку шум, обычно, довольно сильно влияет на эти параметры, ошибка PSD вызывает большую неопределенность выходного сигнала.

В цифровом синхронном усилителе динамический резерв ограничен качеством аналого-цифрового преобразования. После того, как входной сигнал оцифрован, больше не происходит никаких ошибок. Конечно, точность умножения не зависит от размера чисел. Аналого-цифровой преобразователь, используемый в SR810, SR830 и SR850, является чрезвычайно линейным, что означает, что наличие больших шумовых сигналов не ухудшает его способность правильно оцифровывать небольшой сигнал. На самом деле динамический резерв этих синхронных усилителей может без каких-либо проблем превышать 100 дБ. О динамическом резерве мы поговорим чуть позднее.

Линейный, аналоговый ФД умножает сигнал на аналоговую опорную синусоиду. Любое изменение амплитуды в опорне проявляется непосредственно как изменение общего коэффициента усиления. Аналоговые генераторы синуса подвержены дрейфу амплитуды, особенно температурному. Цифровая опорная синусоида имеет точную амплитуду и никогда не меняется. Это позволяет избежать основного источника ошибки усиления, характерного для аналоговых синхронных усилителей.

Общая характеристика синхронного усилителя в значительной степени определяется характеристиками его фазовых детекторов. Практически во всех отношениях цифровой PSD превосходит свои аналоговые варианты.

Что измеряют синхронные усилители?

Итак, что же именно измеряет синхронный усилитель? Теорема Фурье изначально утверждает, что любой входной сигнал может быть представлен как сумма многих синусоидальных волн различной амплитуды, частоты и фазы. Это обычно рассматривается как представление сигнала в "частотной области". Обычные осциллографы отображают сигнал во "временной области". За исключением случая чистых синусоидальных волн, представление во временной области не передает очень много информации о различных частотах, составляющих сигнал.

Синхронный усилитель умножает сигнал на чистую синусоидальную волну на опорной частоте. Все составляющие входного сигнала умножаются на опоры одновременно. Математически говоря, синусоидальные волны различных

частот ортогональны, т. е. среднее произведение двух синусоидальных волн равно нулю, если только частоты в точности не совпадают. Результат этого умножения дает выходной сигнал постоянного тока, пропорциональный компоненте сигнала, частота которого точно привязана к опорной частоте. Фильтр нижних частот (который следует за множителем) обеспечивает усреднение, которое удаляет произведения опоры с компонентами на всех других частотах.

Синхронный усилитель, поскольку он умножает сигнал на чистую синусоиду, измеряет единственную Фурье - (синусоидальную) составляющую сигнала на опорной частоте. Давайте рассмотрим один пример. Предположим, что входной сигнал представляет собой простую прямоугольную волну на частоте f . Прямоугольная волна фактически состоит из множества синусоидальных волн, кратных f , с тщательно подобранными амплитудами и фазами. Прямоугольная волна 2 Впп может быть выражена следующим образом:

$$S(t) = 1.273\sin(\omega t) + 0.4244\sin(3\omega t) + 0.2546\sin(5\omega t) + \dots$$

где $\omega = 2\pi f$. Синхронный усилитель, зафиксированный на f , выделит первый компонент. Измеренный сигнал будет равен $1,273\sin(\omega t)$ а не 2 Впп, которые вы бы измерили на осциллографе.

В общем случае вход состоит из сигнала и шума. Шум представлен в виде изменяющихся сигналов на всех частотах. Идеальный синхронный усилитель реагирует только на шум на опорной частоте. Шум на других частотах удаляется фильтром нижних частот, следующим за множителем. Это "сужение полосы пропускания" является главным преимуществом, которое обеспечивает синхронный усилитель. Только входные сигналы с частотами равными опорной частоте попадают на выход.

Среднеквадратичное значение или пиковое?

Синхронные усилители, как правило, отображают входной сигнал в вольтах среднеквадратичного значения. Когда синхронный усилитель отображает величину 1 Вскз (среднеквадратичное значение), компонент входного сигнала (на опорной частоте) представляет собой синусоидальную волну с амплитудой 1 Вскз или 2,8 Впп.

Таким образом, в предыдущем примере с входным сигналом прямоугольной формы 2 Впп, синхронный усилитель детектировал бы первую синусоидальную составляющую $1,273 (\omega t)$. Измеренная и отображаемая амплитуда будет равна $0,90$ Вскз (или $1,273/\sqrt{2}$).

Градусы или радианы?

В этом обсуждении частоты были определены как f (Гц) и ω ($2\pi f$ радиан/с). Это происходит потому, что люди измеряют частоты в циклах в секунду, а математика лучше всего работает в радианах. Для целей измерения частоты, измеренные в синхронном усилителе, измеряются в Гц. Уравнения, используемые для объяснения реальных расчетов, иногда пишутся с использованием ω для упрощения выражения.

Фаза всегда указывается в градусах. Опять же, это больше по обычаю, чем по выбору. Уравнения, записанные в виде $\sin(\omega t + \theta)$, записываются так, как будто θ измеряется в радианах, в основном для простоты. Синхронные усилители всегда оперируют и измеряют фазу в градусах.

Динамический резерв

Термин "динамический резерв" часто встречается в дискуссиях о синхронных усилителях. Пришло время обсудить этот термин немного более подробно. Предположим, что вход синхронного усилителя состоит из полномасштабного сигнала на частоте f_{ref} плюс шум на некоторой другой частоте. Традиционным определением динамического резерва является отношение наибольшего допустимого шумового сигнала к полномасштабному сигналу, выраженное в дБ. Например, если полная шкала равна 1 мВ, то динамический резерв 60 дБ означает, что шум амплитудой до 1 мВ (на 60 дБ больше полной шкалы) может допускаться на входе без его перегрузки.

Проблема с этим определением заключается в слове "допускаться". Очевидно, что шум на пределе динамического резерва не должен вызывать перегрузку в любом месте прибора, кроме усилителя входного сигнала, ФД, фильтра нижних частот или усилителя постоянного тока. Это достигается путем корректировки распределения коэффициента усиления. Для достижения высокого резерва коэффициент усиления входного сигнала устанавливается очень низким, поэтому шумом вряд ли будет перегружен. Это означает, что сигнал на ФД также очень мал. Фильтр нижних частот удаляет большие шумовые компоненты с выхода ФД, что позволяет оставшемуся

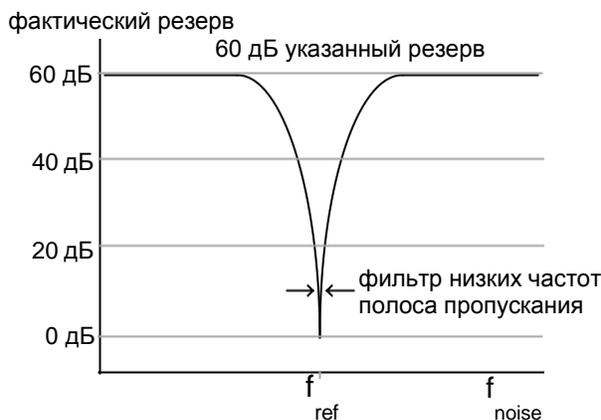
компоненту постоянного тока усиливаться (сильно) до достижения полной шкалы 10 В. Нет никаких проблем с запуском входного усилителя с низким коэффициентом усиления. Однако, как мы уже обсуждали ранее, аналоговые синхронные усилители имеют проблему с высоким резервом из-за линейности ФД и смещений постоянного тока усилителя ФД и постоянного тока. В аналоговом синхронном усилителе большие шумовые сигналы почти всегда каким-то образом нарушают измерение.

Наиболее распространенной проблемой является ошибка выхода постоянного тока, вызванная шумовым сигналом. Это может выглядеть как смещение или как ошибка усиления. Поскольку оба эффекта зависят от амплитуды и частоты шума, они не могут быть смещены до нуля во всех случаях и будут ограничивать точность измерения. Поскольку ошибки носят постоянный характер, увеличение постоянной времени не помогает. Большинство синхронных усилителей определяют допустимый шум как уровни, которые не влияют на выход более чем на несколько процентов от полной шкалы. Это гораздо серьезнее, чем просто отсутствие перегрузки.

Еще один эффект высокого динамического резерва заключается в создании шума и дрейфа на выходе. Это происходит потому, что выходной усилитель постоянного тока работает с очень высоким коэффициентом усиления, а низкочастотный шум и дрейф смещения на выходе ФД или на входе усилителя постоянного тока будут усилены и являться большими на выходе. Шум более приемлем, чем ошибки дрейфа постоянного тока, так как увеличение постоянной времени ослабит шум. Дрейф постоянного тока в аналоговом синхронном усилителе обычно составляет порядка 1000 ppm / °C при использовании динамического резерва 60 дБ. Это означает, что нулевая точка перемещается на 1% от полной шкалы при изменении температуры на 10 °C. Это вообще считается пределом допустимого.

Наконец, динамический резерв зависит от частоты шума. Ясно, что шум на опорной частоте будет пробиваться к выходу без ослабления. Таким образом, динамический резерв на f_{ref} составляет 0 дБ. По мере удаления частоты шума от опорной частоты динамический резерв увеличивается. Почему? Потому что фильтр нижних частот после ФД ослабляет компоненты шума. Помните, что выходы ФД находятся на частоте $|f_{noise} - f_{ref}|$. Скорость, с которой увеличивается резерв, зависит от постоянной времени фильтра нижних частот и крутизны характеристики фильтра. Резерв увеличивается с той скоростью, с которой падает характеристика фильтра. Вот почему фильтры с крутизной 24 дБ/окт лучше, чем фильтры с крутизной 6 или 12 дБ/окт. Если частота шума находится далеко, то резерв ограничен

уровнем распределения усиления и перегрузки каждого элемента усиления. Этот уровень резерва и является динамическим резервом, упомянутым в спецификациях.



На приведенном выше графике показан фактический резерв в сравнении с частотой шума. В некоторых приборах частоты входного сигнала ослабевают далеко за пределами рабочего диапазона синхронного усилителя ($f_{noise} \gg 100$ кГц). В этих случаях резерв может быть выше на этих частотах, чем в пределах рабочего диапазона. Хотя это создает хорошую спецификацию, удаление шума на частотах, очень далеких от опоры, не требует синхронного усилителя. Синхронные усилители используются, когда есть шум на частотах вблизи сигнала. Таким образом, динамический резерв для шума в пределах рабочего диапазона является более важным.

Динамический резерв в цифровых синхронных усилителях SR810, SR830 и SR850

SR810, SR830 и SR850, с их цифровыми ФД, не страдают от ошибок вывода постоянного тока, вызванных большими шумовыми сигналами. Динамический резерв может быть увеличен до более чем 100 дБ без погрешности измерения. Большие шумовые сигналы не вызывают ошибок на выходе ФД. Большой коэффициент усиления постоянного тока не приводит к увеличению дрейфа выходного сигнала.

На самом деле, единственным недостатком использования сверхвысоких динамических резервов (>60 дБ) является повышенный выходной шум из-за шума аналого-цифрового преобразователя. Это увеличение выходного шума наблюдается только тогда, когда динамический резерв увеличивается выше 60 дБ и выше минимального резерва. (Если минимальный резерв составляет 80 дБ, то увеличение до 90 дБ может привести к увеличению шума. Как мы обсудим далее, минимальный резерв не имеет повышенного выходного шума: не важно, насколько он велик.)

Для установки шкалы выходной шум цифрового синхронного усилителя, при динамическом резерве 100 дБ, измеряется только при заземлении входного сигнала. Давайте проведем простой эксперимент. Если опора синхронного усилителя находится на частоте 1 кГц, а большой сигнал подается на частоте 9,5 кГц, то каким будет выход синхронного усилителя? Если сигнал увеличен до предела динамического резерва (на 100 дБ больше полной шкалы), то выход будет отражать шум сигнала на частоте 1 кГц. Спектр любого генератора чистого синусоидального сигнала всегда имеет уровень шума, т. е. существует некоторый шум на всех частотах. Так что, даже если входной сигнал находится на частоте 9,5 кГц, то будет иметь место шум на всех остальных частотах, в том числе и на опоре синхронного усилителя 1 кГц. Этот шум будет детектирован синхронным усилителем и появится как шум на выходе. Этот выходной шум обычно будет больше, чем собственный выходной шум синхронного усилителя. Фактически, практически все источники сигнала будут иметь уровень шума, который будет доминировать над выходным шумом синхронного усилителя. Конечно, шумовые сигналы обычно намного шумнее, чем генераторы чистых синусоидальных сигналов и будут иметь гораздо более высокие уровни широкополосного шума.

Если шум не достигает предела резерва, то собственный выходной шум цифрового синхронного усилителя может быть обнаружен при сверхвысоких резервах. В этом случае просто уменьшите динамический резерв, и коэффициент усиления постоянного тока уменьшится, а также уменьшится выходной шум. В общем, не работайте с большим резервом, чем это необходимо. Конечно, не используйте сверхвысокий резерв, когда практически нет шума вообще.

Частотная зависимость динамического резерва присуща методу детектирования синхронного усилителя. SR810, SR830 и SR850, имея больше ступеней фильтра нижних частот, могут увеличить динамический резерв, близкий к опорной частоте. Указанный резерв применяется к шумовым сигналам в рабочем диапазоне синхронного усилителя, т. е. на частотах ниже 100 кГц. Резерв на более высоких частотах, на самом деле, больше, но, как правило, не так уж и полезен.

Минимальный динамический резерв SR810, SR830 и SR850

SR810, SR830 и SR850 всегда имеют минимальную величину динамического резерва. Этот минимальный резерв изменяется вместе с чувствительностью (коэффициентом усиления) прибора. При высоких коэффициентах усиления (полная чувствительность шкалы 50 мкВ и ниже) минимальный динамический резерв увеличивается с 37 дБ с той же скоростью, что и чувствительность. Например, минимальный резерв при чувствительности 5 мкВ составляет 57 дБ. Во многих аналоговых синхронных усилителях резерв может быть ниже. Почему при такой чувствительности цифровые синхронные усилители не могут работать с меньшим резервом?

Ответ на этот вопрос таков: "Зачем вам нужен более низкий резерв?" В аналоговом синхронном усилителе более низкий резерв означает меньшую выходную ошибку и дрейф. В синхронных усилителях серии SR800 большой резерв не увеличивает выходную ошибку или дрейф. Но большой резерв может увеличить выходной шум. Однако, если коэффициент усиления аналогового сигнала перед аналого-цифровым преобразователем достаточно высок, то шум входного сигнала в нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ будет усилен до уровня, превышающего входной шум аналого-цифрового преобразователя. В этот момент детектированный шум будет отражать фактический шум на сигнальном входе, а не шум аналого-цифрового преобразователя. Увеличение аналогового усиления (уменьшение резерва) не приведет к уменьшению выходного шума. Таким образом, нет никаких оснований для уменьшения резерва. При чувствительности 5 мкВ аналоговый коэффициент усиления достаточно высок, так что шум аналого-цифрового преобразователя не является проблемой. Уровни чувствительности ниже 5 мкВ не требуют дополнительного



усиления, так как отношение сигнал/шум не будет улучшено (преобладает входной шум). Синхронные усилители серии SR800 не увеличивают свой коэффициент усиления на 5 чувствительности ниже мкВ. Вместо этого увеличивается минимальный резерв. Конечно, входной коэффициент усиления может быть уменьшен, а резерв увеличен; в этом случае шум аналого-цифрового преобразователя может быть обнаружен в отсутствие какого-либо входного сигнала.

Динамический резерв в аналоговых синхронных усилителях SR510 и SR530

Из-за ограничений их ФД, аналоговые синхронные усилители должны использовать различные методы для улучшения их динамического резерва. Наиболее распространенным из них является использование аналоговых префильтров. SR510 и SR530 имеют настраиваемые полосовые фильтры на своих входах. Фильтры предназначены для автоматического отслеживания опорной частоты. Если мешающий сигнал ослабляется фильтром до того, как он достигнет входа синхронного усилителя, динамический резерв синхронного усилителя будет увеличен на величину ослабления. Для SR510 и SR530 увеличение динамического резерва до 20 дБ может быть реализовано с помощью входного полосового фильтра. Конечно, такие фильтры добавляют свой собственный шум и вносят свой вклад в погрешность по фазе, поэтому их следует использовать только в случае необходимости.

Синхронный усилитель может измерять сигналы амплитудой всего в несколько нановольт. Малошумящий усилитель необходим для повышения сигнала до уровня, при котором аналого-цифровой преобразователь может оцифровывать сигнал без ухудшения отношения сигнал/шум. Аналоговый коэффициент усиления в SR850 изменяется, примерно, от 7 до 1000. Как обсуждалось ранее, более высокие коэффициенты усиления не улучшают соотношение сигнал/шум и не являются необходимыми.

Общий коэффициент усиления (AC и DC) определяется чувствительностью. Распределение коэффициента усиления (переменного и постоянного тока) задается динамическим резервом.

Входной шум

Входной шум усилителя сигналов SR810, SR830 или SR850 составляет около $5 \text{ нВскз} / \sqrt{\text{Гц}}$. Синхронные усилители SR530 и SR510 имеют $7 \text{ нВскз} / \sqrt{\text{Гц}}$ входного шума. Что означает коэффициент шума? Давайте проведем эксперимент. Если усилитель имеет $5 \text{ нВскз} / \sqrt{\text{Гц}}$ входного шума и коэффициент усиления 1000, то на выходе будет $5 \text{ мВскз} / \sqrt{\text{Гц}}$ шума. Предположим, что выход усилителя отфильтрован одним низкочастотным RC-фильтром (с крутизной 6 дБ/окт) с постоянной времени 100 мс. Каким будет шум на выходе фильтра?

Входной шум усилителя и шум Джонсона (тепловой шум) резисторов имеют Гауссовскую природу. То есть, количество шума пропорционально квадратному корню из полосы пропускания, в которой измеряется шум. Одноступенчатый RC-фильтр имеет эквивалентную полосу пропускания шума (ENBW) $1/4T$, где T-постоянная времени ($R \times C$). Это означает, что гауссовский шум, имеющийся на входе фильтра, отфильтровывается с эффективной полосой пропускания, равной ENBW. В этом примере фильтр видит $5 \text{ мВскз} / \sqrt{\text{Гц}}$ шума на своем входе. Он имеет ENBW $1/(4 \times 100 \text{ мс})$ или 2,5 Гц. Шумовое напряжение на выходе фильтра составит $5 \text{ мВскз} / \sqrt{\text{Гц}} \times \sqrt{2,5 \text{ Гц}}$, или 7,9 мВскз. Для гауссовского шума межпиковая величина шума примерно в 5 раз превышает среднеквадратичный шум. Таким образом, выход будет иметь около 40 мВпп шума.

Входной шум для синхронного усилителя работает точно так же. Для чувствительностей ниже полной шкалы порядка 5 мкВ входной шум будет определять выходной шум (при минимальном резерве). Количество шума на выходе определяется ENBW фильтра нижних частот ENBW зависит от постоянной времени и крутизны фильтра. Например, предположим, что синхронный усилитель установлен на полную шкалу 5 мкВ, с постоянной времени 100 мс и крутизной фильтра 6 дБ/окт. Синхронный усилитель будет измерять входной шум с ENBW 2,5 Гц. Это приводит к 7,9 нВскз на входе. На выходе это составляет около 0,16 % от полной шкалы (7,9 нВ/5 мкВ). Пиковый шум будет составлять около 0,8 % от полной шкалы.

Все это предполагает, что входной сигнал подается от источника с низким импедансом. Помните, что резисторы имеют шум Джонсона, равный $0,13 \times \sqrt{R} \text{ нВскз} / \sqrt{\text{Гц}}$. Даже резистор 50 Ом имеет почти 1 нВскз/√ Гц шума! Импеданс источника сигнала 2 кОм будет иметь шум Джонсона больше, чем входной шум синхронного усилителя. Чтобы определить общий шум от нескольких источников шума, возьмем квадратный корень из суммы квадратов отдельных коэффициентов шума. Например, если используется импеданс источника 2 кОм, то шум Джонсона составит $5,8 \text{ нВскз} / \sqrt{\text{Гц}}$. Общий шум на входе синхронного усилителя составит $[5^2 + 5,8^2]^{1/2}$, или $7,7 \text{ нВскз} / \sqrt{\text{Гц}}$.

Источники шума

Каково происхождение шума, который мы обсуждали? Есть два типа шума, о которых мы должны беспокоиться в лабораторных условиях: внутренний шум и внешний шум. Внутренние источники шума, такие как шум Джонсона и дробовой шум, присущи всем физическим процессам. Хотя мы не можем избавиться от внутренних источников шума, осознавая их природу мы можем минимизировать их воздействие. Внешние источники шума находятся в окружающей среде, такие как шум линий электропередач и вещательных станций. Влияние этих источников шумов может быть сведено к минимуму за счет тщательного внимания к заземлению, экранированию и другим аспектам экспериментального проектирования. Сначала мы обсудим некоторые источники внутреннего шума.

Шум Джонсона

Каждый резистор генерирует шумовое напряжение на своих выводах из-за тепловых флуктуаций электронной плотности внутри самого резистора. Эти флуктуации приводят к возникновению шумового напряжения разомкнутой цепи:

$$V_{\text{noise(скз)}} = (4k TR \Delta f)^{1/2}$$

где k = постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/°К), T -температура в Кельвинах (обычно 300 °К), R -сопротивление в Омах, а Δf -ширина полосы измерения в Гц.

Поскольку усилитель входного сигнала в синхронном усилителе обычно имеет полосу пропускания приблизительно 300 кГц, эффективный шум на входе усилителя составляет $V_{\text{noise}}=70\sqrt{R}$ нВскз, или $350\sqrt{R}$ нВпп. Этот шум широкополосный. Таким образом, если импеданс источника велик, он может определить величину требуемого динамического резерва.

Количество шума, измеряемое синхронным усилителем, определяется полосой пропускания измерения. Помните, что синхронный усилитель не сужает свою полосу обнаружения до тех пор, пока не появятся ФД. В синхронном усилителе эквивалентная полоса пропускания шума (ENBW) фильтра нижних частот (постоянная времени) задает полосу пропускания детектора. В этом случае измеренный шум резистора на входе синхронного усилителя, как правило, является импедансом источника сигнала, просто равен:

$$V_{\text{noise(скз)}} = 0,13\sqrt{R}\sqrt{\text{ENBW}} \text{ нВ}$$

Дробовой шум

Электрический ток имеет шум из-за конечной природы носителей заряда. Всегда существует некоторая неравномерность в потоке электронов, которая порождает шум в токе. Этот шум называется "дробовым шумом". Он может проявляться как шум напряжения, когда ток проходит через резистор, или как шум при измерении тока. Дробовой шум, или токовый шум, задается следующим образом:

$$I_{\text{noise(скз)}} = (2qI \Delta f)^{1/2}$$

где q -заряд электрона ($1,6 \times 10^{-19}$ Кл), I -среднеквадратичный переменный ток или постоянный ток в зависимости от схемы, а Δf -полоса пропускания.

Когда токовый вход синхронного усилителя используется для измерения сигнала переменного тока, полоса пропускания обычно настолько мала, что дробовой шум не имеет значения.

1 / f шум (фликкер шум)

Каждый резистор 10 Ом, независимо от того, из чего он сделан, имеет один и тот же шум Джонсона. Однако, существует избыточный шум в дополнение к шуму Джонсона, который возникает из-за колебаний сопротивления из-за тока, протекающего через резистор. Для углеродных резисторов это обычно составляет от 0,1 мкВ до 3 мкВ среднеквадратичного шума на Вольт напряжения, приложенного к резистору. Металлические пленочные и проволочные резисторы имеют уровень шума примерно в 10 раз меньше. Этот шум имеет спектр $1/f$ и делает затрудняет измерения на низких частотах.

Другие источники шума 1/f включают шум, обнаруженный в вакуумных трубках и полупроводниках.

Полный шум

Все эти источники шума являются некогерентными. Суммарный случайный шум - это квадратный корень из суммы квадратов всех некогерентных источников шума.

Внешние источники шума

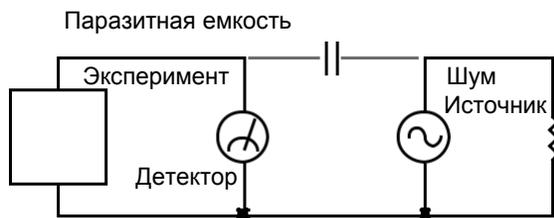
В дополнение к внутренним источникам шума, рассмотренным ранее, в лаборатории существует множество внешних источников шума. Большинство этих источников шума являются асинхронными, т. е. они не связаны с опорной частотой и не возникают на опорной частоте или ее гармониках. Примеры включают в себя осветительные приборы, двигатели, холодильные установки, радиоприемники, компьютерные мониторы и т. д. Эти источники шума влияют на измерение, увеличивая необходимый динамический резерв или удлиняя постоянную времени.

Некоторые источники шума, однако, связаны с опорой, и если они будут подобраны в сигнале, то будут складываться или вычитаться из фактического сигнала и вызывать ошибки в измерении. Типичными источниками синхронного шума являются контуры заземления между экспериментальным устройством, детектором и синхронным усилителем, а также электронный прием от опорного генератора или экспериментальной установки.

Многие из этих источников шума могут быть сведены к минимуму с помощью хорошей лабораторной практики и проектирования экспериментов. Существует несколько способов подключения источников шума к сигнальному тракту.

Емкостная связь

Переменное напряжение от соседней части устройства может давать наводку на детектор через паразитную емкость. Хотя C_{stray} может быть очень мала, наведенный шум, все же, может быть больше, чем слабый экспериментальный сигнал. Это особенно вредно, если наведенный шум является синхронным (с опорной частотой).



Мы можем оценить шумовой ток, вызванный паразитной емкостью, по формуле:

$$i = C_{\text{stray}} \frac{dv}{dt} = \omega C_{\text{stray}} V_{\text{noise}}$$

где ω -2 π -кратная частота шума, V_{noise} -амплитуда шума, а C_{stray} -паразитная емкость.

Например, если источником шума является силовая цепь, то $f = 60$ Гц и $V_{\text{noise}} = 120$ В. C_{stray} можно оценить с помощью эквивалентного конденсатора на параллельных пластинах. Если емкость составляет примерно площадь 1 см^2 , разделенную 10 см , то C_{stray} составляет $0,009 \text{ пФ}$. Результирующий шумовой ток составит 400 пА (при 60 Гц). Этот небольшой шумовой ток может быть в тысячи раз больше, чем ток сигнала. Если источник шума находится на более высокой частоте, то наведенный шум будет еще больше.

Если источник шума находится на опорной частоте, то проблема гораздо хуже. Синхронный усилитель подавляет шум на других частотах, но прием на опорной частоте появляется как сигнал!

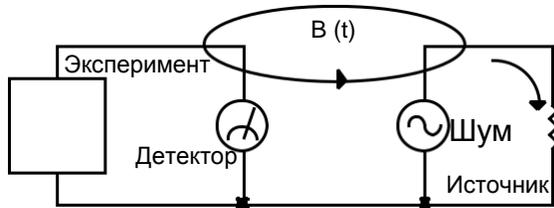
Способы борьбы с емкостной шумовой связью (наводкой) включают в себя:

- 1) Удаление или отключение источника шума.
- 2) Удержание источника шума вдали от эксперимента (уменьшение C_{stray}). Не приближайте сигнальные кабели близко к источнику шума.

- 3) Проектирование эксперимента для измерения напряжений с низким импедансом (шумовой ток генерирует очень низкое напряжение).
- 4) Установка емкостного экранирования осуществляется путем помещения как экспериментального устройства, так и детектора в металлическую коробку.

Индуктивная связь

Проводник с переменным током недалеко от исследуемого устройства может влиять на эксперимент через магнитное поле. Изменяющийся ток в соседней цепи порождает изменяющееся магнитное поле, которое индуцирует ЭДС ($d\Phi_B/dt$) в контуре, соединяющем детектор с экспериментальным устройством. Это похоже на трансформатор с петлей экспериментальное устройство-детектор в качестве вторичной обмотки.

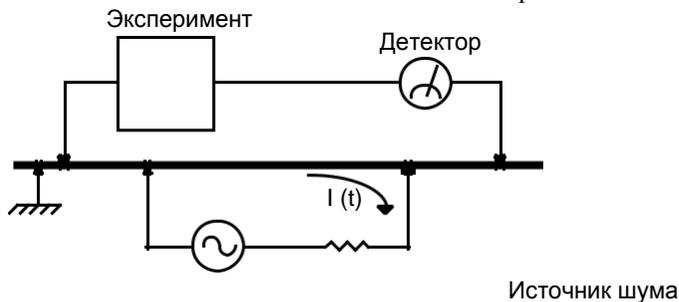


Способы борьбы с индуктивно связанными помехами (наводками) включают в себя:

- 1) Удаление или отключение источника помехового шума.
- 2) Уменьшите площадь контура приемника с помощью витых пар или коаксиальных кабелей или даже скручивания двух коаксиальных кабелей, используемых в дифференциальных соединениях.
- 3) Использование магнитного экранирования для предотвращения пересечения магнитным полем области эксперимента.
- 4) Измерение токов (а не напряжений) от высокоимпедансных детекторов.

Резистивная связь или контуры заземления

Токи, протекающие через заземляющие соединения, могут приводить к возникновению шумовых напряжений. Особенно это касается токов заземления на опорной частоте.



На этой иллюстрации детектор измеряет сигнал относительно земли, удаленной от остальной части эксперимента. Экспериментальное устройство воспринимает сигнал детектора, а также напряжение от обратного тока заземления источника шума, которое проходит через конечное сопротивление земли между экспериментальным устройством и детектором. Детектор и экспериментальное устройство заземлены в разных местах, которые в данном случае находятся на разных потенциалах.

Способы борьбы с проблемами контура заземления включают в себя:

- 1) Заземление всего на одну и ту же физическую точку.
- 2) Использование массивной шины заземления для снижения сопротивления заземляющих соединений.
- 3) Удаление источников больших токов заземления из шины заземления, используемой для малых сигналов.

Микрофонный эффект

Не все источники шума имеют электрическое происхождение. Механический шум может быть переведен в электрический шум с помощью микрофонных эффектов. Физические изменения в экспериментальном устройстве или кабелях (например, из-за вибрации) могут привести к появлению электрического шума во всем диапазоне частот синхронного усилителя.

Например, рассмотрим коаксиальный кабель, соединяющий детектор с синхронным усилителем. Емкость кабеля зависит от его геометрии. Механические колебания в кабеле преобразуются в емкость, которая изменяется во времени, как правило, на частоте вибрации. Поскольку кабель управляется $Q=CV$, вычисляя производную получаем:

$$C \frac{dV}{dt} + V \frac{dC}{dt} = \frac{dQ}{dt} = i$$

Механические вибрации в кабеле, которые приводят к появлению dC/dt , приведут к возникновению тока в кабеле. Этот ток влияет на детектор и измеряемый сигнал.

Некоторые способы минимизации микрофонных сигналов заключаются в следующем:

- 1) Устраните механические вибрации вблизи экспериментального устройства.
- 2) Свяжите кабели несущие чувствительные сигналы, так они перестанут двигаться.

Эффекты термопары

ЭДС, создаваемая соединениями между разнородными металлами, может породить множество микровольт медленно изменяющихся потенциалов. Этот источник шума обычно находится на очень низкой частоте, так как температура детектора и экспериментального устройства обычно изменяется медленно. Этот эффект велик в масштабе многих выходов детектора, и может быть проблемой для низкочастотных измерений, особенно в диапазоне мГц. Некоторые способы минимизации эффектов термопары заключаются в следующем:

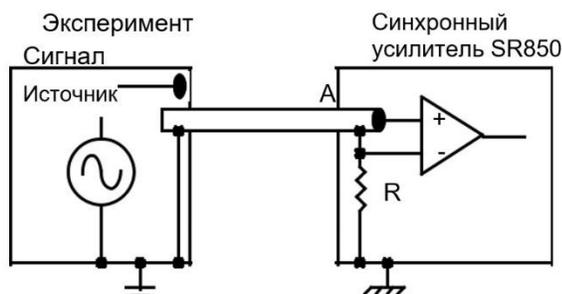
- 1) Держите температуру экспериментального устройства или детектора постоянной.

Необходимо позаботиться о том, чтобы свести к минимуму различные источники шума, которые могут быть найдены в лаборатории. При наличии внутреннего шума (шум Джонсона, шум $1/f$ или входной шум) экспериментальное устройство или детектор должны быть спроектированы с учетом этих источников шума. Эти источники шума присутствуют независимо от входных соединений. Влияние источников шума в лаборатории (например двигателей, генераторов сигналов и др.) и проблема дифференциальных заземлений между детектором и синхронным усилителем, может быть сведена к минимуму с помощью тщательного исполнения входных соединений.

Существует два основных способа подключения сигнала напряжения к синхронному усилителю; однополярное соединение является более удобным, а дифференциальное соединение более эффективно устраняет паразитный прием.

Однополярное подключение напряжения (A)

В первом методе синхронный усилитель вход A в однополярном режиме. Синхронный усилитель определяет сигнал только как напряжение между центральным и внешним проводниками входа A. Синхронный усилитель не заземляет экран кабеля A. Скорее всего, он внутренне соединен с землей синхронного усилителя через резистор. Значение этого резистора обычно составляет от 10 Ом до 1 кОм. SR810, SR830 и SR850 позволяют вам выбрать значение этого резистора. Это позволяет избежать проблем с контуром заземления между экспериментальным устройством и синхронным усилителем из-за различных потенциалов заземления. Синхронный усилитель позволяет экрану "квази-плавать", чтобы почувствовать заземление экспериментального устройства. Однако, шум в экране будет выглядеть как шум для синхронного усилителя. Это плохо, так как блокировка не может отклонить этот шум. Синфазный шум, который появляется как на центральном проводнике, так и на экране, подавляется посредством 100-дБ КОСС (CMRR) входа синхронного усилителя, но шум, имеющийся только на экранирующем проводнике, не подавляется вообще.



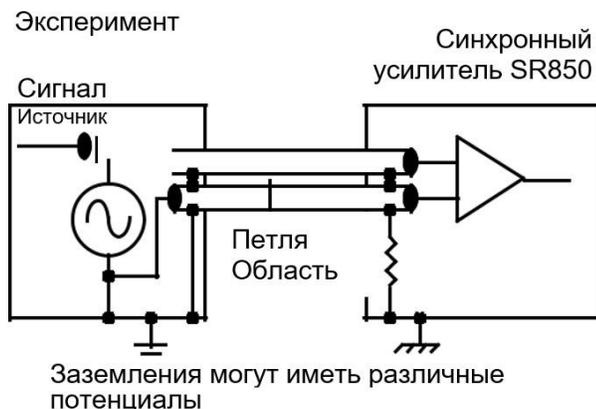
- 2) Используйте компенсационный переход, т. е. второй переход с обратной полярностью, который генерирует ЭДС для компенсации теплового потенциала первого перехода. Это второе соединение должно быть выдержано при той же температуре, что и первое соединение.

Входные соединения

Чтобы достичь наилучшей точности для данного измерения, Заземления могут иметь различные потенциалы соединения дифференциальных напряжений (A-B)

Второй способ соединения-это дифференциальный режим. Синхронный усилитель измеряет разность напряжений между центральными проводниками входов A и B. Оба сигнальных соединения защищены от паразитных наводок. Шума на экранах не преобразуется в сигнальный шум, так как экраны игнорируются.

При использовании двух кабелей важно, чтобы оба кабеля проходили один и тот же путь между экспериментальным устройством и синхронным усилителем. В частности, не должно быть большой площади петли, образованной двумя кабелями. Петли с большими площадями восприимчивы к магнитным наводкам.



Синфазные сигналы

Синфазные сигналы - это те сигналы, которые одновременно появляются как на центральном, так и на экранирующем проводнике (A) или на обоих A и B (A-B). При любой схеме подключения важно минимизировать как синфазный шум, так и синфазный сигнал. Обратите внимание, что источник сигнала "плавает" при ненулевом потенциале земли на обоих приведенных выше рисунках. Если источник сигнала "плавает" при ненулевом потенциале, сигнал, который появляется на обоих входах A и B, не будет полностью компенсирован. Коэффициент ослабления синфазного режима (CMRR) определяет степень ослабления. Для низких частот CMRR 100 дБ указывает на то, что синфазный сигнал ослабляется до 1 части из 10^5 . Даже при CMRR 100 дБ синфазный сигнал 100 мВ ведет себя как дифференциальный сигнал 1 мкВ! Это особенно плохо, если синфазный сигнал находится на опорной частоте (это часто происходит из-за контуров заземления). CMRR уменьшается примерно на 6 дБ/окт (20 дБ/декада), начиная примерно с 1 кГц.

Синхронный усилитель как прибор для измерения шума

Для измерения уровня шума можно использовать синхронные усилители. Измерения шума обычно используются для характеристики компонентов и детекторов. Помните, что синхронный усилитель обнаруживает сигналы близко к опорной частоте. - Насколько близко? Входные сигналы в пределах полосы пропускания обнаружения, заданной постоянной времени фильтра нижних частот и крутизной, появляются на выходе на определенной частоте $f = f_{\text{sig}} - f_{\text{ref}}$. Входной шум вблизи f_{ref} появляется как шум на выходе с полосой пропускания от постоянного тока до полосы детектирования.

Шум-это просто стандартное отклонение (корень среднего значения квадратов отклонений) измеренных X , Y или R . Вы можете точно измерить этот шум, записав последовательность выходных значений, а затем непосредственно вычислить стандартное отклонение. Шум в вольтах/ $\sqrt{\text{Гц}}$ -это просто стандартное отклонение, деленное на квадратный корень из эквивалентной полосы пропускания шума постоянной времени.

Оценка шума

Описанная выше методика, будучи математически обоснованной, не может обеспечить выход в реальном времени или аналоговый выход, пропорциональный измеряемому шуму. Однако, синхронные усилители (такие как SR510, SR530, SR810, SR830 и SR850) обеспечивают эти функции. Величина X_{noise} вычисляется по измеренным значениям X с использованием следующего алгоритма. Вычисляется скользящее среднее X . Это среднее значение X за некоторую прошедшую историю. Текущее среднее значение X вычитается из текущего значения X , чтобы найти отклонение X от среднего значения. Наконец, вычисляется скользящая средняя абсолютного значения отклонений. Этот расчет называется среднее отклонение, или СЗО. Это не то же самое, что расчет. Однако, если шум имеет гауссовскую природу, то среднеквадратичный шум и СЗО шум связаны постоянным фактором.

Для гауссовского шума эквивалентная полоса пропускания шума (ENBW) фильтра нижних частот - это полоса пропускания идеального прямоугольного фильтра, пропускающего такое же количество шума, как и реальный фильтр.

Синхронные усилители SRS используют метод СЗО для оценки среднеквадратичных величин шума X_n , Y_n и R_n . Преимущество этой методики заключается в ее численной простоте и быстродействии. Для большинства приложений оценка шума и расчеты стандартного отклонения дают один и тот же ответ. Какой метод вы используете, зависит от требований эксперимента.