

Цифровые источники сигнала своими руками (теоретическая часть)

Я уже давно заметил, что большая часть аудио-любителей уделяет мало внимания такому неотъемлемому компоненту аудиосистемы, как источник. Основные силы направлены, как правило, на создание усилителей мощности, реже – на акустические системы. Хочу заметить, что в высококачественной аудиосистеме нельзя пренебрегать ни одним компонентом, входящим в ее состав. Почему особенно нельзя пренебрегать источником? Ответ прост: источник воспроизводит тот самый звуковой сигнал, который в последствии будет усиливаться и подводиться к акустическим системам. Если качество, которое обеспечивает источник, низкое, какой смысл тратиться на создание (приобретение) высококачественных усилителей мощности и акустических систем? Вывод напрашивается сам собой: **источник – №1 в аудиосистеме.**

Многих желающих самостоятельно собрать цифро-аналоговый преобразователь или доработать имеющийся в наличии CD-проигрыватель, отпугивает информационный «вакуум», который проявляется как практически полное отсутствие какой-либо литературы по данному направлению. Этот «вакуум» испытал на себе и я, когда впервые решил сделать внешний блок **DAC (Digital to Analog Converter)** для своего CD-проигрывателя. С накоплением информации мне очень много помогли (и до сих пор помогают) профессионалы своего дела, **за что им всем огромное спасибо!** Этой статьей я хочу помочь тем начинающим, которые испытывают желание самостоятельного изготовления цифрового источника, но не знают или не понимают с чего начать. А начинать, как всегда, требуется с теоретических основ, без знания которых сделать что-либо толковое вряд ли получится. Сразу хочу сказать, что самостоятельное изготовление блока DAC не является простым и дешевым. Но, потратив на изготовление \$400...500, можно стать обладателем аппарата с действительно высококачественным звуком, аналогов которому среди промышленных образцов ценовой категории \$3000...4000 найдется не много. Потратив же \$1000...1500, проблему цифрового источника можно будет закрывать и уже открывать проблему приобретения высококачественных записей на CD. ☺ Хотя, проблеме приобретения хороших дисков следует всегда уделять внимание, даже если в наличии бюджетный проигрыватель.

Начать хочу с основ теории преобразования аналогового сигнала в цифровой и обратного процесса, поскольку многие аудио-любители эти процессы представляют себе с трудом. Рассматриваться будет самый распространенный формат цифровых аудиоданных – **CDDA (Compact Disc Digital Audio)**, то есть частота дискретизации (квантования) 44100 Гц и глубина дискретизации 16 бит. Цифровая информация на этом носителе представлена методом импульсно-кодовой модуляции (в обиходе – **PCM – Pulse Code Modulation**). Суть этого метода заключается в представлении аудиоданных последовательным потоком, состоящим из 16-и разрядных двоичных цифровых кодов (цифровых слов), несущих информацию о мгновенных значениях амплитуды сигнала.

Частота дискретизации (в принятом международном обозначении – f_s – **Sampling Frequency**). Для **аналого-цифрового преобразователя (АЦП)** частота дискретизации определяет, сколько раз в секунду производится измерение мгновенного значения уровня (амплитуды) входного аналогового сигнала для формирования эквивалентного цифрового кода. Для **цифро-аналогового преобразователя (ЦАП)** – сколько раз в секунду уровень выходного дискретного аналогового сигнала принимает значение, соответствующее поступившему цифровому коду. Для формата CDDA частота дискретизации 44100 Гц была выбрана исходя из компромисса между наименьшими потерями при преобразовании и объемом информации, занимаемой на цифровом носителе. Данная частота дискретизации, откровенно говоря, сильно мала для качественного преобразования сигналов звукового диапазона, но полностью соответствует главному условию теоремы Шеннона, которая для корректного преобразования требует, чтобы f_s минимум в два раза превышала верхнюю частоту в спектре преобразуемого аналогового сигнала.

Глубина дискретизации определяет максимально возможное количество уровней аналогового сигнала, которое может быть представлено в цифровой форме при процессе преобразования. Для 16-и разрядного преобразователя количество этих уровней составляет 65536, то есть 2^{16} .

Теоретически, при аналого-цифровом преобразовании необходимо стремиться к максимально возможной частоте и глубине дискретизации, поскольку, чем выше f_s , тем более точно определена форма исходного аналогового сигнала и, чем больше разрядность АЦП, тем точнее определены уровни сигнала.

В качестве примера, на рисунке №1 условно изображено, как происходит процесс дискретизации аналогового сигнала 16- разрядным АЦП.

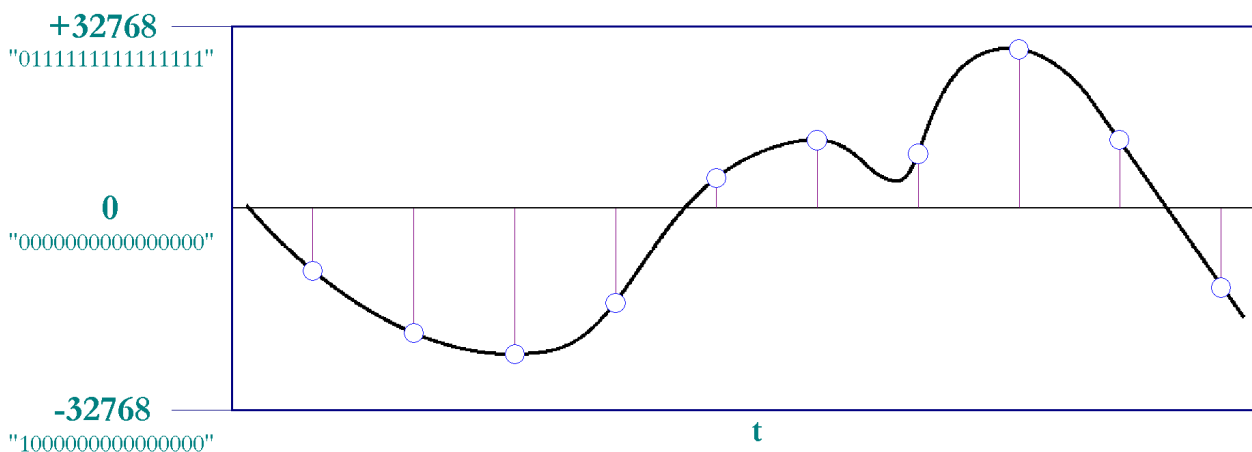


Рисунок №1

Как можно видеть, через равные промежутки времени, определяемые частотой дискретизации, АЦП производит измерение мгновенных значений уровней аналогового сигнала и формирует соответствующие им цифровые коды. Поскольку частота дискретизации не бесконечна, что находится между цифровыми отсчетами, при аналого-цифровом преобразовании будет потеряно, увы, навсегда. Также, любой АЦП обладает своей определенной, зависящей от разрядности, разрешающей способностью, вследствие чего каждый уровень амплитуды аналогового сигнала будет определен с некоторой погрешностью – **ошибкой (или шумом) квантования**. Особенно сильно это отражается на сигналах с малыми амплитудами. Частично устранить данные недостатки цифровой аудиотехники помогают математические методы интерполяции и аппроксимации цифровых данных (для случаев потери информации между отсчетами при квантовании), и применение дизеринга (для уменьшения шума квантования). Но об этом несколько позже. А пока одна из главных тем – ЦАП.

Основные характеристики, которыми обладает любая микросхема аудио-ЦАП, наверное, знают все. Это разрядность и максимальная частота дискретизации. Большинство аудио-любителей, увидев в описании какого-нибудь цифрового источника надпись «24 Bit 192 kHz Audio DAC», считают, что этого вполне достаточно для высококачественного звучания аппарата. Теоретически, такой ЦАП должен очень точно восстанавливать аналоговый сигнал из цифровой формы. Но в реальной жизни этого не происходит, поскольку любой ЦАП обладает погрешностью преобразования, которая, помимо прочих, включает в себя две очень важные характеристики – нелинейность и немонотонность характеристики преобразования (**ХП**).

Нелинейность ХП проявляется как формирование ступенек, отличающихся по ширине и высоте, в выходном аналоговом сигнале при изменении входного цифрового кода на единицу **младшего значащего разряда (МЗР)**, то есть просто изменении двоичного цифрового кода на 1 (например, $1101011\underline{0} + 1 \text{ МЗР} = 1101011\underline{1}$, или $1101011\underline{0} - 1 \text{ МЗР} = 110101\underline{01}$).

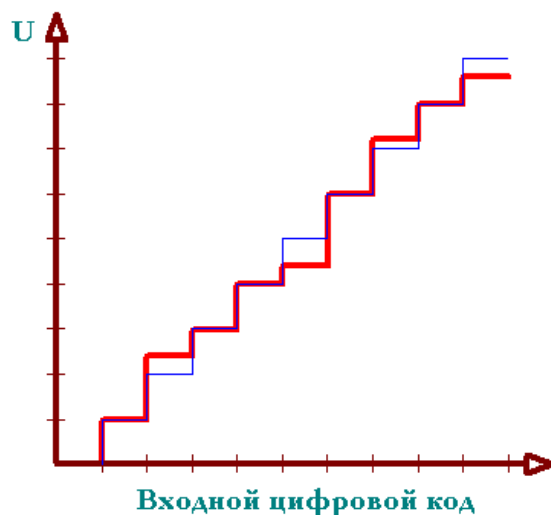


Рисунок №2

На рисунке №2 показано, как проявляется нелинейность ХП. Синим цветом отображена идеальная ХП, красным – нелинейная.

Немонотонность ХП – это изменение знака приращения уровня аналогового сигнала при изменении входного цифрового кода на 1 МЗР без смены знака. У идеального ЦАП вся шкала ХП монотонна. Увеличение входного цифрового кода на 1 МЗР вызывает только увеличение уровня аналогового сигнала на выходе, равно как уменьшение цифрового кода сопровождается только уменьшением уровня аналогового сигнала.

Как проявляется немонотонность ХП, показано на рисунке №3. Синим цветом изображена идеальная ХП.

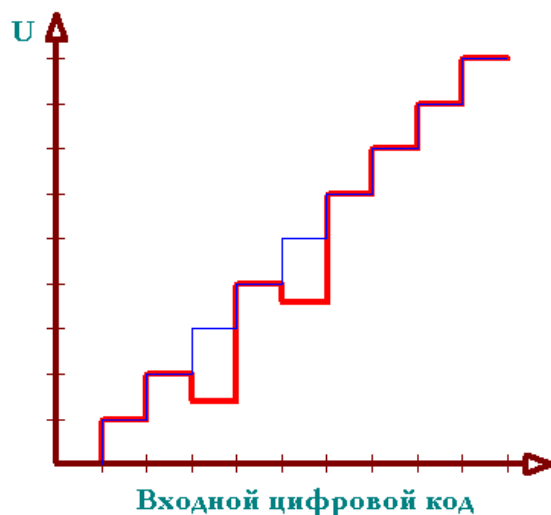


Рисунок №3

Совсем не обязательно, что нелинейность и немонотонность будут проявляться на сигналах с малыми уровнями, это может происходить на любом участке ХП. Обнаружить данный участок практически не представляется возможным. Поэтому общую линейность ЦАП принято оценивать по уровню нелинейных искажений при амплитуде сигнала на выходе соответствующей 0 дБ, и выражать получившееся число эффективным количеством разрядов. В английской терминологии – **ENOB (Effective Number of Bits)**:

$$ENOB = (THD+N)/6$$

При использовании данной формулы, уровень THD+N необходимо выражать в децибелах.

Вследствие преобразования цифрового сигнала, содержащего конечное количество возможных уровней амплитуды, в аналоговый сигнал, последний приобретает дискретную (ступенчатую) форму. Размер ступени составляет **разрешающую способность ЦАП** – возможное наименьшее изменение уровня выходного дискретного аналогового сигнала при соответствующем изменении входного цифрового кода на 1 МЗР. Разрешающая способность ЦАП напрямую зависит от эффективного количества разрядов.

По принципу преобразования аудио-ЦАП делятся на **однобитные** и **мультибитные**. **Дельта-сигма ЦАП**, как очень распространенная разновидность однобитной технологии, работает по принципу квантования всего одним разрядом, но с частотой в сотни и тысячи раз превышающей верхнюю частоту в спектре преобразуемого сигнала. Поступающие на вход дельта-сигма ЦАП цифровые аудиоданные обрабатываются цифровым фильтром – интерполятором для повышения частоты дискретизации. Затем цифровые данные поступают на рекурсивный фильтр – преобразователь шума, задача которого состоит в уменьшении разрядности данных до единицы и перемещении части спектра шума, возникающего в процессе одноразрядного квантования, в область высоких частот. После этого сформированная двоичная последовательность нулей и единиц поступает на одноразрядный цифро-аналоговый преобразователь. «1» в двоичной последовательности цифровых данных соответствует увеличению амплитуды, «0» - ее уменьшению. Нулевой уровень кодируется чередующейся последовательностью «1» и «0». По своей структуре однобитные ЦАП являются преобразователями последовательного действия.

С точки зрения производителей электронных компонентов, у однобитных ЦАП практически отсутствуют недостатки. Технология их производства достаточно проста и дешева. С теоретической точки зрения тоже все просто замечательно – вследствие формирования дискретного аналогового сигнала однобитным преобразователем, ХП такого ЦАП должна быть линейна и монотонна во всем диапазоне. Но это только с теоретической точки зрения. © К существенным недостаткам однобитных ЦАП следует отнести большой уровень генерируемых помех и шумов. И, хотя эти помехи и шумы находятся в области частот далеко за пределами звукового диапазона, их плотность и уровень высоки. Как такие ЦАП преобразуют сигналы малых уровней, можно видеть на рисунке №4.

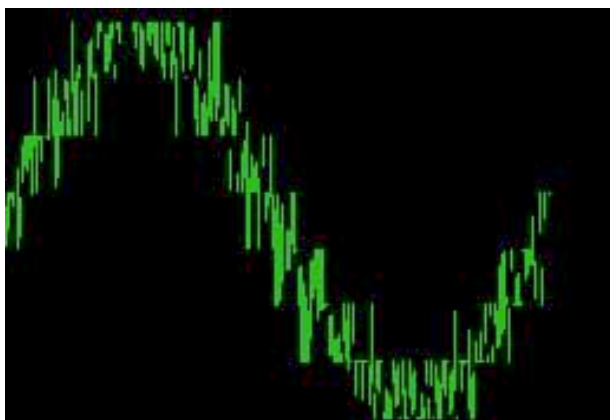


Рисунок №4

Очевидно, принцип работы однобитных ЦАП и определяет их звучание при субъективной оценке. Аппараты с преобразователями дельта-сигма обладают ярко выраженным акцентом на высоких частотах, практически полным отсутствием тембров в звучании инструментов, а грубоватые низкие частоты не позволяют оценить масштаб и динамику звука. Но есть у однобитных ЦАП и приятное достоинство – высокая точность

звучания. Правда, на фоне указанных недостатков это не такое уж и большое достоинство. В большинстве цифровых источников, как бюджетного, так и весьма высокого класса, применяются именно однобитные преобразователи.

Внутренняя структура мультибитных ЦАП в корне отличается от однобитных собратьев. Сразу хочется отметить обязательный атрибут мультибитных ЦАП – токовый выход. В таких ЦАП для преобразования используется источник опорного напряжения, нагруженный на многозвенную прецизионную резистивную матрицу R-2R с постоянным сопротивлением, коммутируемую прецизионными МОП ключами. Количество звеньев R-2R и МОП ключей на единицу меньше, чем разрядность ЦАП. То есть, для 20-и разрядного ЦАП требуется 19 звеньев R-2R и столько же ключей. Поступающий на ЦАП цифровой код преобразуется в параллельную шину и коммутирует соответствующие ключи, которые и задают требуемую величину выходного тока. По своей структуре мультибитные ЦАП являются преобразователями параллельного действия.

Мультибитные ЦАП, с точки зрения производителей, имеют один единственный недостаток – высокую себестоимость ввиду сложности изготовления на одном кристалле прецизионных резисторов и МОП ключей и трудоемкой операции лазерной настройки каждого чипа. Эти ЦАП всегда обладают немонотонностью и нелинейностью ХП, но в отличие от однобитных ЦАП, погрешность смещения и усиления, а также дрейф усиления у мультибитников намного меньше. Как мультибитные ЦАП преобразуют сигналы малых уровней можно видеть на рисунке №5.

Субъективное звучание мультибитных ЦАП полностью противоположно звучанию однобитных. Мягкое приятное звучание инструментов на высоких частотах, мощные изящные низкие частоты, богатый и насыщенный тембрами звук, потрясающая локализация и широкий (если не сказать «широченный») динамический диапазон. И, несмотря на худшие (по сравнению с однобитными ЦАП) показания измерительных приборов, мультибитные ЦАП очень точно звучат на музыкальных композициях с обилием тихих звуков. Конечно, без недостатков не обойтись и здесь. Самый существенный недостаток – высокая цена на мультибитные ЦАП, менее существенный, но все же присутствующий – труднодоступность.

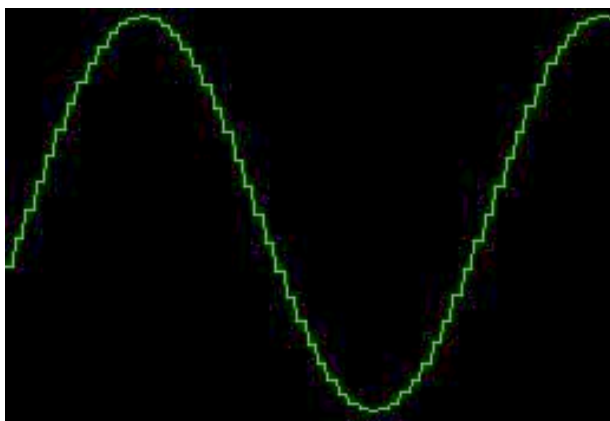


Рисунок №5

В следующей теме я хотел бы затронуть **цифровые фильтры (ЦФ)**. Этот элемент цифрового тракта в последнее время все больше норовят исключить. Причины, как правило, приводят две:

- 1) ЦФ принципиально искажает цифровую информацию;
- 2) Субъективная причина – звучание без ЦФ лучше.

Категорических противников ЦФ достаточно много. Например, небезызвестная в аудиофильских кругах фирма «AudioNote», и наш соотечественник Андрей Маркитанов, выпускающий цифро-аналоговые преобразователи под маркой «MARKAN».

Поскольку вторая из перечисленных причин отказа от ЦФ является субъективной, рассматривать ее особого смысла не имеет. Более подробно остановиться следует на первой причине, то есть об искажениях ЦФ информации, представленной в цифровом виде.

Упрощенно говоря, процесс цифровой фильтрации заключается в масштабировании цифровой информации с помощью весовых коэффициентов. Входные цифровые слова перемножаются на определенные коэффициенты, которые рассчитываются при проектировании ЦФ. Разрядность коэффициентов равна разрядности входных цифровых слов. Как несложно подсчитать, умножение, например, 16-и разрядного цифрового слова на 16-и разрядный коэффициент дает 32-х разрядный результат. В процессе фильтрации производятся интерполяция и аппроксимация цифровых данных, то есть добавление новых цифровых отсчетов и вычисление для них значений мгновенных уровней амплитуд. Наличие аппроксимирующих функций в описании ЦФ не упоминается (это результат цифровой фильтрации), но я не могу по-другому объяснить появление на выходе DAC, содержащего ЦФ, синусоидального сигнала частотой 20 кГц, который в процессе дискретизации с $f_s = 44,1$ кГц описывается 2-3 значениями амплитуд, то есть является треугольным. Как происходит процесс интерполяции условно показано на рисунке №6. В верхней части рисунка изображен синусоидальный сигнал, который описан пятью значениями мгновенных уровней амплитуд, в нижней части – сигнал после восьмикратной интерполяции. Красным цветом показаны формы сигналов, которые можно будет наблюдать осциллографом на выходе DAC с ЦФ и без него.

ЦФ характеризуются: полосой пропускания, полосой заграждения, пульсациями в полосе пропускания и величиной ослабления в полосе заграждения. В качестве примера, на рисунке №7 приведены характеристики высококачественного цифрового фильтра SM5847AF.

Некоторые ЦФ (например, PMD100 и упомянутый выше SM5847AF) имеют в своем составе функцию дизеринга (**Dithering**) – подмешивание псевдослучайного шумового сигнала в младшие разряды с целью уменьшения шумов квантования.

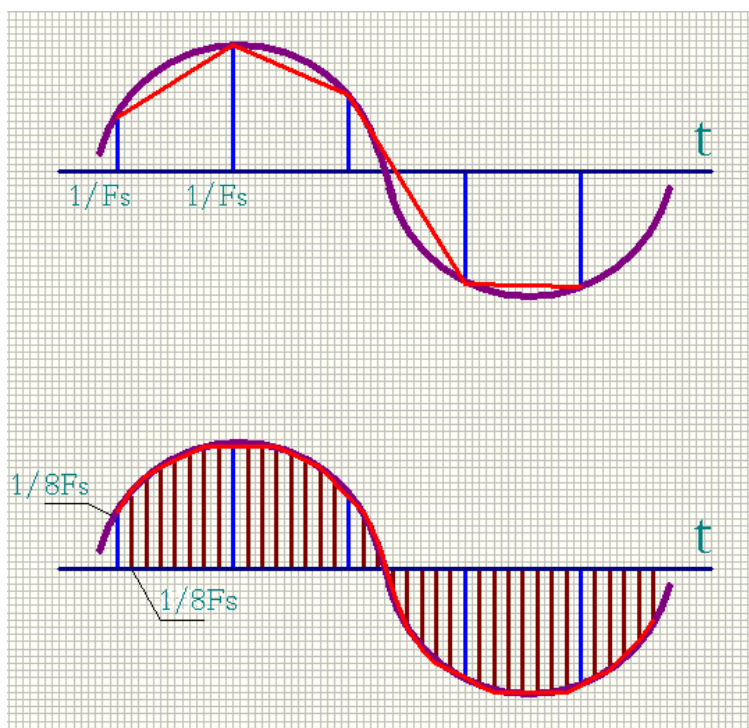


Рисунок №6

Filter Characteristics

8-times interpolation filter

Parameter	Rating
Passband	0 to 0.4535fs
Stopband	0.5465fs to 7.4535fs
Passband ripple	$\leq \pm 0.00002$ dB
Stopband attenuation	≥ 117 dB
Group delay	Constant

Рисунок №7

Применение ЦФ значительно упрощает построение выходного аналогового фильтра после ЦАП и снижает к нему требования. Преобразование данных стандарта CDDA при использовании ЦФ с 8х передискретизацией происходит на частоте 352,8 кГц. Отфильтровать аналоговым фильтром (от которого требуются минимальные искажения АЧХ и ФЧХ в диапазоне звуковых частот) полезный сигнал от цифрового шума, возникающего на частоте 352,8 кГц и ее гармониках, значительно проще, чем от шума на 44,1 кГц.

Некоторой разновидностью ЦФ являются асинхронные преобразователи частоты дискретизации (**Asynchronous Sample Rate Converter – ASRC**), осуществляющие преобразование f_s с некратными значениями (например, 44,1 кГц в 96 кГц). Такие преобразователи – неотъемлемый атрибут всех мультимедийных цифровых источников (компьютерные звуковые карты, DVD-проигрыватели). При использовании таких преобразователей, действительно, можно вести речь об искажениях цифровой информации, поскольку, во-первых, требуются более сложные методы интерполяции и аппроксимации, а во-вторых, новые цифровые отсчеты (в отличие от кратной передискретизации в ЦФ), не добавляются к существующим, а заменяют их, причем следующими с другими, некратными исходным, временными интервалами.

Наверное, любой аудио-любитель, знакомясь с описанием цифровых источников, сталкивался с таким понятием, как джиттер. Во многих печатных изданиях с обзорами и тестами аудиоаппаратуры авторы упоминают про джиттер и его пагубное влияние на звук. Но пока ни в одном из подобных журналов я так и не нашел подробного описания, что такое джиттер, на что он оказывает влияние, и вообще, стоит ли его бояться.

Джиттер (или **фазовый шум цифрового сигнала**) – временная нестабильность цифровых сигналов, вследствие которой изменение логического уровня сигнала происходит не в строго определенные моменты времени t , а с некоторым опережением или запаздыванием. Для упрощения понимания данного процесса, на рисунке №8 изображены: сигнал, содержащий джиттер **1** и абсолютно безджиттерный **2** (теоретически недостижимый). В цифровой аудиотехнике джиттер выражается в **пс** (пикосекундах).

Допустимая величина джиттера при цифро-аналоговом преобразовании, приводящая к ошибке в 1 МЗР, для стандарта CDDA составляет 110 пс. Для сигнала с той же частотой дискретизации, но 20-и разрядного (вспоминаем об увеличении разрядности при цифровой фильтрации), предельная величина джиттера будет уже 7 пс! В подавляющем большинстве промышленных аппаратов и компьютерных звуковых картах величина джиттера может превышать значение в 200 – 300 пс. При этом нам гарантируется полноценная работа с форматом 24 бита 96 кГц и даже 192 кГц. Работать-то устройство будет, но никаких 48 кГц в звуковом диапазоне мы не получим, и тем более не получим динамический диапазон, соответствующий 24 разрядам, и виной этому не только джиттер, но и сами микросхемы ЦАП, о чем уже было сказано выше.

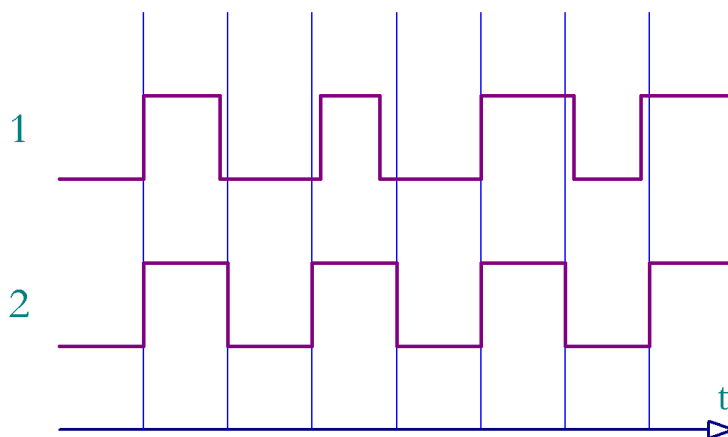


Рисунок №8

Джиттер оказывает пагубное влияние при процессе преобразования сигнала из цифровой формы в аналоговую. То есть, малая величина джиттера цифровых сигналов важна только для работы микросхем ЦАП. Связано это с тем, что микросхема ЦАП формирует на своем выходе дискретный аналоговый сигнал по команде цифрового сигнала, и если последний нестабилен по времени, на выходе ЦАП ступени дискретного аналогового сигнала будут формироваться также нестабильно. Для наглядности, на рисунке №9 изображены два синусоидальных аналоговых сигнала: верхний – чистая синусоида, нижний – сигнал с выхода ЦАП, у которого цифровые входные сигналы подвержены влиянию джиттера достаточно большой величины.

Как можно видеть, сформированный сигнал приобретает вид зашумленной синусоиды. Образующийся в плохих цифровых источниках такой шум, способен замаскировать сигналы с очень малыми уровнями, ограничив снизу динамический диапазон и увеличив искажения. Конечно, на рисунке уровень шума сильно завышен, реальный несколько меньше и выглядит несколько иначе, но такое представление хорошо показывает «работу» джиттера, к тому же, в реальных условиях, на малых уровнях сигнала вполне возможно наблюдать похожую картину.

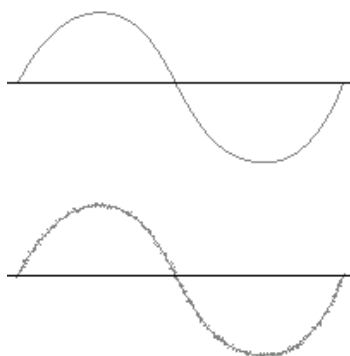


Рисунок №9

Если же рассматривать влияние джиттера на процесс формирования аналогового сигнала за какой-то один временной интервал, то картина складывается примерно такая, как показано на рисунке №10. Красным цветом показан сигнал, сформированный преобразователем при влиянии джиттера, синим – идеальный дискретный сигнал. Если проанализировать последующие аналогичные временные интервалы, то картина в обязательном порядке будет изменяться, и ступени аналогового дискретного сигнала каждый раз будут сформированы с другими задержками/опережениями относительно идеального сигнала. Это более подробно описывает возникновение того шумового эффекта, который можно наблюдать на рисунке №9.

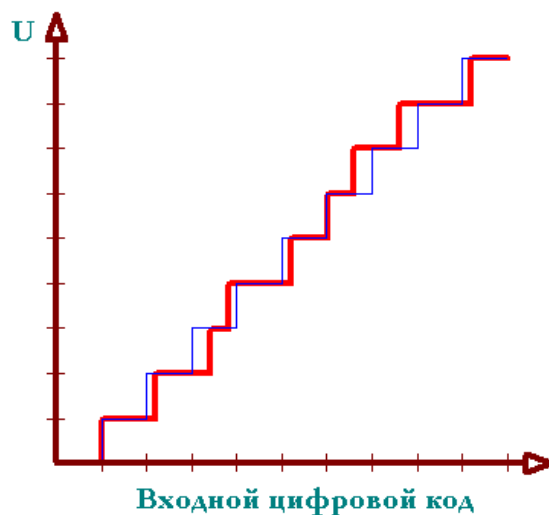


Рисунок №10

Неидентичные по ширине и высоте ступеньки, которые можно наблюдать на рисунке №10, напоминают нелинейную передаточную характеристику ЦАП. То есть, слишком большая величина джиттера ухудшает линейность ЦАП со всеми вытекающими последствиями.

В следующей части (практической) я постараюсь рассказать о достойных кандидатах среди микросхем для изготовления DAC и показать на примерах, как различные узлы стыкуются друг с другом, а также затронуть тему интерфейсов между транспортом и преобразователем.

Профессионалов, которые обратили внимание на данную статью, призываю присоединиться, чтобы избавить начинающих от тех проблем, которые мы сами в свое время почувствовали на себе.