

Какой звуковой ЦАП лучше?

Подготовил **Валерий Сергеев**, г. Киев

В статье производится сравнение качества работы 2 видов музыкальных ЦАП: мультибитного и сигма – дельта.

Споры вокруг темы вынесенной в заглавие статьи не утихают по сегодняшний день, хотя производители ЦАПов всё давно без нас решили, и, по сути, вынесли мультибитным ЦАПам приговор. Виной этому тот факт, что параметры современных сигма-дельта ЦАПов и по шумам, и по искажениям формально, именно формально, при работе с синусоидальным (т.е. не встречающимся в музыке) сигналом давно превзошли параметры самых лучших мультибитных ЦАП.

Отметим, что формальное сравнение технических характеристик мультибитных и сигма - дельта ЦАПов не несёт *никакой* полезной информации об их звучании, поскольку оба вида ЦАП (теоретически) обладают нелинейными искажениями ниже порога чувствительности человеческого слуха.

Однако различия в звучании этих двух видов ЦАП замечает даже неподготовленный слушатель!

Желание разобраться в этом казусе и является целью этой статьи. В качестве отправной точки приведем выдержку из [1]: «...Необычайна чувствительность слуха к временным различиям (форме волны) и длительности звука. Чувствительность слуха к частоте, интенсивности и длительности связаны друг с другом. Слуховой аппарат имеет удивительную дифференциальную способность обнаруживать небольшие различия между сходными звуками по всем параметрам: интенсивности, частоте, временной структуре и длительности. Без этого невозможно было бы восприятие речи...» (подробней см. <http://ecosound.pro/index.htm>)

Итак, первое, на что нам следует обратить внимание, это *точность передачи формы аудиосигнала*. Именно это определяет качество звучания записи музыкального произведения.

Что же, давайте посмотрим, что нам предлагают сигма - дельта и мультибитные ЦАПы, в порядке улучшения их характеристик.

Методика тестирования

Для тестирования использовался уникальный метод вычитания «живого» звукового сигнала в реальном времени. Несмотря на всю его очевидность, им, по-видимому, мало кто пользуется.

Из выходного тока тестируемого сигма - дельта ЦАПа аппаратно вычитался эталонный ток мультибитного ЦАП (отобранного экземпляра типа PCM1704UK, имеющего гарантированную точность 0,001%).



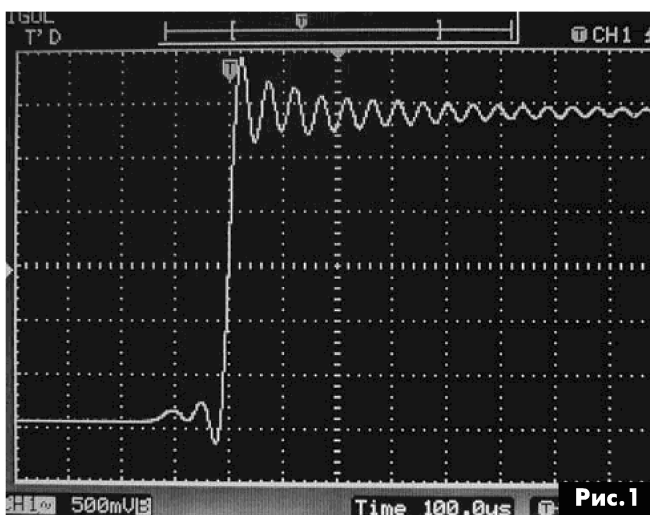
Временная задержка компенсировалась в звуковом редакторе (грубо), а затем с помощью программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) (точно).

При этом на вход ЦАП подавались следующие тестовые сигналы:

- прямоугольный импульс;
- меандр;
- дельта-импульс различной длительности.

Испытания ЦАП CS4398

Разницу (представляющую собой погрешность воспроизведения формы волны) можно было не только увидеть на осциллографе, но и ус-

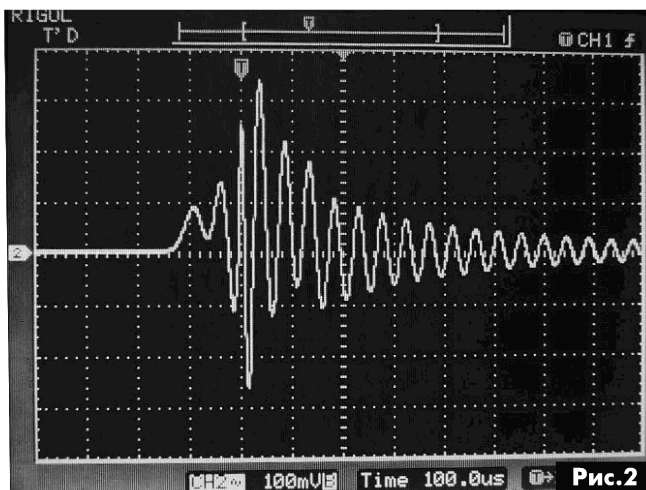


лышать. Интересно, что для ЦАП типа CS4398 этот метод оказался явно избыточным, его погрешность было видно «невооружённым глазом» (см. **рис. 1** на котором хорошо видно отличие огибающей выходного сигнала ЦАП от прямоугольного импульса).

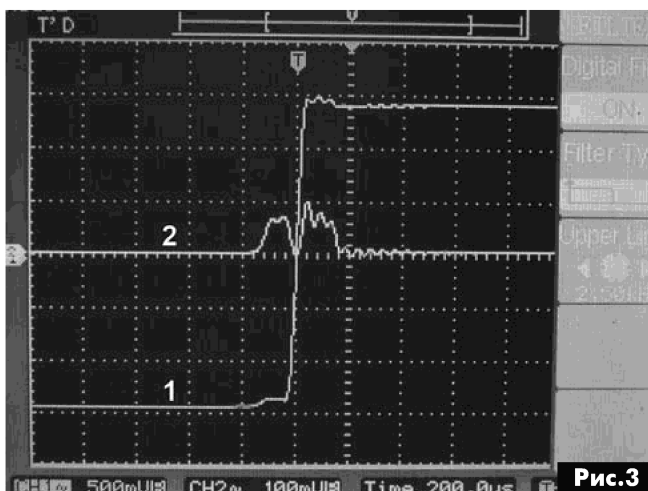
Разработчики этого сигма - дельта ЦАПа изобрели какой-то совершенно «особенный» цифро-



вой фильтр, с разным временем реакции «вперёд» и «назад». На **рис.2** показан результат вычитания (ошибка).



На **рис.3** показана профильтрованная цифровым ФНЧ осциллограмма формы на выходе CS4398 (кривая 1) и отфильтрованная тем же способом ошибка (кривая 2).



Отметим, что ошибка передачи формы даже на низких частотах составляет около 2% - это очень много.

Разумеется, что ЦАП с такой большой ошибкой передачи формы будет звучать весьма посредственно. Однако производители нас откровенно обманывают – у этого ЦАП КНИ заявлен просто великолепный – 107 дБ.

Как оказалось, с помощью эквалайзера (в звуковом компьютерном редакторе) удалось немного уменьшить амплитуду погрешности выходного сигнала ЦАП, что свидетельствует о нелинейности как АЧХ так и ФЧХ ЦАП типа CS4398.

А это значит, что звучание ЦАП CS4398 будет неточное во всём звуковом диапазоне.

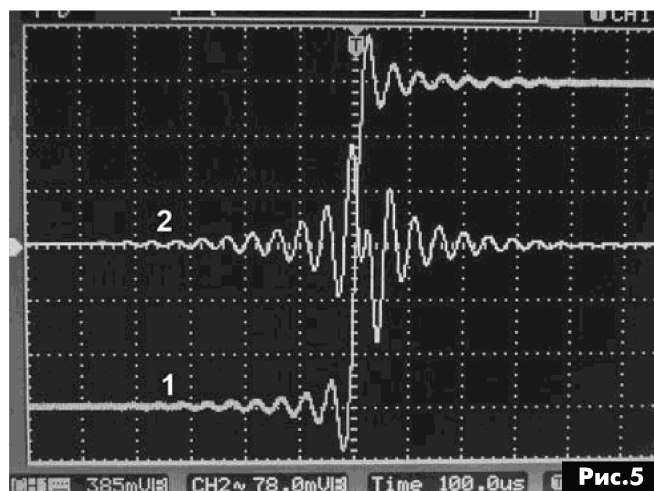
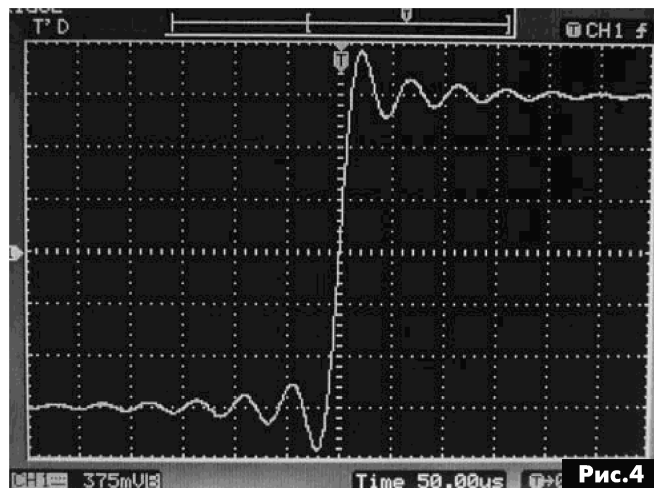
Испытания ЦАП АК4399

При испытаниях ЦАП типа АК4399, оснащенного цифровым фильтром, всё оказалось гораздо лучше. Как видно из **рис.4** он отличается симметричной характеристикой фильтра. А на **рис.5** видно, что он имеет почти симметричный сигнал

ошибки (на **рис.5** кривая 1 - осциллограмма формы на выходе, кривая 2 – ошибка).

ЦАП типа АК4399 показал значительно меньшую погрешность формы, около 0,2%, при этом вся энергия ошибки находилась в высокочастотной звуковой области (выше 5-7 кГц) и на слух воспринималась как неестественно шипящие и «замазанные» ВЧ.

Звучание ЦАП АК4399 до некоторой степени даёт то ощущение «пустоты», которое неизменно присутствует на фоне грома инструментов в современной аудио аппаратуре премиум сегмента.

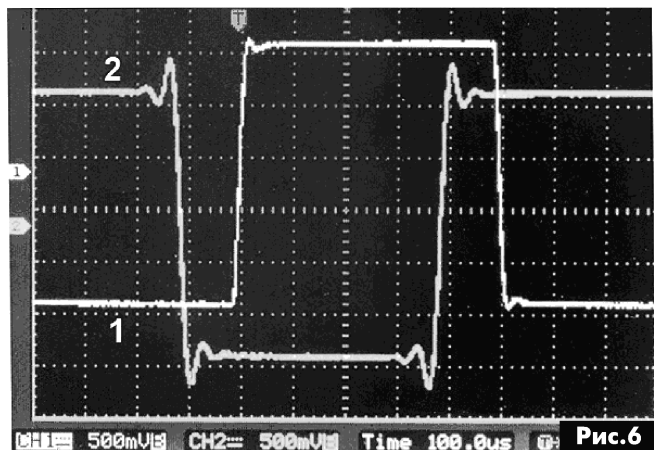


Этот ЦАП хорошо отыгрывает неплотную классику, вокал, неагрессивные акустические инструменты. Нижний регистр точный, а общее ощущение от прослушивания очень ровное и спокойное. Однако через какое-то время начинаешь тосковать по присущей настоящему звуку чёткости, остроте и энергии. Так проявляет себя нехватка разрешения ВЧ и вялая атака - типичные следствия цифровой фильтрации.

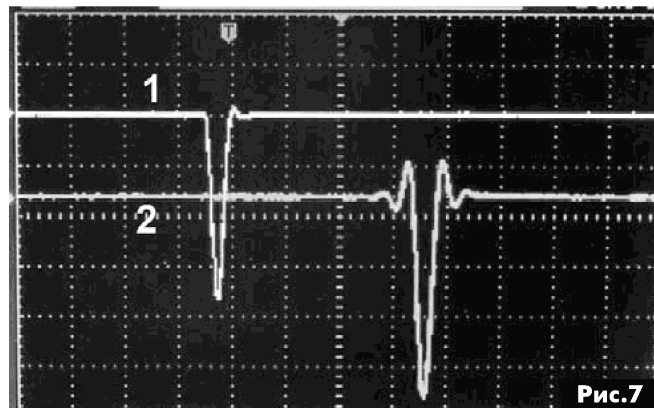
Испытания ЦАП PCM 1794

Результаты вычитания токов будут получены позже, пока же рассмотрим осциллограммы. Здесь и далее кривая 1 – мультибитный ЦАП PCM1704, кривая 2 – сигма - дельта ЦАП PCM1794. Важно, что мультибитный ЦАП PCM1704 включен без цифрового фильтра.

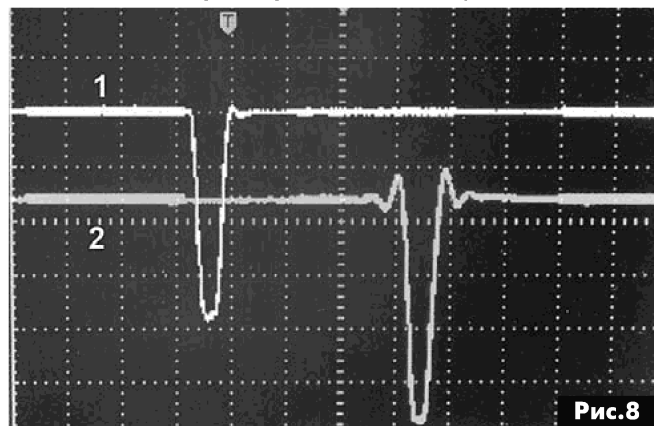
На **рис.6** показан меандр частотой 1 кГц на выходе каждого из этих двух ЦАП. Нетрудно видеть, что по причине цифровой фильтрации внутри PCM1794 его переходной процесс носит колебательный характер.



Переходной процесс PCM1704 так же слегка колебательный, но колебания есть только после завершения фронта, и обусловлены выходным аналоговым фильтром.



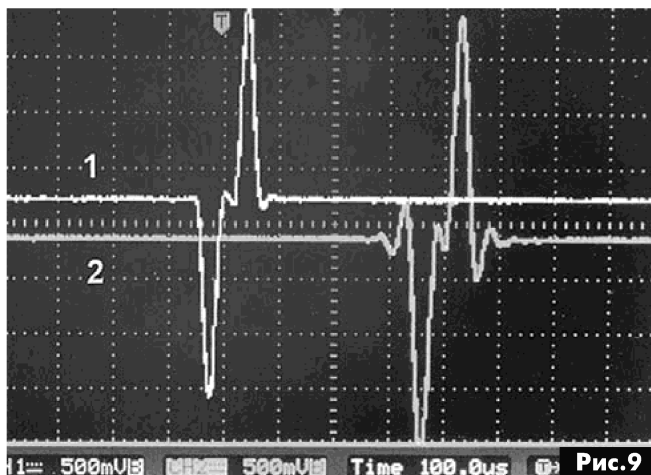
На **рис.7** показана реакция обоих ЦАПов на дельта - импульс длительностью один отсчёт. Как видим, выходной импульс от сигма - дельта ЦАП как будто несколько шире, и с теми же колебаниями, что и при подаче на его вход прямоугольного импульса. У многобитного ЦАП колебания есть только по спаду импульса, и они гораздо меньше.



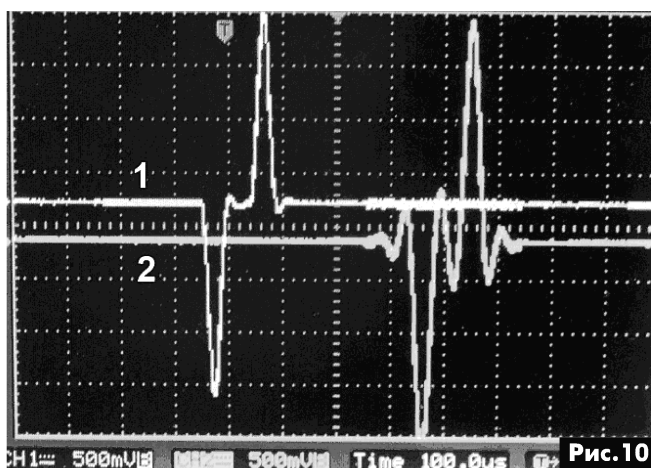
На **рис.8** показана реакция обоих ЦАПов на дельта импульс длительностью два отсчёта. В принципе ничего нового по сравнению с **рис.7** нет,

если не считать, что выбросы уменьшились по амплитуде.

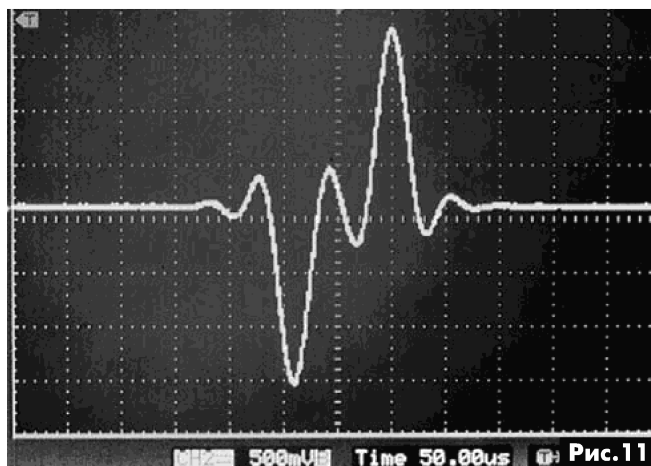
Реакция на два разнополярных дельта импульса длительностью один отсчёт, с паузой в один отсчёт показан на **рис.9**. Это уже интереснее, в сигнале сигма - дельта ЦАП между импульсами появились колебания нехарактерной для цифрового фильтра частоты, примерно 40 кГц. Что это такое, выяснить не удалось.



На **рис.10** показана реакция на два разнополярных дельта импульса длительностью один отсчёт, с паузой два отсчёта.



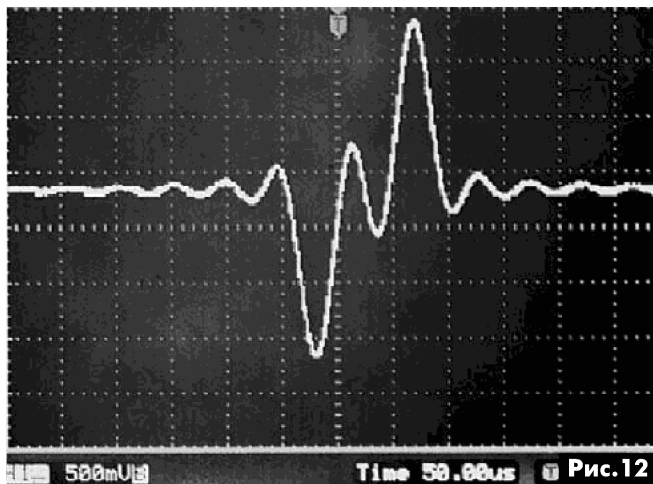
Вот это очень интересно! Импульсы, чётко разделённые на мультибитном ЦАП, в сигма-дельта ЦАП сливаются в сплошной звон!





Неудивительно, что эти ЦАП так по-разному звучат, если разницу видно даже невооружённым глазом!

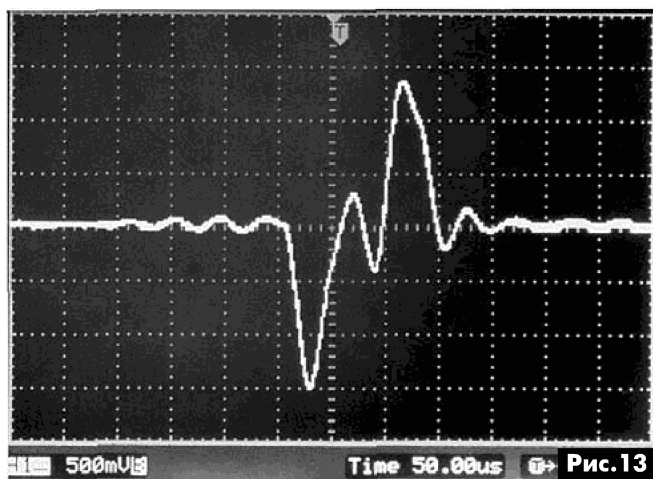
На **рис. 11** показаны те же импульсы, сигма дельта ЦАП, шаг по горизонтали в два раза подробнее (50 мкс/деление).



На **рис. 12** на вход мультибитного ЦАП подаются те же импульсы (один отсчёт, с паузой два отсчёта), в цепь включен цифровой фильтр (4х оверсэмплер) DF1706. С помощью оверсэмплинга мультибитный ЦАП стал очень похож на сигма дельта ЦАП, только колебания имеют большую длительность, чем у сигма дельта ЦАП.

Апсэмплинг, как видим, свёл на нет основное преимущество мультибитного ЦАП!

На **рис. 13** показана реакция на те же импульсы мультибитного ЦАП, асинхронный ресэмплинг



44 кГц в 48 кГц. Здесь всё очень плохо - форма дельта импульсов изменилась до неузнаваемости, и появилась явная асимметрия.

Надо полагать, что любой асинхронный ресэмплинг до более высокой частоты (как это сделано, например, в таких изделиях как Burmester Musiccenter 111, или в Sabre - DAC ES9012, ES9018) будет обладать схожими «особенностями», т.е. значительно искажать форму сигнала.

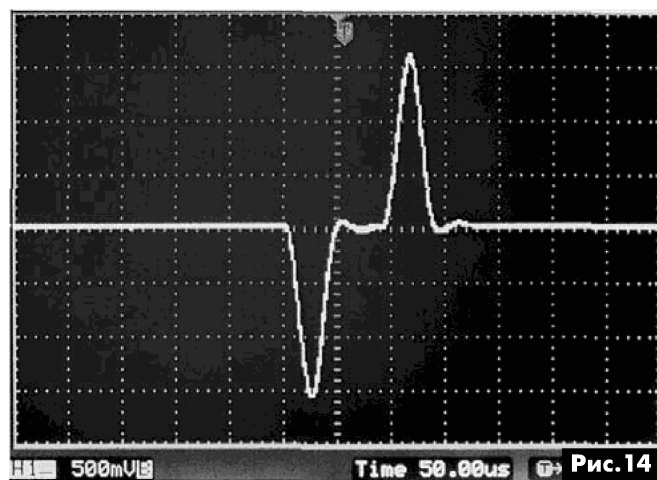
На **рис. 14** показан выходной сигнал мультибитного ЦАП, на входе те же импульсы, но без апсэмплинга. Он очень хорош.

Приведенные осциллограммы наглядно демонстрируют преимущества мультибитного ЦАП относительно передачи формы волны. Но только мультибитного ЦАП без цифрового фильтра.

Выходной ток сигма-дельта ЦАП

Однако, это ещё не всё. На **рис. 15** приведены осциллограммы выходного тока сигма-дельта ЦАП типа PCM1794. 1 канал - ток, 2 канал - выходной сигнал ЦАП. Цена деления по вертикали - 0,8 мА/деление.

Из **рис. 15**, при горизонтальной развертке 5 мс/деление, очень хорошо видно, насколько выходной ток зашумлён высокочастотным «мусором». Интересно, что вопреки ожиданиям, преобразование идёт на частоте всего 8Fх. На частоте 64Fх работает сигма дельта модулятор, который вносит небольшой «уточняющий довесок», а также всю «волосатость».



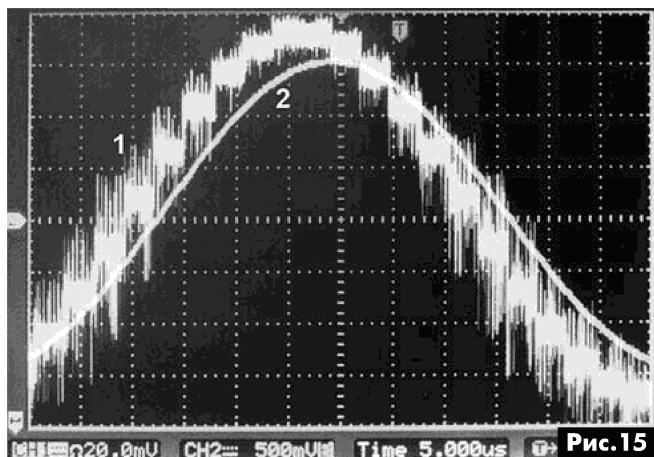
На **рис. 16**, при горизонтальной развертке 100 нс/деление, виден тот же мусор и глитчи. При этом темп переключения составляет 2,8 МГц (на хайрезе будет 6 МГц), плюс мгновенные скачки тока. И это нужно проинтегрировать с точностью 1 / 300000 !!! Мало кому это удаётся, и неудивительно, что выходные сигналы различных музыкальных сигма - дельта ЦАПов звучат очень по-разному.

На **рис. 17**, при горизонтальной развертке растянутой до 10 нс/деление, виден тот же мусор и глитчи. Виден также скачок тока около 1 мА (это очень много). При этом переходной процесс длится менее 2 нс! Сколько на самом деле понять сложно, поскольку полоса используемого осциллографа составляет «всего лишь» 200 МГц. Казалось бы, для аудио сигнала этого достаточно, как оказалось - нет.

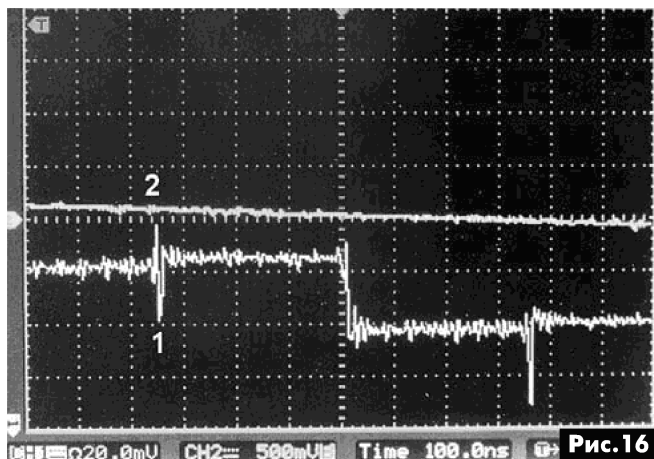
Сравнение PCM1794 и PCM1704

Конечно, выходной сигнал PCM1704 имеет схожие особенности, однако его выходной ток составляет 2 мА против 8 мА у PCM1794, а переключения этого тока, порождающие дополнительные неточности, происходят с гораздо более низкой частотой. «Скачки» выходного тока PCM1704 составляют целых 1-2 мА и требуют очень аккуратного построения выходного интегратора.

Только при использовании «правильного» интегратора звучание PCM1794 можно приблизить к звучанию мультибитного ЦАП. Тем не менее, мультибитный ЦАП всё равно выигрывает в ясности



воспроизведения средне-высокой середины и разрешения высоких звуковых частот.



Кому-то, однако, звук PCM1794 более симпатичен своей энергетической плотностью и даже, где-то, слитностью. Тонкие моменты и «колкости» как будто подретушированы, а общее впечатление несколько «сладкое». Можно смело рекомендовать его для всех систем за исключением Ultra Hi-Fi.

Выводы

1. Мультибитный ЦАП без цифровой фильтрации (Oversampling, Upsampling) более всего подходит для неискажённой во времени передачи аудиосигнала («по горизонтали»). Учитывая вполне достаточную с точки зрения слуха точность «по вертикали» наш выбор совершенно очевиден. Не будем, однако, забывать, что без применения оверсэмплера спектр обладает зеркальными относительно частоты дискретизации полосами. Поэтому звуковой усилитель должен обладать ультрамалыми интермодуляционными искажениями в области частот до 60-80 кГц.

2. Мультибитный PCM1704 является ныне единственным серийно выпускаемым «честным» аудио ЦАПом, а его поведение совершенно предсказуемо.

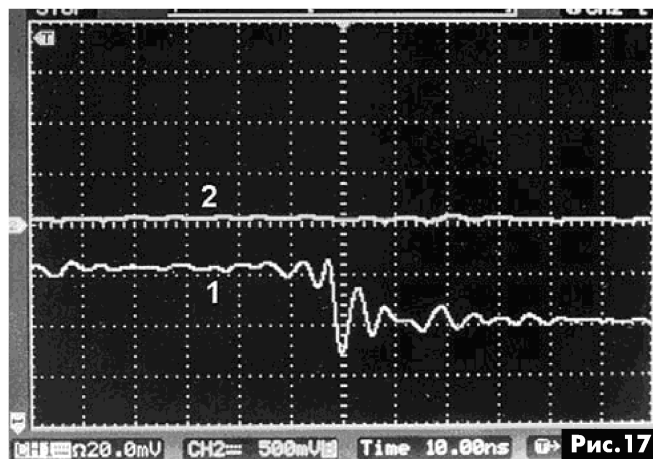
3. Производство сигма-дельта ЦАПов обходится куда дешевле, т.к. не надо производить лазер-

ную подгонку токозадающих элементов, как это неизбежно при производстве мультибитных ЦАП. В итоге производителям стало невыгодно производить более дорогие мультибитные ЦАПы.

Заметность искажения звука

Обстоятельства, при которых слух человека начинает замечать искажения, весьма и весьма разнообразны. Ниже приведены выдержки из [1]:

«...Пороги слуховой чувствительности существенно зависят от характера нелинейности: при появлении низших (второй, третьей) гармоник пороги слуха для тональных сигналов составля-



ют 0,1%, для фортепианной музыки 1...2%, для эстрадной музыки до 7%. Чувствительность слуха зависит от порядка гармоник: заметность гармонических искажений третьего порядка вдвое выше, чем искажений второго порядка, заметность искажений от пятого порядка и выше в 6...10 раз выше, чем второго. Именно этим объясняется странное явление, что в акустических системах, имеющих в основном нелинейные искажения низших порядков, пороговые значения составляют 1...2%, в то же время в транзисторных усилителях и цифровой аппаратуре, где возникают нелинейные искажения высоких порядков, уровни нелинейных искажений должны составлять сотые и тысячные доли процента, чтобы они были незаметны для слуховой системы.

....По-видимому, какие-то различия во временной структуре сигнала, которые до настоящего времени еще четко не определены, являются значимыми для слуховой системы, и именно по ним она определяет живое звучание или отличает одну акустическую систему от другой. Способность различать тонкую, быстро изменяющуюся временную структуру звукового сигнала подтверждается удивительно точным анализом и распознаванием речи, когда в непрерывном временном потоке распознается специфическая структура различных фонем».

Литература

1. Алдошина И. А. Основы психоакустики — М. Радио и связь. 1988 г.

