

# Оценка влияния аналого-цифрового преобразования на искажения при компрессии цифровых аудиоданных

*И. А. Оболонин*

В настоящее время в радиовещании, профессиональной и бытовой аудиотехнике широко используется компрессия цифровых аудиоданных, которая неизбежно сопровождается искажениями качества стереофонического звучания. При этом качество аналого-цифрового преобразования (АЦП) подразумевается идеальным. В работе рассматриваются аспекты аналого-цифрового преобразования, оказывающие существенное влияние на качество цифрового звука с компрессией аудиоданных.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Последние два десятилетия профессиональная и бытовая аудиотехника, звуковое и телевизионное вещание стремительно переходят на цифровые технологии, которые быстро совершенствуются и успешно применяются в самой различной звуковой аппаратуре.

Компрессия цифровых аудиоданных в психоакустических моделях стандартов MPEG неизбежно сопровождается искажениями качества стереофонического звучания (фиксируемыми экспертами), такими как пространственное впечатление, прозрачность звучания, естественность и богатство тембров инструментов и голосов, восприятие акустической атмосферы первичного помещения. Это связано с недостатками самой модели.

В психоакустических моделях стандартов MPEG не учтены:

- механизмы временной маскировки сигналов;
- пространственной демаскировки источников звука, составляющих стереопанораму как по фронту, так и по глубине;
- особенности восприятия реверберационных составляющих стереофонических сигналов.

Однако на качество звучания существенное влияние оказывает и собственно аналого-цифровое преобразование исходного аудиосигнала.

Многие специалисты в области аудиотехники отмечают, что цифровые записи, сделанные с аналоговых магнитных лент, часто звучат хуже оригинала. По их мнению, звучание цифровых записей недостаточно эмоционально, порой безжизненно. Нередко слышны неприятные «цифро-

вые» призвуки, особенно в области высоких частот, возникает ощущение «шероховатого», «грязного» звука.

Предполагают, что эти искажения связаны с недостаточным числом разрядов, низкой частотой дискретизации, невысоким качеством изготовления многоразрядных АЦП и ЦАП, а также погрешностями многократного округления при цифровой обработке звука.

В предлагаемой работе рассматривается три аспекта аналого-цифрового преобразования, по мнению автора, оказывающие наиболее существенное влияние на указанные выше искажения. Это специфический характер спектра ошибок квантования, защита АЦП от перегрузок и фильтрация сигналов при аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразованиях.

## 2. ВЛИЯНИЕ ОШИБОК КВАНТОВАНИЯ

В технической литературе вопрос о спектре ошибок квантования рассмотрен для одного частного случая широкополосного звукового сигнала, который имеет равномерное распределение по частоте и уровню. Для такого сигнала ошибки квантования носят случайный характер и поэтому их называют шумом квантования. Спектральная плотность мощности этого шума имеет равномерное распределение от 0 Гц до частоты Найквиста. Фактически этот шум является белым и, в отличие от искажений цифрового звука, он воспринимается на слух без неприятных ощущений.

Очевидно, что музыкальный сигнал нельзя отождествлять с шумовым хотя бы потому, что он несёт звуковую информацию. От шума он отличается тем, что в нём ошибки квантования в той или иной мере коррелированы с самим сигналом и поэтому на слух наиболее часто они воспринимаются как призвуки. В технической литературе звуки ошибок квантования на музыкальных сигналах называют гранулярным шумом, хотя на слух эти искажения шумом не являются, а являются именно ошибками, или погрешностями.

Мгновенные значения ошибок квантования представляют собой разности между выборками и их квантованными значениями в моменты выборки. Известно, что макси-

мальная величина этих ошибок не может превышать половины шага квантования.

Квантованию подвергается АИМ-сигнал с очень широким дискретным спектром. Ошибки квантования, которые возникают при этой операции, – это ошибки квантования АИМ-сигнала. На это надо обратить внимание, так как в технической литературе под ошибкой квантования часто понимают ошибку, возникающую при квантовании синусоидального сигнала, тогда как спектры у этих двух ошибок совершенно не сопоставимы.

Таким образом, цифровой звук отличается от аналогового тем, что он принципиально является продуктом амплитудно-импульсной модуляции.

В [1] показано, что спектр ошибок квантования и их звучание зависит от коэффициента кратности  $k$ , частоты дискретизации  $f_s$  и частоты сигнала  $F$ .

Для синусоидальных сигналов с частотой  $F$  можно представить отношение частоты дискретизации  $f_s$  к  $F$  в виде отношения чисел  $y$  и  $x$ .

$$k = f_s / F = y / x > 2.$$

Если  $k$  является целым числом, частоты  $F$  и  $f_s$  называются кратными, если  $x > 1$  – субкратными.

Для субкратных частот в  $x$  периодов частоты  $F$  укладывается точно  $y$  периодов частоты  $f_s$ . При этом периоды как АИМ-сигнала, так и сигнала на выходе квантователя в  $x$  раз больше периода звукового сигнала. Это значит, что нижняя граница спектра ошибок квантования  $F_n(x)$  на субкратных частотах ниже частоты  $F$  в  $x$  раз

$$F_n(x) = F / x.$$

Также в работе [1] показано, что спектр ошибок квантования существенно разный при чётных и нечётных значениях  $k$ , как на кратных, так и на субкратных частотах. Наиболее заметные искажения звучания определяются ошибками квантования на субкратных частотах. При отклонении частоты цифрового звука от кратного значения на небольшую величину  $\pm \Delta F$  он становится субкратным с очень большим значением  $x$  и поэтому возникает низкочастотный звук, часто неприятный на слух. Спектр ошибок квантования существенно видоизменяется, и около всех гармоник звукового сигнала возникают боковые полосы из составляющих отражённого спектра. С увеличением отклонения эти полосы расширяются и соседние могут перекрываться.

Таким образом, в спектр ошибок квантования входят звуковой сигнал и его гармоники, нижняя граничная частота спектра  $F_n(x)$  и её гармоники. Биения спектральных составляющих создают восприятие звука с частотой  $F_n(x)$  и её гармониками. Зависимость спектра ошибок квантования от амплитуды звукового сигнала проявляется в том, что одни составляющие спектра могут увеличиваться, а другие – уменьшаться на несколько децибел при общей неизменной мощности. Это приводит к изменению тембра звучания ошибок квантования.

Ошибки квантования возникают в АЦП, но проявляются лишь в ИКМ-демодуляторе, когда цифровые данные преобразуются в последовательность выборок. Благодаря частотной фильтрации и интерполяции высокого порядка,

амплитудные искажения огибающей синусоидального звукового сигнала на выходе ЦАП устраняются во всём звуковом диапазоне частот, а зависимость огибающей ошибок квантования от коэффициента кратности остаётся.

Также в работе [1] исследовано звучание ошибок квантования в зависимости от вида звуковых текстовых сигналов и коэффициента кратности  $k$ . Было установлено, что главное отличие отклонений звукового сигнала от субкратных частот от аналогичного отклонения от кратных частот заключается в том, что у этих сигналов исходно принципиально разные спектры ошибок квантования, и это оказывает влияние на звучание ошибок квантования. При кратных частотах этот спектр простирается только вверх от частоты звукового сигнала, где биения слышны плохо. При субкратных частотах спектр простирается на высоких частотах вниз, а на низких – вверх в области, где биения слышны хорошо.

Если спектр ошибок субкратной частоты содержит составляющие ниже 4 кГц, то при очень небольших отклонениях от неё в пределах 0,01...0,5 Гц возникает очень своеобразный звук. Он похож на отклик колебательного контура высокой добротности на периодическую последовательность коротких импульсов, когда контур настроен на звуковую частоту 2...3 кГц. В короткий промежуток времени звук плавно нарастает и спадает. С увеличением отклонения частота повторения этих звуков увеличивается, и он переходит в звонкие биения с частотой 4...8 Гц, похожие на звон колокольчиков, что раздражает слух. Затем биения становятся глухими и с 50 Гц постепенно переходят в созвучие.

Таким образом, при синусоидальных сигналах независимо от частоты и уровня сигнала ошибки квантования не воспринимаются как шум. Даже при небольших отклонениях сигнала от кратных и субкратных частот, когда частотный интервал между составляющими спектра ошибок квантования меньше 1 Гц во всём диапазоне, их звучание напоминает не шум, а рокот. Неприятных для слуха звуков ошибки квантования не создают. На субкратных частотах из-за них возникают НЧ-призвуки в виде тона или созвучия, либо звонкие биения. В связи с очень большим числом кратных и субкратных частот, особенно на высоких частотах, наиболее характерным искажением является рокот, который на музыкальных сигналах вызывает впечатление «грязного» звучания.

### 3. ЗАЩИТА АЦП ОТ ПЕРЕГРУЗОК

Перегрузки АЦП на входе цифровых аудиотрактов недопустимы, поскольку АЦП порождают собственные побочные эффекты (артефакты) и возникающие искажения в корне отличаются от нелинейных искажений в аналоговых трактах (с точки зрения слухового восприятия). В аналоговых трактах перегрузки (превышение номинального уровня), длящаяся несколько миллисекунд, слухом не воспринимаются (свойство слуха)

Вероятность превышения квазимаксимального уровня для сигнала с гауссовским законом распределения составляет примерно две сотых, что соответствует появлению при воспроизведении шести щелчков в течение 5 минут (только за счёт перегрузки АЦП) [2]. Считается, что при воспроизведении сигнала допускается не более одного за-

метного на слух щелчка в час. Поэтому необходимы меры, не допускающие перегрузку АЦП.

Тривиальным решением является применение на входе АЦП жёсткого (безынерционного) ограничения на уровне, не превышающем порог перегрузки. Такое решение приводит к появлению нелинейных искажений и потере высокочастотных составляющих в области превышения порога ограничения.

Другое решение рассматриваемой проблемы – это компрессия сигнала в верхней части его динамического диапазона. В этом случае сохраняются высокочастотные составляющие исходного сигнала, но нелинейные искажения неизбежны.

От выбора закона компрессии будет зависеть уровень нелинейных искажений при воспроизведении аудиосигналов.

Кроме того, следует учитывать вероятность появления того или иного уровня сигнала.

На рисунке 1 приведена функция распределения уровней (в дБ) во времени, полученная экспериментальным путём [3] при исследовании записанных на магнитной ленте музыкальных и речевых отрывков сигналов звукового вещания.

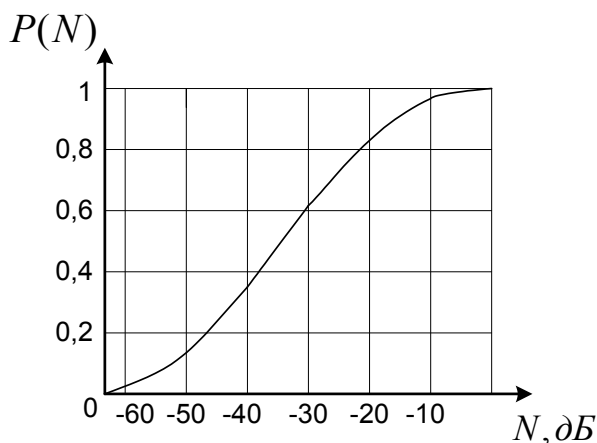


Рис. 1. Функция распределения уровней во времени

С достаточным для практики приближением можно считать, что распределение уровней во времени подчиняется гауссовскому закону с параметрами  $m = -24$  дБ,  $\sigma = 10$  дБ.

Известны исследования зависимости заметности искажений перегрузки АЦП от коэффициента перегрузки  $K_{II}$  [4]

$$K_{II} = 20 \log |X_{\max}| / X_{II}$$

где  $X_{\max}$  – максимальный по модулю отсчёт, а  $X_{II}$  – порог перегрузки АЦП, полученные субъективно-статистическим путём (рис.2).

Из рисунка 2 видно, что искажение перегрузки незаметно при  $K_{II} \approx 1$  дБ.

В аппаратуре часто используют защитный интервал в 3 дБ ( $K_{II} = -3$  дБ).

Однако это приводит к уменьшению отношения сигнал/искажения квантования.

Кроме того, нет гарантии, что:

- диаграмма уровней в канале стабильна;
- точно измерен максимальный уровень сигнала при его

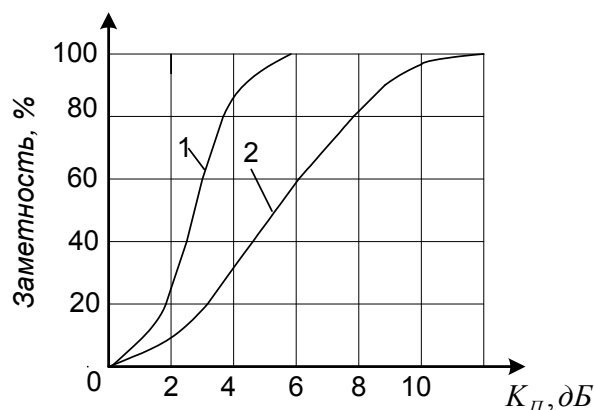


Рис. 2. Зависимость заметности искажений перегрузки от коэффициента перегрузки:

- 1 – усреднённое значение для различных передач;  
2 – для женского сольного пения (критический фрагмент)

На рисунке 3 показана амплитудная характеристика преобразователя (на входе АЦП), осуществляющего компрессию сигнала в верхней части его динамического диапазона.

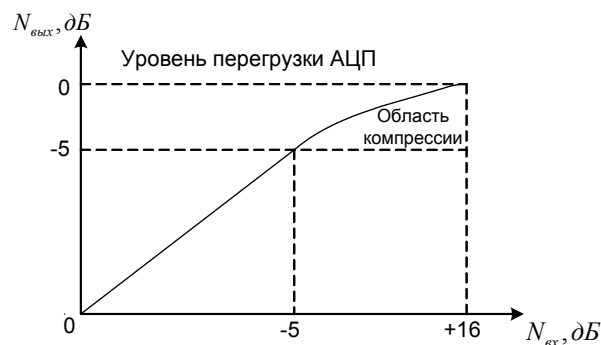


Рис. 3. Амплитудная характеристика входного преобразователя АЦП

Верхние 5 дБ (обычно представленные в линейном соотношении с входным уровнем) используются для создания области, в которой уровень преобразованного сигнала представлен (например) в логарифмическом соотношении. Это позволяет представить в пределах всего лишь пяти дБ фронты сигнала, уровень которых гораздо выше точки, где начинается область перегрузки.

Этот приём подобен эффекту компрессии звука, появляющемуся при записи высокого уровня в аналоговом виде на магнитную ленту (из-за нелинейности кривой намагничивания).

Использование компрессии сигнала в верхней части позволяет обеспечить использование динамического диапазона, превышающего возможности самих аналого-цифровых преобразователей и сберечь максимальное количество информации об аналоговом сигнале, которая затем кодируется с разрешающей способностью конкретного преобразователя. Кроме того, в этом случае можно сохранить высокочастотные составляющие сигнала.

**Оценка нелинейных искажений.** Для одночастотного периодического сигнала методом коэффициентов гармоник была получена [5] сравнительная оценка нелинейных искажений, возникающих при безынерционном ограничении и компрессии верхней части динамического диапазона звукового сигнала (по логарифмическому закону), для которых известна статистика их распределения во времени

(функция распределения уровней во времени). На рисунке 4 представлены полученные зависимости коэффициента гармоник для ограничителя  $K_G(N)$  (1) и компрессора верхней частоты динамического диапазона  $K_{ГК}(N)$  (2).

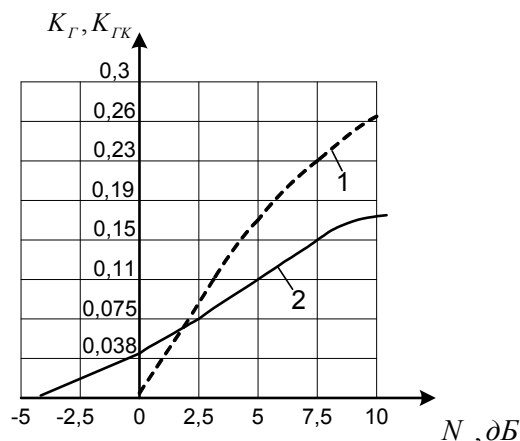


Рис. 4. Зависимости  $K_G$  (1)  $K_{ГК}$  (2) от уровня сигнала

Вероятность того, что коэффициент гармоник превысит то или иное значение, зависит от появления того или иного уровня сигнала.

Вероятность проявления сигнала уровня  $N$

$$P_1(N) = 1 - \left[ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{N_{\min}}^N \exp\left[-\frac{(N-\alpha)^2}{2\sigma^2}\right] dN \right],$$

где в соответствии с экспериментальными данными [3]  $N_{\min} = -60$  дБ,  $\alpha = -24$ ,  $\sigma = 10$

На рисунке 5 приведена рассчитанная зависимость  $P_1(N)$ .

Вероятность того, что коэффициент гармоник превысит то или иное значение равна произведению коэффициента гармоник для заданного уровня сигнала  $K_{ГК}$  на вероятность его превышения.

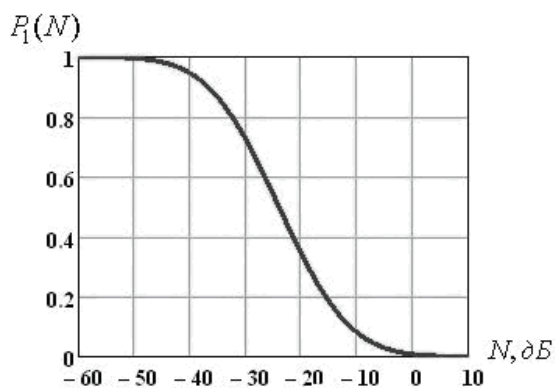


Рис. 5. Вероятность превышения уровня  $N$

Для ограничителя

$$P(K_G > K_{GN}) = K_G(N)P_1(N).$$

Для компрессора

$$P(K_{ГК} > K_{ГК_N}) = K_{ГК}(N)P_1(N).$$

Для рассматриваемого примера (музыкальные и речевые отрывки сигналов звукового вещания) рассчитанные вероятности приведены на рисунке 6.

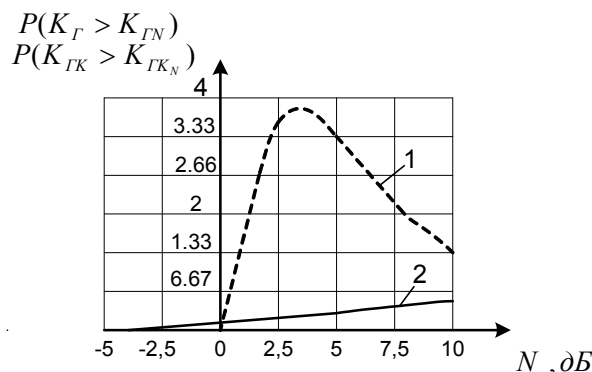


Рис. 6. Зависимости вероятности превышения коэффициента гармоник уровня  $N$  от значения уровня (1 — для ограничителя, 2 — для компрессора)

Анализ полученных зависимостей (рис.6) позволяет сделать вывод о незначительном влиянии нелинейных искажений на качество звучания при защите АЦП от перегрузок с помощью компрессии верхней части динамического диапазона сигнала.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ

На входе АЦП и на выходе ЦАП расположены фильтры нижних частот (ФНЧ), ограничивающие спектр входных частот и устраняющие высокочастотные составляющие выходного сигнала соответственно.

Подавление сигнала ФНЧ на частоте, равной половине частоты дискретизации, должно быть не менее 60 дБ. Крутизна ската ФНЧ получается при этом очень высокой (120 дБ/октаву). Для достижения таких значений крутизны должны быть созданы ФНЧ высокого порядка. Расчёты для получивших наибольшее распространение в аудиотехнике фильтров Баттерворта и Чебышёва показали их нереализуемость в рамках аналоговых технологий. Кроме того, такие фильтры имеют значительные недостатки, главным из которых является существенно нелинейная фазовая характеристика, а это приводит к заметным на слух искажениям аудиосигналов, проявляющихся в потере «прозрачности» звучания.

Известным методом решения данной проблемы является использование ИКМ кодеров (декодеров), в которых АЦП (ЦАП) работают на повышенной частоте, что позволяет значительно снизить требования к крутизне ската (соответственно и к порядку) аналогового ФНЧ, осуществляющего предварительную фильтрацию первичного сигнала. При таком методе основное затухание на граничной частоте полосы не пропускается обеспечивается цифровым фильтром.

При выборе структуры цифрового фильтра предпочтения в данном случае имеют нерекурсивные фильтры.

Решающим преимуществом таких фильтров является возможность получения линейной фазочастотной характеристики. В этом случае при определении требований (следовательно, и порядка) аналогового ФНЧ наряду с предварительной фильтрацией необходимо ориентироваться на

обеспечение требуемой неравномерности группового времени запаздывания в полосе пропускания фильтра.

На рисунке 7 показаны рассчитанные [6] зависимости группового времени запаздывания от нормированной частоты ( $\omega_B$  – верхняя граничная частота сигнала равна 1) для ФНЧ Баттерворта, а на рисунке 8 – для ФНЧ Чебышёва. Для фильтров Баттерворта неравномерность в полосе пропускания не превышает 3,2 мс для фильтра 8-го порядка. При этом обеспечивается рабочее затухание на граничной частоте полосы непропускания ( $A_{pmin}$ ) – 5 дБ для цифровой передачи сигналов звукового вещания и 13 дБ для случая цифровой звукозаписи.

$$N = 2, N_1 = 4, N_2 = 6, N_3 = 8$$

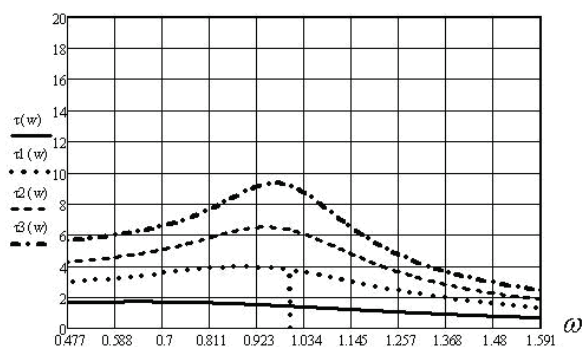


Рис. 7. Групповое время запаздывания для ФНЧ Баттерворта

$$N_1 = 2, N_2 = 4, N_3 = 6, N_4 = 8$$

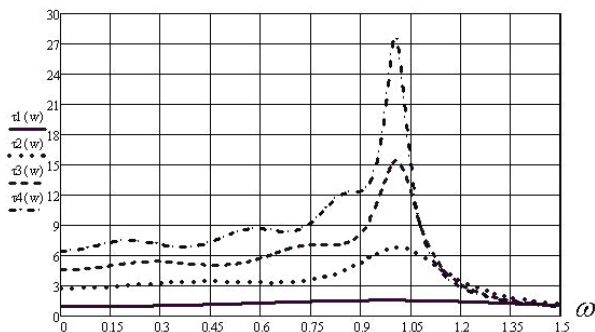


Рис. 8. Групповое время запаздывания для ФНЧ Чебышёва

Для фильтра Чебышёва приемлемым представляется использование фильтра не выше 6-го порядка – неравномерность не превышает 11 мс, что с учётом свойств слуха вполне приемлемо. При этом ФНЧ обеспечивает ( $A_{pmin}$ ) – 28 дБ (для условий звукозаписи) и 10 дБ (для случая передачи сигналов звукового вещания).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на качество воспроизводимого звука при его цифровой передаче или звукозаписи кроме собственно компрессора цифровых аудиоданных, оказывают ошибки квантования, проявляющиеся в виде звучаний, похожих на звон колокольчиков и рокот.

При грамотном построении АЦП применение компрессии входного сигнала в верхней части его динамического диапазона позволяет устранить потери высокочастотных

составляющих сигнала и уменьшает нелинейные искажения по сравнению с ограничением.

Нелинейные искажения зависят от выбора компрессии, но ввиду малой вероятности появления больших уровней сигнала решающим здесь является отсутствие перегрузок АЦП, которое приводит к катастрофическим последствиям.

При использовании для цифровой передачи сигналов звукового вещания и цифровой звукозаписи ИКМ кодеров (и декодеров) с передискретизацией наименьшие искажения (заметные на слух) получаются при наилучшей линейности фазовых характеристик селективных устройств кодеров и декодеров.

Для реализуемых в аналоговой схемотехнике фильтров предварительную фильтрацию предпочтительно выполнять при помощи фильтров Чебышёва, которые обеспечивают приемлемую (с точки зрения слухового восприятия допустимых искажений) неравномерность группового времени запаздывания и сравнительно большое затухание на граничной частоте полосы непропускания.

Для получения линейной фазочастотной характеристики в АЦП и ЦАП с передискретизацией необходимо использовать нерекурсивные цифровые фильтры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вологдин Э. Как возникают и звучат ошибки квантования // Звукорежиссёр. – 2007. – №6, №7. С. 28–41, 32–40
2. Ковалгин Ю.А. Радиовещание и электроакустика. // М.: Радио и связь, 1999. – 792с.
3. Выходец А.В., Гитлиц М.В. Радиовещание и электроакустика. // М.: Радио и связь, 1989. – 542с.
4. Дворецкий И.М., Дриацкий И.Н. Цифровая передача сигналов звукового вещания. // М.: Р. – С. 117–120. Радиосвязь. 1987.-191с.
5. Оболонин И.А., Портфиненко А.Н. Оценка искажений при компрессии аудиосигнала на входе цифровых трактов. // Материалы 11-й международной НТК «Перспективы развития современных средств и систем телекоммуникаций». – Екатеринбург, 23–25 апреля 2005. – С. 117–120.
6. Оболонин И.А. Анализ искажений аудиосигналов при цифровых методах передачи и звукозаписи. // Материалы Российской НТК «Информатика и проблемы телекоммуникаций». – Новосибирск, 24, 25 апреля 2008. – С. 233–234.

## Оболонин Иван Алексеевич

К.т.н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86) тел. (383) 2-698-259,  
e-mail: [oin@neic.nsk.su](mailto:oin@neic.nsk.su)