

## Лекция 4. ЦИФРОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АУДИОСИГНАЛОВ

Перед тем как приступить к рассуждению о преобразовании аналогового сигнала в цифровой и наоборот, сперва рассмотрим, чем аналоговая запись от цифровой отличается и для чего в принципе ввели оцифровку сигнала.

Аналоговый сигнал – сигнал данных, у которого каждый из представляющих параметров описывается функцией времени и непрерывным множеством возможных значений.

Традиционное аналоговое представление сигналов основано на подоби (аналогичности) электрических сигналов (изменений тока и напряжения) представленным ими исходным сигналам (звуковому давлению, температуре, скорости и т.п.). Форма электрической кривой, описывающей исходный сигнал, максимально приближена к форме кривой этого сигнала.

Такое представление наиболее точно, однако малейшее искажение формы несущего электрического сигнала неизбежно повлечет за собой такое же искажение формы и сигнала переносимого. В терминах теории информации, количество информации в несущем сигнале в точности равно количеству информации в сигнале исходном, и электрическое представление не содержит избыточности, которая могла бы защитить переносимый сигнал от искажений при хранении, передаче и усилении.

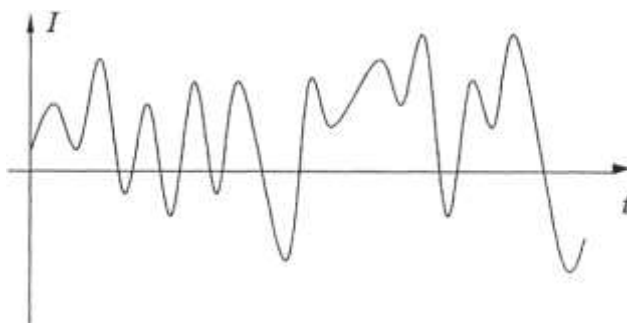


Рисунок 4.1 Пример сигнала

Цифровой сигнал — сигнал, который можно представить в виде последовательности дискретных (цифровых) значений.

Цифровое представление электрических сигналов призвано внести в них избыточность, предохраняющую от воздействия паразитных помех. Для этого на несущий электрический сигнал накладываются серьезные ограничения - его амплитуда может принимать только два предельных значения - 0 и 1.

Вся зона возможных амплитуд в этом случае делится на три зоны: нижняя представляет нулевые значения, верхняя - единичные, а промежуточная является запрещенной - внутрь нее могут попадать только помехи. Таким образом, любая помеха, амплитуда которой меньше половины амплитуды несущего сигнала, не оказывает влияния на правильность передачи значений 0 и 1. Помехи с большей амплитудой также не оказывают влияния, если длительность импульса помехи ощутимо меньше длительности информационного импульса, а на входе приемника установлен фильтр импульсных помех.

Сформированный таким образом цифровой сигнал может переносить любую полезную информацию, которая закодирована в виде последовательности битов - нулей и единиц; частным случаем такой информации являются электрические и звуковые сигналы.

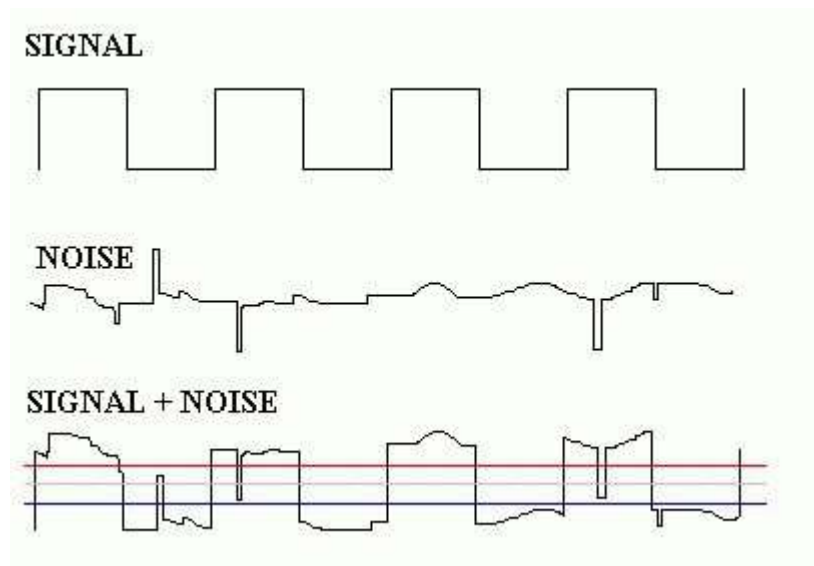


Рисунок 4.2 Наложение шума на сигнал

С конца XIX века бурно развивались технические средства хранения и передачи информации. Так, в конце XIX века знаменитым американским изобретателем Томасом Эдисоном был изготовлен фонограф.

Принцип работы фонографа состоит в следующем. Речь, музыка или пение создают звуковые колебания, которые передаются на записывающую иглу фонографа. Игла, воздействуя на поверхность вращающегося воскового валика, оставляет на ней бороздку с изменяющейся глубиной - звуковую дорожку. При воспроизведении звука происходит обратный процесс: движение считывающей иглы по звуковой дорожке сопровождается ее колебаниями с той же частотой. Эти колебания превращаются фонографом в слышимый звук (рисунок 4.3).

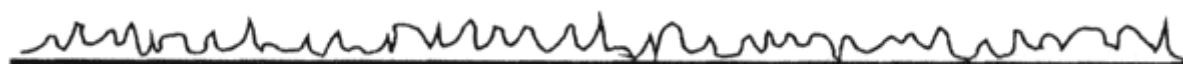


Рисунок 4.3 Профиль звуковой дорожки на фонографе при сильном увеличении

На этой же идее было основано производство целлулоидных грампластинок и механизмов, воспроизводящих записанный на них звук: граммофона и патефона.

В середине XX века появился электрофон - электрический аналог патефона.

Звуковая дорожка грампластинки - это пример непрерывной формы записи звука. В электрофоне колебания движущейся по звуковой дорожке иглы превращаются в непрерывный электрический сигнал.

Электрический сигнал передается на динамик электрофона и превращается в звук.

В XX веке был изобретен магнитофон - устройство для записи звука на магнитную ленту. Здесь также используется аналоговая форма хранения звука. Только теперь звуковая дорожка - это не механическая "бороздка с ямками", как показано на рис. 4.3, а линия с непрерывно изменяющейся намагниченностью. С помощью считывающей магнитной

головки создается переменный электрический сигнал, который озвучивается акустической системой.

До недавнего времени вся техника передачи звука была аналоговой. Это и телефонная связь, и радиосвязь. При телефонном разговоре звуковые колебания мембраны микрофона превращаются в переменный электрический сигнал, который передается по электрическим проводам. В принимающем телефоне они превращаются в звук.

Теперь пришла эпоха цифрового звука, и аналоговые записи являются большой редкостью.

Рассмотрим подробно цифровое представление аналоговых звуковых сигналов.

Для преобразования аналогового сигнала в цифровой последовательно выполняют три операции: дискретизацию аналогового сигнала во времени, квантование и кодирование.



Рисунок 4.4 Операции АЦП

### Дискретизация

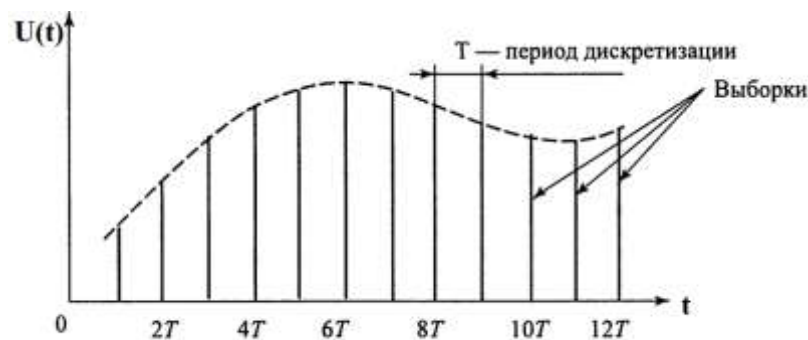


Рисунок 4.5 Дискретизация

При дискретизации сигнал  $U(t)$  представляют последовательностью его значений (отсчетов) в дискретные моменты времени.

В состав дискретизатора входит фильтр нижних частот (ФНЧ) и АИМ-модулятор. ФНЧ ограничивает входной сигнал по полосе, что необходимо для отсутствия наложения спектров дискретизированного сигнала вокруг гармоник частоты дискретизации.

Дискретизация осуществляется в АИМ-модуляторе.

Выходной сигнал модулятора представляет собой последовательность отсчетов  $U(nT_d)$ , отстоящих один от другого на интервал времени  $T_d$ , называется периодом дискретизации.

Спектр дискретного сигнала (рисунок 4.6) содержит низкочастотную компоненту, совпадающую по форме со спектром входного сигнала, и высокочастотную компоненту, состоящую из ряда боковых полос, расположенных вокруг гармоник частоты дискретизации. Выходной сигнал АИМ-модулятора квантуется по уровню и кодируется.

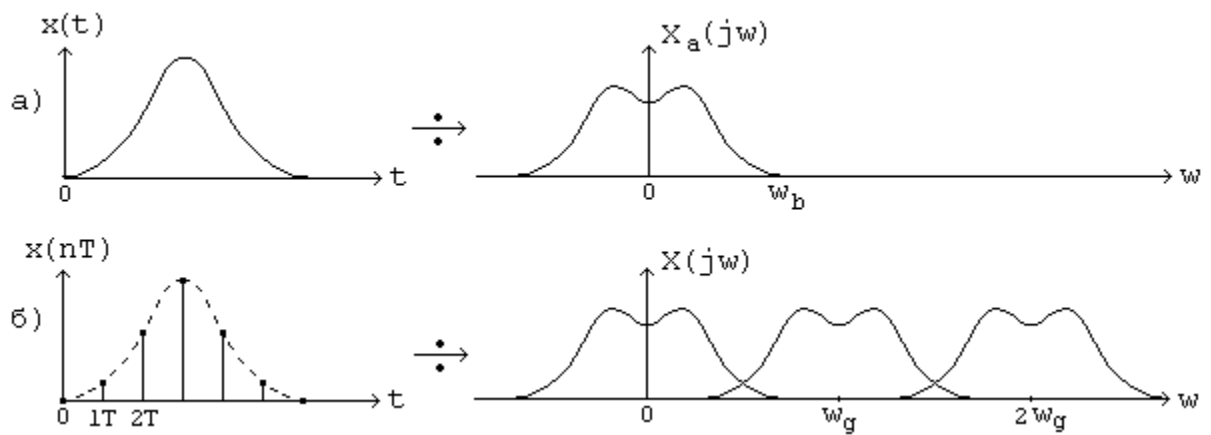


Рисунок 4.6 Спектр дискретного сигнала

Из рисунка 4.6 видно, что частотные компоненты входного сигнала, лежащие выше частоты  $f_d/2$  после дискретизации создают искажения сигнала (перекрывание спектров) и не могут быть разделены.

Следует сразу остановиться на входном ФНЧ, задачей которого является ограничение спектра входного сигнала.

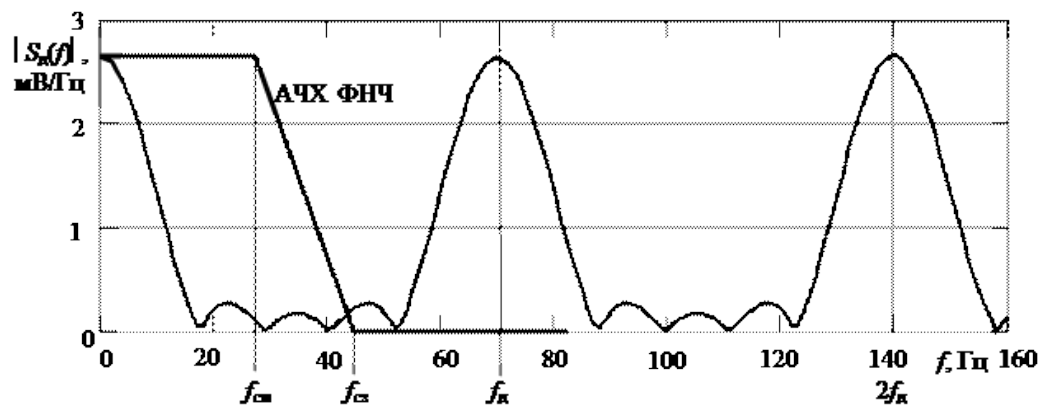


Рисунок 4.7 Спектр дискретного сигнала и АЧХ восстанавливающего ФНЧ

Расчеты показывают, что затухание ФНЧ в области частот выше  $f_d/2$  должно быть больше 60 дБ (не следует забывать, что чем круче АЧХ, т.е. больше затухание в одной и той же полосе, то тем больше неравномерность ФЧХ фильтра в этой же полосе).

Ценность дискретного представления заключается в том, что, в отличие от непрерывного исходного сигнала, его можно передавать на любое заданное расстояние по каналу низкого качества при сколь угодно малых искажениях информации.

Дискретизация может быть представлена как операция коммутации. Ключ периодически соединяет источник сигнала с какой-либо нагрузкой на относительно короткий отрезок времени через сравнительно большие промежутки времени.

Хотя каждый отсчет должен оцениваться за пренебрежимо малое время, обычно необходимо хранить его значение в течение более продолжительного времени. Например, данный отсчет потребуется подать на кодер, который обычно выполняет не одну очень быструю операцию, а некоторую последовательность операций.

Подобный процесс взятия отсчетов и их хранения основывается на заряде конденсатора до потенциала, равного величине отсчета, когда ключ разомкнут, этот заряд сохраняется благодаря очень медленной утечке через цепи с очень высоким сопротивлением.

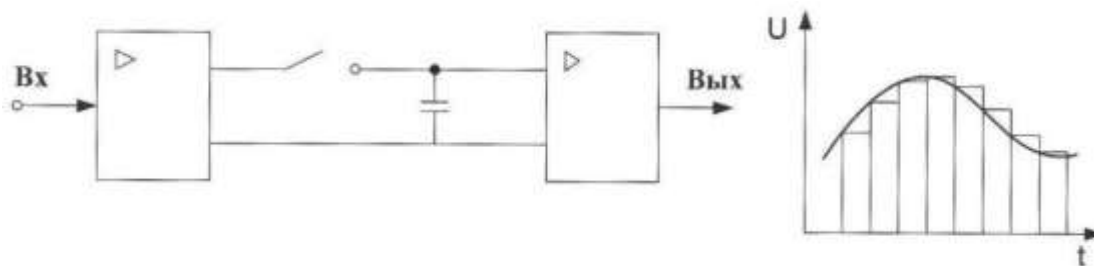


Рисунок 4.8 Процесс взятия отсчетов

Два подхода к теории дискретизированных сигналов.

Первый подход – дискретизация как модуляция.

За исходную берут последовательность импульсов с частотой следования, равной частоте дискретизации, и рассматривают ее как своего рода несущее колебание, на котором полезный сигнал отображается в виде изменения величины импульсов.

Рассмотрим пример. На рисунке 4.9 показан источник ЭДС  $\mathcal{E}$ , соединяемый через переключатель П с нагрузочным резистором.

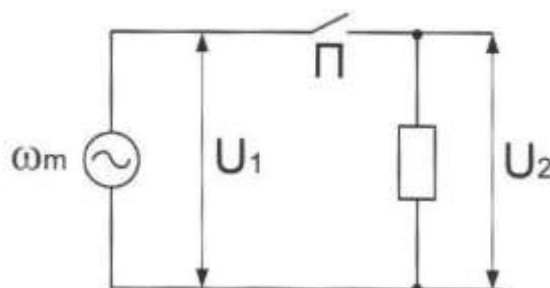


Рисунок 4.9 Пример схемы

Ключ осуществляет контакт периодически на короткое время, через относительно продолжительные интервалы времени (рисунок 4.10).

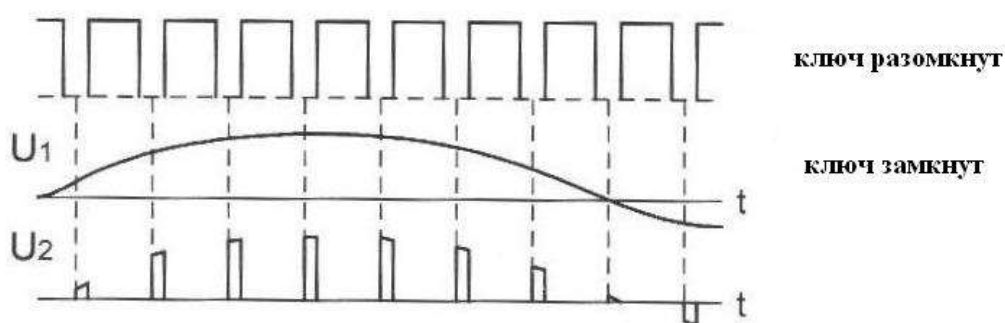


Рисунок 4.10 Периодический сигнал

Когда контакт замыкается, модулирующий сигнал  $U_1$  мгновенно подключается к нагрузке, создавая выходное напряжение  $U_2$ , представляющее собой последовательность импульсов, огибающей которой является модулирующий сигнал  $U_1$ .

Второй подход – исходя из фундаментальных свойств сигнала.

В 1933 году русский ученый Котельников показал, что сигнал с ограниченным по ширине спектром может быть полностью задан некоторым числом дискретных значений.

В соответствии с теорией Котельникова неискаженная передача непрерывного сигнала, занимающего полосу частот  $0 \dots F_{\text{макс}}$ , последовательностью его отсчетов

возможна в том случае, если частота дискретизации связана с максимальной частотой в спектре сигнала следующим соотношением:

$$f_d \geq 2F_{\text{макс.}}$$

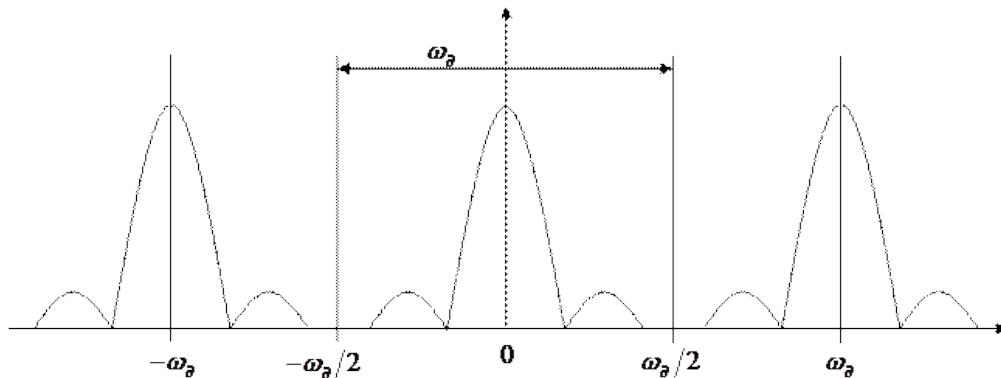


Рисунок 4.11 Область сигнала

Диапазон частот, воспринимаемых слухом человека, лежит в диапазоне 20 Гц...20 кГц. Однако в зависимости от требований к системе этот диапазон ограничивается. Так в телефонии достаточно обеспечить высокую артикуляцию и узнаваемость голоса собеседника. Для этого достаточно обеспечить полосу частот 300...3400 Гц. Поэтому частота дискретизации телефонного сигнала выбрана равной 8 кГц.

При звуковом вещании требуется передача музыкальных программ и ее художественное воспроизведение. Для этого требуется полоса частот от 30 Гц до 15 кГц. Следовательно, частота дискретизации ( $f_d$ ) должна быть не менее 30 кГц. Кроме того следует учитывать, что в системах связи сигналы звукового вещания (ЗВ) кодируются и передаются совместно с другими, в частности телефонными сигналами. Поэтому частота дискретизации сигнала ЗВ должна быть кратна частоте дискретизации телефонного сигнала. В противном случае в общей структуре цифрового потока системы связи невозможно обеспечить передачу сигналов ЗВ вместо нескольких телефонных. Поэтому в системах передачи (распределения) сигналов ЗВ частота дискретизации принята 32 кГц.

В студийном и бытовом оборудовании (пультах, магнитофонах, проигрывателях) принята максимальная частота сигнала  $F_{\text{макс}}=20$  кГц. При этом удовлетворяются требования самых взыскательных слушателей, не накапливаются амплитудно-частотные искажения в основной полосе при многократной перезаписи с использованием аналоговых фильтров. В этом случае частота дискретизации принята равной 48 кГц.

В лазерных проигрывателях и некоторых типах бытовых магнитофонов  $f_d=44,1$  кГц.

## Квантование

Дискретизированный сигнал существует только в определенные моменты времени, но его уровень принадлежит непрерывному интервалу значений. Чтобы получить дискретное представление сигнала, каждому отсчету должна быть поставлена в соответствие некоторая дискретная мера уровня. Это можно сделать путем сравнения отсчета со шкалой, имеющей конечное число интервалов, и определение его, например средним значением того интервала, в который он попадает. Этот процесс называется квантованием.

Другими словами квантование состоит в замене всех возможных мгновенных значений сигнала некоторыми разрешенными уровнями, т.е. каждое значение амплитуды импульса заменяется ближайшим к нему разрешенным значением. Расстояние между соседними разрешенными уровнями квантования называют шагом квантования.

Нечто подобное квантованию мы осуществляем, часто того не осознавая, когда выражаем измеренную величину при помощи ограниченного числа значащих цифр. Процедуру квантования можно рассматривать как результат прохождения входного сигнала через нелинейное безынерционное устройство с амплитудной характеристикой ступенчатой формы (рисунок 4.12), которая называется шкалой квантования.

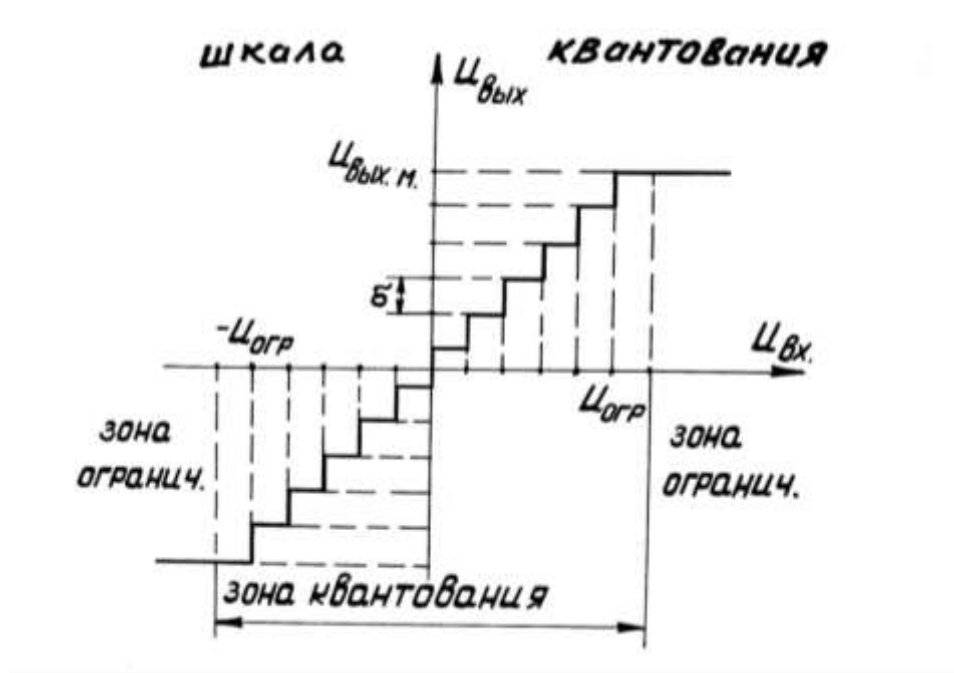


Рисунок 4.12 Шкала квантования

Если в пределах шкалы шаг квантования остается постоянным, квантование называется линейным (или равномерным), квантование с неравными шагами квантования называется нелинейным (неравномерным) (рисунок 4.13).

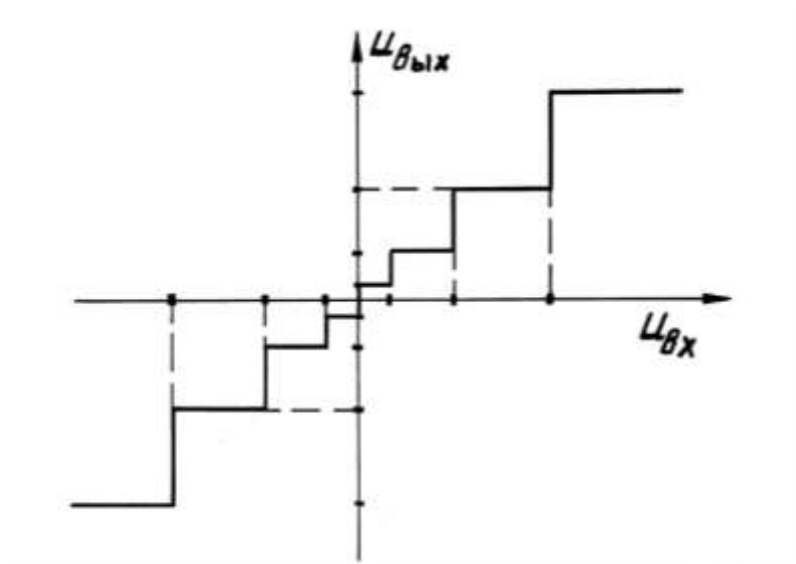


Рисунок 4.13 Шкала с неравномерными шагами

Квантование сигналов сопровождается погрешностью, которая тем меньше, чем меньше шаг квантования.

Разность между исходным и квантованным значениями сигнала является ошибкой квантования и часто называется шумом квантования (рисунок 4.14).

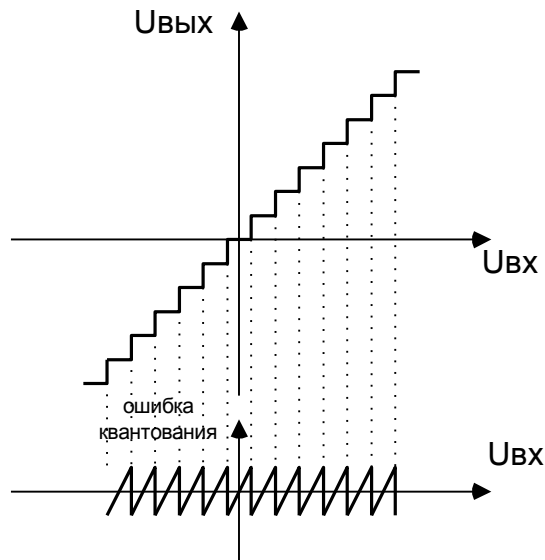


Рисунок 4.14 Шум квантования

Разница между шумом квантования и другими шумами, действующими в аудиоаппаратуре и системах передачи сигналов, заключается в том, что в отличие от последних шум квантования возникает в результате детерминированного нелинейного преобразования входного сигнала. Поэтому было бы правильнее говорить об искажениях, а не о шумах квантования.

Характеристика квантования имеет две зоны: квантования при  $|U_{вх}| \leq |U_{огр}|$  и ограничения при  $|U_{вх}| > |U_{огр}|$ . Зона квантования является рабочей областью характеристики. В ее пределах осуществляется квантование сигнала. Если мгновенное значение входного сигнала  $U_{вх}$  выйдет за пределы зоны квантования, то выходное напряжение будет оставаться неизменным и равным  $U_{вых макс}$  независимо от значения  $U_{вх}$ . Возникающие при этом искажения имеют характер безынерционного ограничения сигнала и считаются недопустимыми. Разность между исходным и ограниченным сигналами называют шумом ограничения.

Мощность шумов квантования, отношение  $P/P_{ш кв}$ . Определим значение мощности шума квантования для произвольной шкалы квантования. Пусть сигнал с плотностью вероятности распределения мгновенных значений  $W(u)$  подвергается квантованию в диапазоне мгновенных значений  $-U_{огр}$  до  $+U_{огр}$  с шагом  $\delta_i$ , величина которого может изменяться.

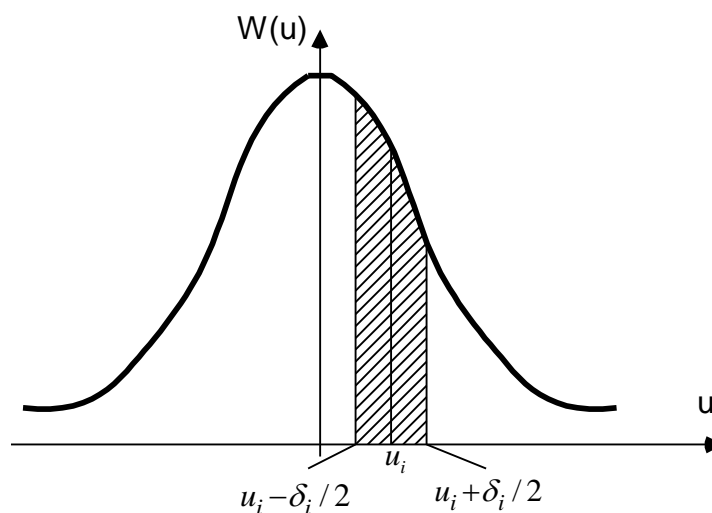


Рисунок 4.15



Из рисунка 4.15 видно, что вероятность появления сигнала с уровнем, лежащим в пределах  $i$ -го шага

$$P_i = \int_{u_i - \delta_i/2}^{u_i + \delta_i/2} W(u) du = W(u_i) \delta_i, \quad (2)$$

где  $W(u_i)$  – плотность вероятности напряжения сигнала в середине рассматриваемого интервала. Мгновенная мощность шумов квантования, развиваемая на сопротивлении 1 Ом, равна квадрату ошибки квантования, т.е.  $P_{ш.кв.мгн} = (u - u_i)^2$ , а часть этой мощности шума, появляющейся при квантовании сигналов в пределах  $i$ -го шага, составляет

$$P_{ш.кв.мгн} = \int_{u_i - \delta_i/2}^{u_i + \delta_i/2} (u - u_i)^2 W(u) du \approx \frac{1}{12} W(u_i) \delta_i^3, \quad (3)$$

или с учетом предыдущего выражения (2)

$$P_{ш.кв.мгн.i} \approx \delta_i^2 p_i / 12. \quad (4)$$

Суммарная мощность шума квантования равна сумме составляющих от каждого шага:

$$P_{ш.кв} = \sum_{i=0}^N \frac{1}{12} \delta_i^2 p_i \quad (5)$$

При равномерной шкале квантования, когда все  $\delta_i$  равны, из (5) имеем

$$P_{ш.кв} = \delta^2 / 12 \quad (6)$$

Отсюда следует важный вывод: при равномерном квантовании мощность шума квантования определяется исключительно шагом квантования.

Шум квантования представляет собой случайный процесс с равномерным распределением в пределах  $-\delta/2 \dots +\delta/2$  (рисунок 4.16). Его плотность вероятности описывается выражением

$$W(x) = 1/\delta \quad (7)$$

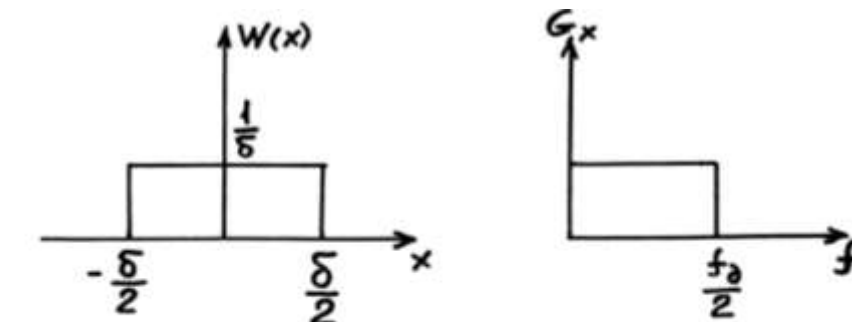


Рисунок 4.16 Шум квантования

Спектр шума квантования равномерный в полосе  $0 \dots f_d/2$ . Шум квантования проявляется только при наличии сигнала. При отсутствии сигнала на входе АЦП можно было бы ожидать, что на выходе ЦАП шум будет полностью подавлен. Однако наличие теплового

шума входных аналоговых блоков АЦП, нестабильность напряжения питания, переходные помехи от соседних каналов, дрейф постоянной составляющей в усилителях постоянного тока и действие других факторов приводят к тому, что самый низкий первый уровень квантования достигается даже при отсутствии сигнала на входе АЦП.

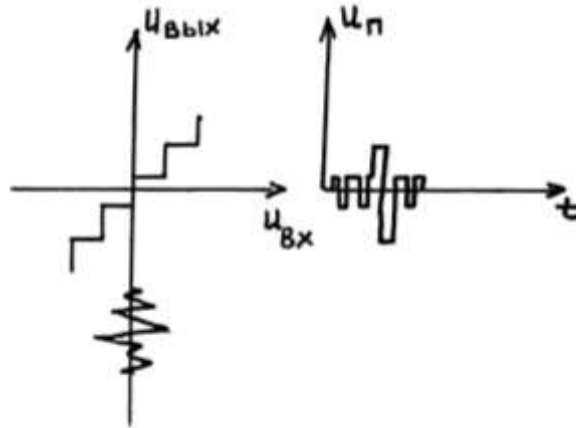


Рисунок 4.17 Шкала квантования

На рисунке 4.17 изображен начальный участок шкалы квантования и показано, как входные шумы преобразуются в АЦП в квантованное колебание. На выходе ЦАП это квантованное колебание превращается в шум, называемой шумом паузы. Шум паузы менее равномерный, чем белый шум, характерный для аналоговых систем, и его часто называют гранулированным. Мощность шума паузы

$$P_{ш.п} = \delta^2/4 \quad (8)$$

на 4,7 дБ больше шума квантования.

Определим отношение сигнал-шум на выходе квантующего устройства. Поскольку  $P_{ш.кв}$  не зависит от уровня входного сигнала, с увеличением мощности входного сигнала  $P_c$  отношение  $P_c/P_{ш.кв}$  линейно растет до тех пор, пока не возникают шумы ограничения. Наличие последних резко уменьшает помехозащищенность. Поэтому, как отмечено, система кодирования строится так, чтобы ограничения сигнала практически не возникало. Для этого порог ограничения квантующего устройства должен быть равен квазимаксимальному  $U_{с.макс}$  значению сигнала, т.е.

$$U_{огр} = U_{с.макс} = k U_{ср} \quad (9)$$

Здесь  $k$  – пик-фактор сигнала;  $U_{ср}$  – среднеквадратичное значение сигнала. Число шагов квантования можно определить по известным  $U_{огр}$  и  $\delta$ :

$$n = 2 \frac{|U_{огр}|}{\delta} + 1 \approx 2 \frac{|U_{огр}|}{\delta}, \quad (10)$$

Подставим (10) в (9), получим:

$$P_{ш.кв} = \frac{1}{3} \frac{U_{огр}^2}{n^2} = \frac{1}{3} \frac{k^2 U_{ср}^2}{n^2}, \quad (11)$$

Поскольку на сопротивление 1 Ом мощность сигнала  $P_c = U_{ср}^2$

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв}} = \frac{3n^2}{k^2}, \quad (12)$$

или в децибелах

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв}} = 20 \lg \frac{n}{k} + 4,8, \quad (13)$$

При  $m$ -разрядном кодировании  $n=2^m$ . Подставив это значение в (13), получим:

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв}} = 6m - 20 \lg k + 4,8, \quad (14)$$

У гармонического сигнала пик-фактор  $k = \sqrt{2}$ , и в этом случае

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв}} = 6m + 1,8, \quad (15)$$

У сигналов вещания пик-фактор зависит от жанра программы. В среднем считают, что он равен 13 дБ. Поэтому для вещательного сигнала

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв}} = 6m - 8,5, \quad (16)$$

Это выражение не учитывает неодинаковой чувствительности слуха человека к составляющим шума разных частот, определяемой психометрическим коэффициентом. С его учетом отношение сигнал-шум квантования уменьшается на 8,5 дБ для сигнала в полосе до 15 кГц и составляет

$$\frac{P_c}{P_{ш.кв}} = 6m - 16,7, \quad (17)$$

Неравномерное (нелинейное) квантование. При равномерном квантовании обеспечить высокую защищенность от шумов квантования для всех сигналов, в том числе и для самых слабых, можно только увеличив число разрядов на отсчет при кодировании. При этом отношение сигнал-шум линейно зависит от уровня входного сигнала, а требуемая скорость передачи оказывается весьма высокой.

Для снижения скорости цифрового потока применяется неравномерное квантование, которое позволяет повысить отношение сигнал-шум квантования для слабых сигналов за счет уменьшения этого отношения для сильных сигналов.

Очевидно, что значение  $P_c/P_{ш.кв}$  должно оставаться достаточно высоким во всем диапазоне изменения уровней входного сигнала. Неравномерная шкала квантования при АЦП звуковых сигналов формируется путем использования:

- мгновенного и
- почти мгновенного компандирования.

## Кодирование

В результате дискретизации и квантования получается дискретный сигнал (дискретен по уровню и во времени). Для передачи этого сигнала по проводнику или радиоканалу, а также для записи на ленту или диск он должен быть преобразован в другой вид. Этот процесс называется кодированием. На практике квантование и кодирование обычно объединяются в общем функциональном узле аппаратуры.

Квантованный отсчет сигнала является элементом дискретного сигнала с большим числом значений, например, 64, 128, или более. Его можно передавать непосредственно по каналу только при условии, что уровень помех значительно ниже одного кванта.

Цель кодирования – представить один элемент с большим основанием в виде группы элементов с малым основанием, так как последние лучше согласуются с параметрами канала передачи. Эта группа называется кодовым словом. Например, выборка, квантованная в один из 128 уровней, может быть представлена семиэлементной

комбинацией двоичных символов. Каждый двоичный разряд имеет два значения уровня, а семь разрядов дают  $2^7=128$  комбинаций.

Существует много способов установления однозначного соответствия между квантованными уровнями и кодовыми комбинациями. Один из удобных способов – выражать порядковые номера квантованных уровней в виде двоичных чисел.

$$n = a_{m-1}2^{m-1} + a_{m-2}2^{m-2} + \dots + a_02^0,$$

где  $n$  – номер кодируемого уровня квантования;

$m$  – число разрядов в кодовой группе (слове);

$a$  – число, принимающее значение 0 или 1.

Кодовая комбинация, соответствующая числу  $n$ , содержит передаваемые последовательно  $a_{m-1}, a_{m-2} \dots a_0$ .

Необходимое число разрядов (длина кодового слова) для кодирования при заданном максимальном числе уровней шкалы квантования  $n_{\text{макс}}$  определяется из выражения  $m = \log_2 n_{\text{макс}}$ . Если кодовая группа содержит  $m$  символов 0 или 1, то с помощью такого  $m$ -разрядного двоичного кода можно закодировать число до  $n_{\text{макс}} = 2^m$ .

Несколько элементов кодовой комбинации кодирующее устройство (кодер) может генерировать одновременно (последовательно или параллельно). Их можно передавать последовательно по общему каналу, либо параллельно по индивидуальным каналам.

Более распространенной является передача в последовательной форме.

Для восстановления исходного сигнала необходимо выполнить обратную операцию, называемую декодированием. Декодер при подаче на его вход нескольких элементов кодовой комбинации преобразует ее в дискретный квантованный сигнал, являющийся наилучшим приближением к исходному отсчету.

Сигнал, прошедший этапы дискретизации, квантования и кодирования, называется ИКМ-сигналом, а совокупность этих операций – импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ).

Двоичные символы, входящие в состав кодовых групп, называются битами. Они имеют разный вес. Наименьший вес имеет младший бит  $a_0$ , несущий информацию об одном шаге квантования. Старший значащий бит  $a_{m-1}$  несет информацию о  $2^{m-1}$  шагах квантования и имеет наибольший вес. Пусть, например, кодируется отсчет сигнала, имеющий уровень  $n = 115$ , а шкала квантования содержит  $n_{\text{макс}} = 256$  отсчетов. В этом случае  $m = \log_2 256 = 8$  и число  $n$  записывается в двоичной системе следующим образом:

$$n = 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

Соответствующая кодовая комбинация имеет вид 01110011. Такой код называют натуральным. В цифровых системах связи и вещания распространены также симметричные коды, характеризующиеся тем, что первый символ кодовой комбинации определяется полярностью кодируемого отсчета сигнала, а остальные символы несут информацию об абсолютном значении отсчета. Если кодируется сигнал положительной полярности, первым битом кодового слова является 1, а если отрицательной полярности, то 0. Разнополярные отсчеты, равные по абсолютному значению, различаются только первым символом в кодовом слове.

Последовательность  $m$ -разрядных кодовых слов является выходным сигналом аналого-цифрового преобразователя. Обычно при передаче и записи к выходному сигналу АЦП добавляется дополнительная информация, которая служит для повышения достоверности передачи и синхронизации. При этом кодовые слова, подвергаемые одновременной обработке, объединяются в блоки. Соответствующий данному коду порядок следования кодовых слов и отдельных символов в блоке называется форматом кода.

Обратное преобразование цифрового сигнала в аналоговую форму осуществляет цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), состоящий из декодера и фильтра нижних частот. Простейшая схема передачи (или записи воспроизведения) с ИКМ показана на рисунке 4.18.

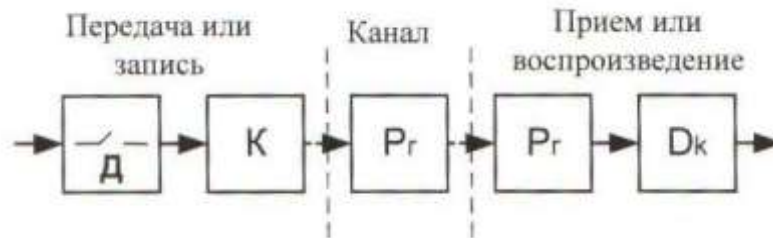


Рисунок 4.18 Схема передачи

На передающей стороне основными операциями являются дискретизация и кодирование (последнее обычно включает и квантование). На приемной стороне регенерация искаженного сигнала и декодирование результирующей последовательности квантованных выборок (процедуры модуляции и демодуляции здесь не показаны). Для иллюстрации на рисунке 4.19 показаны виды сигналов, соответствующих различным этапам обработки и передачи (записи) для случая  $4^x$ -разрядного двоичного числового кода. Этот код используется для передачи 16 квантованных уровней. Передаваемые кодовые комбинации в данном случае занимают полные интервалы времени между соседними отсчетами; практически их можно передавать (записывать) либо таким способом, либо сжимать во времени в последовательности меньшей длительности и размещать в промежутках между другими сигналами такого же типа. В последнем случае по одному общему тракту с достаточно высокой скоростью передачи можно передать (записать) несколько сообщений. Эта операция называется временным уплотнением.

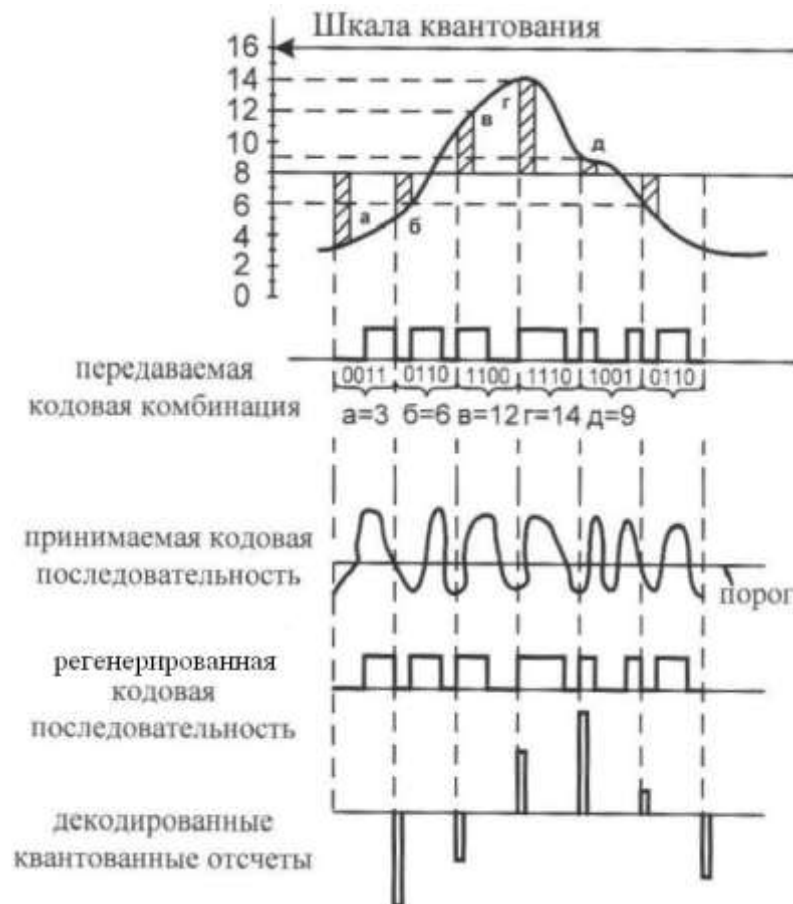


Рисунок 4.19 Передача кодовой последовательности

На рисунке 4.19 показан случай передачи кодовой последовательности по каналу, ширина полосы пропускания которого ограничена и в котором присутствует шум, вызывающий случайные искажения сигнала.

Запаздывание сигнала в канале для простоты не учитывается.

Для получения регенерированной кодовой комбинации берут отсчеты принимаемого сигнала в середине каждого тактового интервала; поэтому регенерируемая последовательность задерживается относительно принимаемой на половину тактового интервала.

Декодирование можно осуществить только тогда, когда будут приняты все разряды данной комбинации, поэтому восстанавливаемые отсчеты дополнительно задерживаются относительно исходных на время, равное периоду дискретизации.

Эти задержки достаточно малы.

Значительно большую задержку и фазовые искажения вносит демодулирующий фильтр (на рисунке 4.19 не показан), который осуществляет интерполяцию между отсчетами.

При построении упрощенной структурной схемы не учтена важная операция – идентификация разрядов кода. Эта операция осуществляется счетчиками, которые делят последовательность разрядов на комбинации требуемой длины.

Чтобы эти счетчики группировали разряды одинаково, необходима их синхронизация, для чего периодически передается какая-либо легко идентифицируемая комбинация.

Принципиальная особенность кодирования заключается в том, что кодированный сигнал с низким основанием кода  $r$  (например, 2) обладает более высокой помехоустойчивостью, чем квантованная выборка этого сигнала с высоким основанием кода  $R$  (например, 128).

Однако кодированный сигнал содержит большее число элементов, в общем случае  $\log_r R$  (или ближайшее большее целое число, если это значение оказывается дробным). Для передачи этих элементов требуется соответственно более широкая полоса частот.

Поэтому двоичное кодирование наиболее выгодно в тех случаях, когда канал передачи характеризуется высоким уровнем шумов, но имеет достаточно широкую полосу частот.

Кодом называется множество комбинаций, которые, будучи взяты по порядку, соответствуют множеству уровней.

Комбинацией (кодовым словом) называется группа элементов сигнала, например, двоичные разряды, которые в совокупности определяют отсчетное значение исходного сигнала; в случае ИКМ они определяют уровень, представляющий собой порядковый номер интервала на шкале квантования, в который попадает отсчетное значение исходного сигнала.

В системе ИКМ над сообщением осуществляются три основных операции, которые могут влиять на выбор кода, а именно: кодирование, цифровая передача и декодирование.

Методы кодирования и декодирования налагают ограничения на порядок, в котором комбинации распределяются по уровням, но не на ансамбль используемых комбинаций.