

НЕКОТОРЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Б.П. Хромой, д.т.н., профессор, Московский технический университет связи и информатики, P_khromoy@rambler.ru.

УДК 681.325

Аннотация. Целью работы является анализ исторических аспектов развития цифровизации. 15 мая 2018 г. по указу Президента Российской Федерации в нашей стране было создано Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. В.В. Путин за основу своего указа взял следующее положение: «Цифровые технологии – это не отдельная отрасль, по сути это уклад жизни, новая основа для развития системы государственного управления, экономики, бизнеса, социальной сферы, всего общества. Формирование цифровой экономики – это вопрос национальной безопасности и независимости любого государства, конкуренции отечественных компаний». В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 9 сентября 2020 г. №1389 официальное сокращенное название Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ было изменено с «Минкомсвязь России» на «Минцифры России». В связи с изложенным представляет интерес история возникновения и развития процесса цифровизации.

Ключевые слова: дискретизация; квантование; кодирование; система счисления; октава; струна; лад.

HISTORICAL ASPECTS OF DIGITALIZATION

B.P. Khromoy, doctor of technical sciences, professor, Moscow technical university of communications and informatics.

Annotation. The aim of this work is the analysis of historical aspects of digitalization development. On May 15, 2018, by decree of the President of the Russian Federation, the Ministry of digital development, communications and mass media of the Russian Federation was established in our country. Vladimir Putin based his decree on the following position: "Digital technologies are not a separate industry; in fact, they are a way of life, a new basis for the development of public administration, economy, business, social sphere, and society as a whole. The formation of the digital economy is a matter of national security and independence of any state, competition of domestic companies." In accordance with the RF Government Decree from September 9, 2020, No. 1389 the official abbreviation of the Ministry of digital development, communications and mass communications of the Russian Federation was changed from the "Ministry of communications" to the "Ministry of digital development". In connection with the above, the history of the emergence and digitalization development is of interest.

Keywords: discretization; quantization coding; number system; octave; string; okay.

Термин «цифровизация» произошел от слова «цифра». Представляет интерес происхождение этого слова с исторической точки зрения. Прежде чем появился термин «цифра», в каменном веке люди начали определять число предметов. Мысль о счете пришла людям в голову раньше, чем появились цифры.

Первыми придумали запись чисел древние шумеры. Для обозначения числа они пользовались всего двумя цифрами, которые имели соответствующее обозначение. Такая цифровая система в настоящее время называется двоичной.

Слово «цифра» досталась нам от арабов по наследству. Арабы нуль или «пусто» называли «сифра». С тех пор и появилось слово «цифра». Правда сейчас цифрами называются все десять значков для записи чисел, которыми мы пользуемся: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Цифры русского народа имели свою особенность. Наши предки пользовались алфавитной нумерацией, то есть числа изображались буквами, над которыми ставился значок ~, называемый «титло». Чтобы отделить такие буквы – числа от текста, спереди и сзади ставились точки. Этот способ обозначения цифр называется цифирью. Он был заимствован славянами от средневековых греков-византийцев.

Ряд чисел 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9... называется натуральным. А сами эти числа натуральными. С появлением натурального ряда был сделан первый шаг к созданию математики. Сейчас все понимают, что натуральный ряд чисел бесконечен. В древности люди этого не знали. Сначала они умели считать до трех, потом до десяти, до сорока, до ста, а дальше была «тьма». Натуральный ряд был очень коротким. Расширить его удалось великому механику и математику древности Архимеду.

С развитием математики появились различные системы счисления. Первые математики считали по пальцам одной руки – до пяти. А если предметов было больше, то говорили «пять и один», «пять и два»... Так возникла пятеричная система счисления. Потом пальцев руки стало недостаточно и появилось десятичная система счисления. Но и этого оказалось мало. Тогда придумали шестидесятеричную систему. Стали считать тройками, по числу суставов на каждом пальце левой руки без большого пальца, то есть до двенадцати. Каждый палец левой руки означал 12. Если один палец это 12, то пять пальцев – это 60.

Шестидесятеричную систему изобрели древние вавилоняне. В наследство от них нам осталось деление суток на 24 или 12 двойных часов, деление часа на 60 минут, а минут на секунды и деление круга на 360 градусов.

Однако самой удобной оказалась десятичная система, которая широко используется в наше время. Цифры, которыми мы записываем числа, называются арабскими. Их всего десять. Изобретены эти цифры были в Индии, но получили название арабских, потому что в Европу пришли из арабских стран. Многие годы форма цифр совершенствовалась и теперь принята во всем мире. Так постепенно зарождалась математика. Человек незаметно очутился в мире чисел, записываемых с помощью цифр.

Первые шаги цифровой передачи сигналов связаны с развитием электрического телеграфа. В начале XIX века трудами и исследованиями Г.Х. Эрстеда, Ампера, Гаусса, Вебера и других ученых была создана теоретическая и практическая база для создания электрической телеграфной связи.

Основным стимулом для создания и широкого внедрения телеграфной связи явилось развитие железных дорог, начиная с 1830 г. Даже на заре своего существования железнодорожные поезда могли перемещаться со скоростью до 80 км/час, и поэтому потребовалась система связи, обеспечивающая передачу информации со скоростью, соизмеримой со скоростью движения поездов.

В 1832 г. русским ученым П. Л. Шиллингом был создан первый телеграфный аппарат, пригодный для эксплуатации. Усилиями английских исследователей Уитстона и Кука телеграфный аппарат Шиллинга был внедрен в практическую эксплуатацию в 1837 г. на магистрали Лондон – Бирмингем.

После этого телеграфные системы начали быстро внедряться и к 1870 г. они существовали во всем мире. Основным барьером для прогресса телеграфной связи

явилось то обстоятельство, что для каждой пары телеграфных аппаратов (на передаче и приеме) требовалась отдельная линия связи.

Следующим этапом развития цифровой передачи в виде телеграфных сигналов явилось многократное использование одной линии связи для передачи нескольких сообщений, что существенно повышало эффективность использования линейных сооружений. Первая работоспособная многоканальная система передачи, основанная на временном объединении телеграфных сигналов, была создана молодым инженером французской телеграфной службы Ш. Бодо в 1875 г. При ее разработке были успешно решены несколько технических проблем, важнейшими из которых являются – синхронизация передающей и приемной частей системы передачи, а также внедрение в практику равномерного 5-ти разрядного телеграфного кода. В знак заслуг Бодо в области передачи цифровых сигналов его именем названа единица телеграфирования: Бод – количество телеграфных символов, передаваемых за 1 с [1].

Но патент на электромагнитный телеграф механического типа достался Сэмюэлю Морзе (1840 г.). Позже изобретатель создал известный во всем мире сигнальный код – азбуку Морзе. В его аппарате буква передавалась с помощью ключа, к которому была подключена линия связи и батарея. При нажатии ключа в линию поступает ток, который, проходя через электромагнит на другом конце линии, притягивает рычаг. С его помощью на перемещаемой бумажной ленте отпечатывается знак – тире или точка.

Знаки точка и тире свидетельствуют о применении в аппарате Морзе двоичной системы счисления. Конечно, точка и тире не являются цифрами. Однако их можно рассматривать как результат кодирования. Для образования точки и тире необходимо передавать по линии короткий и более длительный импульсы тока. Их совокупность и последовательность позволили образовать сигнальный код – азбуку Морзе, с помощью которого можно было передавать все буквы алфавита и цифры.

Кодирование с помощью азбуки Морзе широко применялось в более позднее время, а также для передачи сообщений во время II-ой мировой войны. Таким образом, можно считать, что применение цифровых методов передачи информации, имело место в электросвязи уже в начале 19-го века. В последующие годы этого века проводная телеграфная связь получила широкое распространение во всем мире.

Следующий важный этап развития цифровой связи возник 24 марта 1896 г., когда российский ученый Александр Попов на закрытом заседании Русского физико-химического общества в Петербурге впервые в мире осуществил передачу радиотелеграммы. С помощью передатчика и приемника собственной конструкции он передал набранные азбукой Морзе слова *Heinrich Hertz* (Генрих Герц). Таким образом, цифровой метод передачи был реализован в беспроводной связи.

Дальнейшее развитие техники связи произошло благодаря изобретению телефона. Первый телефонный аппарат был представлен в 1876 г. в Соединенных Штатах Америки, а создателем, запатентовавшим свое изобретение, стал Александр Грехем Белл. Особенностью телефонного аппарата является использование для передачи не цифровых, а аналоговых сигналов. Это изобретение положило начало развитию связи с помощью аналоговых сигналов.

Развитие аналоговой связи продолжилось с развитием радио. Вначале в диапазоне длинных волн, затем средних и высоких. В начале XX века радиосвязь развивалась различными инженерами во всем мире на основе большого количества изобретений. Среди них – изобретение электронных ламп, построение на их основе усилителей, генераторов, модуляторов. Безусловно, эти изобретения повлияли на развитие радиосвязи и заслуживают оценки с исторической точки зрения. Большим

достижением в области аналоговой связи явилось создание телевидения. На дальнейшее развитие широкого применения аналогового сигнала на государственном уровне повлияло изобретение разного типа транзисторов, устройств магнитной записи звуковых и телевизионных сигналов.

Следует отметить и быстрое развитие теории и техники связи для решения задач на государственном уровне. Изобретение телефона создало задачу построения телефонной сети в городах, а также проводной связи между абонентами разных городов. Решение этих задач было возможно при больших затратах. С целью их уменьшения уже в 1918 г. в США была создана первая система проводной связи с частотным уплотнением сигналов. Ее дальнейшее развитие имело место в 1935 г. созданием в СССР однополосной многоканальной системы передачи сигналов телефонии и телеграфии за счет научных работ В. А. Котельникова, А. В. Черенкова, А.Ф. Ганина. Эти два примера характеризуют лишь небольшую часть технических и научных достижений этого времени.

Однако следует обратить внимание на одно важное обстоятельство: в многоканальной проводной передаче сигналов между городами передавались как аналоговые телефонные сигналы, так и цифровые телеграфные сигналы. Таким образом, широкое применение аналоговых технологий не привело к устранению цифровых. Более того, на определенном этапе началось преобразование аналоговых звуковых сигналов в цифровые сигналы. Первоначально это делалось с целью обеспечения помехоустойчивости многоканальных систем. Передача большого количества сигналов по кабелю, проложенного под землей, требовала больших денежных затрат как при строительстве, так и при эксплуатации. Цифровые сигналы обеспечивали большую помехоустойчивость.

Решить проблему создания многоканальных систем передачи, работающих по кабелям существующей телефонной сети, оказалось возможным только при помощи цифровой системы передачи (ЦСП) с импульсно кодовой модуляцией (ИКМ). Первыми участками сети, на которых начиналось внедрение систем передачи с ИКМ во всех странах мира, явились соединительные линии между городскими автоматическими телефонными станциями (АТС). Внедрение систем с ИКМ на межстанционных соединительных линиях было поворотным моментом во внедрении цифровых методов передачи. С тех пор началась бурная «цифровизация» сетей связи на всех участках: местном, внутризональном и магистральном.

Важным событием в процессе цифровизации техники и жизни людей является цифровое телевидение. В России сеть цифрового телевидения начала действовать в 2019 г. Развитие цифрового телевидения происходило в течении нескольких лет и несколькими этапами, начиная от пограничных территорий, и заканчивая центральными районами России.

В Европе в 1993 г., когда стало ясно, что за цифровыми телевизионными системами будущее, был принят проект *DVB (Digital Video Broadcasting – цифровое видео вещание)*, разработанный на основе стандарта сжатия данных *MPEG-2*, созданный группой *MPEG (Moving Picture Expert Group)*.

Применение цифрового телевидения обеспечивает ряд преимуществ.

Во-первых, сокращается используемая полоса радиочастот, так при применении цифрового телевидения на одной частоте можно передать не один, а десять каналов.

Во-вторых, сокращается количество передатчиков, потому что достаточно транслировать на двух частотах вместо, скажем, девятнадцати, как было в Останкино.

В-третьих, сокращается мощность передатчика, поскольку из цифрового сигнала достаточно извлекать только цифры, а не реальное аналоговое изображение и звук.

Одним из плюсов цифрового телевидения для населения явился тот факт, что благодаря дополнительной разветвленной сети ретрансляторов и возможности передавать на одной частоте сразу десять каналов, во многих отдаленных населенных пунктах появилась возможность смотреть 20 каналов с качественным изображением. Кроме того, заметно возросло качество принимаемого изображения.

Использование цифрового телевидения в России и в других странах свидетельствует о широком развитии цифровизации в настоящее время.

Для преобразования аналогового сигнала в цифровой, были разработаны аналого-цифровые преобразователи (АЦП) [1-4]. В АЦП происходят три преобразования сигнала: дискретизация, квантование и кодирование. Такое преобразование связано с применением различных устройств. Поэтому каждое преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал связано с затратами. Этим решение задачи не исчерпывается, так как на приемном конце необходимо обратное преобразование цифрового сигнала в аналоговый сигнал, что выполняется за счет применения цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Возможность эффективного практического использования АЦП и ЦАП была связана с большими достижениями в конструкции деталей, из которых создавались эти устройства. Если первоначально для их реализации можно было использовать вакуумные лампы, а затем транзисторы, то в эпоху применения АЦП и ЦАП стало возможным для их реализации использовать микросхемы.

Развитие электронной аппаратуры, разработанной для связи, оказало существенное влияние на развитие вычислительной техники. Имеется существенное отличие в задачах, решаемых связной аппаратурой и компьютером. Связь необходима для передачи сигналов на расстояние, а компьютер для вычислений.

Задача вычислений имела актуальность много столетий назад. Однако тогда еще не существовала электронная техника и решение вычислительных задач решалось математическим путем. Например, для перемножения чисел шотландским математиком Джоном Непером в 1617 г. были предложены логарифмы. Это позволило заменить перемножение многозначных чисел их сложением. Им были предложены так называемые палочки Непера, которые пользовались большой популярностью. Затем широко использовались логарифмические таблицы, линейки, а затем механические арифмометры, позволявшие осуществлять четыре арифметических действия.

Следует отметить, что в 1642 г. Блезом Паскалем была разработана механическая машина «Паскалина» и Готфридом Вильгельмом Лейбницем – арифмометр. Лейбниц также описал двоичную систему счисления – один из ключевых принципов построения всех современных компьютеров. Однако, вплоть до 1940-х гг. многие последующие разработки были основаны на более сложной в реализации десятичной системе.

Историю развития вычислительной техники принято делить на периоды. Всю электронно-вычислительную технику принято делить на поколения. ЭВМ относят к тому либо иному поколению в зависимости от типа главных используемых в ней частей, либо от технологии их производства. От элементной базы зависит мощность компьютера, что в свою очередь привело к изменениям в архитектуре ЭВМ, расширению круга ее задач, к изменению способа взаимодействия пользователя и компьютера.

Следует отметить, что на развитие вычислительной техники повлияли достижения в области связи. Прежде всего, это касается элементной базы. Как и в технике связи в компьютерах сначала применялись лампы, затем транзисторы, затем интегральные схемы. Кроме того, для запоминания сигналов двоичной системы счисления использовались триггеры, устройства записи информации на магнитную ленту, которые были разработаны для техники связи. Однако в дальнейшем компьютерные технологии начали применяться в технике связи. Это очевидно на примере развития мобильной связи. Кроме того, отдельные элементы, разработанные для компьютеров, повлияли на развитие техники связи. Так, например, компьютерные цифровые устройства памяти большого объема позволили создать цифровое телевидение.

Дальнейшее развитие цифровых технологий в связи и ЭВМ безусловно будет продолжаться и составит значительную часть решений в области цифровизации в историческом плане.

Однако, рассматривая историю цифровизации, можно вернуться к термину АЦП применительно к временам, когда еще не существовали связь и ЭВМ. Это может вызвать удивление, поскольку АЦП – устройство, созданное на основе современных технологий. Однако в данном случае речь пойдет не об устройстве, а о процессе: «аналого-цифровое преобразование». Как уже было отмечено, этот процесс состоит из трех этапов преобразования: дискретизации, квантования и кодирования. Как ни странно, но эти преобразования применялись на практике более тысячи лет назад.

Применение дискретизации, квантования и кодирования связано с развитием музыкальной культуры на протяжении многих веков. Например, музыка играла важную роль в жизни древних египтян. О значении музыки в Древнем Египте говорят настенные рельефы древних египетских храмов и гробниц с изображением музыкантов. Древнейшими музыкальными инструментами египтян были арфа и флейта.

В период Нового царства египтяне играли на колоколах, бубнах, барабанах и лирах, импортируемых из Азии.

Считается, что в культуре Древнего мира музыка достигла наивысшего расцвета в Древней Греции.

Слово «музыка» имеет древнегреческое происхождение. Развитие теории музыки приписывается Пифагору. Музыка использовалась как предмет образования и воспитания и как составляющая общественной жизни. Она имела огромное значение для греков и в целом для всей позднейшей цивилизации в [5, 6].

О расцвете музыкальной культуры в настоящее время можно судить на основе нотной записи произведений. Нотная запись появилась в начале XI века на основе работ итальянского монаха и учителя пения Гвидо д'Ареццо (Гвидо Аретинский). На основе применения букв ему удалось свести нотописание в единую стройную систему. Однако ноты лишь отражали запись музыкальных произведений, которые создавались по определенным правилам извлечения звуков разных частот и их сложению с обеспечением гармонии. Развитие музыкальной теории в древности не вызывает сомнений. На фресках Древнего Египта, Древней Греции, Ассирии изображены струнные инструменты, являющиеся прототипом современной арфы. Известно, что прототип современного органа (клавишного инструмента) был изобретен во втором веке до новой эры в Александрии. Создание этих инструментов, их настройка были невозможны без основ теории музыки. Отдельные элементы теории музыки в настоящее время известны только из работ Пифагора.

Рассмотрим основные элементы современной музыкальной теории на основе дискретизации, квантования и кодирования. Начнем с термина дискретизация. Музыкальное произведение исполняется в течение определенного временного интервала. Композитор, сочиняя музыку, не устанавливает время исполнения произведения, а устанавливает темп. Темп обычно устанавливается с помощью метронома, который был изобретен венским механиком И.Н. Мельцелем.

Метроном – прибор, снабженный заводным механизмом, который точно отсчитывает длительности, причем в точной, нужной скорости. Выглядит он как деревянная пирамидка, с которой снята одна панель. Снизу закреплен маятник с передвижной гирькой, а на пирамидке шкала с цифрами. Если передвигать гирьку относительно маятника, то в соответствии с тем, около какого числа на шкале ее установить, маятник качается быстрее или медленнее и щелчками отмечает нужные доли такта. В нотках указывается установка темпа в виде надписи М.М. =108. Это означает, что исполняется 108 четвертных нот в минуту. Метроном является своеобразным историческим аналогом задающего генератора в современном АЦП. Дискретизация заключается в том, что весь временной интервал, отводимый на исполнение произведения, делится на равные интервалы-такты. В этом случае метроном является аналогом электрического генератора, размещенного в АЦП и задающего частоту процесса дискретизации. На этом этапе нет практически никакого различия в процессе дискретизации в АЦП и в музыке. В обоих случаях дискретизация выполняется по равномерному закону.

Но это только на первом этапе. Дело в том, что в музыке такт делится на доли. Количество долей в такте может быть различным. Так, например, если разделить время, отводимое на один такт на четыре части, то доля будет составлять $\frac{1}{4}$ его длительности, и будет называться «одна четверть». Если поделить четверть на два, получим «одну восьмую». Дальнейшее деление даст «одну шестнадцатую», одну «тридцать вторую» и т.д. Кроме того, сочиняя музыку композитор может «заполнять такт», используя три четвертные ноты (вальс), две четвертные ноты (марш) и т.п. То есть, в двух соседних тактах количество нот может быть различным, однако применяя различные доли, композитор должен выбрать такое их количество, чтобы суммарное время звучания каждого такта было одинаковым.

Таким образом, в музыке применяется первичная дискретизация по равномерному закону, а также определенным образом организованная вторичная дискретизация (субдискретизация) и следует признать, что дискретизация в музыке гораздо сложнее чем в современных АЦП, применяемых в технике связи.

Следующим процессом в АЦП является квантование. Следует отметить, что в связанном АЦП квантуется уровень сигнала в музыкальной акустике – частота.

При построении музыкального произведения используется определенное количество фиксированных по частоте звуков, составляющих так называемый звукоряд. Звукоряд является категорией «изобретенной» природой, а не человеком. Существует природный звукоряд, на основе которого был создан звукоряд, использующийся в настоящее время, т.е. музыкальный звукоряд.

Как человек узнал о существовании природного звукоряда? Природный звукоряд образуется в результате колебания струны. Такой «струной» первоначально являлась тетива самого первого лука, которая при выстреле колебалась, издавая набор звуков, соотношения частот которых используются и в настоящее время. Как известно, струна, колеблясь, образует стоячие волны. Связисту хорошо известно, что длина стоячей волны должна составлять целую часть от длины колеблющегося тела. Таким образом, струна колеблется не только целиком, но и частями, образуя гармоники, составляющие некоторый набор частот. Целая струна образует первую гармонику, половина струны вторую, третья часть

струны – третью и т.д. Во сколько раз меньше колеблющаяся часть струны, во столько раз выше частота колебаний.

Натуральный звукоряд для струны, колеблющейся с частотой 24 Гц, представлен в табл. 1.

Таблица 1.

1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{11}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{13}$	$\frac{1}{14}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{16}$
24 Гц	48 Гц	72 Гц	96 Гц	120 Гц	144 Гц	168 Гц	192 Гц	216 Гц	240 Гц	264 Гц	288 Гц	312 Гц	336 Гц	360 Гц	384 Гц

Верхняя строка таблицы определяет часть от общей длины колеблющейся струны, а нижняя – частоты соответствующих им гармоник. В нижней строке выделены частоты, являющиеся границами октавы. Следует отметить, что такие же соотношения получаются, если колеблется не твердое тело, но и воздух в определенном объеме.

Обратим внимание на то, что натуральный звукоряд имеет логарифмическую структуру. Если первая гармоника имеет частоту 24 Гц, то вторая – 48 Гц. Первая и вторая гармоника образуют октаву. Как известно, октава имеет граничные частоты, отличающиеся в два раза. Вторая октава образуется частотами 48 Гц и 96 Гц. Между граничными значениями появилась промежуточная частота 72 Гц. Третья октава (частоты 96 Гц-192 Гц) уже содержит три промежуточные частоты, а четвертая семь частот.

Звукоряд можно было бы продолжить, но практически это не имеет смысла, поскольку гармоники, образуемые частью струны меньшей $\frac{1}{16}$, имеют слишком малую энергию и практически не слышимы. Учитывая природный звукоряд, казалось бы, многострунный инструмент надо настраивать в соответствии с приведенными в табл. 1 соотношениями. Действительно на многострунном инструменте исполнитель может одновременно извлекать звуки с помощью нескольких струн. Сочетание звуков при определенных соотношениях может вызывать диссонанс. С другой стороны, добавление струн делается с целью увеличения звуковой палитры. (Исключением является балалайка, в которой делается одинаковая длина струн и одинаковая их частотная настройка). Отметим, что согласно табл. 1, частотные интервалы между соседними звуками (24 Гц) являются достаточно большими. Известно, что в низкочастотном диапазоне человек различает два тона, отличающихся на 1 Гц в среднечастотном диапазоне 2-3 Гц, в высокочастотном диапазоне на 5 Гц. В диапазоне, в котором настраиваются музыкальные инструменты (16-4700 Гц), человек может различать около 1500 различных звуков.

Связиста может удивить диапазон 16-4700 Гц. Ведь известно, что при звуковом вещании 1-го класса верхняя частота диапазона установлена практически равной 15000 Гц. Зачем, если инструменты настраиваются в гораздо более узком диапазоне? Дело в том, что если струна настроена на частоту 4700 Гц, то излучаемая ею третья гармоника составляет $4700 \times 3 = 14100$ Гц. На эту частоту не надо ничего настраивать, она образуется автоматически. А передавать ее надо, поскольку она звучит в зале, и слушатель ее воспринимает.

Итак, в диапазоне 16-4700 Гц человек способен различить около 1500 различных звуков. А сколько же звуков целесообразно использовать при построении музыкальных инструментов? Естественно, что количество настраиваемых элементов у музыкального инструмента должно быть возможно

меньшим. Примером может служить скрипка, имеющая четыре струны. Однако она не может быть взята за основу. Дело в том, что, плавно меняя положение пальца, прижимающего струну к грифу, скрипач так же плавно меняет частоту звука. Иными словами, он «настраивает» инструмент на определенную частоту звука во время исполнения произведения. Иначе выполняет свою задачу исполнитель на арфе или фортепиано. Он ничего не может подстраивать и изменять во время исполнения. Инструмент настроен перед концертом и позволяет воспроизводить определенный набор фиксированных частот. Аналогичная ситуация у исполнителей на духовых инструментах.

Какое же количество фиксированных по частоте звуков используется на практике? Ответ на этот вопрос может получить любой из нас, если подойдет к роялю и подсчитает количество белых и черных клавиш. Их всего 88 штук. А рояль охватывает практически весь частотный диапазон! А скрипка? Хотя скрипач может извлечь около 400 частот, на практике он использует всего лишь порядка 50, даже выступая соло и исполняя сложное произведение. Тем более он не может отойти от этого правила, играя в ансамбле с другими инструментами, с которыми надо «считаться».

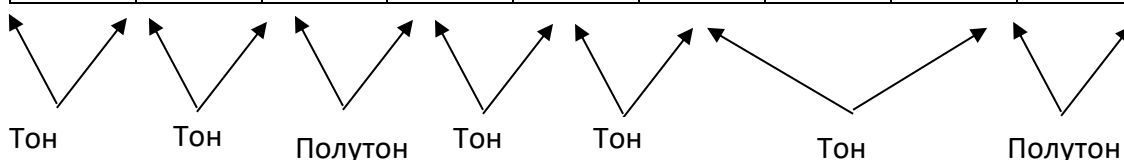
Итак, количество воспроизводимых частот выбрано порядка 88. Отметим, что произошел процесс квантования частот. Как же на практике осуществляется выбор дискретных значений частот? Для этого обратимся к истории. Музыканты, а они уже были профессионалами в древнем Египте, опытным путем пришли к необходимости изменения природного строя. Дело в том, что, развивая технику игры, они начали использовать аккорды. Как известно аккордом называют одновременное использование не менее трех звуков. Практика показала, что приятное звучание аккорда получается, если частоты соотносятся как 4:5:6. В природном звукоряде, как это очевидно из табл. 1, имеется только одно такое сочетание, это 192:240:288. А музыканты хотели, чтобы такое сочетание можно было бы получить, начиная с любой частоты звукоряда. Для этого природный звукоряд был «модернизирован». Модернизация свелась к изменению численных значений двух частот и удалению одной частоты.

В табл. 2 в верхней строке показан природный звукоряд и в нижней – результат модернизации.

Что получилось в результате? Возьмем частоты через один интервал 192, 240 и 288 Гц. Поделим 192 на 240. Получим 0,8 (или 4:5). Поделим 240 на 288. Получим 0,833 (или 5:6). Таким образом, частоты относятся друг другу как 4:5:6. Можно показать, что и для любой другой выбранной частоты это соотношение выполняется. Этот ряд, известный еще в древней Греции, обычно называется на русском языке «лад». На других языках он может быть переведен на русский язык как «согласие», «порядок». Если взять из второй строки значение двух соседних частот и вычислить их отношение, то они окажутся разными. Так отношение $216/192=9/8$, $240/216=10/9$, а отношение $256/240=16/15$. Если близкие величины $9/8$ и $10/9$ принять за «целый тон», то интервал $16/15$ может быть принят как «полутон».

Таблица 2.

192	216	240	264	288	312	336	360	384
192	216	240	256	288	320	-----	360	384



Таким образом, звукоряд образовался чередованием: тон-тон-полутон-тон-тон-тон-полутон. Однако, это лишь в том случае, если в качестве начального звука выбирается звук с частотой 192. Если же начать с частоты 216 (соседняя ячейка), то последовательность будет другой «тон-полутон-тон-тон-тон-полутон-тон». С какой бы частоты не начать отсчет, чередование тонов и полутонов (т.е. лад) будет иным. Каждому такому ладу греки дали название. Их было семь, по числу звуков в октаве. Лад, образующийся от частоты 192, назывался лидийским.

В дальнейшем были введены дополнительные звуки, частоты которых делили интервалы целых тонов пополам. Поскольку таких интервалов, как следует из табл. 2, пять, то были введены пять дополнительных частот. Напомним, что у рояля каждая октава содержит пять черных клавишей, что и отражают данную идею.

Введение дополнительных звуков было сделано очень давно, задолго до появления фортепиано. Насколько? Практически за 2500 лет. Кем? Пифагором. Обычно имя Пифагора связывают с математикой. В школе учащиеся знакомятся с теоремой Пифагора. Однако мало кто знает, что Пифагор был еще и великолепным музыкантом. Им был предложен математический ряд, который носит название: «ряд Пифагора». Связисты привыкли к тому, что многие частотные параметры стандартизированы. На основе ряда Пифагора в музыкальной акустике действуют стандарты, в том числе и на величины тех 88 частот, на которые настраивают струны рояля. По этому стандарту (пианино модели Л-120) частота 349,23 Гц соответствует ноте «фа» первой октавы.

Следует отметить, что струны настраиваются с высокой точностью (до сотых долей Гц).

Теперь можно сравнить основные характеристики процесса квантования в современном АЦП и в музыкальной акустике.

Квантование в обоих случаях осуществляется по логарифмическому закону с основанием 2.

При квантовании характеристика квантователя (или музыкального строя) разделяется на сегменты (или октавы).

В АЦП (кроме первого), деление каждого сегмента осуществляется на 16 равных (по абсолютному значению) частей (интервалов). В музыкальной акустике на 12 равных интервалов, но по относительному значению.

В электронном АЦП, при увеличении номера сегмента на единицу, величины интервалов удваиваются. В темперированном музыкальном строе увеличение номера октавы приводит к увеличению частотного интервала между соседними нотами так же в два раза.

Сравнивая процессы квантования в АЦП и в музыкальной акустике, следует отметить и различие. В АЦП квантуются уровни сигналов, а в музыкальной акустике – частоты. Однако это не имеет принципиального значения, поскольку речь идет о сравнении процессов, а не устройств. Однако следует отметить цели, с которыми осуществляется процесс квантования по логарифмическому закону. В первом случае (АЦП) улучшается отношение сигнал/шум, во втором (музыкальная акустика) достигается гармония звуков, поскольку удается избежать диссонансов, которые при исполнении произведения, воспринимались бы как помехи.

Заканчивая рассмотрение вопроса квантования в музыкальной акустике, следует отметить, что квантование рассмотрено на уровне частотной настройки музыкального инструмента, например, рояля. Однако на практике музыкант исполняет музыкальное произведение, которое построено на выборе лада.

Дело в том, что музыкальная октава состоит из 12 полутонов. Для ее воспроизведения в рояле используется 12 клавишей: 7 из них имеют белый цвет, а

5 – черный. При сочинении произведения композитор использует не 12 звуков октавы, а только семь. Их применение осуществляется на основе выбранного лада. Их всего два: «мажор» и «минор». Мажорный звукоряд, например, образуется чередованием: тон-тон-полутон-тон-тон-тон-полутон. Звукоряд может начинаться с любого полутона октавы и поскольку полутонов 12, мажорный звукоряд имеет 12 вариантов. Например, если начать звукоряд с первого звука октавы (он имеет название «До»), то остальные ноты данного звукоряда: «Ре, Ми, Фа, Соль, Ля, Си»). Такой звукоряд, состоящий из семи нот, называется ладом «До мажор».

Кроме мажорного лада, композитор может использовать и минорный лад, который также имеет 12 вариантов построения. Таким образом, в музыкальной акустике используется всего 24 лада. Каждый из них представляет набор звуков, выбираемых по определенным правилам, определяющих их частоты. Поэтому в отличие от АЦП, применяемых в технике связи, в музыкальной акустике используется 24 варианта использования частот квантования при создании музыкального произведения.

И наконец, следует обратиться к процессу кодирования. Конечно, во времена древней Греции не существовало кода Хемминга, и вряд ли использовался сам термин «код». Однако музыкальные произведения стремились сохранить, а для этого их надо было записывать. Естественно, что последовательность звуков, их громкость, продолжительность, темп исполнения очень трудно описать словами, поэтому для сохранения произведений использовался код, который в настоящее время называется «ноты».

Как известно для расшифровки кода должен быть использован «ключ». Для записи нот используются пять линий. Ноту можно изобразить кружком на линии, или кружком между линиями. Всего десять нот. А всего у рояля 88 клавиш. Частично выход из положения может быть достигнут добавлением линий в нужном месте. Однако слишком много добавленных строчек неудобно считать. Не следует забывать, что часто музыкант исполняет произведение без предварительного разучивания или как говорят «с листа».

Поэтому принято использовать пять линий для размещения нот в скрипичном ключе (играемых обычно правой рукой) и те же пять линий в басовом ключе (играемых обычно левой рукой). Линия, на которой расположена «ключевая» нота (вторая снизу) находится в центре спирали скрипичного ключа. Эта нота соль первой октавы. От нее отсчитывается положение соседних нот. Линия, отмеченная точкой на басовом ключе (вторая сверху) служит для размещения ноты «фа» малой октавы. Существуют и другие ключи: теноровый альтовый и т.п.

В нотной записи имеются знаки, определяющие время звучания звукового тона, громкости, паузы и т.п. В настоящее время музыкантам знакомы и ноты, записанные несколько столетий назад. Однако для того, чтобы исполнить записанные произведения, необходимо предварительно расшифровать код, что сделать не так-то просто по той простой причине, что авторы не оставили «ключа».

Таким образом, в музыкальной акустике, так же как в связном АЦП применяется кодирование. Оно обеспечивает запись музыкального произведения на бумаге и при различии кода для разного вида инструментов, обеспечивает совместимость их совместного звучания в оркестре.

Литература

1. Аджемов А.С., Кобленц А.И., Гордиенко В.Н. Многоканальная электросвязь и каналобразующая телеграфная аппаратура. – М.: Радио и связь, 1989. – 415 с.

2. Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Справочник. СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 224 с.
3. Власов И.И., Птичников М.М. Измерения в цифровых сетях связи. – М.: ПОСТМАРКЕТ, 2004.
4. Иванов В.И., Гордиенко В.Н., Попов Г.Н. и др.; Цифровые и аналоговые системы передачи. Учебник для вузов; Под ред. Иванова В.И. – М.: Радио и связь, 2007.
5. Газарян С.С. В мире музыкальных инструментов. – М.: Просвещение, 1989.
6. Алдошина И., Приттс Р. Музыкальная акустика: Учебник для высших учебных заведений. – СПб., 2006.