

Ян Синклер

**ВВЕДЕНИЕ
В ЦИФРОВУЮ
ЗВУКОТЕХНИКУ**

*Перевод с английского
Н. В. Пароля*



**МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1990**

ББК 32.871

С 38

УДК 681.84:534.85

Ian R. Sinclair

INTRODUCING DIGITAL AUDIO

PC Publishing, London, 1988

Синклер Ян.

С 38 Введение в цифровую звукотехнику: Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 80 с.: ил.

ISBN 5-283-02498-9

Дано популярное изложение основ техники цифровой записи и воспроизведения звука. В форме, доступной для понимания профессионально неподготовленными читателями, рассмотрены вопросы аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования звуковых сигналов, записи видеосигналов. Описаны системы цифровой записи на компакт-дисках и магнитной ленте, методы синтеза звука с помощью цифровой техники и микропроцессоров.

Для широкого круга читателей, интересующихся цифровой электроникой, любителей бытовой звуко- и видеотехники.

**С 2303030000-003
051 (01) -90 193-90**

ББК 32.871

**ISBN 1-870775-05-8 (англ.)
ISBN 5-283-02498-9 (рус.)**

© PC Publishing, 1988

**© Перевод на русский язык
Энергоатомиздат, 1990**

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Предлагаемая вашему вниманию книга посвящена очень интересной теме – цифровой записи звука на диски и магнитные ленты. Рассказ о том, как осуществляются цифровая запись и воспроизведение звука, не требует особой подготовки. Читатель, знакомый с основными элементами цифровой техники, может опустить две главы, в которых дается их описание, без ущерба для понимания дальнейшего материала.

Автор подчеркивает, что он неставил перед собой цели изложить теоретические основы и практические схемы реализации цифровой записи, а стремился дать общее представление о многообразии и сложности проблемы. Однако техника цифровой записи и воспроизведения звука – предмет достаточно сложный, поэтому выдержать общедоступный уровень изложения всей тематики автору в полной мере не удалось. Это, в частности, относится к вопросам кодирования и методам контроля и исправления ошибок. К тому же добавились объективные трудности, связанные, в частности, с тем, что фирмы-изготовители аппаратуры не открывают пользователю ряд технических особенностей. Для массового потребителя эти тонкости не представляют интереса. Желающим более подробно ознакомиться с техникой кодирования звуковых записей может быть полезна отечественная литература, в частности книга В. Щербины "Цифровые магнитофоны" ("Радио и связь", 1986 г.), для чтения которой нужна определенная подготовка. В целом автору удалось выполнить свое намерение – в доступной форме изложить основные идеи цифровой записи и воспроизведения звука.

Н. В. Пароль

ПРЕДИСЛОВИЕ

Неизбежность внедрения цифровых методов в бытовую звуковую аппаратуру была осознана не сразу. Методы цифровой записи звука известны много лет и стали обычными для профессиональных инженеров звукозаписи. Но первым устройством, которое принесло в домашние условия "звук в цифрах", стали компакт-диски (КД), хотя еще раньше "лазервидение" с ограниченным успехом пыталось прорваться на видеорынок. Ко времени написания настоящей книги КД прочно утвердились и сегодня газетные обзоры уделяют больше внимания традиционному КД, нежели других носителей звука, таких как магнитные ленты или долгоиграющие пластиники.

Развитие этой техники потребовало методов и схем, ранее чуждых техническим специалистам и радиолюбителям, имевшим опыт работы со звуковыми аналоговыми схемами. Принципы и практика цифрового звука почти ничего не заимствовали из аналоговой техники звукозаписи: они значительно ближе и доступнее инженерам-специалистам в области компьютерной техники, чем взрослому поколению инженеров звука. Отсутствие специальной литературы в результате создавало ощущение, что цифровая техника и математические основы кодирования сигналов уже хорошо знакомы читателям. Но это было только ощущением, так как цифровые схемы совершенно непохожи на линейные (анalogовые). Первые две главы этой книги посвящены именно основам цифровой техники.

Цель книги — проложить "мостик" понимания между техниками и романтическими радиолюбителями; она не рассчитана на профессиональных инженеров по звуку. В книге изложены принципы и методы, о без углубления в математические основы и теорию. Моя цель — показать, из чего состоит цифровая часть звукового сигнала, особенно в новых системах, таких как КД и цифровые звуковые ленты, и при этом не входить в детали процесса дискретизации сигналов, коррекции шебек и других сложных тем. В книге рассмотрены цифровые методы применительно к системам КД и магнитным цифровым лентам, не касаясь техники усиления звука.

Автор очень благодарен всем, кто помог осуществить эту попытку, особенно Philips Ltd и Sony (UK), предоставившим важную информацию. Я многим обязан и признателен Филу Чэпмэну, который поддержал мою инициативу и издал эту книгу.

Глава 1. ЦИФРОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ ВО ВРЕМЕНИ

ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Началом электроники было радио, и полезно вспомнить, что первым применением радио была передача сообщений в коде Морзе. Сигнал передавался путем включения и выключения передатчика, который в те времена представлял собой искровой генератор, включенный между антенной и землей на больший (тире) и меньший (точка) интервал времени. Такая форма посылки – один из возможных вариантов цифрового сигнала. Сигналы в коде Морзе сегодня называются цифровыми широтно-импульсно модулированными сигналами (рис. 1.1). До изобретения лампы сигналы в коде Морзе были единственным видом модулированных сигналов. С изобретением лампы в 1920 г. стало возможным модулировать несущую частоту звуковым сигналом.

Пример формы звукового сигнала показан на рис. 1.2. Как видно, звуковой сигнал периодически изменяется, причем эти изменения происходят непрерывно. Звуковой сигнал может быть преобразован в напряжение, как, например, это делается с помощью микрофона; напряжение можно записать или передать по радио. Важно, чтобы частота и характер изменения напряжения точно соответствовали частоте и характеру изменения звуковой волны. Амплитуда напряжения должна быть пропорциональна амплитуде звуковых колебаний и, таким образом, соответствовать громкости звука. Частота напряжения, так же как и частота звуковых колебаний, соответствует высоте воспроизведенного тона. Итак, форма электрического напряжения является точной копией формы звукового колебания и несет о ней полную информацию.

С отмеченным обстоятельством связан круг проблем, присущих аналоговой технике записи звука. Характер звукового колебания весьма сложен и изначально несет в себе ряд тонких, порой чисто психологических особенностей восприятия звука. Например, при всех огромных возможностях современной технологии мы сегодня не в состоянии воспроизвести характер звучания скрипки Страдивари. Никакие эксперименты с деревом и лаками не позволяют создать инструмент, передающий неповторимое звучание оригинала. Характер звучания большого оркестра не поддается никакому прямому анализу, к тому же надо добавить особенности восприятия звука нашим собственным ухом. Человеческое ухо – уникальный приемник звука; оно воспринимает ничтожные уровни звука с такими нюансами, которые теоретически обнаружить невозможно. Вместе с тем история знает массу мнений о высоком качестве записи и воспроизведения звука как с помощью первых рупорных граммофонов, так и с применением электронных сис-

• — • — • — •

а)

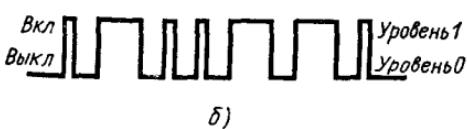


Рис. 1.1. Код Морзе: значащая часть сигнала — импульсы и длительность импульсов — составляющие двоичного кода:

а — запись кода; б — передача кода

тем. В прежние времена звукозапись считалась чудом и воспроизведение голоса Гали — Курчи казалось миражом. Позже восприятие звука стало более острым и строгим и дальнейшее развитие техники потребовало серьезных усовершенствований.

Техника записи и воспроизведения звука прошла длинный и сложный путь — от восковых до долгоиграющих дисков. На каждом этапе развития казалось, что возможности дальнейших усовершенствований исчерпаны, а через несколько лет убеждались в том, что это не так. И множество проблем связано с носителем записи. Остановимся на трудностях, связанных с изготовлением первого металлического оригинала фонограммы. Для записи используется миниатюрный резец, перемещение которого должно строго соответствовать характеру изменения электрического сигнала. Барабанная перепонка человеческого уха легка и иежна, а заставить резец с такой же легкостью резать металл, очевидно, невозможно. Для управления резцом требуются значительные мощности (от 500 до 1000 Вт) и все же не удается зафиксировать все тонкости звукового сигнала. Изготовление копий также вносит дополнительные искажения.

При воспроизведении игла звукоснимателя перемещается в канавке пластинки. Сама по себе игла легка, но она механически связана с преобразователем колебаний иглы в электрический сигнал и в целом то уже достаточно сложная и весомая конструкция. Звукосниматели являются источником новых искажений.

Представляется, что магнитная запись звука устраниет отмеченные трудности. Однако проблема магнитной записи состоит в том, что процесс записи по своей природе нелинейен. На рис. 1.3 показана зависимость остаточной намагниченности магнитного материала от тока, протекающего через катушку, намагничающую материал (ленту).

При очень слабых токах через катушку лента вообще не намагничивается, а при больших токах наступает насыщение, ограничивающее

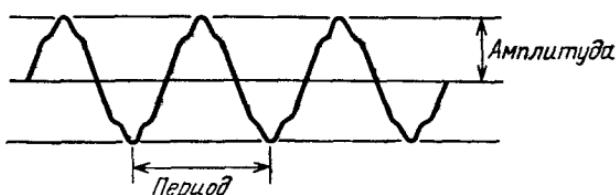
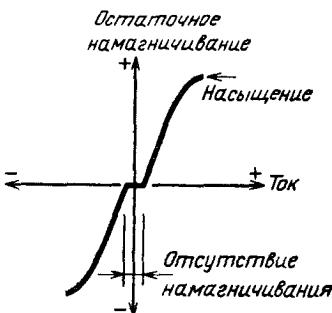


Рис. 1.2. Типичная форма звукового колебания (упрощенно); реально звуковое колебание всегда более сложно; оно никогда не бывает чисто синусоидальным

Рис. 1.3. Типичная характеристика намагничивания ленты. В большей части она нелинейна. Видна область, в которой слабые токи не оставляют следа на ленте (не намагничают ленту)



амплитуды записываемых сигналов. Диапазон записываемых частот зависит от скорости движения ленты и параметров записывающей головки. Записанная лента имеет относительно высокий уровень шумов, которые хорошо прослушиваются при воспроизведении тихой и нежной музыки. Для решения перечисленных проблем можно использовать ультразвуковое смещение, широкие ленты, высокие скорости движения ленты.

Широко используемые для усиления транзисторы не являются линейными элементами, а история высококачественного звукоспроизведения — это история развития схемотехники, попыток "обойти" природную нелинейность сначала ламп, а затем транзисторов. Установлено, что каждые 10 лет обнаруживаются новые виды искажений и свыше 10 лет тратится на их устранение; инженеры звукозаписи хорошо знают, что многие критики, высоко оценивающие качество исходного звука, не могут дать такой же оценки звуку записанному. Вообще электрические искажения устраниТЬ проще, чем механические; в целом слабыми звеньями в звукоспроизведении являются собственно процесс записи звука и громкоговорители.

Использование цифровой техники открывает возможность с новых позиций обозреть процесс звукозаписи.

ЦИФРОВЫЕ СИГНАЛЫ

Цифровой сигнал — это изменение напряжения, для которого время возникновения изменения более существенно, чем точностная характеристика самого изменения напряжения. В цифровой технике к форме и амплитуде цифрового сигнала не предъявляется жестких требований. Цифровые сигналы представляют собой импульсы прямоугольной формы. Цифровой сигнал характеризуется изменением напряжения от одного уровня к другому, обычно между 0 и + 5 В, причем значения этих уровней точно не оговариваются. Например, за уровень 1 принимается напряжение в интервале от 2,4 до 5,2 В, а за уровень 0 — напряжение в интервале от 0 до 0,8 В. Цифровая электроника в отличие от аналоговой, оперирующей формой и напряжением сигнала, использует дискретные уровни напряжений, соответствующих 0 или 1. В дискретных схемах импульсы включают и выключают различные цепи с помощью

Логических элементов. Хотя форма импульса некритична, переход от одного уровня к другому должен происходить по возможности быстро. Не предъявляется жестких требований к амплитуде импульса при условии, что напряжение надежно перекрывает уровни 0 и 1. Использование только двух уровней очень удобно как для применения электронных приборов, так и для записи на магнитную ленту. Биполярный или полевой транзистор может быть полностью закрыт или открыт путем подачи соответствующего напряжения на базу или затвор, причем эти состояния фиксируются значительно проще, чем любые "промежуточные". Использование двух состояний позволяет избежать ошибок, возможных, например, при работе транзистора с 10-уровнями напряжений между двумя крайними (0 или 1). Не предъявляется жестких требований и к форме напряжения (тока) базы или затвора, поскольку транзистор должен быть только открыт или закрыт. Устрашаются проблемы линейности характеристик, поскольку никто не усиливается и амплитуда выходного сигнала в цифровой технике практически равна уровню входного сигнала. При счете используются только две цифры: 0 и 1. Это может показаться неудобным. Однако необходимость счета возникает не всегда. Например, необходимость счета отсутствует при управлении двумя газонаполненными лампами, когда одна из них включена, а другая выключена. Если же необходимо включать одну из ламп, например, после второго импульса на входе, а другую — через четыре импульса на том же входе, то эта задача требует счета.

Счет с использованием двух цифр производится в двоичной системе счисления. Существуют различные системы счисления, но двоичная имеет ряд достоинств. Как и в случае десятичной системы в ней важно понятие разряда. Разряд представляет собой число — степень, в которую возводится 10, справа для младшего разряда: единицы — 0 (10^0), десятки — 1 (10^1), сотни — 2 (10^2), тысячи — 3 (10^3) и т. д. Например, число 362 в десятичной системе счисления можно представить как 3 сотни ($3 \cdot 10^2$) = 300, 6 десятков ($6 \cdot 10^1$ = 60) и 2 единицы ($2 \cdot 10^0$ = 2). Для двоичной системы счисления справедлива аналогичная схема: 1, 2, 4 \div 2², 8 \div 2³ и т. д. Ниже показано, как число, записанное в двоичной системе счисления, выражается в десятичной системе, и наоборот.

Переход от двоичных чисел к десятичным

Номер разряда (степень 2)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Десятичное число	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512
Номер разряда (степень 2)	10	11	12	13	14				15	
Десятичное число	1024	2048	4096	8192	16 384				32 768	

Чтобы перейти от двоичного числа к десятичному, надо найти десятичные числа, соответствующие единицам во всех разрядах двоичного числа (где они есть) и сложить их. Номера разрядов отсчитываются права, начиная с нуля.

Например, число 10010110 содержит 1 в 1, 2, 4 и 7 разрядах. Соответствующие десятичные числа составляют 2, 4, 16 и 128. Складывая их ($2 + 4 + 16 + 128$), получим 150.

ПЕРЕХОД ОТ ДЕСЯТИЧНЫХ ЧИСЕЛ К ДВОИЧНЫМ

Переход от десятичных чисел к двоичным делается на бумаге делением десятичного числа на 2; при этом выписывается остаток. Двоичное число считается снизу.

Пример: перевести число 583 из десятичной системы в двоичную

$$\begin{aligned} 583 / 2 &= 291 \text{ остаток } 1 \\ 291 / 2 &= 145 \text{ остаток } 1 \\ 145 / 2 &= 72 \text{ остаток } 1 \\ 72 / 2 &= 36 \text{ остаток } 0 \\ 36 / 2 &= 18 \text{ остаток } 0 \\ 18 / 2 &= 9 \text{ остаток } 0 \\ 9 / 2 &= 4 \text{ остаток } 1 \\ 4 / 2 &= 2 \text{ остаток } 0 \\ 2 / 2 &= 1 \text{ остаток } 0 \\ 1 / 2 &= 0 \text{ остаток } 1. \end{aligned}$$

Число 583 в двоичной системе записывается как 1001000111.

Наибольшее число, которое может быть записано в двоичной системе счисления (как и в любой другой), зависит от числа используемых разрядов. В случае только двух разрядов (или бит) мы сможем сосчитать числа в интервале от 0 до 3. Используя 8 разрядов (называемых байтом), можно оперировать с числами от 0 до 255, а при 16 битах (16 бит образуют слово) возможности расширяются от 0 до 65 535.

Цифровые схемы – переключающие. В них используется значительное число транзисторов, поэтому они изготавливаются в виде интегральных схем (ИС). Эти ИС могут быть изготовлены на базе биполярных или МОП (металл–оксид–полупроводник)-транзисторов; оба варианта достаточно широко распространены. На МОП-транзисторах изготавливаются блоки памяти и микропроцессоры. Биполярные транзисторы используются там, где требуется высокое быстродействие и достаточно большие токи; эти параметры особенно существенны для выходных устройств ЭВМ и промышленных контроллеров. Цифровые ИС, используемые в цифровой звуковой технике, как правило, сконструированы для конкретного узкого назначения.

Достоинства двоичных сигналов особенно ярко проявляются в технике магнитной записи: для записи 0 или 1 достаточно полностью намагнитить ленту в том или ином направлении. В этом случае используется эффект насыщения магнитного материала, для чего большинство магнитных материалов идеально подходит. При этом отпадают жесткие требования к степени намагниченности материала, важно только направление намагничивания. Можно конструировать записывающие и воспроизводящие головки различными и увеличить плотность записи (число сигналов на заданной длине дорожки).

Шумы много меньше записываемых цифровых сигналов. Это обстоятельство облегчает задачу снятия копий, поскольку шумы копирования не ухудшают качества записи, как это происходит при аналоговой записи. Поскольку линейность и шумы — две главные проблемы записи на ленту (или другой магнитный носитель), ведущие студии звукозаписи переходят на изготовление цифровых оригиналов фонограмм.

При магнитной цифровой записи нет проблемы линейности, нет жестких требований к форме и размерам намагниченных "точек", важно только их число. Шумы могут сказываться на точности счета, и далее будут рассмотрены методы, минимизирующие вероятность ошибок.

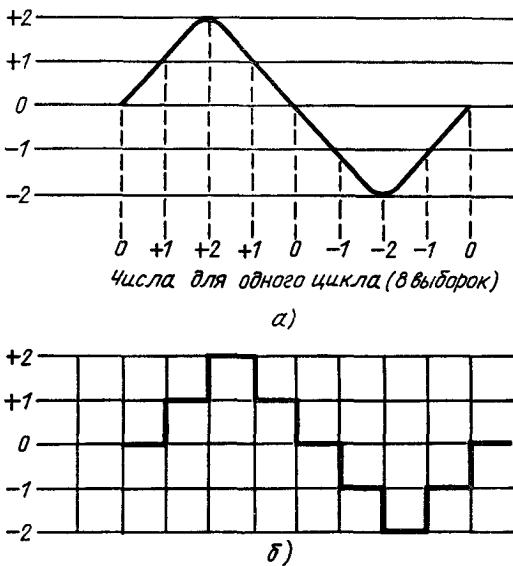
Достоинства цифровой записи проявляются и при использовании дисков и даже в большей степени, чем при записи на магнитную ленту. Принятый метод записи двоичных сигналов на плоский пластиковый диск состоит в формировании микроуглублений на поверхности диска; при воспроизведении "1" воспринимается как результат изменения характера отражения луча лазера от поверхности диска. Следует отметить, что размеры микроуглублений также некритичны, поскольку при чтывании лучом лазера только группа углублений формирует воспроизводимый сигнал. Далее будет показано, что процесс в действительности более сложен, чем приведенное краткое описание, что система записи и воспроизведения с КД более отработана, чем цифровая запись на ленту. Основные принципы записи просты; не требуется резца при резке перемещающегося материала; записывающий луч лазера включается и выключается в соответствии с двоичным сигналом. При воспроизведении информация считывается лучом маломощного лазера. Процесс чтывания не требует перемещения звукоснимателя и происходит без механического контакта с собственно диском.

Копирование КД — процесс более сложный, чем копирование долгоиграющих пластинок; требуются большие затраты на оборудование, процессы контроля оказываются весьма дорогостоящими; однако все это окупается достоинствами цифровой записи. Обычно КД меньше изнашиваются, чем долгоиграющие пластинки. Высокая устойчивость Д к износу — большое достоинство КД; их высокая стоимость быстро купается при использовании в автоматических электропроигрывающих устройствах в ресторанах и других общественных местах. Распространение КД способствует созданию фонотек, приобретение дисков окупается, диски могут быть проданы за хорошую цену, поскольку в эксплуатации качество их практически не ухудшается.

ПЛАТА ЗА КАЧЕСТВО

Ни какие достижения не даются без затрат, и плата за качество цифровой записи и воспроизведения состоит в необходимости преобразования аналоговых сигналов в цифровые и обратно, что требует существенного увеличения скорости обработки данных. Электрический аналог звукового сигнала необходимо преобразовать в цифровую форму. Такое преобразование следует выполнять, когда сигнал имеет достаточную амплитуду (несколько вольт) и намного превышает уровень шума.

Рис. 1.4. Квантование аналогового сигнала (а) – нуль считается за один уровень; каждая часть сигнала отображается целым числом; изображение квантованного сигнала (б)



Каждой части сигнала необходимо присвоить определенное число, значение которого пропорционально напряжению сигнала. Эта задача связана с двумя проблемами цифровых систем – разрешением и временными характеристиками системы.

Рассмотрим пример. Пусть необходимо закодировать сигнал, напряжение которого составляет 4 В от пика до пика (рис. 1.4, а), и в нашем распоряжении есть целые числа от -2 до $+2$. Поскольку половины разряда не существует, значения напряжения между $-0,5$ и $+0,5$ В в любом временном интервале кодируются как 0, значения напряжения между $0,5$ и $1,5$ В – как 1 и т. д.

Каждой части напряжения (в одинаковые интервалы времени) будет соответствовать число в интервале от -2 до $+2$. Результат кодирования (эта операция называется квантованием) показан на рис. 1.4, б; получилась, образно выражаясь, "блок-схема" исходного напряжения; если квантованное напряжение разумно "сгладить", то получится нечто близкое к оригиналу. Произведено квантование по пяти уровням: бесконечное множество уровней напряжения реального сигнала сведено к пяти. Это пример очень грубого квантования. В действительности следует использовать значительно большее число уровней квантования, например, как показано на рис. 1.5. Чем больше уровней квантования, тем ближе квантованное отображение сигнала к оригиналу. Для грубой оценки степени искажений сигнала рассмотрим случай передачи по радио с частотой несущей 500 кГц звукового сигнала с частотой 10 кГц. По времени одна длина звуковой волны займет 50 длин радиоволн, т. е. звуковой сигнал в модулированном высокочастотном сигнале представлен 50 раз; иначе – звуковой сигнал подвергнут квантованию по 50 уровням. Можно представить себе "качество" квантования, реализуемое во многих системах с применением частоты несущей 110 кГц. Идею пере-

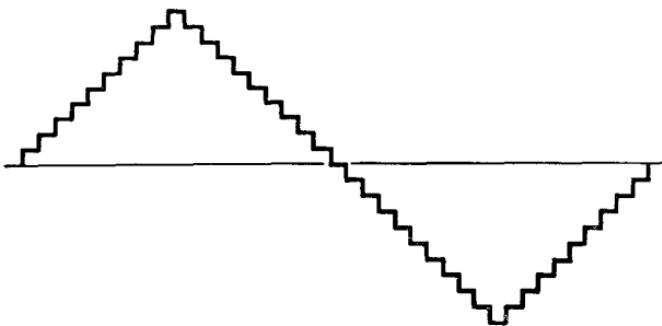


Рис. 1.5. Результат квантования с большим числом уровней. Для наглядности .
эффекта увеличения числа уровней форма исходного сигнала принята треугольной

дачи звука путем подобных выборок ни в коем случае нельзя считать новой; она внутренне присуща процессу модуляции в радиотехнике и в течение многих лет оправдала себя. Сказанное также относится к частотной модуляции, при этом требуется обеспечить достаточно широкий диапазон изменения частоты, что облегчает процесс квантования. Среди всех путей передачи звуковых сигналов частотная модуляция наиболее удобна для передачи двоичных сигналов, когда одна частота соответствует 1, а другая 0.

Здесь возникает вторая проблема: при большом числе уровней квантования запись в двоичной форме требует большого количества чисел. Предположим, что наивысшая частота звукового сигнала выбирается раза за цикл. Это означает, что для воспроизведения наивысшей звуковой частоты 20 кГц потребуется частота выборки 80 кГц. Даже инусоидальный сигнал такой частоты записать непросто, а в цифровом варианте необходимо записывать прямоугольные импульсы, что вызывает серьезные трудности. Только из этого примера видно, что цифровая запись значительно сложнее аналоговой.

Следующая задача — формирование чисел. Мы уже видели, что запись числа в двоичной форме позволяет использовать только два значения: 0 и 1. Двоичный код, рассмотренный в этой главе, называется кодом 8–4–2–1, поскольку положение разряда представляет собой 2 в соответствующей степени. Однако есть другие коды, позволяющие представить число нулями и единицами; примерами могут служить код Грэя

Экспресс-3. Код Грэя для многих целей промышленного управления оказывается предпочтительным в сравнении с кодом 8–4–2–1. Основное достоинство кода в том, что в нем при последовательном увеличении чисел изменяется состояние только одного разряда. Существуют преобразователи четырехбитового двоичного кода в код Грэя и наоборот, выполненные на базе интегральной технологии. Преобразование код Грэя использует только 4 бита (табл. 1.1).

Достоинство кода 8–4–2–1 состоит в том, что кодирование и дешифрация здесь осуществляются относительно просто. Какой бы код и использовался, необходимо учитывать размер двоичного числа, современной цифровой записи каждую амплитуду напряжения

Таблица I.1. Запись чисел кода 8-4-2-1 и кода Грэя

Десятичные числа	Код 8-4-2-1	Код Грэя	Десятичные числа	Код 8-4-2-1	Код Грэя
0	0000	0000	8	1000	1100
1	0001	0001	9	1001	1101
2	0010	0011	10	1010	1111
3	0011	0010	11	1011	1110
4	0100	0110	12	1100	1010
5	0101	0111	13	1101	1011
6	0110	0101	14	1110	1001
7	0111	0100	15	1111	1000

принято описывать 16-битовым числом. При этом каждой амплитуде может соответствовать до 65 536 значений. Для каждой выборки напряжения необходимо записать 16 двоичных сигналов 0 или 1 и все 16 необходимы для восстановления оригинала напряжения. На этом в прошлом терпели неудачи многие попытки кодирования звуковых сигналов. Как часто бывает, нашлось более простое решение задачи — запись на ленту; оказалось сравнительно просто создать 16-дорожечную головку (применяя широкую ленту) и использовать каждый канал для записи одного из битов числа. Этот метод удобен для изготовления оригиналов, так как нет проблем с шириной ленты, но его недостаток состоит в том, что для записи оригиналов требуется от 16 до 32 отдельных музыкальных дорожек. Если каждая из них состоит из 16 двоичных дорожек, записывающее устройство будет перегружено. Так как создать и использовать диск с 16 дорожками невозможно, относительно простую идею использования одной дорожки на двоичный разряд приходится отвергнуть. Другой метод состоит в последовательной передаче и записи данных. Последовательно — значит, один за другим. Для 16-битового двоичного числа последовательная передача означает, что биты передаются в потоке 16 сигналов 0 и 1, а не в виде 16 отдельных сигналов по 16 каналам одновременно. Если выборка сигналов производится с частотой 60 кГц и для передачи каждого сигнала требуется 16 бит, то частота посылок двоичных сигналов составит $16 \cdot 60 \text{ кГц} = 960 \text{ кГц}$, что выходит за пределы возможностей обычных лент или дисков. Понижение частоты выборки вызывает свои трудности. При последовательной передаче необходимо отличать последний бит одного числа от первого бита следующего. При параллельной передаче, когда каждый бит передается по своему каналу, трудности в идентификации числа отсутствуют (биты одного числа передаются в одно и то же время по 16 различным каналам). Пример ошибки, возможной при чтении последовательности сигналов, показан на рис. 1.6.

Разница в амплитудах ненормальна; это обстоятельство является причиной промышленного использования кодов, отличных от 8-4-2-1. Код 8-4-2-1 преимущественно используется в вычислительной технике, благодаря простоте арифметических операций, выполняемых с числами в этом коде.

A	B	C	D	
--010000001	000000000	10010	---	a)

$B=129$ $C=0$

Рис. 1.6. Ошибка, вызванная пропуском одного разряда в последовательности сигналов, приводит к тому, что каждый последующий байт будет прочитан неверно:

A	B	C	D	
010000000	100000000	010010		b)

$B=64$ $C=128$

a – управляемое деление на группы по 8; b – ошибочное деление

Что же произойдет, если при считывании будет пропущен или ошибочно считан один бит? Было бы необоснованно оптимистично полагать, что на частотах порядка 1 МГц не может быть пропущен или заменен 1 бит. При записи и воспроизведении с магнитной ленты могут быть ложные сигналы, некоторые сигналы могут выпадать. Поверхность дисков также не может быть абсолютно совершенной. При столь высокой плотности данных ошибки неизбежны и необходимо принимать специальные меры, обеспечивающие правильную передачу слов (групп из 16 бит). При этом не следует искать компромиссов в выборе скорости передачи данных. К счастью, такая задача в течение длительного времени изучалась и решалась специалистами по вычислительной технике. Решения, найденные для простых компьютеров, подсказали конструкторам цифровых систем звукозаписи несколько направлений действий. При последовательной передаче данных в компьютере слово представляет собой не только группу 0 и 1. Исторически сложилось так, что передача данных в компьютере осуществляется группами по 8 бит, называемыми байтами, значительно реже 16-битовыми словами (существо дела от этого не меняется). При передаче данных так называемыми асинхронными методами передаче каждого байта предшествует "стартовый бит", а после окончания байта посыпается один или два (в зависимости от используемой системы) "стоповых бита". Поскольку часто используются два стоповых бита, рассмотрим язычку, состоящую из одного стартового бита, группы из 8 бит (байта) и двух стоповых бит. Стартовым битом является 0, а стоповые биты 1, так что каждая посыпаемая группа из 11 бит должна начинаться нулем и заканчиваться двумя единицами. В приемном устройстве 11-битовая группа помещается в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и производится проверка стартовых и стоповых битов. Если форма группы (нуль в начале, две единицы в конце) не выдержана, производится последовательный сдвиг группы вправо, как показано на рис. 1.7, пока форма группы не будет удовлетворять вышеизложенным требованиям. Неправильно переданный бит приведет к потере данных; может потребоваться несколько попыток отыскания годной группы. Для каждого неправильно переданного байта эти попытки увенчиваются успехом, как это случилось бы в отсутствие стартовых стоповых битов.

Использование стартовых и стоповых битов – эффективный, но не единственный метод проверки правильности передачи данных. Наряду

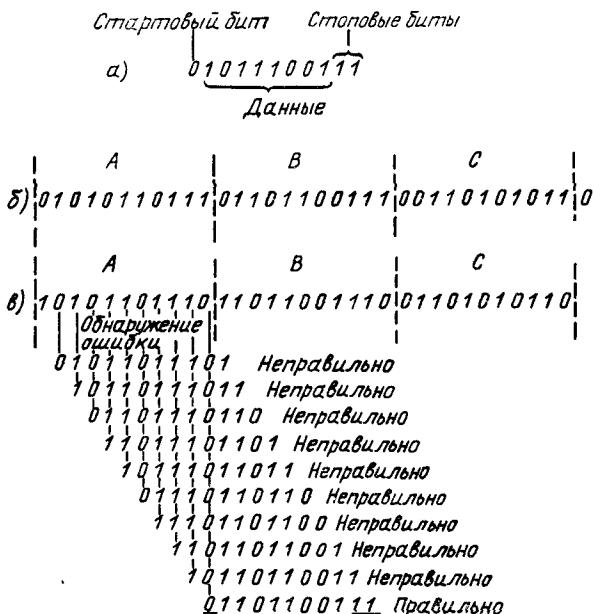


Рис. 1.7. Использование одного стартового и двух стоповых бит (а); трехбитовый сигнал с добавленными стартовыми и стоповыми битами (б); обнаружение ошибки в первом бите (в). Биты считаются группами по 11; в каждый момент времени посылка сдвигается на 1 бит. Данные считаются тогда, когда пойдет комбинация, начинающаяся с нуля и заканчивающаяся двумя единицами

с использованием стартовых и стоповых битов во многих вычислительных системах используется контроль по четности, позволяющий обнаружить ошибку. В группе из 8 бит 7 предназначаются для передачи информации, а восьмой является резервным. Этот бит используется для весьма простой проверки сигнала. Контроль по четности основан на том, что число единиц в группе из 8 должно быть всегда четным. Если число единиц нечетное, значит, при передаче данных допущена ошибка и компьютерная система может дать команду повторить передачу. При передаче каждого бита считают число единиц. Если оно четное, то оставшийся бит 0, а если нечетное, то остающийся бит 1, так что байт теперь содержит четное число единиц. В приемном устройстве проверяется четность числа единиц, но при этом остается неизвестным, какой из бит неправильный.

Контроль по четности прост, однако если неправильно переданы 2 бита, то контроль может не заметить ошибки. Контроль по четности сам по себе подвержен ошибкам и правильно переданные данные может квалифицировать как неправильные. Тем не менее контроль по четности в сочетании с использованием стартовых и стоповых бит работает эффективно, что позволяет передавать массу компьютерных данных с весьма высокими скоростями. Однако приемлемые для компьютеров скорости не очень подходят для звукозаписи. Скорости последова-

тельной передачи данных в компьютерах лежат в пределах от 110 бит/с (относительно низкая скорость) до 19 600 бит/с (при такой скорости передача может стать ненадежной); однако и эта скорость недостаточна для передачи звуковой информации. Это обстоятельство будет рассмотрено позже, в частности, в гл. 3.

В целом достоинства цифрового кодирования реализуются непросто, как в случае использования лент, так и дисков. Необходимо использовать весьма высокие скорости и система обнаружения ошибок должна быть более совершенной и быстродействующей, чем в широко сегодня распространенных персональных компьютерах. Вся промышленность, обеспечивающая массовый выпуск продукции, должна работать весьма совершенно; этому способствует единственный в мире стандарт на КД.

Глава 2. ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Логические элементы – блоки, из которых строятся цифровые устройства, подобно тому как одиночный усилительный каскад является блоком, необходимым для построения усилительного устройства. Среди логических элементов можно выделить два основных, называемых И или ИЛИ с определенными функциональными назначениями в отличие от устройств, предназначенных для выполнения логических операций в линейных схемах. На рис. 2.1 показан пример выполнения логического действия в линейном устройстве – включения и выключения сигнала. Цифровые логические элементы действуют приблизительно также; состояние на выходе логического элемента определяется состояниями на входах и подчиняется определенным правилам, формируемым в виде таблиц истинности. Отметим, что в случае аналоговой логики на один вход подается сигнал, форма которого определяет состояние включения или выключения на выходе.

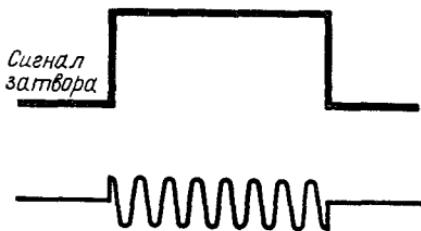
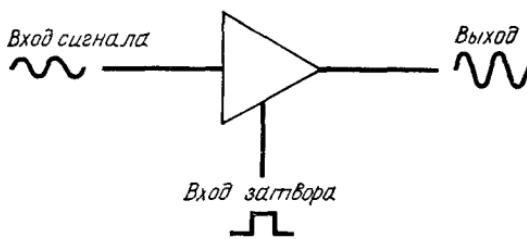
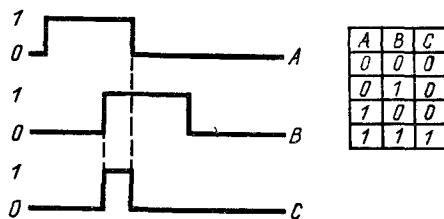


Рис. 2.1. Линейный затвор; на входе и выходе – аналоговый сигнал; прямоугольный импульс включает и выключает затвор. Форма аналогового сигнала сохраняется

Рис. 2.2. Схема И. Двоичные сигналы на входах и выходе имеют одинаковую амплитуду. Состояние на выходе определяется комбинацией сигналов на входах; состояние 1 будет только, если на обоих входах 1. Показаны формы сигналов и таблица истинности



На рис. 2.2 показано условное обозначение логического элемента И и соответствующая таблица истинности; символы, приведенные в таблице, общеприняты и используются как изготовителями, так и потребителями. Схема имеет два входа, из которых подаются двоичные сигналы; они определяют состояние на выходе схемы. В таблице истинности приведены возможные комбинации на входах. Для трех комбинаций сигналов на входах сигнал на выходе будет 0 и только четвертая комбинация дает на выходе 1 — когда на оба входа *A* и *B* поданы единицы; отсюда и название схемы И. Таблица истинности для схемы И с тремя входами показана на рис. 2.3. И в этом случае 1 на выходе будет только, если на все три входа поданы 1. При любом числе входов на выходе схемы И единица будет в единственном варианте, когда на всех входах будут единицы.

Оказалось проще сделать инвертирующий вариант этой схемы, называемый И-НЕ, условное обозначение которой и таблица истинности показаны на рис. 2.4. Маленький кружочек на обозначении означает инверсию. При различных комбинациях сигналов на входе — выходе схемы И-НЕ единица за исключением случая, когда на обоих входах единицы. Схема И-НЕ используется для многих целей. Для примера на рис. 2.5 показаны два варианта включения схемы И-НЕ. Земля имеет логический уровень 0, а напряжению питания соответствует уровень 1. В рассматриваемом варианте логический элемент действует

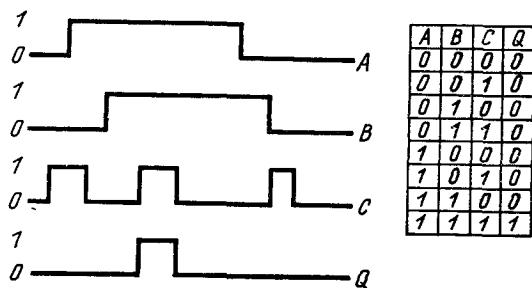
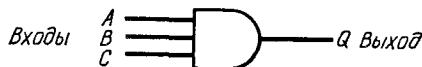
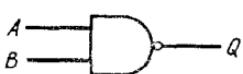


Рис. 2.3. Схема И с тремя входами; форма сигналов и таблица истинности



A	B	\bar{Q}
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Рис. 2.4. Схема И-НЕ и ее таблица истинности; она может быть представлена эквивалентной схемой в виде схемы И и инвертора



A	\bar{Q}
0	1
1	0



Рис. 2.5. Схема И-НЕ может быть реализована с помощью схем ИЛИ-НЕ; это основной элемент цифровых ИС

как инвертор: если на входе 0, то на выходе 1 и наоборот. Это только один из примеров, иллюстрирующих возможности использования схемы И-НЕ; для более подробного изучения возможностей таких схем следует обратиться к специальной литературе.

Другой широко распространенной схемой является ИЛИ, условное обозначение которой (с двумя входами) и таблица истинности показаны на рис. 2.6. На выходе схемы 0, если на оба входа поданы нули. Если хотя бы на одном из входов 1, то на выходе 1. Следует veryo-
зосторожно воспринимать название схемы ИЛИ в повседневном быт-
овом смысле (один или другой, но не оба). Как и в случае схемы И
проще сделать схему ИЛИ-НЕ в инвертирующем исполнении
(рис. 2.7). Другой вариант схемы, выполняющей действие "один или
другой", осуществляет исключающее ИЛИ (условное обозначение и
таблица истинности показаны на рис. 2.8). Этот элемент широко ис-
пользуется при выполнении арифметического сложения двух двоич-
ных чисел.

Описанные схемы являются основными в технике цифровых уст-
ройств. С их помощью выполняются многие логические действия. На-
пример, необходимо на выходе иметь 1, если на двух или трех входах 1.
Для решения задачи можно применять схемы либо только И-НЕ, либо
ИЛИ-НЕ. С применением логических элементов конструируются счи-
тающие схемы. Знание свойств логических элементов необходимо для
знакомления техники цифровой звукозаписи; оно необходимо и для
знакомления более сложных операций, используемых при проигрывании
КД.



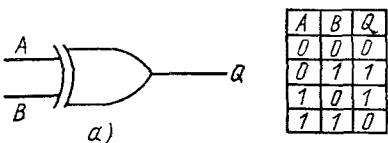
A	B	\bar{Q}
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	1



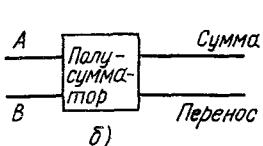
A	B	\bar{Q}
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

ис. 2.6. Схема ИЛИ с двумя входами; показано состояние схемы при единицах
на обоих входах

ис. 2.7. Схема ИЛИ-НЕ, эквивалентная последовательно включенным схемам
ИЛИ и инвертора; как и И-НЕ она является основным элементом цифровых
схем



A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



A	B	Сумма	Перенос
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

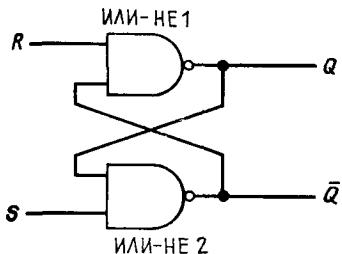
Рис. 2.8. Схема исключающего ИЛИ и ее таблица истинности (а) – сложение двух бит с помощью схем И, а также исключающего ИЛИ (б)

Логические действия применительно к КД включают выбор дорожек, оценку годности дорожки, коррекцию ошибок, управление фокусированной лазерного луча, управление скоростью двигателя. Необходимо знать возможности логических элементов, даже специально не предназначенных для воспроизведения звука. Возможно, что кто-то пожелает самостоятельно сконструировать какое-либо устройство. При этом логические варианты следует рассмотреть, пользуясь таблицами истинности. Логические элементы можно испытывать, используя постоянные напряжения, применяемые в технике КД: при этом никакими "мелочами" пренебрегать нельзя. Это особенно важно для последовательностных схем.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТНЫЕ СХЕМЫ

Логические схемы иногда называют комбинационными, поскольку сигнал на выходе зависит от комбинации 0 и 1 на входах. Известен другой тип схем, которые можно построить с помощью логических элементов; состояние на выходе этих схем зависит от последовательности входных сигналов. Простейший пример такой схемы – считающая ИС, в которой состояние на выходе зависит от числа импульсов, поступивших на вход. Классическим примером последовательностной логической схемы является триггер, цифровая версия которого весьма далека от простого, знакомого всем мультивибратора.

Наиболее простым является *RS*-триггер, выполненный в виде ИС, сравнительно редко используемый в настоящее время. Схема одного из вариантов *RS*-триггера с использованием схем И–НЕ показана на рис. 2.9. Для понимания процесса вспомним, что на выходе двухходовой схемы И–НЕ формируется 0, если на оба входа поданы 1, и 1 для любых других значений сигналов на входах. В схеме, показанной на рис. 2.9, подача 0 на вход *R* независимо от сигнала на входе *S* приводит к тому, что на выходе элемента ИЛИ–НЕ 1 будет 1. Это означает, что когда на входе *S* уровень 1, то на обоих входах схемы И–НЕ 2 тоже 1, так что на выходе ее будет 0. Если на входе *S* сохраняется уровень 1, то изменение состояния входа *R* на 1 не будет влиять на состояние выхода 0, потому что на другом входе схемы И–НЕ 1 уровень 0 и на выходе 1. Если на одном входе 1 и на другом 0, то состояние триггера



R	S	Q	\bar{Q}
0	1	1	0
1	1	1	0
1	0	0	1
1	1	0	1

Рис. 2.9. Простейшая форма последовательностной схемы — *RS*-триггер. В отличие от комбинационной логики состояния выходов зависят от последовательности состояний на входах (а не их комбинаций). Состояния $R = 0$, $S = 0$ не используются, так как в этом случае $Q = Q = 0$, а обычно ожидается, что Q — инверсия 0

изменится и наличие 1 на обоих входах блокирует триггер и он останется в том состоянии, которое было в предыдущий момент. Это — основная особенность последовательностных цепей — состояние их выходов в первую очередь зависит от последовательности изменения состояний входов. Триггер является основной структурной ячейкой последовательностных логических схем. Наиболее широкое распространение получил триггер, работающий по схеме "мастер—помощник", упрощенно *JK*-триггер. Это тактируемый триггер; состояние такого триггера изменяется только в момент прихода тактирующего импульса. Это означает, что логические элементы, составляющие схему, работают синхронно, что позволяет избежать осложнений, возможных в цифровых схемах, при подаче импульсов в разное время.

Тактирующие импульсы генерируются, как правило, генератором, частота которого стабилизирована кристаллом.

Условное обозначение и таблица состояний для *JK*-триггера даны на рис. 2.10. Таблица состояний в отличие от таблицы истинности показы-

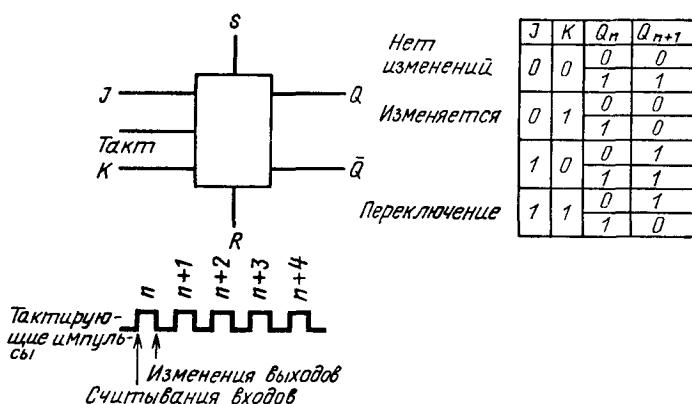
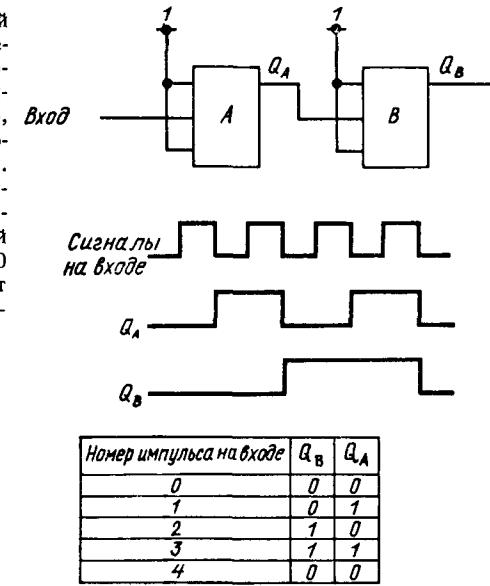


Рис. 2.10. *JK*-триггер. Таблица состояний показывает, как изменяются состояния выходов при возможных комбинациях сигналов на входах *J* и *K*. Если на входах *J* и *K* установлен уровень 1, то тактирующие импульсы будут последовательно переключать выходы из 1 в 0 и из 0 в 1 и т. д.:

Q_n — выход в момент изменения состояния входов; Q_{n+1} — выход при следующем тактирующем импульсе; 0 на входе *S* устанавливает $Q = 1$; $\bar{Q} = 0$ безотносительно к тактирующему импульсу; 0 на входе *R* устанавливает $Q = 0$; $\bar{Q} = 1$ безотносительно к тактирующему импульсу

Рис. 2.11. Счетчик, образованный двумя JK триггерами, в переключательном режиме. Выход первого триггера подключен к синхронирующему входу второго, так что второй триггер переключается в 2 раза реже, чем первый. Диаграмма состояний иллюстрирует процесс деления, который в терминах 1 и 0 представляет собой счет в двоичной системе от 00 до 11. Триггер B представляет старший разряд, триггер A – младший



вает, что одинаковые состояния на входах не обязательно дают одинаковые состояния на выходах, так как состояние выходов зависит от порядка следования входных импульсов. Входы обозначаются J и K , а выходы Q и \bar{Q} .

Выход \bar{Q} всегда инвертирован по отношению к Q . Таблица показывает возможные состояния входов до и после тактирующих импульсов, как напряжения на входах J и K определяют состояния выходов после каждого тактирующего импульса. Заметим, что если на входах J и K 1, то триггер изменяет свое состояние при каждом тактирующем импульсе, т. е. будет работать как двоичный счетчик.

Триггер является основной считающей схемой, поскольку на каждые два тактирующих импульса выдается на выходах один импульс. Включив последовательно два триггера, получим двухступенчатый счетчик (рис. 2.11). В принципе можно соединить любое число триггеров. Такое устройство используется как таймер, считающий тактирующие импульсы, частота которых может быть достаточно высокой. Счетчик, использующий последовательное переключение триггеров, называется асинхронным, поскольку последний в цепи триггер нельзя перевести в другое состояние, пока не изменено состояние каждого предыдущего триггера. Это удобно для многих целей. Для ряда применений, преимущественно быстродействующих цифровых устройств важно, чтобы все ступени счетчика срабатывали одновременно при подаче тактирующих импульсов. В этих случаях входы J и K соединяются соответствующим образом с помощью логических схем. Изучение таких схем выходит за рамки настоящей книги.

РЕГИСТРЫ

Триггеры в цифровой технике широко используются для построения регистров сдвига обычно в интегральном исполнении. Регистр сдвига – наиболее простой вид регистра; он представляет собой соединение нескольких триггеров. В зависимости от характера соединения можно создать четыре типа регистров. Они обозначаются как SISO, SIPO, PISO и PIPO, где S и P обозначают последовательный (serial) и параллельный (parallel), а 1 и 0 – входы (inputs) и выходы (outputs). Действие этих регистров можно пояснить на примере четырех триггеров, у которых на выходе будет 0 или 1.

Важно, как изменяются состояния входов, вызывающие изменение состояний выходов. Регистры всегда тактируются, так что состояния изменяются только во время тактирующих импульсов, а не при подаче напряжений на входы. Регистр любого типа обладает "памятью" (триггеры, составляющие регистр, обладают памятью).

На рис. 2.12 показан пример PIPO-регистра (параллельные входы – параллельные выходы). Триггеры в таком регистре соединены в том смысле, что для всех триггеров используются одни и те же тактирующие импульсы, но триггеры действуют независимо. Во время тактирующего импульса входной сигнал передается на выход и до прихода следующего тактирующего импульса состояние выхода не изменяется независимо от состояния на входе. Можно представить себе применение этого устройства, производящего выборку при каждом такте и сохраняющего состояние до прихода следующего тактирующего импульса. Второй тип регистра (параллельный вход – последовательный выход) PISO показан на рис. 2.13. Здесь каждый триггер имеет собственный вход, но выход каждого используется также как альтернативный вход

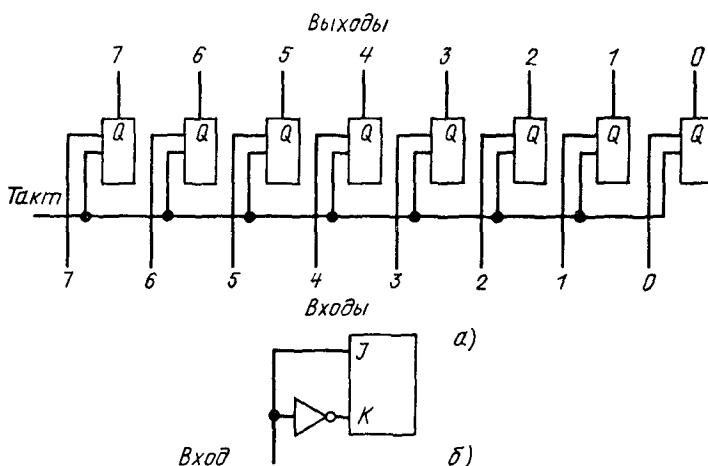


Рис. 2.12. PIPO-регистр (а). Тактирующие импульсы подаются на параллельно включенные входы триггеров. Числа от 0 до 7 соответствуют степеням, в которые возводятся 2; 0 соответствует $2^0 = 1$ и 7 соответствует $2^7 = 128$, – входная ступень триггера в PIPO-регистре (б)

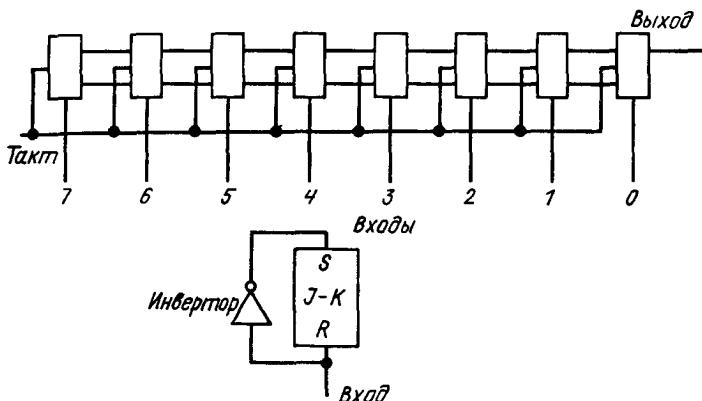


Рис. 2.13. PISO-регистр (а). Входы включены параллельно, выходы подключены к следующим JK-входам. Регистр работает как регистр сдвига; при каждом следующем тактирующем импульсе каждый бит перемещается вправо. Тактирующие импульсы сдвигают содержащиеся в регистре биты вдоль регистра так, что нужно 8 тактирующих импульсов, чтобы очистить 8-битовый регистр. Схема установки JK-триггера независимо от тактирующих импульсов (б)

для следующего в линейке триггера. Пусть регистр загружен; тогда функция сепаратной загрузки состоит в том, чтобы триггеры хранили информацию. Каждый тактирующий импульс сдвигает содержимое регистра на одну ступень так, что выходы получают хранимые биты один за другим, пока регистр не очистится. Этот тип регистра преобразует числовой код в последовательность двоичных сигналов и является основным в преобразовании двоичных цифровых сигналов в последовательную форму для записи на диск или ленту.

SIFO-регистр (последовательный вход — параллельный выход) (рис. 2.14), осуществляет противоположную комбинацию. Набор тактирующих импульсов позволяет принять сигналы на вход и продвигать их по триггерам, снимая соответствующую информацию с выходов. Таким образом, последовательные сигналы преобразуются в параллельную форму, удобную для представления считываемых с диска или ленты групп битов в соответствующие числа.

На рис. 2.15 показан SISO-регистр (последовательный вход — последовательный выход). Он может быть использован для временной за-

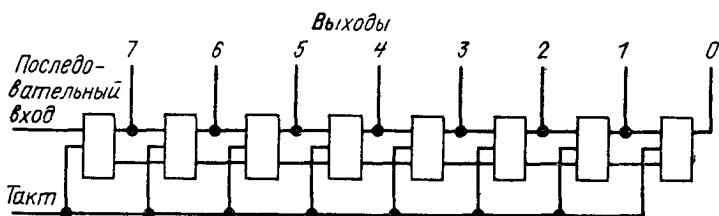


Рис. 2.14. SIPO-регистр. Это также регистр сдвига, в котором биты записываются при тактирующих импульсах и могут быть считаны с параллельных выходов

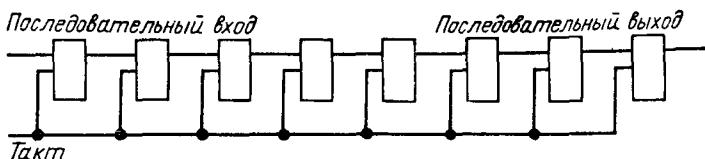


Рис. 2.15. SISO-регистр. Используется последовательное включение входов и последовательное включение выходов. В этом примере 8 тактирующих импульсов передвигают бит со входа на выход. Последовательный выход с задержкой на 8 импульсов. Этот регистр может быть использован в качестве памяти, которая получила название "первый вошел—первый вышел". Этот вид регистра используется при перемежении (см. ниже)

держки; например, для регистра, состоящего из четырех триггеров, для передачи бита со входа на выход требуется четыре тактовых импульса. Время задержки определяется частотой посылок тактирующих импульсов. Процесс задержки применяется в звукозаписи.

Для цифровых ИС важными параметрами являются среднее время задержки распространения сигнала и допустимая мощность рассеивания на одном приборе. Среднее время задержки представляет собой интервал времени, равный полусумме времен задержки распространения сигнала при включении и выключении цифровых микросхем. Для транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) время задержки порядка 10 нс. Для достижения столь малого времени задержки логические элементы, составляющие схему, работают при мощности рассеивания около 10 МВт на элемент. Это небольшое значение, но если схема состоит из нескольких сотен логических элементов, то выделяемую мощность трудно рассеять и схема может перегреваться. Проблема создания приборов с высоким быстродействием и малой рассеиваемой мощностью решается только за счет выигрыша в быстродействии и проигрыша в мощности или наоборот.

Условия применения цифровых схем взаимосвязаны и зависят от типа используемых схем. Для некоторых схем напряжение питания должно составлять $5,0 \pm 0,25$ В и не превышать 7,0 В. При каждом переключении схемы на выходе источника питания появляется провал, вызванный кратковременным коротким замыканием в момент переключения. Этот импульс может оказаться нежелательным для других схем. Напряжение питания следует всегда стабилизировать. Полезно между выводами схемы включить емкость примерно 10 нФ (можно использовать один конденсатор на каждые пять приборов). Этот конденсатор особенно важен для сложных устройств, в которых расстояние между источником питания и ТТЛ ИС велико. Новейшие типы ИС менее чувствительны к перепадам питающих напряжений, но емкостная связь все же необходима.

На время задержки влияют температура и характер подключаемой нагрузки. Наиболее "тяжелым" случаем является емкостная нагрузка с резистором, который включается так, что напряжение на схеме никогда не достигает напряжения источника питания (рис. 2.16). В этой

Рис. 2.16. Худший вариант нагрузки цифровой схемы: резистор и большая паразитная емкость

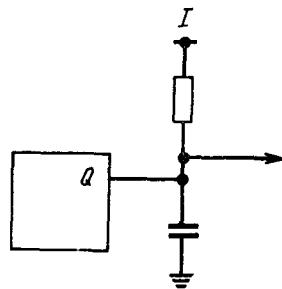
схеме уменьшение напряжения до логического 0 означает, что через резистор протекает ток и емкость разряжается, даже если это только паразитная емкость. Емкость (обычно 7 нФ – 80 пФ) влияет на скорость переключения схемы. Скорость переключения сравнительно слабо зависит от температуры.

Помехоустойчивость схем является весьма существенной характеристикой, поскольку интерференция помехи и полезного сигнала является источником ошибок. Помехоустойчивость часто оценивает значение интерференционного импульса, который может переключать схему. Для многих типов цифровых систем помехоустойчивость оценивается разницей между фактическим напряжением уровня 0 или 1, существующим в аппаратуре и напряжением, при котором происходит переключение схемы. Например, если максимальный уровень логического нуля составляет 0,8 В, а реально схема переключается при 1,4 В, то достаточно постороннего импульса 0,6 В, чтобы вызвать неприятности. Некоторые схемы, в том числе первые ТТЛ-схемы, весьма подвержены помехам по цепям питания, и это обстоятельство является дополнительным аргументом в пользу установки конденсатора между питающим проводом и заземляющим выводом каждого прибора.

КМОП ИС

КМОП ИС – комплементарные схемы, в которых МОП-транзисторы с каналами *p*- и *n*-типа используются парами. В типичной комплементарной схеме (рис. 2.17) *p*- и *n*-канальные полевые транзисторы включены последовательно. Выводы затворов соединены, так что входной сигнал подается на оба затвора. Если на вход подана 1, то транзистор *A* открыт, а *B* – закрыт; в результате уровень напряжения на выходе 1. Если на затворы подан 0, то закрыт транзистор *A*, а *B* открыт, так что на выходе 0. Сигнал на выходе этой схемы повторяет сигнал на входе. Эту схему можно назвать "экспандером"; она обладает высокой нагрузкой способностью – позволяет подключать большое число нагрузок.

Достоинство КМОП-структур состоит в возможности использования широкого диапазона питающих и логических уровней напряжений. Стандартные схемы предназначены для работы с напряжением источников питания +5 В и должны быть жестко к нему привязаны. Многие КМОП-схемы работают при низких напряжениях (например 3 В и даже при 1,5 В). Они также работают при напряжениях 12 В и выше, так что КМОП ИС можно питать от низковольтных батарей и от автомобильных аккумуляторов. При переключении напряжение очень близко к напряжению источника питания. Конструкция выходных каскадов в варианте ТТЛ затрудняет достижение логического уровня 1, близкого к напря-



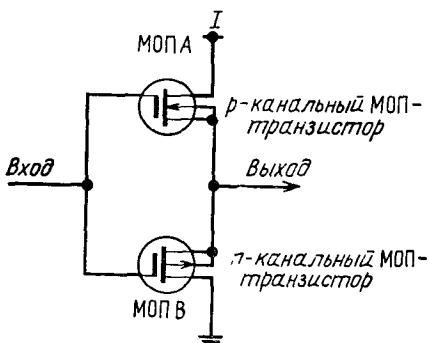


Рис. 2.17. Типовая схема последовательного включения полевых транзисторов с различными типами проводимости. При подаче на вход цифрового сигнала один транзистор закрыт, другой – открыт

жению питания + 5 В. Типовое значение этого уровня около 3,5 В. Это обстоятельство обуславливает сравнительно низкую помехоустойчивость схем ТТЛ. Поскольку напряжение на выходе КМОП ИС практически равно напряжению питания, их помехоустойчивость выше помехоустойчивости стандартных схем. В дополнение: рассеиваемые мощности КМОП ИС существенно ниже, чем у ТТЛ и могут составлять несколько микроватт на элемент.

Недостатком КМОП ИС первых выпусков является низкое быстродействие. КМОП ИС требуют защиты от воздействия статического электричества. Скорости передачи данных для старых типов КМОП ИС составляют 100–200 нс – в 10 раз больше, чем в среднем для ТТЛ. Для многих практических применений это несущественно; в частности, для карманных калькуляторов это время не слишком велико. Скорости "старых" КМОП ИС недостаточны для больших систем с последовательной обработкой данных. Необходимость использования высоких частот посылок тактирующих импульсов составляет "известную" проблему цифровой звукозаписи. Современные КМОП ИС рассчитаны на повышенные скорости обработки данных. Нужда в повышенном быстродействии КМОП ИС обостряется необходимостью создания экономичных схем памяти, сохраняющих информацию при питании от низковольтных батарей. Можно использовать отдельные МОП-транзисторы с *p*- и *n*-каналами, обладающие большим быстродействием, чем КМОП ИС.

Раньше повреждения КМОП ИС, вызванные воздействием электростатического электричества, причиняли большие неприятности. Затворы МОП-транзисторов так хорошо изолированы от каналов, что разряд малейшего электростатического заряда вызывает недопустимые перенапряжения. В то же время очень тонкие слои двуокиси кремния пробиваются при напряжениях порядка 20 В. Это означает, что любые операции, например обрезка выводов МОП-транзисторов на изолированных подложках, могут вызвать необратимые пробои диэлектрика затвора. КМОП ИС широко используются в аппаратуре; для предотвращения появления недопустимых напряжений принимаются различные меры, в том числе применяются разрядные диоды, подключаемые к выводам затворов. Необходимо помнить, что вызывать повреждения может только разность потенциалов между затвором и каналом.

При ходьбе по нейлоновому ковру ваши руки могут иметь потенциал порядка 14 кВ и более, но если этот потенциал приложен и к затвору, и к каналу, то повреждения не произойдет. Аккуратное включение ИС в цепь исключает электростатическую опасность, поскольку в любой цепи есть сопротивление, включенное между затвором и каналом и оно в разумных пределах надежно защищает прибор от воздействия статического электричества. Иными словами, статическое электричество не может повредить работающую схему независимо от того, переключается она или нет.

Единственная возможность повреждения возникает в случае, если один вывод МОП ИС заземлен, а к другому прикасаются; даже в этом случае встроенные диоды могут защитить транзисторы. За много лет работы с МОП-транзисторами я ни разу не встречался с повреждениями, вызванными статическим электричеством, даже в те дни, когда после прохода по ковру касался радиатора и ощущал неприятный удар.

Стандартные предосторожности при работе с МОП-приборами приведены ниже.

1. До применения сохраняйте приборы в упаковке изготовителя. Избегайте касания выводов.
2. До впайки прибора в схему не нарушайте перемычек, замыкающих выводы накоротко.
3. Не допускайте, чтобы цепь затвора оказалась разомкнутой.
4. При монтаже МОП-прибора используйте заземление паяльника и монтажной платы.
5. Убедитесь в том, что на плате есть резистивная дорожка между затвором и другими выводами.
6. Убедитесь в том, что соответствующие условия для работы созданы: влажность достаточно велика, отсутствует синтетика, все металлические поверхности заземлены; в сложных случаях монтажнику следует использовать заземленный браслет, надеваемый на запястье.

Проблемы статического электричества устраняются, если ИС изымаются или вставляются при выключенном напряжении питания; если ИС до употребления хранятся в защитной упаковке; если руки оператора слегка увлажнены и монтажная панель заземлена.

На рис. 2.18 показана типичная схема логического элемента И-Не в КМОП-исполнении. Входами всегда являются выводы затворов, а выход берется от соединения истока одного транзистора со стоком другого. Поскольку входные цепи МОП ИС практически не потребляют тока, число входов ограничивается только емкостями выводов затво-

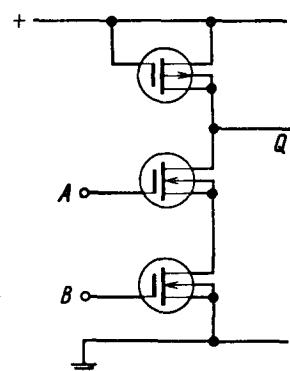


Рис. 2.18. Схема И-НЕ с комплементарной МОП-структурой; входами являются затворы полевых транзисторов, поэтому входное сопротивление всегда велико. Выходы – сток или исток; выходное сопротивление относительно невелико

ров. На высоких скоростях переключения значения тока, необходимого для заряда и разряда емкости затвор–канал, являются ограничивающим фактором. Наличие защитных диодов также увеличивает утечку по постоянному току, хотя она и не слишком велика.

КМОП ИС благодаря малой потребляемой мощности представляют важный класс цифровых ИС, но во многих цифровых ИС используются МОП-транзисторы с одним типом канала: n -МОП или p -МОП. Эти ИС также потребляют малые мощности, хотя и несколько большие, чем КМОП ИС, особенно на высоких скоростях переключения. ИС на МОП-транзисторах широко используются в микропроцессорах и схемах памяти. Они же в сочетании с КМОП ИС находят и другие применения, например в устройствах передачи данных и измерительной технике. Многие из них представляют собой типовые схемы цифровой техники, такие как счетчики, но отличаются высокой степенью интеграции. Другие имеют специальное назначение, например схемы для передачи речевых сигналов, для обработки сигналов в цифровой записи на КД или ленты. Многие p -МОП и n -МОП ИС предназначены для вычислительной техники и микропроцессоров широкого применения. В этой категории ИС интересны схемы типа "пожарная цепочка", представляющие собой разновидность регистра, в котором данные смещаются по цепочке при каждом тактирующем импульсе. Эти устройства позволяют осуществлять задержку информации на время, зависящее от частоты посыпок тактирующих импульсов; многие потребители используют эти устройства для звуковых систем, например для создания реверберации и других эффектов.

ИС ПАМЯТИ

Очень важный класс МОП ИС предназначен для использования в устройствах памяти. Память в смысле вычислительной техники означает способность сохранять логические уровни 0 или 1 сколь угодно долго. Выделяются два типа памяти: энергозависимая и энергонезависимая память. Энергозависимая память требует регенерации данных. Все устройства памяти этого класса, в том числе некоторые КМОП-устройства, требуют источников питания, например батарей. При выключении источника питания хранимая информация теряется. Истинно энергонезависимое устройство памяти сохраняет информацию при выключении источника питания. Наиболее характерным примером энергонезависимой памяти является магнитная память. В устройствах памяти первых образцов вычислительных машин использовались кольцевые магнитные сердечники с обмотками, каждый из которых хранил один двоичный разряд. Для внешней памяти использовались магнитные ленты или диски; в наиболее современных системах используются оптические диски. Их достоинства состоят в высокой плотности записи данных, устойчивости к воздействию случайных магнитных полей, в возможности не очень аккуратного обращения. Не будет преувеличением утверждение, что КД как устройства па-

мяти более важны для вычислительной техники, чем собственно для звукозаписи.

Устройство кратковременной (оперативной) памяти может быть создано на триггерах, которые работают только при наличии напряжения питания. Энергозависимую память разделяют на два типа: статическую и динамическую, которые существенно различаются. В статической памяти, которую обычно называют статическим ЗУПВ – запоминающим устройством с произвольной выборкой (обращение к любому элементу памяти произвольно) каждый триггер хранит 1 бит. Поскольку триггер состоит из двух транзисторов, один из которых открыт, а другой – закрыт, запоминаемый бит может быть 1 или 0. В самых первых типах такой памяти триггеры соединялись в цепочку и при каждом тактирующем импульсе каждый бит данных передавался по цепочке следующему триггеру. Это накладывало на процесс выборки (считывание информации) определенные ограничения; для хранения в такой памяти 1000 бит данных требовалось по меньшей мере 1000 триггеров. Информация подается на вход в соответствии с тактирующими импульсами и снимается с выхода – 1 бит на один такт. Такая система называется "первым вошел, первым вышел". Каждый раз при считывании информации она должна быть помещена обратно, для следующего использования. Каждый раз необходимо считывать всю цепочку: невозможно прочесть 56-й бит, не считав предшествующие 55 бит. Развитие интегральной технологии позволило подвести выводы входа и выхода к каждому триггеру на кристалле и осуществить произвольную выборку. Произвольная выборка требует использования на кристалле логических элементов и определенных методов обращения к нужному триггеру. В частности, используется подача двоичных сигналов на адресные шины. Адресом называется двоичное число – идентификатор того триггера, в котором хранится нужный бит. Базовое однобитовое ЗУПВ имеет одну входную шину, одну выходную шину, шину записи / считывания и определенное количество адресных шин. Если, например, адресов 16, то можно обратиться к $2^{16} = 65\,536$ различным триггерам: это и есть число запоминаемых бит.

Применение триггеров связано с потреблением значительной мощности. Это обстоятельство привело к созданию памяти другого типа – динамической, и хотя статическая КМОП-память потребляет небольшую мощность, динамическая память широко применяется, в частности, в малых компьютерах. В динамической памяти уровни логических состояний хранятся в виде электрических зарядов в емкостях, сконструированных подобно затворам МОП-транзисторов. Хотя сопротивление между выводами конденсаторов велико, утечки в цепях схемы ограничивают время хранения информации несколькими миллисекундами. Это означает, что конденсатор, хранящий 1, должен перезаряжаться примерно каждую миллисекунду. Это не очень сложно. Современные динамические ЗУПВ имеют схемы регенерации зарядов, изготавливаемые на том же кристалле, что и память, а контроль регенерации осуществляется специальными схемами или в некоторых случаях самим мик-

ропроцессором. Регенерация должна быть "прозрачной" в том смысле, что она не должна мешать нормальному функционированию устройства памяти.

Использование динамической памяти уменьшает потребление энергии, что существенно для малых компьютеров; энергия расходуется только на регенерацию. Экономичность позволяет создавать устройства памяти большой емкости. Во время написания книги наибольшая емкость динамического ЗУПВ составляла 262 144 бит. Такое устройство называется "chip 256К", поскольку символ К используется для обозначения объема 1024 (2^{10}) бит.

Помимо описанной временной (оперативной) памяти, нуждающейся в регенерации информации, необходимо иметь постоянную память. Например, необходимо постоянно хранить группу сигналов. Память такого типа называется ПЗУ — постоянное запоминающее устройство; оно может быть выполнено в различных вариантах. Применительно к КД не предусматривается изменять содержимое памяти, поскольку в системах КД в обозримом будущем существенных изменений не предвидится. Поэтому память программируется в процессе производства так, что она работает при простой адресации на выводах и непосредственно выдает информацию, не требуя доступа к выходам триггеров или емкостей. Конфигурация нулей и единиц программируется в ПЗУ при изготовлении микросхемы. Программированные ПЗУ при массовом производстве дешевы. Однако для новых задач ошибка в программировании может оказаться весьма дорогостоящей.

Альтернативой является программируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ), оно однажды программируется и может быть считано практически неограниченное число раз. Кристалл выпускается незапрограммированным; его можно программировать, подавая 0 или 1 на соответствующие адресные шины и шины данных. Затем кристалл используется как ПЗУ с той разницей, что перед установкой в компьютер при программировании можно вносить необходимые изменения. Наиболее популярным типом ППЗУ является стираемое ППЗУ (СППЗУ), в котором запись производится путем инжекции носителей в полупроводник, а записанная информация стирается засветкой ячеек ультрафиолетовым излучением.

МИКРОПРОЦЕССОРЫ

Микропроцессорный чип (кристалл) является сердцем любого компьютера и универсальным узлом широкой номенклатуры промышленных контроллеров. Чип имеет значительное число логических элементов и триггеров. Его отличительная особенность состоит в том, что внутренние связи между элементами могут изменяться в соответствии с программой. Иными словами, посылки двоичных сигналов на вход микропроцессора (МП) используются для коммутации логических элементов и задания действий, которые должна выполнять схема, получив следующую посылку данных. МП представляет собой последовательный контроллер, выполняющий определенную последовательность действий во

времени. Чтобы МП сложил два числа, требуется по меньшей мере три шага. Первый шаг: подача на вход команды ADD (сложить) в двоичной форме; второй шаг — ввод одного из слагаемых; следующий — введение второго слагаемого. Затем на выходной линии данных появляется результат вычислений — искомая сумма. Приведенный пример показывает, что для выполнения простого действия — сложения требуется четыре последовательных шага. Поэтому иногда МП оказывается слишком медлительным для целей управления. Скорость вычислений, определяемая частотой посылок тактирующих импульсов, обычно составляет несколько мегагерц.

ТАКТИРУЮЩИЕ ИМПУЛЬСЫ

Большинство цифровых систем использует тактирующие импульсы. В цифровой записи от них многое зависит, особенно правильная частота выборки (об этом позже). Как же эти импульсы получают в приемных устройствах? Известны два метода: использование кварцевого генератора в каждом приборе и применение самосинхронизирующихся генераторов, управление которыми осуществляется синхронизирующими импульсами, являющимися частью принимаемых сигналов. Оба метода не являются несовместимыми, и известны схемы, в которых частота кварцевых генераторов корректируется синхроимпульсами.

В системах записи на КД и на ленты используется метод самосинхронизации, при котором частота и фаза колебаний задающего генератора поддерживаются синхроимпульсами, передаваемыми одновременно с импульсами, несущими звуковую информацию. Это особенно важно для лент, поскольку лента может растягиваться, что делает невозможным применение автономных несинхронизируемых генераторов. Самосинхронизация требуется и для КД, поскольку есть трудности в правильной центровке дисков. При использовании самосинхронизации и постоянной линейной скорости эти проблемы становятся несущественными.

Глава 3. АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И МОДУЛЯЦИЯ

Преобразование аналогового сигнала в цифровую форму — первый шаг в любой системе цифровой записи звука. Аналого-цифровое преобразование (АЦП) — процесс более существенный для записи звука, чем для воспроизведения, однако способ воспроизведения звука существенно зависит от АЦП. Немного о преобразовании и модуляции. Первая операция означает преобразование звукового сигнала в последовательность цифровых сигналов. При модуляции оригинальный двоичный сигнал превращается в некоторую разновидность двоичных сигналов, используемую для передачи данных и записи на носитель ленту или диск. Эти процессы взаимосвязаны, многие формы преобразования

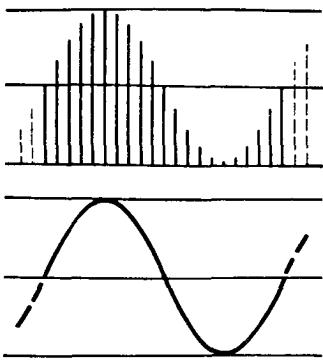


Рис. 3.1. Импульсное преобразование амплитуды и модуляция. Схема неудобна для применения, поскольку подвержена интерференции

являются также формами модуляции. С термином "модуляция" в литературе по цифровой звукозаписи имеется некоторая неопределенность и всегда надо быть уверенным в смысле, в котором он используется.

Рассмотрим, например, тип модуляции, показанный на рис. 3.1. В этой системе производится выборка аналогового сигнала с целью формирования последовательности импульсов, амплитуды которых равны мгновенным значениям сигнала в соответствующие моменты времени. Это несколько больше, чем двоичная версия амплитудной модуляции несущей; такой метод часто применяется в высококачественных звуковых устройствах; в этом случае модуляция и преобразование едины, разделить их невозможно.

Более современные методы основаны на импульсно-кодовой модуляции, при которой амплитуды выбираемых звуковых сигналов представляются в форме кодированных импульсов. Теперь можно увидеть разницу между методом преобразования амплитудных значений аналоговых сигналов в форму двоичных сигналов и методом организации этих сигналов в форму, удобную для записи — модуляционной частью проблемы.

Результатом преобразования является представление при каждой выборке аналогового сигнала в виде числа в двоичной форме, причем это число пропорционально амплитуде выбираемого сигнала. Среди чисел, записываемых в двоичной форме с помощью 1 и 0, могут быть числа, состоящие преимущественно из 1 или 0, например 1000000000000000 и 0 111 111 111 111 111. Хотя эти числа не представляют собой проблем для регистров, надо подумать, как их записать. Длинная последовательность 1 или 0 по существу представляет собой сигнал постоянного уровня, подобный посылке постоянного тока, а сигнал постоянного тока нельзя записать ни на ленту, ни на диск. Поэтому какой бы метод модуляции мы ни выбрали, он должен создать такую конфигурацию сигнала, в которой имело бы место достаточно частое чередование изменений уровней от 0 до 1 или от 1 до 0. Если эти изменения происходят очень редко, то вероятность ошибок существенно возрастает. Это осложнение устраняется использованием метода модуляции двоичного сигнала в форме кода, в котором описанные ситуации встречаются крайне редко.

ЧАСТОТА ВЫБОРКИ

Преобразование начинается с выборки. В процессе выборки амплитуда аналогового звукового сигнала измеряется и запоминается на короткое время; через некоторый интервал времени процедура повторяется. Процесс иллюстрируется рис. 3.2, из которого видно, что для качественного преобразования аналогового сигнала в цифровой необходимо брать достаточно большое число выборок в течение одного периода. Если брать мало выборок (рис. 3.3), то двоичная версия сиг-

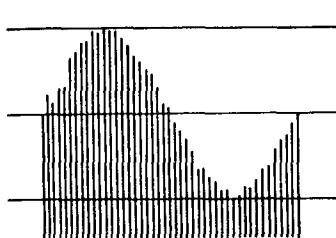


Рис. 3.2. Сорок пять выборок сигнала. При такой плотности выборок хорошо передаются детали формы колебания

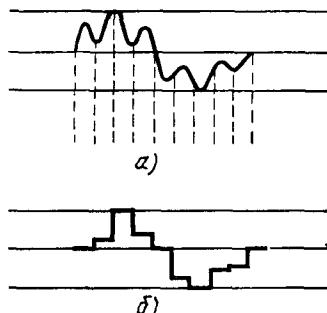


Рис. 3.3. Неадекватная выборка сигналов:

a – исходное колебание; *b* – плохая реплика

нала будет мало похожана на оригинал. С другой стороны, изменение числа выборок в течение периода вызовет появление избыточной информации и ненужный износ дисков. Выбор разумного компромисса между эффективностью и качеством – одна из важнейших задач в теории выборок.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Рассмотрим подробнее процесс преобразования. Следует определить, сколько бит следует использовать для передачи числа. Как было показано в гл. 1, использование 9 разрядов позволяет различать 256 уровней амплитуд, что оставляет желать лучшего. Чтобы реализовать высокие стандарты звуковоспроизведения, надо иметь возможность охватить диапазон амплитуд сигналов до 90 дБ, что соответствует отношению амплитуд сигналов примерно 32 000 к 1. Использование 256 уровней квантования амплитуды сигнала означает, что размер интервала между уровнями составляет примерно 123 единицы. Это очень грубо для обеспечения приемлемого качества звука. Использование 16 разрядов соответствует 32 767 уровням, что очень близко к названному соотношению амплитуд 32 000:1.

Такая степень квантования используется в системах КД и цифровой записи на ленту. Если возможно, то следует использовать мень-

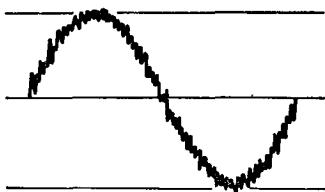


Рис. 3.4. Звуковое колебание; выборка дает хорошие результаты, поскольку аппроксимация может повлиять только на воспроизведение малых амплитуд высокочастотных колебаний, которые в аналоговой системе в любом случае будут потеряны

шее число разрядов, поскольку последовательная запись 16 разрядов занимает много времени, особенно при использовании метода модуляции, который будет описан в гл. 6. Рабочая частота системы КД при этом оказывается эквивалентной частоте видеосигнала.

Однако есть и другие возможности. В идеале амплитуда каждого выбираемого сигнала пропорциональна числу в 16-битовом диапазоне. Но это не так, и разница между реальной амплитудой и амплитудой, закодированной 16-битовым числом, представляет собой ошибку — шум квантования. Не останавливаясь на доказательствах, отметим, что чем больше бит используется для кодирования амплитуды, тем меньше шумы квантования.

Менее очевиден эффект, связанный с сигналами, имеющими малые амплитуды. Для сигналов с малыми амплитудами уровень шумов квантования действительно пропорционален уровню сигнала, который ухо воспринимает не как шум, а скорее как искажения. Чем больше цифровых разрядов используется для кодирования, тем полнее проявляется этот эффект, если не принимать специальных мер. Парадокс состоит в том, что задача решается добавлением шума. Добавление белого шума (шум, амплитуда которого практически постоянна в широком диапазоне частот) к сигналу малой амплитуды разрывает связь между шумами квантования и амплитудой сигнала и таким образом существенно уменьшает эффект воспроизведения звука как искаженного. Добавление шума называется подмешиванием псевдослучайного сигнала и является весьма важной частью процесса преобразования.

Идея цифровых сообщений достаточно нова: в 1948 г. К. Шеннон опубликовал свою работу "Математическая теория сообщений", являющуюся базовой и для цифровой обработки звука. Существо работы Шеннона состоит в том, что для достижения баланса между качеством и полосой пропускания системы необходимо, чтобы частота выборки вдвое превышала наивысшую частоту звукового сигнала. Обратим внимание на тезис о наивысшей частотной компоненте. Если частота синусоидальных колебаний составляет 1 кГц, то, используя частоту выборки 2 кГц, нельзя выполнить требования стандарта в части высокого качества, если обратное преобразование рассчитано на воспроизведение синусоидального сигнала. Теория Шеннона касается несинусоидальных колебаний, характерных для звуковой техники и представляющих собой комбинации основных частот и некоторого количества гармоник. Это обстоятельство иллюстрируется рис. 3.4, на котором показана типичная форма звукового колебания; наивысшая частота определяется малой частью колебания, похожей не на синусоиду, а на пилообразные импульсы. Строго говоря, рис. 3.4 не точно отражает характер гармо-

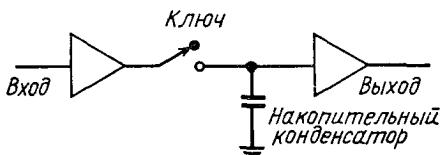
ник, однако представляет собой достаточно образную картину. Хороший цифровой эквивалент звукового колебания получается, если частота выборки равна удвоенной частоте наивысшей гармоники.

В системе КД частота выборки составляет 44,1 кГц, что соответствует наивысшей частоте звукового колебания 22 кГц. Эта частота выбрана с учетом ряда дополнительных обстоятельств, в том числе частоты тактирующих импульсов, и составляет именно 44,1, а не 44 кГц. Эта частота также в известной степени отражает стремление инженеров к совершенствованию системы записи на КД, а не просто желание получить не худшие результаты, чем при обычном способе звукозаписи.

ПРОЦЕСС ВЫБОРКИ

Процесс выборки осуществляется с помощью схемы выборки и памяти. Производится выборка мгновенного значения напряжения, которое хранится в памяти в течение времени, необходимого для преобразования аналоговой величины в цифровую форму. Процесс поясняется рис. 3.5, на котором показана соответствующая схема. Операция

Рис. 3.5. Выборка и запоминание с помощью переключателя и конденсатора. На конденсаторе некоторое время поддерживается напряжение, поскольку сопротивление следующего буфера велико



запоминания осуществляется с помощью конденсатора. При замкнутом ключе напряжение на конденсаторе, соответствующее напряжению звукового сигнала, подается с выхода буферного усилителя, имеющего низкое выходное сопротивление. Преобразования сигнала в цифровую форму в это время не происходит. В момент размыкания ключа напряжение на конденсаторе равно напряжению звукового сигнала. Это напряжение подается на второй буферный усилитель; сигнал, снимаемый с его выхода, преобразуется в цифровую форму. Временной интервал, в течение которого производится выборка, может быть очень мал, а время между двумя импульсами, осуществляющими выборку, соответствует времени, в течение которого надо преобразовать сигнал в цифровую форму. В качестве реального ключа можно использовать полупроводниковую ключевую схему, а функции конденсатора может выполнять полупроводниковая схема памяти, хотя на частоте 44,1 кГц может успешно работать и конденсатор при условии, что он нагружен только входным сопротивлением буферного усилителя на МОП-транзисторе. Частота выборки 44,1 кГц соответствует временному интервалу около 22 мкс — времени, достаточное для преобразования сигнала в цифровую форму при использовании современной элементной базы.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Амплитудно-цифровое преобразование является основным циклом во всем процессе записи. Известно несколько методов осуществления такого преобразования, но не все из них легко применимы к задачам звукозаписи. Важно понять принципы, положенные в основу двух главных методов. Сначала рассмотрим интегратор, подобный используемому в цифровых вольтметрах. Принцип действия его достаточно прост. Основным узлом схемы (рис. 3.6) является компаратор, имеющий два входа и один выход. Пока напряжение на одном входе ниже, чем на другом, на выходе поддерживается один логический уровень. Этот уровень изменяется при изменении соотношения уровней на входах; можно считать, что выход компаратора переключается при равенстве входных уровней напряжения (практически при очень малой разнице порядка нескольких милливольт).

Уровень сигнала, подлежащего преобразованию на одном из входов, следует поддерживать неизменным в течение времени, необходимого для преобразования. Тактирующие импульсы подаются на счетчик и на интегрирующую схему. Напряжение на выходе интегрирующей цепи представляет собой последовательность равных ступенек напряжения (одна ступенька на один тактирующий импульс); это напряжение подается на другой вход компаратора. Когда напряжение на обоих входах окажется одинаковым (или почти равным), компаратор переключается; при этом посыпки тактирующих импульсов прекращаются, а на выходе счетчика появляется число сосчитанных импульсов.

Предположим, что ступенька напряжения составляет 1 мВ, а напряжение выборки 3,145 В. Чтобы достичь равенства напряжений, необ-

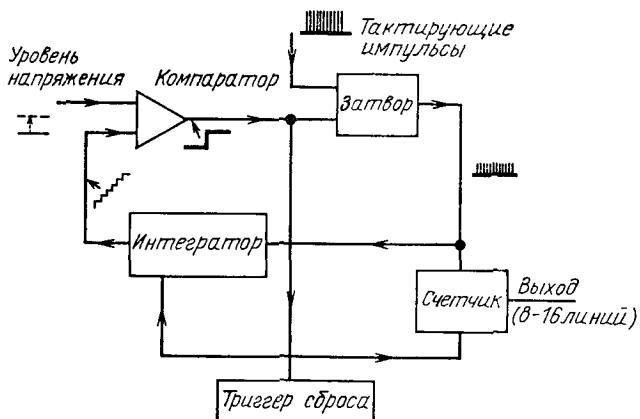


Рис. 3.6. Принципиальная схема АЦП с интегратором и компаратором. Тактирующие импульсы, проходящие через затвор, считаются и интегрируются. Когда проинтегрированный сигнал становится равным амплитуде входного сигнала, компаратор закрывает затвор. Содержимое счетчика считывается. Затем триггер сбрасывает схему в исходное состояние. Амплитуда на входе в течение счета предполагается постоянной, так что частота тактирующих импульсов должна быть высокой

ходимо 3145 ступенек по 1 мВ; и подсчитанное число составит 3145 – число в двоичной форме, отображающее амплитуду напряжения выборки. При переключении компаратора и остановке счетчика это число посыпается в регистр. Затем первый тактирующий импульс сбрасывает напряжение на выходе интегратора до нуля и схема готова к обработке новой выборки. Приведенный пример является условным, но он показывает, как уровень сигнала преобразуется в числовую форму по этому методу.

Качество преобразования по этому методу жестко связано с совершенством интегратора. Интегратор – одно из устройств для цифро-аналогового преобразования (ЦАП), а мы его используем как основной узел в системе АЦП (парадокс, напоминающий ситуацию с яйцом и курицей). Простейшая схема интегратора, например схема заряда конденсатора через резистор, для решения наших задач непригодна из-за неудовлетворительной линейности. Ступеньки по высоте должны быть строго одинаковы, а в случае с конденсатором высота каждой последующей ступеньки меньше предыдущей. Ниже мы рассмотрим принцип действия ЦАП в интегральной форме.

Рассматривая проблему совершенного интегрирования с помощью ЦАП, следует остановиться на быстродействии схем. Скорость зависит от времени между двумя выборками и числа шагов преобразования. Если мы имеем 20 мкс для работы с максимальным числом шагов 65 536, то частота тактирующих импульсов должна составлять

$$\frac{65\,536}{20 \cdot 10^{-6}} \approx 3,3 \text{ ГГц},$$

что значительно превышает возможности обычных цифровых устройств и прочего цифрового оборудования (за исключением спутниковых систем). Это обстоятельство исключает возможность использования относительно простых интеграторов для преобразования со скоростями выборки и числом бит, необходимыми для звукозаписи, и заставляет искать другие пути решения задачи.

Если есть желание сохранить интегрирующий тип преобразователя, то один из возможных вариантов состоит в использовании двух преобразователей, каждый из которых работает с определенным интервалом напряжений. Идея состоит в том, что один счетчик работает в интервале от 0 до 255 единиц, а другой – с единицами, которые в 256 раз превышают первые. Напряжение измеряется в виде двух 8-битовых цифр, каждая из которых соответствует 255 ступенькам, так что скорость может быть существенно снижена. Так как счетчики работают последовательно и младший счетчик работает только после окончания укрупненного счета (рис. 3.7), полное число шагов составляет $2 \cdot 255 = 510$, и частота тактирующих импульсов при интервале 20 мкс составляет

$$\frac{510}{20 \cdot 10^{-6}} = 25,5 \text{ МГц}.$$

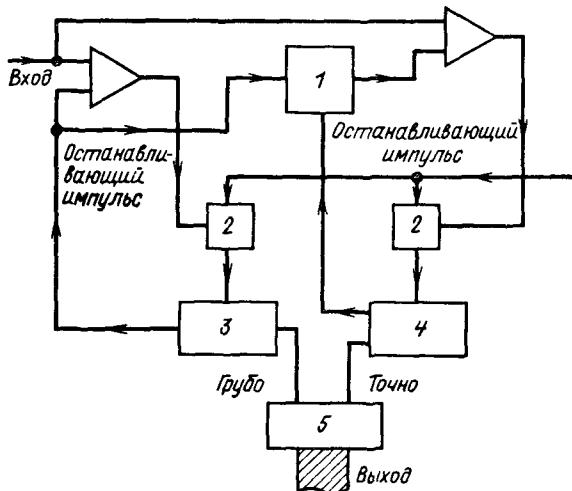


Рис. 3.7. Принципиальная схема двухступенчатой интегрирующей системы:

1 – сумматор; 2 – затвор; 3 – интегратор грубый; 4 – интегратор точный; 5 – счетчик. Грубый интегратор дает уровни, ближайшие к целому числу шагов; число шагов считывается. Остаток интегрируется точным интегратором и дает младшие разряды. Грубый интегратор должен быть смешен так, чтобы напряжение на его выходе было ниже реального значения и чтобы оно запускало точный интегратор

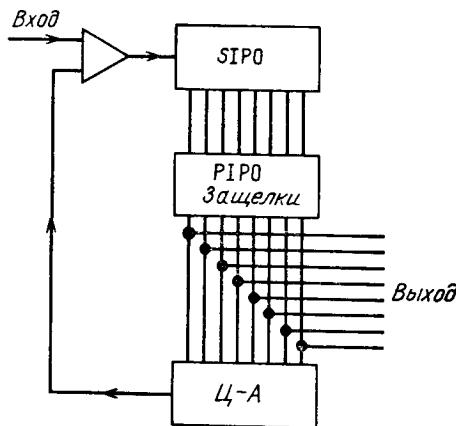
Такая частота может показаться слишком высокой в сравнении с частотами звукового диапазона, но она невелика по сравнению с частотами, используемыми в персональных компьютерах, и является средней для современной интегральной цифровой техники.

Другой формой является последовательный тип АЦП (рис. 3.8). Он состоит из регистра последовательный вход–параллельный выход (SIPO), набора Д-триггеров РИРО, называемого также регистром параллельный вход–параллельный выход, цифро-аналогового преобразователя и компаратора, выход которого управляет работой регистров. Принцип действия этой схемы не слишком очевиден, поэтому представим себе, что происходит при выборке.

Пусть на выходе ЦАП в момент выборки 0, следовательно, уровень сигнала на выходе меньше сигнала на входе. Если на двух входах компаратора 0, то на его выходе высокий уровень и первый тактирующий импульс, поступающий на вход SIPO-регистра переключает первый триггер РИРО-регистра; напряжение на его выходе станет высоким. Этот первый выход РИРО-регистра подключен к старшему входу ЦАП, который для 16-битового регистра соответствует 32 767-му шагу амплитуды.

Дальнейшее зависит от того, будет ли уровень входного сигнала больше или меньше уровня на выходе ЦАП для этого входного числа. Если входной сигнал меньше соответствующего значения, то для этого бита на выходе компаратора будет 0 и на выходах SIPO- и

Рис. 3.8. Принцип последовательной аппроксимации в АЦП. РИРО-регистр необычного типа; он состоит из триггеров, к которым тактирующие импульсы подаются последовательно. Это позволяет изменить состояние выходов без учета предшествующего состояния



РИРО-регистров тоже 0. Если уровень входного сигнала больше уровня сигнала на выходе ЦАП, то первый бит останется на первом месте регистра. Тактирующий импульс не перешлет этот импульс на следующий вход РИРО-регистра, однако воздействует на вход РИРО, который останется на ранее достигнутом уровне. Сигнал на выходе будет больше или меньше сигнала на входе, в результате второй бит в РИРО-регистре установит уровень на выходе 1 или вернет его в 0. Второй бит представляет 16 384-й шаг, если его уровень 1, и 0, если его уровень 0. Процесс повторяется для всех 16 ступеней регистра, пока двоичное число на выходе РИРО-регистра, соединенного со входом ЦАП, не сделает выход ЦАП равным уровню входного сигнала.

При использовании этого метода за время выборки надо сделать только 16 операций сравнения; на одну из этих операций приходится максимум 1,25 мкс. В это время входит время сдвига информации по регистру; также требуется высокое быстродействие ЦАП, более высокое, чем обеспечиваемое большинством конструкций. Скорость — проблема большинства цифровых устройств; она постоянно повышается путем совершенствования технологии изготовления ИС, а также за счет применения новых материалов, например арсенида галлия.

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ЧИСЛА

Итак, мы предположили, что работаем с числами в диапазоне от 0 до 65 535 — диапазоне, который может быть представлен 16 битами. Но напряжения, с которым мы имеем дело — переменные и в том числе отрицательные. Двоичная система счисления не содержит прямых оговорок, препятствующих использованию знака отрицания, но при любом методе преобразования десятичных чисел в двоичные один из битов необходимо использовать для указания знака (знаковый бит). Обычно старший бит используется как знаковый; при 0 в знаковом бите число положительное, при 1 — отрицательное. Принцип образования 4-битовых чисел иллюстрируется нижеприведенным примером для чисел от 0000 до 0111 (от 0 до 7) — положительных и от 1000 до

1111 (от 8 до 15) отрицательных. Способ образования отрицательных чисел несколько неожиданен, поскольку в этом простом примере изменения от +7 до -8 соответствуют изменения от 0111 до 1000. Значение отрицательного числа в десятичных терминах есть значение числа (в пренебрежении знаком) за вычетом 16.

Преобразуемое число должно быть таким, чтобы старший бит оказался незанятым. Преобразуемое число записывается в двоичном коде и полученное число записывается в обратном коде путем замены 0 на 1 и 1 на 0. К полученному числу прибавляется 1.

П р и м е р

4-битовые числа от -8 до +7.

Преобразование производится без учета знака.

1. Запишите десятичное число в двоичном коде как положительное $-6 \rightarrow +6 = 0110$

2. Получите обратный код $0110 \rightarrow 1001$

3. Прибавьте 1: $1001 + 1 = 1010$

4. Число отрицательное, поскольку знаковый бит 1.

Для 4-битового числа

0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
-8	1000
-7	1001
-6	1010
-5	1011
-4	1100
-3	1101
-2	1110
-1	1111

Таков метод кодирования отрицательных чисел. Старший значащий бит (слева) используется как знаковый бит. Преобразование выполняется без учета знака, затем отрицательное число обращается и добавляется 1.

Для 16-битового числа диапазон положительных чисел от 0 до 32 767 и отрицательных от -1 до -32 768. Как видно, в итоге сохраняется названный выше диапазон от 0 до 65 537, но он расщеплен на положительную и отрицательную области. На методы АЦП это обстоятельство не влияет, только надо иметь в виду, что полярность сигналов будет такова, что отрицательные числа в АЦП смогут превышать 1 000 000 000 000 000.

КОНТРОЛЬ ОШИБОК

Одна из проблем систем, оперирующих с двоичными числами, безотносительно их устройства и назначения, состоит в том, что ошибка, выражающаяся в замене 1 на 0 или 0 на 1, может вызвать большую численную разницу. Если ошибка происходит в младшем разряде, то это практически не очень заметно; например, если вместо 0 110 111 001 011 011 (десятичное число 28 251) вследствие ошибки получится 0 110 111 001 011 010 (десятичное число 28 250), то изменение составит примерно 1 часть от 28 000, чем можно пренебречь, но если в результате ошибки в старшем разряде получится 0 010 111 001 011 011 (десятичное число 11 867), то, разумеется, такой ошибкой пренебречь нельзя. Еще более неприятно, когда происходит ошибка в знаковом бите и получается положительное число вместо отрицательного, или наоборот.

Поэтому любая двоичная система должна предусматривать возможность контроля ошибок, а для цифровой звуковой системы одного контроля недостаточно. Надо иметь еще возможность исправления ошибок, поскольку природа звуконосителя (ленты или диска) такова, что биты могут выпадать вообще. При работе с лентами мы всегда встречаемся с ложными сигналами и выпадениями сигналов, вызывающими ошибки считывания двоичных чисел, а в случае дисков — с царапинами и другими дефектами поверхности. Поцарапанный диск может создавать шум и, что еще хуже, вызывать ошибки считывания записанных чисел, а это может привести к потере существенной части звукового колебания. Не будем углубляться в методы обнаружения и коррекции ошибок, поскольку это одна из сложнейших проблем цифровых звуковых систем, а большинство потребителей с этими проблемами не встречается, так как они включены в общую систему управления записью и воспроизведением звука. Достаточно знать основные принципы. Они сводятся к двоичному счету, избыточности и поддержанию уровня.

Двоичный счет — метод контроля одного неправильного бита и простейшая проверка — контроль четности, такой же, как в линиях связи компьютеров с принтерами. Некоторые замечания об этом сделаны в гл. 1, но конкретный пример, приводимый ниже, поможет более ясно представить достоинства и недостатки этого метода. Для простоты предположим, что мы работаем с числами, состоящими из трех разрядов в интервале от 000 до 111. Такие числа могут содержать четное или нечетное число единиц, например 001 и 011; наличие четного или нечетного числа единиц устанавливается очень просто с помощью схемы исключающее ИЛИ. Для достижения четности добавляют 1 бит так, чтобы все числа содержали четное число единиц; этот дополнительный бит помещается на место старшего разряда. Проделаем эту операцию на примере последовательности чисел 000, 001, 011, 100, 101, 110, 111; получится 0000, 1001, 0011, 1100, 0101, 0110, 1111. Если использовать систему контроля нечетности, то каждое из названных чисел будет иметь вид 1000, 0001, 1011, 0100, 1101, 1110, 0111. Во многих случаях

эта система оказывается предпочтительной, так как в ней нет числа 0000 и все числа состоят из 0 и 1.

Контроль четности весьма эффективен для малого числа разрядов и достаточно эффективен для обнаружения ошибки в 1 бит в 8-битовом числе. Однако это не означает, что его можно непосредственно применять в цифровых звуковых системах. Простой контроль может помочь установить факт изменения одного бита, но не может указать, какого именно, не может установить более одного изменения и скорректировать ошибку. Далее мы увидим, что числа могут быть сформированы в группы бит, в которых некоторые биты оказываются более важными.

Избыточность – другой важный метод обнаружения и коррекции ошибок. Грубо говоря, избыточность означает, что каждое число записывается трижды, а приемное устройство организовано так, что оно способно выделить ключевое корректное число, если три версии не совпадают.

Простейший метод состоит в двукратной записи каждого числа с дополнениями для соблюдения четности и исключений числа, в котором не соблюдена четность. Однако простые избыточные системы приводят к нерациональной загрузке схем памяти, и всегда надо тщательно думать о том, что же желательно корректировать. Поскольку биты старшего порядка наиболее ответственны за большие изменения амплитуд сигналов, есть смысл оказывать им предпочтение в смысле избыточности, нежели младшим разрядам. Избыточность передачи информации в двоичных системах привлекала пристальное внимание теоретиков, и сейчас как таковая стала в известном смысле пугающе сложной. В настоящей книге мы только весьма поверхностно каснемся этих проблем особенно сложных систем, созданных для обнаружения и коррекции ошибок применительно к КД.

Если ошибка обнаружена, но не может быть исправлена, то система поддержания уровня определяет число, в котором есть ошибки, сохранив предыдущее число. Скорость выборки при преобразовании звуковых сигналов такова, что разность амплитуд у двух последующих выборок всегда очень мала.

Амплитуда, полученная в предыдущей выборке, является основанием для обнаружения некорректной последующей амплитуды, особенно если изменение амплитуды велико.

Другая возможность состоит в интерполяции, при этом разница амплитуд между двумя предшествовавшими безошибочными сигналами добавляется к сигналу, предшествовавшему ошибке.

Например:

n	$n+1$	$n+2$	$n+3$...
14 605	14 622	-22	14 655	...
Ошибка				

Разница равна 17

Надо принять $14\ 622 + 17 = 14\ 639$

Разница между двумя сигналами запоминается; если следующий сигнал ошибочен, то скорректированный сигнал формируется путем

добавления заломленной разницы к предыдущему значению амплитуды. Даже после нескольких интерполяций форма звукового колебания практически не искажается.

Глава 4. ЦИФРОВОЙ → В АНАЛОГОВЫЙ

ПРОСТЫЕ СИСТЕМЫ

Преобразование цифрового сигнала в аналоговый должно основываться на методах, соответствующих типу используемого цифрового сигнала. Если, к примеру, используется простая цифровая амплитудная модуляция или система, в которой число единиц пропорционально амплитуде сигнала, то можно ограничиться простым сглаживанием (рис. 4.1).

Сглаживание – часть цифро-аналогового преобразования, поскольку преобразуемый сигнал имеет ступенчатую форму (рис. 4.2). При частоте выборки порядка 44 кГц ступеньки располагаются тесно и сглаживание не представляет трудностей. Этую операцию вполне можно выполнить с помощью RC -цепи, не говоря уже о сложных интеграторах, с помощью которых форма воспроизведенного сигнала делается гораздо более близкой к оригиналу, чем это достигается при чисто аналоговой записи. Кодово-импульсные двоичные системы требуют достаточно сложных методов преобразования двоичных сигналов в аналоговую форму; при этом непосредственная подача сигнала на громкоговорители лишена смысла. Двоичный сигнал представляет собой цифровой код числа, соответствующего амплитуде сигнала в каждой выборке. При этом используются схемы, преобразующие число в напряжение, амплитуда которого пропорциональна числу. Альтернативой, которая бы позволила непосредственно управлять громкоговорителями,

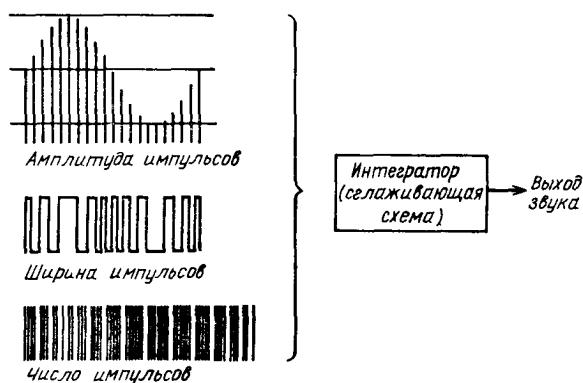


Рис. 4.1 Три типа двоичной модуляции; обратное преобразование в аналоговую форму может быть выполнено путем сглаживания. Ни одна из них не подходит для цифрового звука, хотя импульсно-кодовая система может быть очень полезна, если не требуется каждому числу приписывать большое число импульсов (до 65 535)

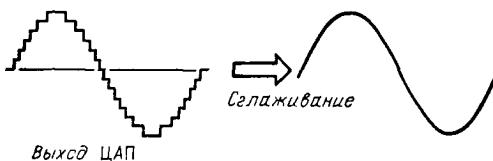


Рис. 4.2. Сглаживание в ЦАП.
Небольшое сглаживание устраивает ступенчатую форму сигнала, однако хороший узкополосный фильтр предпочтительнее

было бы преобразование каждого числа в группу импульсов, количество импульсов в которой было бы равно числу; единица дала бы один импульс, а 65 536 – 65 536 импульсов. Недостаток такой системы в трудности воспроизведения отрицательных чисел; между сглаживающей целью и выходной ступенью необходимо включить конденсатор или трансформатор для исключения постоянной составляющей.

Для наглядности проиллюстрируем процесс преобразования с использованием 4-битовых чисел. В таком числе (как и любом двоичном) каждый бит имеет различный вес в соответствии с местоположением в числе; например, 0001 представляет собой единицу, 0010 – два; 0100 – четыре и 1000 – восемь; это – последовательность степеней, в которую возводится два. На рис. 4.3 показаны регистр и генератор напряжений для 8 бит, каждый бит генерирует напряжение, пропорциональное его значимости в числе; 1 бит на втором месте дает 2 мВ, на четвертом 8 мВ, на седьмом 64 мВ. Сложение этих напряжений дает амплитуду напряжения, пропорциональную двоичному числу 74 мВ в рассматриваемом примере. В этом сущность всех ЦАП.

Рисунок 4.4 иллюстрирует практическую схему реализации метода. Четыре резистора используются в цели отрицательной обратной связи и определяют уровень на выходе буферного усилителя в зависимости от коэффициента деления напряжения. В свою очередь он зависит от отношения сопротивлений, так что переключение резисторов формирует изменения напряжения, пропорциональные сопротивлениям. В этом примере каждый резистор может быть включен с помощью аналогового ключа, который в свою очередь управляется параллельным выходом регистра. Если наивысший порядок бит в регистре 1, то включается резистор, сопротивление которого обозначено R , если следующий бит 1, то включается $2R$, и т.д.

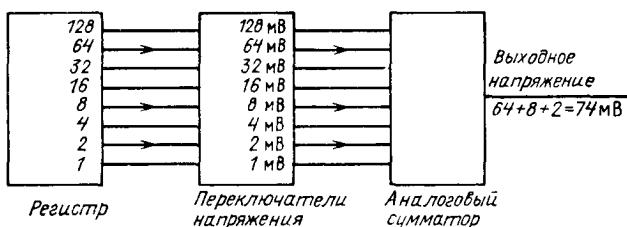
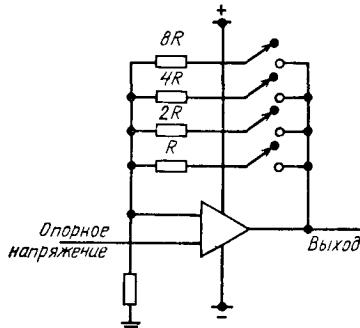


Рис. 4.3. Принцип взвешенного преобразования. Каждый выход регистра управляет переключателем напряжения, которые расположены по степеням двух. При суммировании напряжений восстанавливается амплитуда аналогового сигнала

Рис. 4.4. Сумматор напряжений, показанный только для четырех бит. Используется операционный усилитель с переключаемыми сопротивлениями в цепи обратной связи. Недостаток схемы — необходимость использования широкого диапазона сопротивлений и жесткие требования на их значения. Выход зависит от того, какие резисторы включены



В результате напряжение на выходе буферного усилителя (или аналогового сумматора) будет пропорционально двоичному числу. Пока пренебрежем отрицательными числами, поскольку они реализуются путем изменения напряжения, соответствующего старшему разряду; это несущественно для выяснения принципа действия преобразователя; главное — простота метода.

Преобразователи с переключаемыми резисторами широко распространены и весьма эффективны только для ограниченного числа бит. Проблема состоит в том, что по мере расширения диапазона сопротивлений существенно возрастают требования к точности резисторов. Например, рассмотрим схему, в которой минимальное сопротивление составляет 2 К. Это приемлемая величина, если нельзя пренебречь выходным сопротивлением усилителя и самого резистора, сопротивление которого несравненно больше сопротивления аналогового ключа. Таким образом, для 8-битового преобразователя сопротивления резисторов, соответствующие двойке, возведенной в квадрат, должны составлять 4 К, 8 К, 16 К ... до 256 К. Поскольку это широкий диапазон, допуск на сопротивления должен быть весьма жестким. В системе с 8 битами сопротивления должен быть не хуже одной 256-й. Такие требования непросто реализовать даже при ручной установке сопротивлений, а тем более в интегральном исполнении. Задача решается путем создания тонкопленочных схем с использованием компьютерного оборудования для подгонки сопротивлений резисторов, опять же только не более чем для 8 бит.

Применительно к 16-битовой системе преобразование представляется практически невозможным. Даже если уменьшить минимальное сопротивление до 1 К, то максимальное значение составит 65 М и требования к допуску на сопротивления будут порядка 0,006 %. Скорость преобразования может быть велика, и 16-битовые преобразователи такого типа с тонкопленочными резисторами для некоторых целей находят практическое применение. Для массового применения этот метод реально неприменим. Жесткие требования к допускам на сопротивления могут быть смягчены преобразованием в четырех битах, поскольку старший порядок требует наибольшей точности.

СЛОЖЕНИЕ ТОКОВ

Альтернативой сложению напряжений служит сложение токов. Разумеется, значением тока можно управлять с помощью цепи сопротивлений, и хотя используемые в этом варианте значения сопротивлений более приемлемы, требования к точности их соблюдения сохраняются, как и в предыдущем случае. Есть, однако, и некоторая разница. Вместо преобразования 16-битового числа путем сложения 16 напряжений (каждое последующее из которых вдвое больше предыдущего) можно рассмотреть вариант использования 65 535 источников тока.

Для примера ограничимся тремя разрядами (рис. 4.5). Двоичное число "демультиплексируется" схемой, имеющей 8 выходов. Если на входе 000, то ни на одном из выходов не будет высокого уровня; если на входе 001, то на одном из выходов будет высокий уровень; если на входе 010, то на двух выходах высокий уровень; если на выходе 011, то на трех выходах будет высокий уровень и т.д. Если каждый выход демультиплексора переключает равные токи, то полный ток пропорционален двоичному числу. Система привлекает менее жесткими требованиями к допускам, поскольку биты не взвешены.

Попытка сконструировать 65 536 источников тока, управляемых регистром, не так уж страшна для современной интегральной техники. В настоящее время несмотря на общую тенденцию сокращения числа используемых компонентов надежно работают и более сложные интегральные схемы. Предметом компромисса служит количество источников тока. Вместо 65 536 одинаковых источников тока можно применить меньшее количество источников, поставив их в зависимость от местоположения бита. Предположим, что мы имеем 16 383 источника, каждый из которых оценивается 1, 2, 4 и 8 единицами. Ступеньки тока формируются с помощью резисторов, точность которых вполне реализуема при современной интегральной технологии; число компонентов существенно сокращается даже при более сложном преобразователе с 16 битами на входе. Так построен ЦАП, используемый в системе КД.

Другая возможность состоит в использовании токов, взвешенных в отношении 2:1; при этом нужно только 16 переключающих ступе-

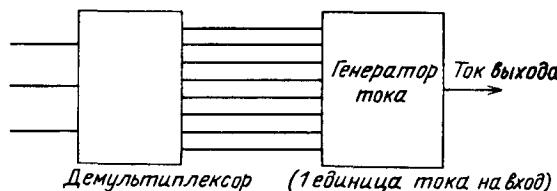
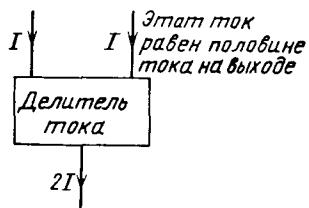


Рис. 4.5. Метод сложения токов. На входе демультиплексора (три линии) – двоичные сигналы. Каждая комбинация напряжений на входах вызывает повышение уровня на выходах; если на входе 001 – одна линия на выходе имеет положительный потенциал, если 101 – то пять линий. Выходы демультиплексора приводят в действие генераторы тока, каждый из которых дает единицу тока в схему сумматора (не показан)

Рис. 4.6. Принцип токового делителя. Если вы думаете, что это токовый сумматор, то действия делителя и сумматора подобны



ней. Это вполне реализуемо в интегральной форме. Принцип токового делителя иллюстрируется рис. 4.6. Разница между токовым сумматором и токовым делителем — в направлениях токов. Входящие токи должны быть в высокой степени идентичны, для чего недостаточно использовать простую резистивную схему.

В таком типе преобразователя, впервые описанном Плаше в 1976 г., используются сопротивления. Принцип построения иллюстрируется рис. 4.7; проще рассматривать эту схему как токовый сумматор, чем как делитель. Два входных тока I_1 и I_2 формируют ток I_3 ; если резисторы R_1 и R_2 равны, то $I_1 = I_2 = I_3/2$, т.е. токи I_1 и I_2 равны половине тока I_3 . Трудность состоит в том, что резисторы R_1 и R_2 не идентичны. Чтобы уменьшить влияние разницы в значениях сопротивлений на результат, можно токи поочередно пропустить через каждое сопротивление. В схеме, показанной на рис. 4.7, б, в течение части цикла ток I_1 течет через сопротивление R_1 , а I_2 — через R_2 ; в течение другой части цикла ток I_1 течет через R_2 , а I_2 — через R_1 . Если переключение производится достаточно быстро, то разница в сопротивлениях усредняется. Условие равенства токов I_1 и I_2 половине тока I_3 достигается, если допуск на сопротивления не превышает 1 %. Теория показывает, что ошибка пропорциональна погрешности управления переключателями; приемлемую точность тактирования не хуже 0,01 % осуществить нетрудно.

Рассмотрим схему, показанную на рис. 4.8. Отношение токов в каждой ступени 2:1. Схема выполнена с небольшим числом комплектующих элементов, не требует применения высокоточных деталей. Схема

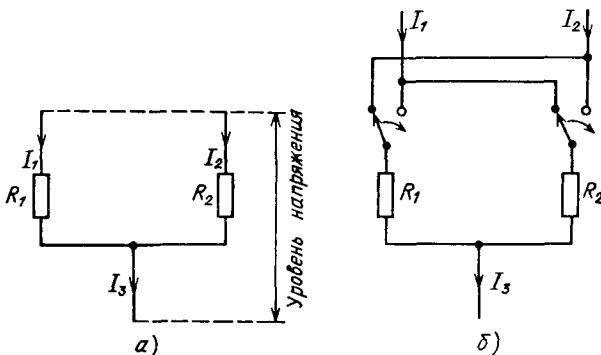


Рис. 4.7. Простой делитель тока (а) и его усовершенствование с переключателем (б). При переключении с высокой скоростью обеспечивается точное деление при условии, что тактирующие импульсы посыпаются с точными интервалами

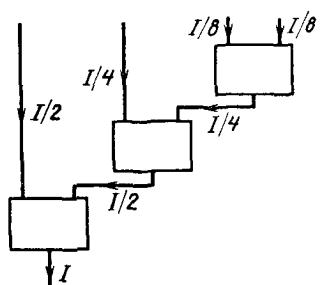


Рис. 4.8. Принцип последовательного токового делителя, выдающего на ЦАП группу токов, значения которых находятся в определенном соотношении

характеризуется достаточно высоким быстродействием и может использоваться в аналого-цифровых преобразователях, описанных в гл. 3. Конденсатор, необходимый для сглаживания небольших пульсаций тока, возникающих в процессе переключения, обычно подключают к штырькам ИС.

Необходимо остановиться на уровне преобразуемого напряжения. Применительно к преобразователям напряжения амплитуда ступенек сигнала может составлять 10 мВ, 100 мВ, 1 В. Чем выше уровень на выходе, тем сложнее осуществляется процесс преобразования, поскольку реализовать высокие скорости переключения напряжений проще при малых ступенках сигналов, так как паразитные емкости заряжаются до меньших уровней. С другой стороны, чем ниже уровень преобразовываемого сигнала, тем выше эффект паразитного шума. Оптимальным уровнем напряжения при преобразовании можно считать 1 В, и он выдерживается таким в большинстве преобразователей.

ПЕРЕД ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

Преобразование цифрового сигнала в аналоговую форму – часть воспроизводящей системы. До преобразования производится поиск и коррекция ошибок; определяется, какие дополнительные биты посланы с каждым числом и с каждой группой чисел. В гл. 3 мы кратко рассмотрели процесс обнаружения и коррекции ошибок, в том числе контроль четности. Контроль четности очень удобен для некоторых систем, в частности, при передаче данных по проводам, но он недостаточен для цифровых звуковых систем и мы рассмотрим более совершенные методы, разработанные в вычислительной технике. Многие из этих методов известны и используются в сравнительно дешевых домашних компьютерах и для коррекции ошибок в системах записи и воспроизведения двоичных сигналов с обычными кассетными лентами. Эти методы называют циклической избыточной проверкой (ЦИП), мы рассмотрим простейший из них – метод контрольных сумм.

Метод контрольных сумм основан на добавлении двоичного числа к группе. Большинство цифровых звуковых систем работает с кадрами – группами чисел, включающими в себя сигналы синхронизации и сигналы коррекции ошибок. Пусть каждый кадр состоит из 12 чисел. Чтобы получить контрольную сумму, пренебрегая любым переполнением, добавим 12 чисел так, чтобы сумма укладывалась в 16 бит. Ниже приводится пример для 4-битовых чисел. Число, соответствующее контрольной сумме, записывается как часть кадра. В приемном устройстве числа суммируются точно таким же образом и результат срав-

нивается с контрольной суммой. Если обнаружено несовпадение, значит, при передаче произошла ошибка.

Номера данных /десятичные/	7	3	6	1	3	4	2	6	4
		$\overbrace{7+3=10}$							
		$=8+2$							
		$\overbrace{2+6=8}$							
		$=8+0$							
		$\overbrace{0+1=1}$							
		$\overbrace{1+3=4}$							
		$\overbrace{4+4=8}$							
		$=8+0$							
		$\overbrace{0+2=2}$							
		$\overbrace{2+6=8}$							
		$=8+0$							
		$\overbrace{0+4=4}$							

Контрольная сумма = 4

Альтернативно: сумма = $36 = 8 \cdot 4 + 4$ в остатке.

Этот метод контроля ошибок более чувствителен, чем метод контроля четности, при котором замена нуля единицей может компенсироваться заменой единицы нулем в том же самом положении бита в другом числе. Но все же использование метода контрольной суммы не позволяет установить местонахождение ошибки, хотя с его помощью можно определить, есть ли ошибка в конкретном кадре или нет; само по себе это уже ценная информация. Для более точного обнаружения местоположения ошибки используются некоторые способы контроля каждого байта или слова, и в ряде случаев ЦИП оказывается очень удобной.

Математические основы ЦИП изложены в специальной литературе и мы ограничимся примером. Как и во многих системах обнаружения ошибок в ЦИП используются избыточные биты. Для примера рассмотрим сигнал, состоящий только из 5 бит. Для кодирования его в соответствии с ЦИП надо использовать 8 бит, 3 из которых являются избыточными и предназначены для обнаружения ошибок. Ниже приводится пример практических действий.

Дано: 01101101100 (десятичное 109)

Ключ: 101 (десятичное 5)

Остаток от деления $100 \cdot 109 / 5 = 204 / 54$ остаток передается как 01101101100

В приемнике перегруппировывается как 01101101 и 100

01101101, деленное на 101, дает 100. Данные без ошибок.

В этом примере число делится ключевым числом и замечается остаток. Данные сдвигаются влево на три позиции и остаток прибавляется

ся. В приемнике контроль такого же типа должен дать тот же остаток.

Выбор ключевого числа не случаен. Оно должно начинаться с 1 и число составляющих его бит должно быть равно числу бит, отведенных для обнаружения ошибок. В нашем примере, когда для обнаружения ошибок отведено 3 бита, ключевое число должно содержать 3 бита и начинаться с 1. Если мы сдвигаем данные влево на 3 позиции и затем делим полученное на ключевое число, остаток после деления будет числом, которое может быть нулем (нет остатка) и далее до 3 бит по 1. Для примера, если мы приняли 3 избыточных бита и используем 7 в качестве ключевого числа, то максимальный остаток 6 (двоичное 110).

После выполнения деления остаток помещается на младшие вакантные места полного числа, которое теперь состоит из бит данных и бит остатка. Если оно передается без ошибок, деление бит данных на то же ключевое число должно дать тот же остаток. Применение этой системы требует определенных навыков, и она хорошо работает при удалении больших изменений сигнала.

Использование ЦИП, разработанной для цифровой звуковой системы, требует дополнительных затрат времени и приводит к увеличению объема обрабатываемых данных. Поэтому лучше использовать другую форму кодирования (не просто двоичную), которая будет рассмотрена в гл. 6.

Глава 5. СТУДИЙНЫЕ ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ЗАПИСИ

ЦИФРОВЫЕ ЛЕНТЫ

Основная и наиболее старая проблема записи на магнитную ленту состоит в нелинейности намагничивания ленты. Зависимость остаточной намагнченности от амплитуды намагничающего тока имеет S-образную форму, и при малых токах намагничивания лента не намагничивается вообще. Традиционный метод борьбы с этим недостатком состоит в подаче на записывающие головки ультразвукового смещения так, чтобы звуковой сигнал накладывался на пики высокочастотного сигнала. Подбирая соответствующую амплитуду смещения, можно добиться, что звук будетмещен на участок характеристики с приемлемой линейностью, но только с "приемлемой".

Главное достоинство цифровой записи звука на магнитную ленту очевидно: поскольку сигнал состоит из 0 и 1, требование к линейности отпадает и вместе с ним другие трудности аналоговой магнитной записи. Устраняется и другое противоречие, присущее аналоговой записи противоречие между необходимостью обеспечить требуемую линейность и широкий динамический диапазон звуковых амплитуд, реализуемый без перегрузки ленты. В прошлом для нахождения приемлемого компромисса разрабатывались сложные компандеры¹, которые иногда обеспечивали хорошее качество звука, иногда — нет. Поскольку ампли-

¹ Устройства, состоящие из компрессора и экспандера.

туда двоичных сигналов постоянна — устраняется проблема перегрузки ленты и насыщения.

Теперь, когда цифровая запись вошла в жизнь, трудно даже вспомнить все неприятности, возникавшие при освоении аналоговой записи. В то время как значение коэффициента искажений 0,1% было уже обычным для усиления, в магнитной записи добивались уровня искажений менее 1%. Некоторые небольшие фирмы звукозаписи, которые были не в состоянии вкладывать огромные капиталы в современную технику, вернулись к прямому резанию в процессе изготовления оригиналов, побуждая звукоинженеров совершенствовать существующие системы. Во избежание излишней эйфории уместно вспомнить о трудностях, стоявших на пути цифровой записи на ленту. Основная проблема состоит в необходимости обеспечить высокую плотность записи цифровых сигналов (гораздо большую, чем при аналоговой записи). В стандартной системе КД частота выборки 44,1 кГц и запись 16 бит в каждой выборке; с учетом необходимости осуществления качественного контроля ошибок и введения корректирующих битов частота посылок 1 и 0 становится устрашающей — порядка нескольких мегагерц. Это уже область выдеочастот и, возможно, цифровую звукозапись вообще не удалось бы осуществить, если бы не одно обстоятельство. Дело в том, что звукозапись проще видеозаписи, поскольку видеосигнал — не цифровой сигнал. Для записи видеосигналов их необходимо преобразовать в форму, подобную цифровым сигналам путем использования частотной модуляции с постоянной амплитудой. Однако даже при использовании противоположных направлений намагничивания для записи 0 и 1 скорость записи остается очень высокой. Полоса пропускания при цифровой записи должна быть примерно в 30 раз шире полосы, требуемой при аналоговой записи. Во времена аналоговой записи постоянно приходилось искать компромиссы между стремлением обеспечить широкую полосу пропускания и достичь хорошей линейности. У цифровой записи есть дополнительные возможности, например применение двух или более стереоканалов на дорожке или перемежение звуковых и управляющих сигналов.

Однако, что бы ни предпринималось, проблема полосы пропускания может быть удовлетворительно решена только при условии обеспечения необходимой скорости движения ленты относительно головки. Эту задачу можно, в частности, решить (как это делалось в первых цифровых и аналоговых магнитофонах) путем увеличения скорости протяжки ленты относительно неподвижной части головки. В более совершенной СГ-системе¹ используются многодорожечные головки. Удобнее протягивать ленту с не очень высокой скоростью и использовать врачающуюся магнитную головку, осуществляющую запись на наклонных дорожках. Для студийной записи применение устройств со стационарными головками не является таким неудобством, как для домашних условий (необходимо использовать очень длинные ленты и катушки большого диаметра). У аппаратов со стационарными голов-

¹ Стационарная (неподвижная) головка.

ками есть существенное достоинство — они позволяют записывать несколько каналов, а студии обычно хотят записывать по меньшей мере 24 канала.

Важное значение имеют минимальная длина ленты и максимальная частота выборки. Минимальная длина ленты — минимальная длина, на которой может быть записана полная звуковая волна. Она зависит от зазора в записывающей головке и обычно составляет 1–5 мкм. Допустим, что лента движется вдоль головки со скоростью 5 см/с и минимальная длина составляет 5 мкм. При этом можно записать $1\ 000\ 000/5 = 200\ 000$ циклов на одном метре ленты и получить $200\ 000/20 = 10\ 000$ циклов на 5 см ленты. При скорости движения ленты 5 см/с можно записать 10 000 циклов в секунду, что соответствует полосе пропускания 10 кГц. Для записи частот порядка 4 МГц с минимальной записываемой длиной волны 5 мкм необходимо иметь скорость движения ленты порядка 20 м/с. Даже для студийных условий это неприемлемо и уже в прошлом использовались простые цифровые методы, позволяющие уменьшить полосу пропускания до 1 МГц. В дальнейшем различными приемами, такими как расщепление данных по разным каналам, скорость протяжки ленты для систем с неподвижными головками удалось уменьшить до 38 см/с.

Проблема скорости существенно упрощается при использовании вращающихся головок, хотя при этом возникают трудности с управлением и синхронизацией. Использование вращающихся головок позволяет работать при скоростях, сравнимых со скоростями протяжки, используемых в бытовых кассетных магнитофонах. При этом возможна импульсно-кодовая модуляция (ИКМ), применяемая чаще других типов цифровой модуляции. Признанным пионером в создании записывающей аппаратуры с вращающимися головками и ИКМ является Nippon Columbia of Tokyo, которая в 1972 г. продемонстрировала звуковую систему с использованием ИКМ на базе профессионального видеомагнитофона. С того времени разработаны многие другие звукоаппараты и звуковоспроизводящие системы, а также система КД.

Виде- и цифровая звукозапись оказались во многом совместимыми; они развивались одновременно и очень быстро. Совсем в стороне от цифровых методов явилось отсутствие единых мировых стандартов на звукозапись. С развитием видеозаписи создавались несовместимые стандарты на видеокассетные магнитофоны, например VHS, Betamax и разработки фирмы Philips. Неудивительно, что сейчас используется по меньшей мере 5 основных несовместимых систем студийной цифровой звукозаписи катушечного типа. Большой успех имела разработка мирового стандарта на КД, выполненная фирмами Philips и Sony.

Сейчас системы со стационарными головками не очень распространены, хотя они имеют ряд достоинств, весьма существенных для малых студий. К тому же аппараты со стационарными головками позволяют использовать другие типы головок для воспроизведения записанного сигнала, что, в общем, невозможно в случае использования вращающихся головок.

Первыми среди машин с вращающимися головками были аппараты фирмы Sony PCM 1620 и 1630; они и сейчас широко используются, несмотря на то, что подобные устройства выпускаются и многими другими изготовителями. Кассетные системы используют вращающиеся головки и работают с цифровыми сигналами; они отвечают стандартам на КД. Однако объем продажи кассет сдерживается компаниями, которые предвидят, что записывающие системы, позволяющие делать совершенные копии с КД, подорвут рынок сбыта КД. Динамика продажи средств программного обеспечения для компьютеров, заставляет думать о том, что придется продавать КД по цене, конкурентоспособной с ценой на незаписанные ленты. Возможно, что проблема не так сложна, как кажется. Быстрый переход от долгоиграющих дисков к лентам был в значительной степени обусловлен износом дисков. Поскольку КД имеют действительно неограниченный срок службы, они в этом смысле не уступают лентам, используемым в обычных кассетных устройствах. Интересно, что системы с вращающимися головками (ВГ) разработаны в Европе, а основным поставщиком КД является Япония.

ТЕХНИКА ВРАЩАЮЩИХСЯ ГОЛОВОК

Читатель, не интересующийся видеокассетами, должен иметь в виду, что техника записи с помощью вращающихся головок столь же необычна, как сама цифровая запись. Этот раздел – введение в идеи записи с помощью вращающихся головок, рассчитанное на читателя, чей опыт основан на обычной аналоговой звуковой аппаратуре. Для читателя, имеющего опыт видеозаписи, многое окажется знакомым, хотя использование вращающихся головок в записи цифровых звуковых сигналов в деталях не идентично записи на видеокассеты. Отметим, что обычная кассета содержит ленту ограниченной длины, которой при использовании стационарных головок хватило бы всего на несколько минут работы. В случае использования стационарных записывающих головок скорость записи и воспроизведения должна быть такого же порядка, как для современных высокоскоростных видеокассетных магнитофонов.

Идея использования вращающихся головок заимствована из кассетной видеозаписи и другой ленточной видеоаппаратуры и состоит в том, что скорость головки относительно ленты может быть очень высокой, а собственно лента при этом может двигаться со сравнительно небольшой скоростью – около 1,873 см/с (записывающая аппаратура типа Betamax).

Обычно используются две головки, вращающиеся достаточно быстро, так что скорость головки относительно ленты составляет 5–7 м/с в зависимости от системы (наибольшие скорости используются в системе Betamax). Дорожка на ленте располагается под небольшим углом, так что каждая головка пересекает ленту до диагонали (рис. 5.1). Угол, на который поворачивается лента, составляет примерно 180°. При движении ленты между соседними видеострочками формируется защитная дорожка. Края ленты проходят вдоль стационарных головок, одна из

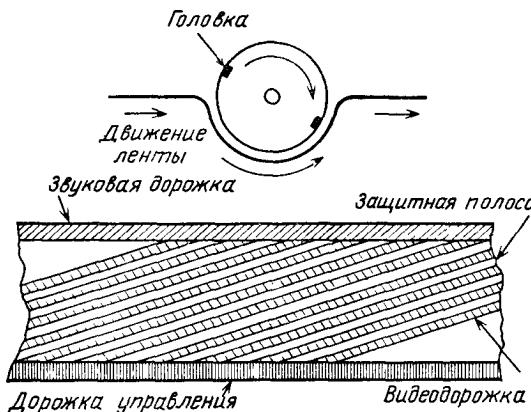


Рис. 5.1. Принцип записи с помощью вращающихся головок. Лента протягивается так, что две головки, содержащиеся на барабане, проходят ленту под небольшим углом. Таким образом формируются участки дорожек, разделенные защитными полосками. Края ленты могут быть использованы для записи звуковых и управляющих сигналов

которых записывает управляющие и синхронизирующие сигналы на другом краю ленты. В старых вариантах видеокассет качество звука было плохим потому, что звук записывался с помощью стационарных головок и скорость протяжки ленты была мала даже по сравнению со стационарными звуковыми кассетами. В более современных системах используются дополнительные вращающиеся головки и запись ведется теми же методами, которые впоследствии развились в системы с вращающимися головками. Видеосигналы разделены на секции и частотно-модулированы, чтобы уменьшить требования к линейности магнитных характеристик ленты.

На первый взгляд может показаться, что хорошо опробованную систему можно непосредственно применять для цифровой звукозаписи, тем более что к качеству цифровых звуковых сигналов предъявляются не слишком жесткие требования. Но дело в том, что звуковой сигнал продолжительный, а видео – нет; видеосигнал состоит из группы колебаний, которые повторяются через 20 мс (длительность чередования полей). Каждому полю соответствует набор строк на экране телевизионного приемника; два поля образуют полный набор – "картинку". Разворотка – чересстрочная; одному полю соответствуют нечетные строки, другому четные. Временной интервал между полями велик, и луч успевает переместиться в верхний левый угол экрана. Это время – время синхронизации полей; оно соответствует 20 строкам в каждом поле и равно 1,28 мс.

В течение интервала синхронизации передаются только синхронизирующие импульсы, а не видеосигнал. Если вращение головок управляется надлежащим образом и количество намотанной ленты корректно, то точка пересечения одной головки с другой может быть подстроена в течение этого интервала. Одна дорожка записывается одной головкой; содержимое записи соответствует одному полу. Импульсы, синхронизирующие поля, создаются генератором.

При записи телевизионного сигнала нарушение непрерывности видеосигнала облегчает переход с одной головки на другую. В звуковом сигнале таких разрывов нет и, если мы хотим использовать систему с дву-

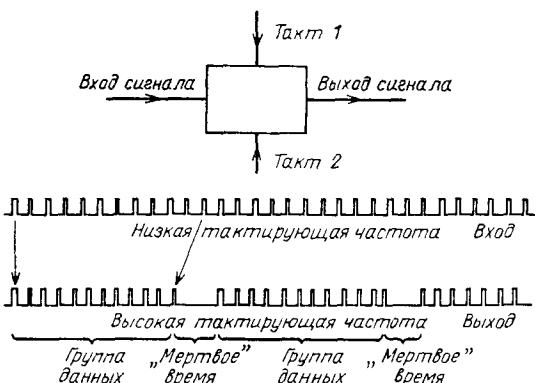


Рис. 5.2. Сжатие данных, используемое для формирования искусственного разрыва в данных, необходимого при применении вращающихся головок. Сигналы помещаются в память с одной скоростью, а считаются с другой – большей. Затвор служит для прерывания. На рисунке показаны импульсы, сгруппированные по 12; в действительности используются группы из большего количества сигналов. В приемном устройстве процесс восстанавливается с первоначальной тактирующей частотой. Каждый импульс представляет группу звуковых сигналов

мя головками, то такой разрыв нужно создать. Это основа всех систем, в которых используется цифровая запись звука на стандартные видеокассеты, а также для цифровых звуковых кассет – систем с ВГ.

Разрыв создается времененным сжатием двоичных импульсов, формирующих кадр сигнала. Кадр сигналов – искусственное формирование – это группа сигналов, проходящих за время, в течение которого головка сканирует отрезок ленты. При временном сжатии число импульсов, посыпаемых за время одного кадра в записывающую головку, меньше натуральной длительности кадра. При этом создается временной интервал, в течение которого сканирование ленты передается от одной головки к другой, после чего посыпается или принимается другой кадр.

Временное сжатие осуществляется с помощью памяти типа компьютерной. Цифровые сигналы, поступающие из цепей обработки, непрерывно загружаются в память, а содержимое считывается только в течение интервала (рис. 5.2). Для этого необходимо более сложное устройство, чем простой регистр сдвига, потому что считывание происходит быстрее записи (на записывающей стороне), так что в памяти должен быть размещен полный кадр сигналов плюс сигналы, поступающие между кадрами. Для этого используется ЗУПВ, и ниже мы покажем, что это не такая простая система.

В отличие от памяти на регистрах сдвига в ЗУПВ используется набор триггеров; доступ к любому из них осуществляется произвольно. В такой памяти выборка осуществляется с помощью двоичного числа, называемого адресом, и каждый элемент памяти имеет свой собственный адрес. Для некоторых типов ЗУПВ, используемых в компьютерах, запись и считывание никогда не производятся одновременно. Для целей временного сжатия в звуковой технике можно использовать ИС памяти,

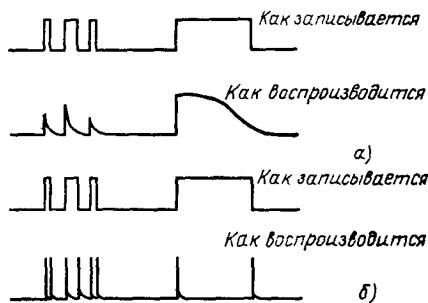


Рис. 5.3. Проблемы считывания. Если сигнал состоит из большого количества 1, возникают трудности интегрирования (а), особенно при коде БВН. Проблема упрощается, если метод записи использует 1 для каждого перехода от 0 к 1 или от 1 к 0 (б)

имеющие раздельные вводы и выводы. Время, необходимое для записи или считывания одного бита, в таких схемах мало (порядка 150 нс), так что можно перемежать операции считывания и записи. Есть необходимость в периодическом очищении памяти, поскольку операция записи бита зависит от того, что хранилось ранее.

С помощью такой памяти создается сигнал, который имеет "горизонтальные" синхроимпульсы (при более редких интервалах). По существу, это видеосигнал, который может быть записан устройством видеозаписи с вращающимися головками. Стандартная система кодирования, используемая в видеозаписи — код "без возвращения к нулю" (БВН), может быть использована с любым видеокассетным записывающим устройством. Записываемый сигнал, считываемый из памяти с постоянной скоростью, может быть тотчас же загружен в ту же память. Записывающая система для видеокассет относится к типу БВН и это требует пояснений. Магнитная лента хорошо приспособлена к записи импульсов, но на ней нельзя записывать и воспроизводить сигналы постоянного тока. Если имеется большая группа сигналов, состоящая только из 1 или 0, то ее невозможно правильно записать и воспроизвести, так как по существу такая группа представляет собой посылку постоянного тока. Кроме того, в потоке сигналов, состоящем из одинаковых бит, невозможно сосчитать их число; такой поток будет воспринят с ленты как длинный импульс с медленно спадающим задним фронтом (рис. 5.3). Система, в которой одно из направлений намагничивания ленты соответствует 0, а противоположное 1, называется системой без возвращения к нулю (БВН). Она не очень хорошо приспособлена для звуковых кодированных сигналов, однако преобразование цифровых звуковых сигналов в форму видеоимпульсов позволяет использовать такой тип модуляции. При этом не используются более простые методы, применяемые в записи на диски, и запись цифровых звуковых сигналов становится аналогичной видеозаписи. Позже мы увидим, что для решения проблемы однотипных последовательностей 0 или 1 используются более сложные коды, чем простые двоичные.

ПУЛЬТЫ И МОНТАЖ

В студии с цифровыми звуковыми сигналами (как и с аналоговыми) необходимо выполнять ряд рабочих операций, таких как регулирование громкости, микширование и монтаж с последующим преобразо-

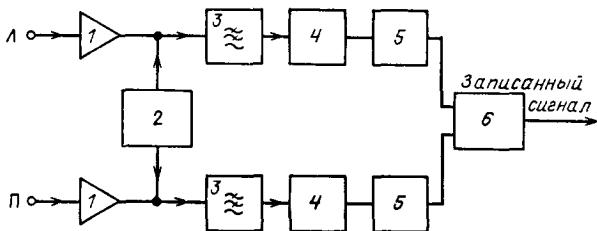


Рис. 5.4. Структурная схема цифровой записи на ленту с использованием импульсно-кодовой модуляцией. Воспроизводящие ступени выполняют операции, противоположные производимым при записи:

1 – буфер; 2 – генератор подмешиваемых сигналов; 3 – узкополосный фильтр; 4 – выборка и хранение; 5 – АЦП; 6 – обработка

ванием их в аналоговую форму. Склейка ленты – операция несложная в случае использования стационарных головок, а для склейки ленты в системах с вращающимися головками существуют специальные машины. Пульты для выполнения операций микширования и регулировки громкости представляют собой весьма сложное оборудование. В случае аналогового сигнала регулировка громкости осуществляется с помощью потенциометра. При работе с двоичными сигналами эта операция осуществляется путем вычитания соответствующих двоичных чисел. "Вычитаемое" не может быть постоянным, иначе сигнал искажается; его значение зависит от амплитуды, т.е. необходимо вычесть определенную часть амплитуды сигнала в каждой точке.

Для регулирования громкости каждое двоичное число надо умножить на число, равное коэффициенту деления потенциометра, который применялся бы в случае аналогового сигнала. Это медленный процесс, поскольку он состоит из большого числа шагов; операция выполняется соответствующим оборудованием. В малых студиях все вышеперечисленные действия выполняются до преобразования сигнала в цифровую форму.

Тем не менее созданы и работают цифровые студии. Однако полностью цифровые пульты производятся только применительно к системе КД. В ближайшем будущем будут созданы полностью цифровые студии с универсальным оборудованием; этому способствует постоянное снижение цен на цифровые устройства, в частности, на схемы памяти. Период времени, в течение которого цена компьютера снизилась с 15 тыс. дол. до 500 дол., был периодом интенсивного развития цифровой звуковой техники. Сейчас время получать прибыли от проведенной дорогостоящей работы

Ниже описывается схема двоичного устройства, записывающего обычные видеокассеты. Интересно, что одно время эта схема рассматривалась как схема устройства для бытовой звукозаписи. Как будет показано в гл. 7, окончательно принятая система цифровой записи на пленку мало похожа на описанную.

Система допускает изменение скорости выборки и максимальной частоты записи, зависящей от нее. Звуковой сигнал проходит через

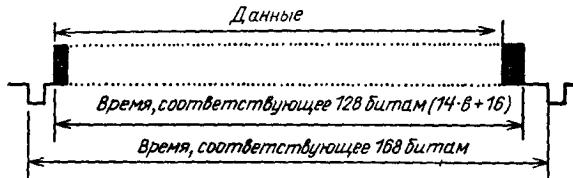


Рис. 5.5. Структура данных звукового сигнала, подобного сигналу цветного телевидения, допускающая использование записи на видеокассету

фильтр с полосой пропускания 0–20 кГц и неравномерностью ± 2 дБ, с тем чтобы более высокие частоты не могли интерферировать с частотой выборки. Структурная схема устройства показана на рис. 5.4. После фильтра включаются схемы выборки и кратковременной памяти, сигнал с выхода которой преобразуется. Частота выборки составляет 44,056 кГц.

Результирующий цифровой сигнал видеоизменяется в форму сигнала NTSC (стандарт цветного телевидения США). Это позволяет использовать стандартные видеокассеты для записи и воспроизведения. Но вначале сигнал перекодируется из восьмеричного в четырнадцатеричный код; при этом на каждый бит сигнала в коде 8–4–2–1 формируется 14 бит сигнала; аналогичное преобразование производится в системе КД, о чем – ниже.

Сигнал преобразуется в "строки" и "поля" точно такие же, как у телевизионного сигнала. Каждая строка занимает время, эквивалентное 128 битам сигнала и вместе с битами синхронизации составляет 168 бит (рис. 5.5). Строки собираются в поля по 245 строк в каждом; с синхронирующими импульсами поле занимает время, эквивалентное 262,5 строк. Рисунок 5.6 иллюстрирует разницу между четными и нечетными полями.

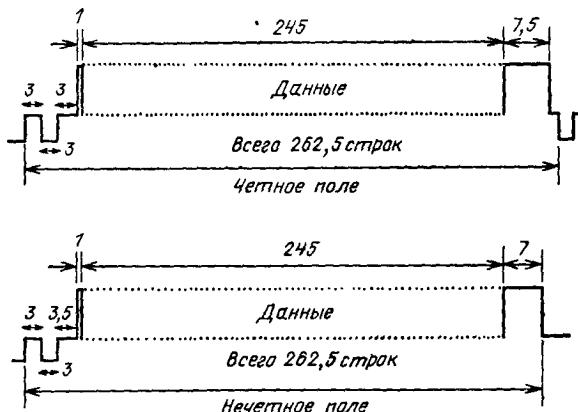


Рис. 5.6. Структура цифрового сигнала типа псевдовидео. Она организована с четными и нечетными полями, так же как телевизионный сигнал

К каждому кадру добавляются данные расположения сигнала, состоящие из одной строки, содержащей сигнал задания уровня 1100, идентификационные сигналы, 16-битовый сигнал циклической проверки кода, адресные и управляющие сигналы.

Используются уровни сигналов 0,4 В для 1 и 0,1 В для 0; в телевидении они соответствуют опорному уровню и уровню черного. Пиковый сигнал белого передается в течение обратного хода для коррекции цепи автоматической регулировки громкости.

Глава 6. СИСТЕМА КД

ВВЕДЕНИЕ

Создание системы КД – редкий пример международной кооперации, позволившей создать мировой стандарт, чего существенно нехватало первому поколению аппаратуры видеокассетной техники. Система КД родилась не из общих идей создания цифровой техники, а из целевой попытки создать видеодиски – приемлемую альтернативу видеокассетам. Уже при возникновении видеодисков были известны две системы, одна из которых требовала механического контакта между диском и устройством, снимающим сигнал, и другая – которая этого контакта не требовала. Фирма Philips предложила систему, в которой считывание информации с диска производилось с помощью луча лазера, без какого-либо механического контакта. Несмотря на очевидные достоинства этого предложения, видеодиски не имели видимого коммерческого успеха, хотя и обеспечивали высочайшее качество изображения и звука в сравнении с видеокассетными записями.

Работа над видеодисками велась в атмосфере конкуренции, но к тому времени, когда внимание акцентировалось на поисках наиболее интересной для рынка сбыта идеи КД, стремление к унификации преобладало. В известном для видеосистем смысле звуковые системы никогда не были полностью несовместимыми. При покупке звукозаписывающего устройства или кассеты в любой стране Вам не надо задумываться над типом системы воспроизведения. Изготовители поняли, что звуковой рынок весьма отличается от видеорынка. В то время как новые типы кассетной записывающей аппаратуры позволяли реализовать ранее невыполнимые функции, звуковые КД успешно конкурировали с ранее известными способами воспроизведения звука.

В 1978 г. 35-ю ведущими японскими фирмами-изготовителями была заключена конвенция, которая рекомендовала работу по созданию цифровых дисков вести в 12 направлениях, одним из них было направление, предложенное фирмой Philips. Особенности этого предложения состояли в следующем: линейная скорость записи должна быть постоянной, необходимо использовать модуляцию 8 на 14 и новую систему коррекции ошибок, названную перемежающимся кодом Рида–Соломона. Использование постоянной скорости записи означало, что на внешней и внутренней дорожке диска скорость считывания двоичной инфор-

мации должна быть одинакова. Фирма Philips решила эту задачу путем использования постоянной скорости записи и изменения частоты вращения диска на различных расстояниях от центра. В этом легко убедиться, проигрывая начало КД (внутреннюю дорожку) и конец (внешнюю дорожку). Замедление скорости очень заметно. Использование постоянной скорости считывания двоичных данных существенно упростило их обработку.

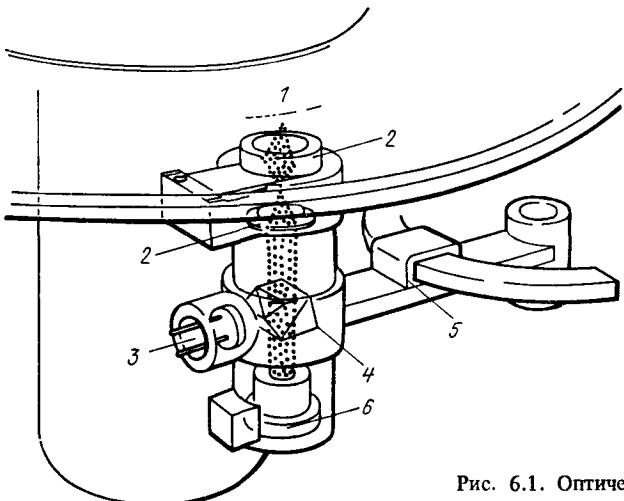
В 1980 г. фирмы Sony и Philips решили совместно использовать методы модуляции, разработанные фирмой Philips, и системы обработки сигналов, предложенные фирмой Sony. Сочетание нового метода коррекции ошибок с высокой плотностью записи данных поставило систему вне конкуренции; другие компании вынуждены были купить на нее лицензию. Все другие системы получили отставку. Система КД утвердилась как редкий пример кооперативного достижения на фоне интенсивной рыночной конкуренции.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

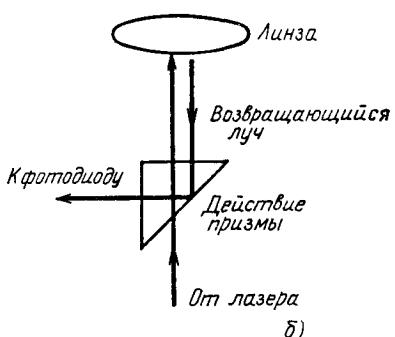
В системе КД принята оптическая запись с помощью луча миниатюрного полупроводникового лазера. Несмотря на малую мощность (порядка милливатт), сфокусированный луч в состоянии испарить легко-плавкий материал, например специально подобранный пластик. Записывающий луч за доли микросекунды испаряет материал, формируя микроминиатюрный кратер — углубление диаметром примерно 0,6 мкм (диаметр человеческого волоса примерно 50 мкм). Глубина углубления очень мала, примерно 0,1 мкм (условимся для простоты называть это углубление точкой). В отсутствие луча поверхность диска остается без изменений. Таким образом производится запись импульсов в форме: есть точка, нет точки.

Считывание точек с диска производится с помощью совсем маломощного полупроводникового лазера (при считывании испарять материал нет необходимости). Считывающий луч отражается от нетронутой поверхности диска и рассеивается при попадании в точку. С помощью оптической системы (рис. 6.1) луч лазера проходит в обоих направлениях (к поверхности диска и от нее). Отраженный луч направляется на фотодиод, который воспринимает сигнал и не воспринимает его, если луч рассеивается, попав в точку. Двоичный сигнал, снимаемый с выхода фотодиода, обрабатывается и преобразуется в звуковой сигнал. Только лазер является источником монохроматического (единственная частота излучения) и когерентного (без перерывов в распространении волны) излучения; луч его можно сфокусировать в очень маленькой области.

На поверхность КД нанесен прозрачный слой, защищающий ее и точки, несущие записанную информацию, от возможных повреждений (рис. 6.2). Этот слой совместно с оптической линзой фокусирует луч лазера. Диаметр луча на поверхности прозрачного покрытия примерно 1 мм, а в результате совместного действия линзы и покрытия диаметр сфокусированного луча составляет примерно 0,5 мкм. Это означает, что частицы пыли, ворсинки на поверхности диска практически не влияют



а)



б)

Рис. 6.1. Оптический путь светового луча в проигрывателе КД (*а*); оптические компоненты расположены внизу диска. Действие призмы более четко показано на нижнем рисунке (*б*); она расщепляет возвращающийся луч и часть его направляет на фотодиод:

1 – фокус на диске; 2 – линза;
3 – фотодиод; 4 – призма; 5 –
двигатель установки на дорожке;
6 – пазер

на фокусировку луча, хотя диаметр их может достигать 1 мм. Это только одна из причин, по которой запись на КД не подвержена воздействию пыли, царапин на внешней поверхности диска; другая причина – эффективная система коррекции ошибок.

Каким же образом удерживается считывающий луч на дорожке? Точки расположены по спирали, как звуковая канавка на обычном диске. Однако эта спираль начинается от центра внутри диска и запись идет к краю диска, с шагом между двумя соседними дорожками, составляющим всего 1,6 мкм. Поскольку между считывающим устройством и диском нет механического контакта, слежение за дорожкой осуществляется с помощью серводвигателя. Положение внутренней дорожки отыскивается автоматически. При радиальном перемещении считывающего устройства ведется счет пройденных дорожек; можно установить считающее устройство на любую из 41 250 дорожек. Поскольку диаметр внутренней дорожки составляет 50 мм, а наибольший диаметр внешней дорожки 116 мм, число знаков на внешней дорожке примерно в 2,32 раза больше, чем на внутренней. Частота вращения диска 200 об/мин на внешней дорожке и около 500 об/мин на

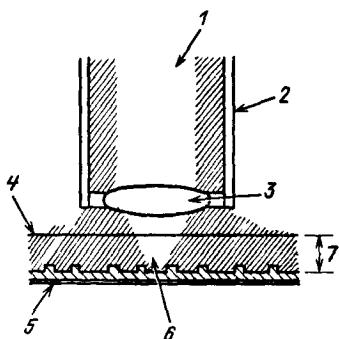


Рис. 6.2. Расположение линзы; луч фокусируется пинзой и прозрачным покрытием. Диаметр луча на поверхности прозрачного покрытия относительно велик, что позволяет ему "не замечать" пыли и царапин на поверхности диска:

1 – луч света; 2 – держатель; 3 – линза; 4 – поверхность; 5 – основание; 6 – фокусировка на точке; 7 – прозрачный слой

внутренней; частота определяется схемой управления. Знаки считаются с постоянной скоростью, определяемой ведущей тактирующей частотой; скорость считывания составляет примерно 1,2–1,4 м дорожки в секунду.

Следующая проблема – запись и воспроизведение двух каналов (стерео). Механические и оптические препятствия на очевидном пути использования двух дорожек и двух оптических считающих устройств устраняются попеременной записью информации от двух каналов на одну дорожку. Такое решение упрощает устройство хранения данных перед записью; можно использовать две схемы памяти, одна из которых содержит данные, относящиеся к левому каналу, другая – к правому; они могут считываться в третью схему памяти, готовящую полный кадр. При этом нет необходимости проводить фазированную выборку для сохранения временных интервалов между выборками разных каналов. На компьютерном жаргоне это означает, что изменения происходят вне реального времени.

Наиболее сложной сферой всей КД-системы является метод модуляции, обнаружение и коррекция ошибок, способ комплектования кадров сигналов для записи и воспроизведения. Точное описание этих процессов можно получить, приобретя лицензию. Доходы от продажи лицензии делятся между фирмами Philips и Sony, к лицензии прилагается справочник, называемый "Красной книгой", в котором полностью излагается стандарт и способы выполнения его требований. Некоторые сведения изложены ниже. Их достаточно для общего ознакомления, однако при этом остаются неизвестными схемотехника ИС, содержимое памяти и т.п. В системе обнаружения и коррекции ошибок используется код Рида–Соломона. Этот код, в частности, удобен для коррекции ошибок в виде длинных разрывов, т.е. когда часть сигналов потеряна. Такие ошибки вызываются крупными дефектами диска – царапинами, и с помощью используемого кода можно восстанавливать потери до 4000 бит, что соответствует повреждению 2,5 мм дорожки на диске. В то же время такое кодирование требует очень большого количества избыточных бит, что ограничивает полезные возможности системы. Использование одного дополнительного бита к каждым трем битам данных обеспечивает эффективность, оцениваемую примерно 75 %. Малые ошибки исправляются, а крупные

корректируются путем синтезирования наиболее вероятной формы колебания, которую можно ожидать в районе ошибки (потерь информации). Вся система существенно зависит от структуры кадра, который, хотя и не таков, как телевизионный кадр, допускает самосинхронизацию сигнала. Это позволяет осуществить самосинхронизирующуюся запись, при которой информация, необходимая для правильного считывания, записана на диске; при этом нет нужды использовать в каждом проигрывателе кварцевый генератор тактирующей частоты. Кадровая структура позволяет записывать и воспроизводить сигнал с помощью вращающихся головок.

Каждый блок данных содержит 24 синхронизирующих бита с 12 единицами данных (данные выражаются 16-битовыми словами), 4 слова для коррекции ошибок (каждое из 16 бит) и 8 бит контрольного кода. Из 12 слов данных 6 относятся к левому каналу и 6 к правому. Использование 12 слов в кадре позволяет при необходимости применить 4 канала (по 3 слова в каждом): 16-битовые слова расщепляются на группы в 8-битовые единицы для формирования кадра. Ниже показано, как группируются данные перед модуляцией 8-14:

$$\begin{array}{l} \text{Данные } 12 \cdot 16 \text{ бит (6 групп на канал)} = 24 \cdot 8 \text{ бит} \\ \text{Коррекция ошибок } 4 \cdot 16 \text{ бит} = 8 \cdot 8 \text{ бит} \\ \text{Управление и отображение на дисплее} = 1 \cdot 8 \text{ бит} \end{array} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 33 \cdot 8 \text{ бит}$$

Итого	264 бита на кадр
-------	------------------

После модуляции 8-14:

Полные данные (как выше)	33 · 14 бит	= 462
Синхронизация		24
Избыточные биты для данных и		
синхронизация	3 · 34	= 102

Итого	588 записываемых бит на кадр
-------	------------------------------

Кадр — единица для контроля ошибок, синхронизации и управления отображения на дисплее.

СИСТЕМА МОДУЛЯЦИИ 8-14

Термин "модуляция" используется в нескольких смыслах, но в данном случае это метод кодирования единиц и нулей двоичных чисел в единицы и нули для целей записи. Система модуляции, в частности предотвращает появление длинных групп единиц или нулей. Выбранная система называется модуляцией 8-14; при этом каждая посылка из 8 бит кодируется в виде 14 бит для записи. Прямого математического соотношения между закодированной 14-битовой версией и 8-битовым оригиналом нет.

Цель модуляции 8-14 минимизировать вероятность ошибок в записи и считывании 8-битовых фрагментов. Код построен так, что сигналы всегда разделены не менее чем тремя битами. Этого нельзя достичь,

не изменив 8- или 16-битовые сигналы; целью кодирования является минимизация ошибок, возможных в том случае, если луч перекрывает две точки и считывает их как одну. Трехбитовый минимум намного упрощает требования к качеству дорожки и фокусировке луча. В то же время кодирование допускает не более 11 бит между изменениями, таким образом исключая возможность появления длинных фрагментов 1 или 0. К тому же 3 избыточных бита добавляются к каждым 14 и это позволяет разорвать длинную посылку 0 или 1, которая может образоваться при последовательной передаче двух блоков из 14 бит.

Идея использования кода, наиболее приспособленного для считывания и записи, не нова. Долгое время как альтернатива двоичному коду 8-4-2-1 использовался код Грея, в котором небольшим изменением чисел соответствуют небольшие изменения кода. Для примера замена 7 на 8 в 4-битовом двоичном коде соответствует замене 0111 на 1000, а в коде Грея – 0100 на 1100, т.е. изменяется один разряд. В коде 8-14 используется тот же принцип; преобразование может производиться с помощью небольшого ПЗУ, в котором при использовании 8-битового числа в качестве адреса на выходе появляются данные на 14 линиях. В приемном устройстве, используя 14 линий, в качестве адреса на выходе ПЗУ получают 8-битовое число.

При использовании преобразования 8-14 кадр становится существенно большим, чем в случае 33 8-битовых единиц. Для каждой из этих единиц надо использовать 14 групп преобразованного сигнала, так что получается 33·14 бит. Кроме того, добавляются 3 бита для каждой 14-битовой посылки, 24 бита синхронизации и еще 3 избыточных бита для разделения групп с граничными единицами или нулями.

В результате для записи полного кадра требуется 588 бит. Все это – кодированная версия 12 слов (6 слов на канал), соответствующая 6 выборкам на частоте 44,1 кГц (примерно 136 мкс сигнала в каждом канале).

КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК

Система модуляции 8-14 – помехозащищенная система, но для КД требуется большее; повреждения диска могут вызвать длинные последовательности ошибок. Главная коррекция ошибок осуществляется применением кода Рида–Соломона, и одна из особенностей системы – использование принципа перемежения.

Ошибки в цифровой записи и воспроизведении бывают преимущественно двух типов; случайные ошибки и ошибки типа "потеря пакета". Случайные ошибки в несколько бит обычно разбросаны по диску; они могут быть исправлены сравнительно простыми способами. Случайность состоит также в том, что в кадре из 588 бит ошибки могут быть в данных, не несущих звуковую информацию. Наконец, при использовании модуляции 8-14 ошибка в 1 бит не оказывает существенного влияния на результирующие данные.

Иначе обстоит дело с потерей пакетов – в этом случае ошибку составляет большое число последовательно расположенных бит. Такая ошибка может быть вызвана грубым повреждением диска или круп-

ным дефектом ленты и исправить ее гораздо сложнее, чем случайную ошибку. Эффект, вызываемый таким дефектом, может быть существенно уменьшен, если биты, составляющие посылку, не располагать последовательно. Если, к примеру, посылку из 24 байт, связанных между собой, передавать в течение 8 кадров, тогда потерю сравнительно большого пакета можно рассматривать как случайную ошибку, происшедшую в одном или двух байтах. Такой способ передачи данных называется перемежением — он является наиболее эффективным способом борьбы с потерями пакетов. Ступени обнаружения и коррекции размещены между ступенью перемены каналов; схема управления и выдачи данных на дисплей добавляется до схемы кодирования 8–14.

Метод использует системы четного кодирования Рида–Соломона с перемежением для получения последовательности, отличной от первичного кода. Используются два кодера Рида–Соломона, каждый из которых добавляет четыре 8-битовых посылки четности к коду числа 8-битовых единиц. Система четности оказывается гораздо сложнее ранее рассмотренной простой однобитовой системы и позволяет установить место ошибки. В системе КД используются два каскада преобразования Рида–Соломона; один работает с 24 байтами, а другой — с 28 (байты данных плюс байты четности от первого преобразования), так что кадр растягивается во времени. Путем использования временной задержки, производимой последовательными регистрами, включенными между кодерами, осуществляется перемежение байтов между кадрами. В результате кодирования формируется блочный сигнал, состоящий из четырех перемежающихся частей: корректирующего кода (1), данных (1), данных (2) и корректирующего кода (2). Например, записываемый 32-битовый сигнал может состоять из первого корректирующего кода, одного блока и первых байтов данных из смежного блока, вторых байтов данных из четвертого блока и второго корректирующего кода из восьмого блока данных. Они собираются вместе и к ним добавляется избыточное контрольное число. В декодере действия происходят в обратной последовательности. В это время могут существовать ошибки. Можно обнаружить блок, содержащий ошибки, и по возможности их исправить. Когда корректные части блока (код ошибок, данные, код ошибок) собраны вместе, тогда можно проверить каждое слово и по возможности исправить. Окончательные данные, очищенные от всех дополнительных кодов будут либо безошибочны, либо их нужно восстанавливать (подобно интерполяции) для исправления или маскирования больших ошибок.

КОНЕЧНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

Все операции кодирования и декодирования (рис. 6.3) осуществляются благодаря возможности хранения сигналов, а столь интенсивные манипуляции с сигналами можно выполнять только потому, что они имеют двоичную форму. Объем обработки двоичных сигналов неограничен. Из прошлого опыта весьма живуче представление о том, что

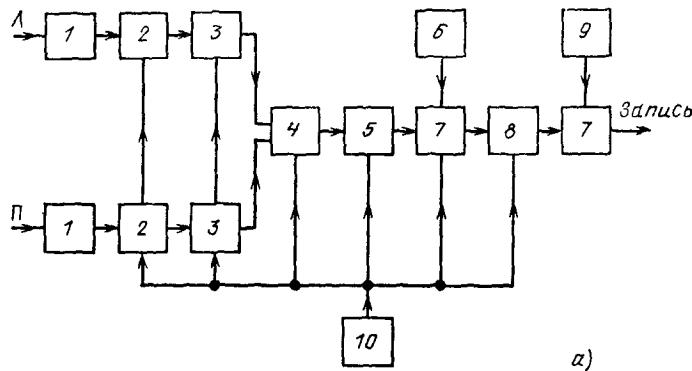


Рис. 6.3. Структурная схема записи (а) и воспроизведения (б) в системе КД:

а: 1 – узкополосный фильтр; 2 – выборка и хранение; 3 – АЦП; 4 – мультиплексированные сигналы; 5 – сигналы ошибки; 6 – сигналы управления и отображения на дисплее; 7 – мультиплексирование; 8 – модуляция; 9 – synchronization; 10 – таймер; б: 1 – детектор бит; 2 – демультиплексор; 3 – коррекция ошибок; 4 – ЦАП и фильтр; 5 – тактирование; 6 – синхронизация; 7 – блок управления и дисплея; 8 – управление (дорожка, выбор, скорость); 9 – дисплей (дорожки)

чем меньшему объему преобразований подвергается звуковой сигнал, тем лучше. Однако цифровыми сигналами можно манипулировать как угодно при условии, что кодирование и другие преобразования обратимы. Доказательством действенности системы в целом являются высокие характеристики звука. Сегодня воспроизводится полоса частот от 20 Гц до 20 кГц (с неравномерностью не более 0,3 дБ) при динамическом диапазоне 90 дБ с полными гармоническими искажениями (включая шумы), не превышающими 0,005 %. Эти данные трудно даже сравнить с показателями, характерными для аналоговой записи.

Одна из проблем цифровой записи состоит в том, что качество аналоговых устройств, используемых в процессе обработки сигналов, должно быть не хуже качества цифровой аппаратуры.

В запись введены данные, необходимые для контроля и отображения на дисплее. Очень интересной особенностью КД является возможность переходить с дорожки на дорожку (для музыкальных театров) и таким образом повторять или опускать отдельные ноты. Хотя многие пользователи КД проигрывают их как обычные пластинки – от начала до конца, некоторые уже оценили возможности выбора фрагментов записи.

По новым стандартам качество долгоиграющих пластинок уже не высокое; в свое время аналогичная ситуация была в сравнении долгоиграющих дисков со старыми пластинками, рассчитанными на частоту вращения 78 об/мин.

Глава 7. БЫТОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ЛЕНТОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Интересно, что впервые цифровая запись осуществлялась применительно к дискам, а не к лентам. Запись на видеокассеты получила распространение в то время, когда студии переключались на цифровую ленточную запись и появление цифровых звуковых ленточных систем можно было объяснить техническими причинами.

Популярность КД является скорее следствием установившейся практики, чем успехов технологии. Диск всегда был предпочтительным носителем для высококачественной записи звука. На диски исторически устанавливались высокие стандарты качества звучания; массовое производство дисков было более простым, чем производство лент, даже кассетных. Хотя продажа кассет в последние несколько лет растет, имея тенденцию превзойти продажу дисков, большинство кассет не обеспечивает того качества звучания, к которому стремятся потенциальные потребители КД. Поскольку высокое качество записи стало главным, внимание было обращено на КД; в любом случае технические проблемы исследовались в процессе работ над видеодисками.

Кассета удобна для переносных устройств, автомобилей. Только на нее можно записывать так же просто, как и проигрывать. Кассета удобна в тех случаях, когда, например, телевидение показывает в одно и то же время две интересующих Вас программы; одну из них можно записать.

Обстоятельством, сдерживающим появление цифровых лент, была боязнь подорвать весьма прибыльный рынок сбыта КД. Производство КД потребовало огромных капиталовложений, и очевидно, что пока они не окупятся, изготовители не станут проектировать новое производство. Риск перехода на цифровые ленты оправдывается в том случае, если содержимое КД можно переписать на ленту и, что более серьезно, копировать ленты без потери качества оригинала. В случае аналоговой записи на ленту каждая копия хуже копируемой ленты, а цифровые копии равнозначны, даже если их делаются сотни. Поэтому во многих странах сдерживается продажа устройств для цифровой записи на ленты и разрабатываются методы, затрудняющие копирование КД.

СИСТЕМЫ

Потребителю предлагается два вида систем: система со стационарными (СГ) и с вращающимися (ВГ) головками. Система СГ обладает весьма существенным потребительским достоинством: она позволяет довольно просто осуществлять монтаж сигналограмм, что невозможно в домашних условиях при использовании системы с ВГ. Для потребителя, который не собирается заниматься монтажом или многоканальной записью, достоинства системы СГ на этом исчерпываются; следует отметить ее относительно высокую стоимость. Тем не менее, коротко остановимся на ее технических данных. Кассета системы СГ имеет размеры $86 \times 55 \times 10$ мм (немножко больше кассеты системы ВГ). Скорость $5,47$ см/с, как у обычных звуковых кассет; применяется и меньшая скорость $4,37$ см/с, обеспечивающая более длительное звучание. Лента значительно шире ленты, используемой в аналоговой записи. Плотность записи данных 2130 бит на 1 мм длины ленты. Такая высокая плотность достигается применением многодорожечных головок. Цифровые многодорожечные головки изготавливаются по тонкопленочной технологии и рассчитаны на большое количество дорожек. Благодаря их использованию решена проблема скорости.

СИСТЕМА ВГ

Система ВГ преимущественно распространена в Европе. Кассета системы с ВГ имеет размеры $73 \times 54 \times 10,5$ мм. Пленка шириной $3,8$ мм. Пленка сканируется двумя головками запись/воспроизведение таким же образом, как в видеозаписи. На этом сходства звуковой цифровой и видеокассеты исчерпываются. Первоначально предполагалось использовать звукозапись, сопоставимую с видеозаписью. Предполагалось иметь строчно-кадровую структуру, аналогичную используемой в системе NTSC, которую можно было бы записывать на аппаратах США. Но этот стандарт не позволяет воспроизводить запись на европейской аппаратуре, поскольку в Европе действует другой телевизионный стандарт.

Поскольку для бытовых цифровых звуковых лент новая аппаратура требовалась в любом случае, недавно был согласован новый стандарт. В деталях стандарт известен только 81 участнику соглашения. Изложенное ниже основано на ранее опубликованной информации, преимущественно в статьях и лекциях. Новый стандарт, в частности, не предусматривает никаких попыток использования квазивидеосигналов. Он разделил технологию звуковых лент и технологию видеолент, положив конец идеи пользователей покупать модифицированную аппаратуру видеозаписи или использовать цифровые преобразователи для воспроизведения звуковых лент.

Механическая система с ВГ использует поворот ленты на 90° по направляющим стойкам. Этот угол много меньше, чем при видеозаписи, что в свою очередь уменьшает износ ленты и вероятность обрывов тем более, что обычно с видеокассетами обращаются аккуратнее, чем со звуковыми. Это также позволяет головкам поддерживать контакт

с лентой при протяжке со скоростью, в 200 раз превышающей нормальную, и принимать индексные сигналы, разделяющие части ленты. Используются две вращающиеся головки так, что за один оборот шинделя головки лента записывается или считывается в течение 50 % времени. При этом время контакта ленты с каждой головкой также уменьшается на 50 %. В ранних системах "мертвое время" было занято искусственной группировкой сигналов в поля и кадры телевизионного типа.

Система с ВГ использует свою технику компрессии данных. Она основана на тех же принципах, которые используются для создания полей; сигналы накапливаются в памяти емкостью 128 кбит и записываются только во время контакта головки с лентой. Этот объем памяти больше, чем требуется для совместимых видеосистем, однако ИС памяти стоит дешево.

Механические особенности системы следующие. Диаметр барабана головки 300 мм и частота вращения составляет 2000 об/мин. Стандартизованы следующие скорости протяжки ленты: 4,075 мм/с (половинная скорость), 8,150 мм/с (нормальная скорость) и 12,225 мм/с (широкая дорожка). Угол наклона дорожки составляет $6^{\circ}25'59.5''$, длина дорожки 23,501 мм. Расход ленты при половинной скорости оптимален и обеспечивает длительное звучание при хорошем качестве или очень хорошее качество при длительном звучании. Ширина каждой записанной дорожки 13,591 мкм в нормальном варианте и 20,41 мкм в широкодорожечном. Зазор магнитной головки расположен под азимутальным углом $\pm 20^{\circ}$; ориентация зазора изменяется от одной дорожки к другой; он занимает ширину 2,613 мм (рис. 7.1). Термин "кадр" относится к паре дорожек, каждая из которых – в каждом азимутальном направлении.

Стандарты на систему с ВР допускают четыре частоты выборки, в том числе 32; 44,1 и 48 кГц. Изготовитель оборудования волен выбирать любую частоту, в том числе 44,1 кГц, используемую в КД, но она допускается только для проигрывателей, с тем чтобы затруднить непосредственную запись с КД на ленту. Другие частоты можно использовать для устройств записи и воспроизведения.

Стандарты допускают шесть режимов работы, в которых эти частоты сочетаются с различными числами бит. Цель многовариантных стандартов – не ограничивать возможности дальнейшего развития систем.

Стандарты на цифровые ленты перекрывают все типы записывающих систем, включая профессиональную студийную запись, копировальные машины, так что наличие шести вариантов не означает, что ленточные проигрыватели будут снабжены 6-позиционным переключателем вариантов; стандарт на бытовую аппаратуру будет рассчитан на один из этих вариантов, как согласовано с участниками конвенции.

Частота выборки при записи и воспроизведении составляет 48 кГц при 16-битовом слове в каждой выборке. Выборка двух каналов обычного стереосигнала производится одновременно, затем сигналы перемежаются в последовательности, принятой для КД. Сигналы состоят из блоков по 45 (360) бит; каждая головка записывает на дорожке

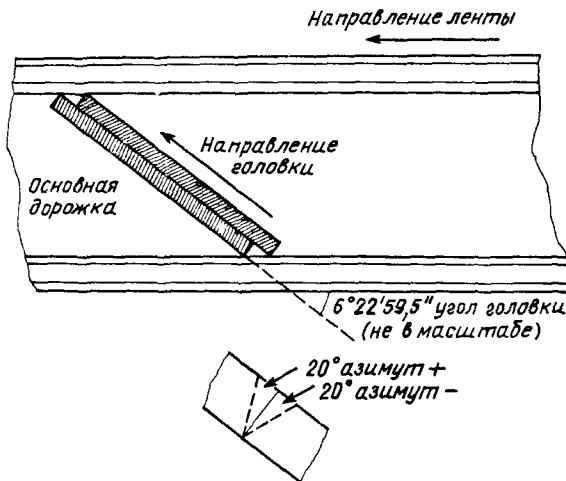


Рис. 7.1. Расположение дорожек на цифровой ленте

196 блоков. Из этого числа блоков только 128 содержат сигналы данных, синхронизации, идентификации; адреса блоков; биты четности. Оставшаяся часть дорожки используется для записи сигналов автоматического поиска дорожки, сигналов поддержания скорости движения ленты, субкодов (номера каналов, частота выборки, код защиты от копирования) и исправляющих сигналов.

Система цифровой записи на ленту включает в себя контроль ошибок; предпочтение отдано перемежающемуся кодированию Рида-Соломона (как и для КД). Основные изменения в системе цифровой записи на ленту сделаны в направлении сближения ее с системой КД с тем, чтобы изготовители могли использовать одинаковое записывающее оборудование от микрофонов до носителей.

Ряд выбираемых данных состоит из двух каналов; производится выборка 16 бит с частотой 48 кГц, что соответствует скорости $2 \times 16 \times 48 = 1536$ Кбит/с (1,536 Мбит/с). Используются два кодера Рида-Соломона с последовательным перемежением, что уменьшает эффект "больших" ошибок. Избыточность кода Рида-Соломона плюс добавление вышеупомянутых данных приводят к увеличению скорости до 2,77 Мбит/с. К тому же блоки перемежаются по дорожкам. Одна дорожка из пары содержит четные номера блоков правого канала и нечетные номера блоков левого канала. Другая — нечетные номера правого канала и четные номера левого. Это дополнительное перемежение допускает полную потерю части данных на одной дорожке; данные могут быть восполнены с соседней дорожкой. Группирование сигналов в памяти, позволяющее записывать данные в виде пакетов, увеличивает скорость записи примерно до 7,5 Мбит/с.

Проблема копирования КД реализуется при частоте выборки 44,1 кГц, действующей только для воспроизводящих устройств и профессионального копировального оборудования с дополнением за-

щитных кодов. Это конечно не может помешать копированию аналогового сигнала с КД-проигрывателя путем подачи этого сигнала на звуковой вход устройства записи на цифровую ленту. Однако это препятствует изготовлению цифровых копий цифровых сигналов. Различие в методах копирования весьма существенно, потому что преобразование цифрового сигнала в аналоговый и обратно приводит к появлению искажений и шума, так что при этом копии получаются несовершенными. Разница в частотах выборки вызывает биения, появляющиеся на ленте при таком способе копирования.

Все это, конечно, не удержит профессиональных пиратов звука, которые распространялись на Дальнем и частично Ближнем Востоке, но будет ограничивать возможности массового копирования любителями. Вместе с тем никто не предусмотрел возможности появления копировальных бытовых устройств.

Впервые цифровые ленты в Европе использовались владельцами компьютеров и, вероятно, некоторые энтузиасты пытались приспособить эту технику к звуку. Цены на записывающую аппаратуру высоки и сегодня, но изготовители не видят препятствий на пути их снижения до уровня цен на проигрывающие устройства КД. Менее определенная ситуация существует с продажей записанных лент. "Чистые" кассеты поставляются многими изготовителями, но создается впечатление, что никто не стремится к реализации музыкальных записей. Обычно ссылаются на то, что записывающие устройства не пользуются спросом из-за отсутствия лент и что ленты не пользуются спросом из-за недостатка записывающих устройств.

Однако ясно, что существующая ситуация с правом на снятие копий должна быть радикально пересмотрена. Нельзя более рассчитывать на то, что люди будут покупать дорогостоящую аппаратуру, чтобы записать первые слова своего ребенка или проигрывать плохо записанные коммерческие кассеты, а также делать вид, что владельцы компьютеров не будут копировать попавшиеся им диски. Пока владельцы бытовой аппаратуры не будут иметь возможности легально делать копии с любого источника и на любом материале для собственного, не коммерческого использования, право на копирование будет пребывать в пренебрежении. От этого будут выигрывать только коммерческие пираты.

Глава 8. СИНТЕЗ ЗВУКА

НОВЫЕ ЗВУКИ

В начале развития электроники было осознано, что звуковые системы могут не только воспроизводить, но и генерировать звуки. Как только появились первые триоды, Л. Термен продемонстрировал эти возможности. Он использовал ламповый генератор биений с усилителем и громкоговорителем. Манипулируя руками около стрежня, подключенного к контуру одного из генераторов, он получал различные

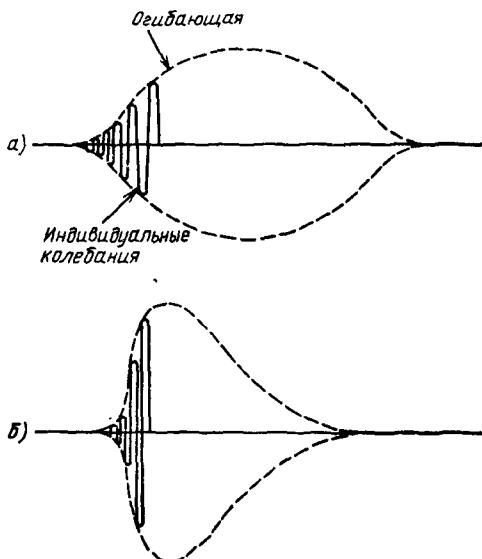


Рис. 8.1. Форма огибающих. На звучание ноты влияет форма колебания (а) и огибающей (б)

звуковые частоты биений. Приборы Термена были широко распространены, а принципы синтеза музыки были положены задолго до их практической реализации. Реальное начало синтеза музыки было положено второй серией органов Хаммонда в 1939 г., в них применялись ламповые генераторы звуковых токов, переключаемые клавиатурой, усилители и громкоговорители. Родоначальниками синтезаторов, которые считаются инструментом поп-музыки, были инструменты, широко использовавшиеся в церкви.

Распространены два общих принципа синтеза. Один из них, предложенный Мугом, основывается на применении генераторов, управляемых напряжением, а другой – генератора шума с управляемыми фильтрами. Генераторы, управляемые напряжением – логическое развитие принципа Термена; используется один или несколько генераторов, частота которых изменяется постоянным напряжением, снимаемым с делителя напряжения. Каждой клавише инструмента, построенного по этому принципу, соответствует определенное значение управляющего напряжения. В соответствии со вторым методом используется широкополосный генератор шума, а клавиатура управляет включением узкополосных фильтров.

Оба метода позволяют получать разные звуки. Форма колебаний генератора, управляемого напряжением, зависит от режима его работы и может изменяться от синусоидальной до прямоугольной. Генератор шума изначально создает более сложную форму. Обе системы обеспечивают неограниченное число эффектов и в зависимости от формы огибающей (рис. 8.1) создают звучание, подобное тому или иному музыкальному инструменту, либо совсем необычное.

Оба метода являются аналоговыми и введение цифровых методов в синтез звука происходит постепенно и до настоящего времени не завер-

шено. Однако в области синтеза звука цифровые методы могут стать доминирующими, полностью исключив применение каких-либо аналоговых устройств. Синтезированная музыка "не работает" в том смысле, как действует музыкальный инструмент, звучание которого воспринимается микрофоном.

Синтезаторы создают изменяющиеся напряжения, и существует возможность выбора способа преобразования их в звук.

Подобно аналоговым синтезаторам, в основе которых лежат либо генераторы, управляемые напряжением, либо источник шума, цифровые генераторы теоретически могут базироваться на обоих принципах. Различие состоит в способах генерации сигналов, поскольку на выходе цифрового генератора, имеется поток чисел. Так как "оригинальный" сигнал отсутствует, нет нужды в АЦП и оборудование может работать прямо на цифровые записывающие устройства.

МЕТОДЫ СИНТЕЗА

Цифровой генератор создает последовательность чисел, значения которых соответствуют амплитудам выборок звуковых колебаний. Простой и очевидный способ получения таких сигналов – использование генератора, управляемого напряжением совместно с АЦП, но это – не чисто цифровой генератор. Альтернативой является использование микропроцессора для генерации чисел, образующих математическую структуру (простую, подобную синусоиде или сложную, как например ряд синусов – косинусов) или ПЗУ, содержащего последовательности чисел, которые можно использовать для формирования колебаний заданной формы. Использование ПЗУ подобно применению ленты с записанными на ней базисными звуковыми комбинациями, которые варьируются синтезатором.

Менее обещающе выглядит перспектива использования шумовых сигналов. Хотя генератор случайных (или псевдослучайных) чисел можно использовать для создания "шумового" цифрового сигнала, создать цифровые эквиваленты фильтров очень непросто. Для примера, реализацию узкополосного фильтра можно представить в виде устройства, уменьшающего числа на базе разницы между ними. Цифровые генераторы шума используются, но совместно с ЦАП и аналоговыми фильтрами.

Глубина практического внедрения цифровой техники в синтез музыки связана с развитием схем временной задержки цифровых сигналов и схем управления. Управляемая реверберация синтезированных сигналов ранее осуществлялась только с помощью петель магнитной ленты и акустических устройств задержки. По мере снижения цен на ИС все более широкое применение для задержки получают приборы с зарядовой связью. Следующий логический шаг к созданию полностью цифровых систем задержки был также сделан в связи с быстрым снижением цен на цифровые схемы, в том числе электронные часы и компьютеры. Выборки цифровых сигналов хранятся в памяти, пока не пришло время их считывания. Одно время в качестве устройств памяти использовались

регистры сдвига, но современная интегральная технология предложила такую роскошь, как устройство с переменной временной задержкой, программируемые схемы задержки, которые расширили возможности произвольной выборки. Для приборов умеренной стоимости частота выборки не слишком велика и только для дорогостоящих устройств приближается к 44,1 кГц, как для систем КД. В таких случаях время задержки может достигать минуты; но для длительных задержек, которые требуют огромного объема памяти, все же удобнее использовать высокоскоростные магнитные диски, нежели твердотельные схемы.

ЦИМИ

Очень серьезный толчок развитию цифрового синтеза звука дало появление цифровых интерфейсов музыкальных инструментов (ЦИМИ), стандартных для изготовителей музыкальных инструментов и некоторых персональных компьютеров. Потребность в таком стандарте вызвана существенно возросшими сложностями процесса синтеза. Идеи использования компьютеров оказались весьма привлекательными для специалистов по синтезу. В этом направлении много сделано Roland Jupiter 8 и Sequential Circuits Prophet 5, а в то время, когда другие производители бросились изобретать системы последовательного микропроцессорного управления для своего оборудования, недостаток стандартизации оказался полезным. Однако скоро стало ясно, что все-таки некоторая стандартизация необходима, иначе потребители, использующие оборудование, основанное на микропроцессорах будут ограничены в возможностях применения изделий других изготовителей.

Система, предложенная Дейвом Смитом из Sequential Circuits, была модифицирована с учетом достижений фирм Roland, Yamaha и др. с целью создания стандарта ЦИМИ. В соответствии с ним используется последовательный интерфейс с неизбежными ограничениями скорости, но он дешев и не предъявляет особых требований к длине кабелей. Скорость составляет 31,25 Кбод; она превышает скорость передачи по компьютерным линиям связи и пригодна для многих целей; 1 бод означает – 1 сигнал в секунду, и хотя скорость в бодах не обязательно соответствует скорости в битах в секунду, но обычно используется в таком значении.

Система ЦИМИ допускает кодирование нот в диапазоне 10,5 октав и позволяет сигнализацию изменений содержимого памяти, а также дает специфичную информацию об инструментах. Система первоначально предназначалась для управления клавиатурными синтезаторами, но может применяться для создания ритмов; может быть также использована с различными устройствами, включая некоторые модели персональных компьютеров.

ЦИМИ допускают использование 16 отдельных каналов; позволяют изменять направление передачи сигналов. Система использует 8-битовые группы данных. Индивидуальные биты в каждом байте несут собственную информацию. К примеру, номер канала передается четырьмя

битами, а другие биты этого же байта могут нести нотную информацию. Декодер может отличить байт селекции каналов от байта, несущего информацию о тоне.

Коды ЦИМИ предусматривают информацию о ноте, уровне громкости каждой ноты, типе тона, огибающей амплитуды каждого тона, которая передается между инструментами и от компьютера к инструменту. Инструменты, используемые в линиях ЦИМИ, могут работать в одном из трех вариантов, называемых "омни", "поли" и "моно"; от выбора варианта зависит, как воздействуют передаваемые сигналы на индивидуальные инструменты.

В режиме "омни" передатчик ЦИМИ (главная клавиатура или компьютер) посыпает данные по одному каналу, но каждый принимающий инструмент по цепочке будет реагировать на все 16 каналов. Это позволяет с помощью одной клавиатуры управлять более чем одним синтезатором. Это простейший вариант работы ЦИМИ; в этом варианте компьютер может управлять синтезатором, в частности, задавать ритм.

В варианте "поли" каждый инструмент имеет свой канал из 16. Это позволяет передатчику индивидуально управлять инструментом, так что каждый может исполнять свою партию. Отдельные ноты воспроизводятся последовательно, но благодаря высокой скорости передачи задержка во времени на слух не воспринимается и даже 16 различных партий звучат одновременно.

В варианте "моно", используя современные синтезаторы, можно брать аккорды. Современные синтезаторы являются многоголосными и аккорды берутся, как на фортепиано. Это требует сложной системы управления, так как схема фиксированных аккордов предусматривает только основные мажорные и минорные аккорды. В варианте "моно" можно создавать уникальные оттенки звучания.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Таблица обозначений основных логических элементов, используемых в устройствах цифровой звукотехники

Обозначения основных логических элементов		
Логическая функция элемента	В книге	По ГОСТ
Буфер		
Инвертор		
И		
НЕ-И		
ИЛИ		
НЕ-ИЛИ		
Исключающее ИЛИ		

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Технические характеристики аппаратуры магнитной записи

Параметр	Магнитофон	
	аналоговый	цифровой
Рабочий диапазон частот, Гц	20–20 000	2–22 000
Неравномерность частотной характеристики, дБ	3,0	0,3
Коэффициент детонации, %	0,05	Не поддается измерению
Отношение сигнал/шум, дБ	50–65	90–95
Динамический диапазон, дБ	50–60	90
Коэффициент гармоник, %	1,0–1,5	0,05

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Технические характеристики проигрывателей

Параметр	Проигрыватель	
	аналоговый	цифровой
Диапазон воспроизводимых частот, Гц	20–20 000	2–20 000
Неравномерность частотной характеристики в диапазоне воспроизводимых частот, дБ	2,0	0,1
Коэффициент детонации, дБ	0,3	0,005
Отношение сигнал/шум, дБ	50	116
Динамический диапазон, дБ	40	112
Коэффициент гармоник, %	1,5	0,0015
Коэффициент интермодуляционных искажений, %	2	0,003
Разделение стереоканалов, дБ	35	110
Число проигрываний диска без заметного ухудшения качества	50	Не ограничено
Длительность звучания диска, мин	40	70

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Предисловие к русскому изданию	4
<i>Глава 1. Цифровая информация во времени</i>	5
<i>Глава 2. Цифровые устройства</i>	16
<i>Глава 3. Аналого-цифровое преобразование</i>	31
<i>Глава 4. Цифровой – в аналоговый</i>	43
<i>Глава 5. Студийные цифровые методы записи</i>	50
<i>Глава 6. Система КД</i>	59
<i>Глава 7. Бытовые цифровые ленточные системы</i>	67
<i>Глава 8. Синтез звука</i>	71
Приложения	76

Производственное издание

Ян Синклер

ВВЕДЕНИЕ В ЦИФРОВУЮ ЗВУКОТЕХНИКУ

Заведующий редакцией *А. Б. Желдыбин*

Редактор издательства *Ю. Ф. Архипцев*

Художественный редактор *Т. А. Дворецкова*

Технический редактор *Г. Н. Лядухина*

Корректор *З.Б. Драновская*

ИБ 3241

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинал-макета 13.12.89.
Формат 60 x 90 1/16. Бумага офсетная № 1. Печать высокая. Усл. печ. л. 5,00.
Усл. кр.-отт. 5,38. Уч.-изд. л. 5,43. Тираж 250 000 экз. Заказ 91 Цена 75 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в типографии Прейскурантиздата
125438, Москва, Пакгаузное шоссе, 1.