

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

К защите допустить  
Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ 2011 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

на тему: Цифровое устройство записи звука в память

\_\_\_\_\_

Выпускник \_\_\_\_\_ Ешанов Г. Б.  
подпись \_\_\_\_\_ ф.и.о.

Руководитель \_\_\_\_\_ Рахимов Б. Т.  
подпись \_\_\_\_\_ ф.и.о.

Рецензент \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
подпись \_\_\_\_\_ ф.и.о.

**Ташкент – 2011**

## ВВЕДЕНИЕ

В наше время, когда огромное значение придается различной информации, в том числе и голосовой, возникает проблема в удобных способах хранения этой информации. Для этого применяют различные звукозаписывающие устройства. Принцип построения этих устройств различен от записи на восковой носитель первого фонографа, до преобразования звуковой информации в цифровой код, с последующим её хранением в виде цифровых кодов. Самым удобным средством хранения звуковой информации является цифровое устройство. Профессий, для которых цифровое устройство записи является необходимым устройством - множество. Это и журналисты, телевизионщики, корреспонденты, органы охраны правопорядка.

Одной из проблем, которая возникает перед отечественным пользователем это выбор лучшей по соотношению качество/цена модели. Неизбалованные отечественные пользователи часто не придают особого значения устройству и техническим характеристикам цифровых устройств записи звука. Мало кто сознает, насколько проще и легче может стать работа с этим устройством, если серьезно отнестись к его выбору. Цифровые устройства записи звука выпускаются многими компаниями. К числу наиболее известных фирм-производителей относятся: Yamaha, Marantz, Sony, LG и многие другие.

Однако, вследствие того, что продукция этих фирм сильно дорогостоящая, а продукцию фирм, которые еще не заработали себе имя на мировом рынке имя, приобретать не спешат, перед пользователями этих устройств встает вопрос- «Какую модель выбрать?»

Отличительной особенностью большинства моделей цифровых устройств записи звука является то, что носителем информации является магнитная лента. А она, как известна подвержена старению, в результате чего после нескольких десятков использований резко ухудшаются её качества. К

тому же, велика вероятность «потерять» записанную информацию вследствие влияния сильных магнитных полей. Также отличительной особенностью диктофонов является наличие сложного механизма со множеством движущихся частей, которые от интенсивного использования быстро приходят в негодность.

Современные цифровые устройства записи звука в качестве носителей информации используют цифровые модули памяти. Ресурс модулей памяти даже при самом интенсивном использовании составит не менее нескольких лет. В таких моделях отсутствует сложный лентопротяжный механизм.

Исходя из вышесказанного проектирование новых типов цифровых устройств записи звука является важной задачей ввиду все более нарастающей потребности удобства хранения звуковой информации.

# 1. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ И ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

## 1.1. Назначение, основные свойства и классификация

В электронных системах одинаково широко используется обработка информации, представленной в аналоговой и цифровой формах. Объясняется это тем, что первичная, исходная информация о различных физических величинах и процессах носит, как правило, аналоговый характер. Обработку же этой информации в силу причин, рассмотренных во введении, удобнее вести в цифровой форме. Использование полученных после цифровой обработки результатов также в большинстве случаев требует их аналогового представления. Следовательно, любая система, использующая цифровые методы обработки информации, должна содержать устройства взаимного преобразования аналоговых и цифровых сигналов. Роль таких устройств выполняют аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП).

*Аналого-цифровой преобразователь* — устройство, предназначенное для преобразования непрерывно изменяющейся во времени аналоговой, физической величины в эквивалентные ей значения числовых кодов.

*Цифро-аналоговый преобразователь* — устройство, предназначенное для преобразования входной величины, представленной по-следовательностью числовых кодов, в эквивалентные им значения заданной физической величины.

В качестве аналоговой физической величины, оговоренной в данных определениях, в общем случае могут фигурировать различные параметры, например угол поворота, линейное перемещение, давление жидкости или газа и т. д. В дальнейшем под этой величиной будем

понимать напряжение либо ток, которые, при необходимости, можно легко преобразовать в другие физические величины.

Основным вопросом, с которым приходится сталкиваться при проектировании и использовании ЦАП и АЦП, является вопрос адекватности полученного в результате преобразования сигнала исходному физическому процессу, т. е. вопрос точности преобразования. Поэтому рассмотрим алгоритмы этих преобразований с точки зрения погрешностей, возникающих при их выполнении.

Процесс аналого-цифрового преобразования предполагает последовательное выполнение следующих операций:

выборка значений исходной аналоговой величины в некоторые наперед заданные дискретные моменты времени, т. е. дискретизация сигнала по времени;

квантование (округление до некоторых известных величин) полученной в дискретные моменты времени последовательности значений исходной аналоговой величины по уровню;

кодирование — замена найденных квантованных значений некоторыми числовыми кодами.

Проиллюстрируем эту последовательность действий с помощью рис.1.1 Пусть задана некоторая аналоговая зависимость  $u(t)$ . Для получения ее дискретного эквивалента  $U(nT_D) = \{U(0), U(T_D), U(2T_D), \dots\}$  необходимо провести выборку ее значений в дискретные моменты времени  $nT_D$  где  $n = 0, 1, 2 \dots$  целое число. Постоянная величина  $T_D$  — носит название периода выборки или периода *дискретизации*, а сам процесс замены исходной аналоговой функции  $u(t)$  некоторой дискретной функцией  $U(nT_D)$  называется дискретизацией сигнала во времени. Следует отметить, что полученная дискретная функция  $U(nT_D)$  относительно самого сигнала  $u(t)$  носит по-прежнему аналоговый характер, так как может принимать бесконечное число различных значений.

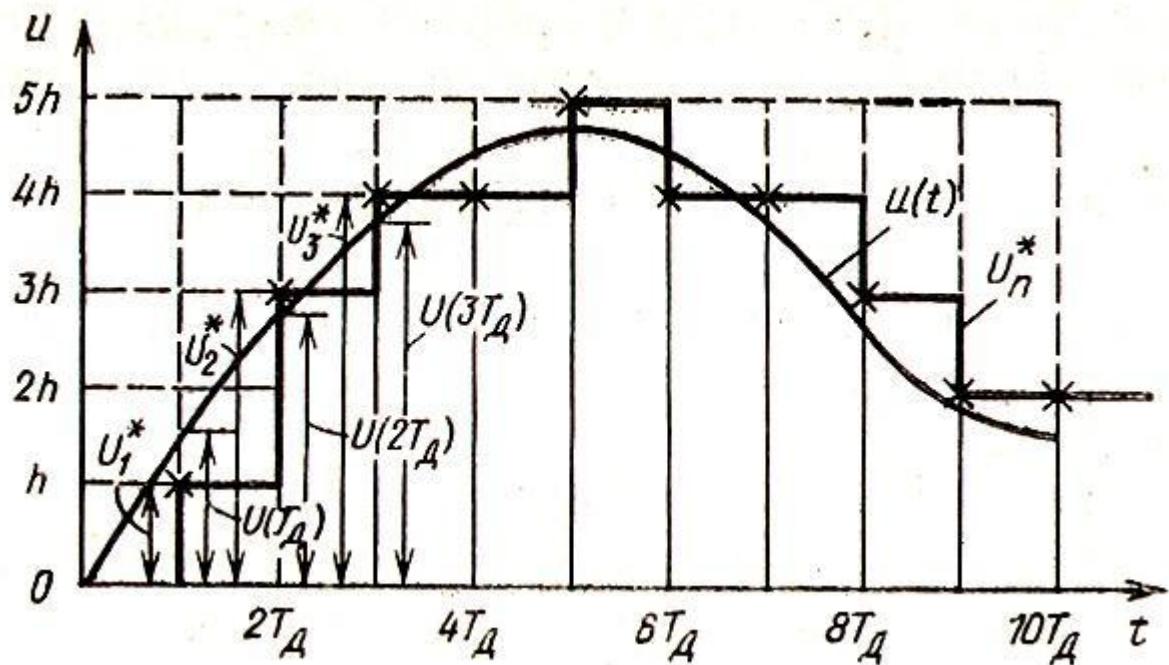


Рис.1.1 К пояснение принципов аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразований.

Операция квантования по уровню дискретной функции  $U(nT_D)$  заключается в отображении бесконечного множества ее значений на некоторое конечное множество значений  $U_n^*$ , называемых *уровнями квантования*. Для выполнения этой операции весь динамический диапазон  $D = U(nT_D)_{max} - U(nT_D)_{min}$  изменения дискретной функции  $U(nT_D)$  разбивают на некоторое заданное число уровней  $N$  и производят округление каждой величины  $U(nT_D)$  до ближайшего уровня  $U_n^*$ . Величина  $h = D/N$  носит название *шага квантования*. Результатом операции квантования по уровню является дискретная функция  $U_n^*$ , которая может принимать  $N + 1$  значение.

Для выполнения последней операции необходимо выбрать некоторый код  $K = \{K_1, K_2, \dots\}$ , способный отображать не менее  $(N + 1)$ -го значения, и каждому дискретному значению  $U_n^*$  поставить в соответствие некоторый код  $K_i$ . В простейшем случае в качестве кода

может быть использована последовательность чисел, соответствующих порядковым номерам уровней квантования. При таком выборе кода представленная на рис.1.1 функция  $u(t)$  может быть заменена последовательностью десятичных чисел:  $K_n = \{0, 1, 3, 4, 4, 5, 4, 4, 3, 2, 2\}$ , или в двоичной форме  $K_n = \{000, 001, 011, 100, 100, 101, 100, 100, 011, 010, 010\}$ .

В аналитической форме процесс аналого-цифрового преобразования может быть представлен выражением

$$K_n = \left\lceil \frac{u(t)_{t=n_i} T_\delta}{h} \right\rceil$$

Где результат в квадратных скобках округлен до ближайшего целого числа,  $\delta K_{ni}$  — погрешность преобразования на  $i$ -м шаге.

Как следует из описанного алгоритма, переходы, от исходной функции  $u(t)$  к дискретной  $U(nT_\Delta)$  и далее к квантованной по уровню  $U_n^*$  сопряжены с некоторой потерей информации. На этапе же кодирования подобные потери отсутствуют. Рассмотрим вопрос потери информации более подробно.

Предположим, что исходная аналоговая функция  $u(t)$  может быть представлена в виде конечной суммы гармонических сигналов, т. е. ее частотный спектр ограничен:

$$u(t) = \sum_{i=1}^k U_i \sin(\omega_i t + \varphi_i).$$

Тогда согласно известной из теории информации теореме Котельникова, если период дискретизации  $T_\Delta$  отвечает условию

$$T_\Delta \leq 1/2f_{\max}$$

где  $f_{\max}$  — частота максимальной гармоники исходного сигнала  $u(t)$ , дискретные значения  $U(nT_\Delta)$  полностью определяют исходную зависимость  $u(t)$ , и замена аналоговой функции  $u(t)$  на дискретную  $U(nT_\Delta)$  не сопряжена с искажением вида исходной зависимости, так как по  $U(nT_\Delta)$  можно однозначно восстановить исходный вид  $u(t)$ .

Следовательно, при выполнении условия погрешность преобразования на этапе дискретизации по времени отсутствует.

Процесс квантования по уровню дискретной функции  $U(nT_d)$  всегда связан с внесением некоторой погрешности  $\epsilon$ , значение которой (см. рис. 1.1) определяется неравенством —  $h/2 \leq \epsilon_i \leq h/2$ .

Величина  $\epsilon$ , носит название *шума квантования* и однозначно определяется числом допустимых значений функции  $U_{nb}^*$ , т. е. разрядностью используемого числового кода.

Поэтому погрешность аналого-цифрового преобразования, обусловленная шумом квантования, при увеличении разрядности выходного кода может быть уменьшена до сколь угодно малой величины. Но в отличие от погрешности дискретизации по времени она принципиально присуща данному алгоритму и не может быть сведена к нулю выбором параметров устройства.

Рассмотренные погрешности обусловлены самим алгоритмом аналого-цифрового преобразования. Кроме них в реальных АЦП возникают погрешности, связанные с не идеальностью используемой элементной базы, т. е. инструментальные погрешности.

Процесс цифро-аналогового преобразования предполагает последовательное выполнение следующих операций:

формирование в заданном диапазоне изменения выходного сигнала  $M$  его дискретных значений  $U_M^*$ , отличающихся на некоторое значение  $a$ , и постановка каждому сформированному уровню в соответствие некоторого кода  $K_i$ ;

последовательное, с заданным временным интервалом  $T_1$ , присвоение выходному сигналу значений выделенных уровней, соответствующих входной последовательности кодов  $K_i$ .

Если предположить, что  $a = h$  и  $T_1 = T_d$ , то результатом цифро-аналогового преобразования полученной ранее последовательности кодов  $K_i$  будет, показанная на рис. 1.1, ступенчатая функция  $U_{nb}^*$ . Эта

функция, хотя и непрерывна во времени, но остается дискретной по уровню, что является результатом погрешности, обусловленной шумом квантования. Сам процесс цифро-аналогового преобразования не вносит собственных принципиальных погрешностей, а лишь материализует погрешности, полученные в АЦП. Реально возникающие при преобразовании погрешности носят чисто инструментальный характер.

Математически алгоритм цифро-аналогового преобразования можно записать в виде

$$U_{n_i} = \alpha K_{n_i} + \delta U_{n_i}$$

где  $\delta U_{n_i}$  — погрешность преобразования на  $i$ -м шаге.

Подводя итог сказанному, отметим, что погрешности, обусловленные самим алгоритмом работы, возникают только на этапе аналого-цифрового преобразования и их уменьшение требует уменьшения периода дискретизации  $T$  и шага квантования  $h$ .

Существует большое число признаков, по которым могут быть классифицированы ЦАП и АЦП. Ниже остановимся на наиболее часто встречающейся классификации, базирующейся на реализуемом методе преобразования. С этой точки зрения все существующие ЦАП могут быть разделены на два класса: устройства, реализующие метод многократного суммирования одного эталона; устройства, реализующие метод суммирования нескольких различных эталонов.

Цифро-аналоговые преобразователи первого класса используют при работе единственный эталон, число повторений (суммирований) которого определяется значением входного единичного кода. Этот код подается на вход ЦАП в последовательной форме.

Цифро-аналоговые преобразователи второго класса имеют число эталонов, равное разрядности входного кода. Причем значения этих эталонов пропорциональны величинам весовых коэффициентов

используемого кода. Входной код подается на вход таких ЦАП в параллельной форме.

Следует отметить, что в настоящее время используются только ЦАП второго класса.

Интегральные схемы ЦАП могут выполняться как функционально завершенными, т. е. не требующими для своей работы дополнительных элементов, так и функционально незавершенными. В последнем случае в качестве внешних элементов, как правило, применяют источник эталонного напряжения, операционный усилитель, регистры и т. д.

Работа с внешним источником эталонного напряжения позволяет разделить все ЦАП на две группы: *умножающие* — работающие с изменяющимся во времени источником эталонного сигнала, и *неумножающие* — работающие с эталонным источником, величина которого в течение всего времени работы устройства остается постоянной.

С позиции используемого метода преобразования все АЦП делятся на: устройства, реализующие метод последовательного счета, устройства, реализующие метод поразрядного кодирования, устройства, реализующие метод считывания.

Аналого-цифровые преобразователи, работающие по методу последовательного счета, осуществляют уравновешивание входной аналоговой величины суммой одинаковых эталонов. Момент равенства этих величин фиксируется сравнивающим устройством. На выходе таких АЦП формируется последовательный единичный код. Далее этот код может быть преобразован к любому требуемому виду.

Аналого-цифровые преобразователи, работающие по методу поразрядного кодирования, используют несколько эталонов. Причем их число равно числу разрядов, а значения пропорциональны весовым коэффициентам выходного позиционного кода. Каждый эталон сравнивается с входной величиной устройством сравнения. Процесс

сравнения начинается с эталона, имеющего максимальное значение. В зависимости от результата этого сравнения формируется цифра старшего разряда выходного кода. Если эталон больше входной величины, то в старшем разряде формируется нулевое значение и производится сравнение входной величины с наибольшим из оставшихся эталонов. Если максимальный эталон оказался меньше входной величины, то в старшем разряде выходного кода формируется сигнал лог. 1 и дальнейшему сравнению подлежит сигнал разности входной величины и максимального эталона. Аналогичные действия выполняются для всех используемых эталонов.

Аналого-цифровые преобразователи, работающие по методу считывания, используют  $N$  эталонов ( $N$  — число уровней квантования). При этом младший эталон равен  $h$  (шагу квантования), следующий  $2h$  и т. д. Входная величина сравнивается с каждым эталоном своим устройством сравнения, в результате чего на выходе устройства формируется параллельный единичный код, в котором число единиц соответствует числу эталонов, выходной сигнал которых меньше входного.

## 1.2 Основные характеристики

Рассмотрим основные электрические характеристики ЦАП и АЦП. Они подразделяются на статические, которые задают конечную точность преобразования, и динамические, характеризующие быстродействие данного класса устройств. Статические характеристики преобразователей определяются видом характеристики преобразования, которая устанавливает соответствие между значениями аналоговой величины и цифрового кода. К ним относятся.

*Число разрядов ( $B$ )* — число разрядов кода, отображающего исходную аналоговую величину, которое может формироваться на

выходе АЦП или подаваться на вход ЦАП. При использовании двоичного кода под  $b$  понимают двоичный логарифм от максимального числа кодовых комбинаций (уровней квантования) на выходе АЦП или входе ЦАП.

*Абсолютная разрешающая способность* — средние значения минимального изменения сигнала на выходе ЦАП (a), или минимального изменения входного сигнала АЦП (m), обусловленные увеличением или уменьшением его кода на единицу.

Значение абсолютной разрешающей способности является мерой измерения всех основных статических характеристик данного класса устройств и часто обозначается как ЕМР (единица младшего разряда), или просто МР (младший разряд).

*Абсолютная погрешность преобразования в конечной точке шкалы* ( $\delta F_s$ ) — отклонение реальных максимальных значений входного для АЦП ( $U_{IRN}$ ) и выходного для ЦАП ( $U_{ORN}$ ) аналоговых сигналов от значений, соответствующих конечной точке идеальной характеристики преобразования  $\{U_{IRN\ MAX} \text{ и } U_{ORN\ MAX}\}$  (рис. 2.2). Применительно к АЦП наличие  $\delta F_s$  означает, что максимальный выходной код будет сформирован на выходе устройства при входном сигнале  $U_{BX} = U_{IRN\ MAX} - \delta F_s$ . По аналогии для ЦАП можно сказать, что при подаче на вход максимального кода его выходное напряжение будет отличаться от  $U_{ORN\ MAX}$  на величину  $\delta F_s$ . Обычно  $\delta F_s$  измеряется в ЕМР. В технической литературе  $\delta F_s$  иногда называют мультипликативной погрешностью.

*Напряжение смещения нуля*  $U_o$  — для АЦП это напряжение ( $U_{BX0}$ ), которое необходимо приложить к его входу для получения нулевого выходного кода. Для ЦАП — это напряжение, присутствующее на его выходе ( $U_{ВыХ0}$ ) при подаче на вход нулевого кода. Величина  $U_o$  обычно выражается в ЕМР.

*Нелинейность* ( $\delta L$ ) — отклонение действительной характеристики преобразования от оговоренной линейной, т. е. это разность реального напряжения, соответствующего выбранному значению кода и Напряжения, которое должно соответствовать этому коду в случае идеальной характеристики преобразования устройства, (рис. 1.2). Для ЦАП это напряжение измеряется относительно центров ступеней указанных характеристик (рис. 1.3). В качестве оговоренной линейной характеристики используют либо прямую, проведенную через точки 0  $U_{max}$ , либо прямую, обеспечивающую минимизацию  $\delta L$ , например, среднеквадратическое отклонение всех точек которой от реальной характеристики минимально. Величину  $\delta L$  измеряют в EMP ( $\delta L = \delta' L / h$ ) или процентах ( $\delta L = 100 \delta' L / U_{max}$ ), где  $\delta' L$  — абсолютное значение нелинейности). В справочной литературе обычно задается максимально возможная величина  $\delta L$ .

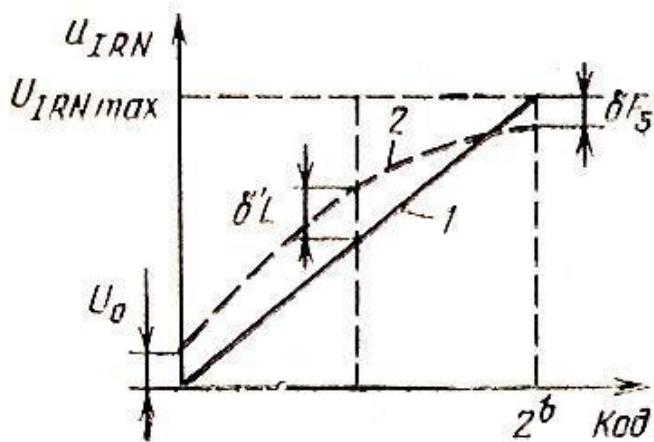


Рис. 1.2 Идеальная (1) и вариант реальной(2) характеристики преобразования АЦП

*Дифференциальная нелинейность* ( $\delta L_d$ ). Это отклонение действительного шага квантования  $\delta' L_d$  от его среднего значения ( $h$ ) (рис. 1.3). Величина  $\delta L_d$  измеряется либо в EMP [ $\delta L_d = (\delta' L_d - h)/h$ ], либо в процентах  $\delta L_d = (\delta' L_d - h) \cdot 100 U_{max}$ .

Величина дифференциальной нелинейности однозначно связана с понятием монотонности характеристик ЦАП и АЦП. Если  $|\delta L_d| > 1 \text{ EMP}$ , то приращение выходного сигнала в данной точке характеристики может быть как положительным, так и отрицательным (рис. 1.3). В последнем случае характеристика преобразования перестает быть монотонной.

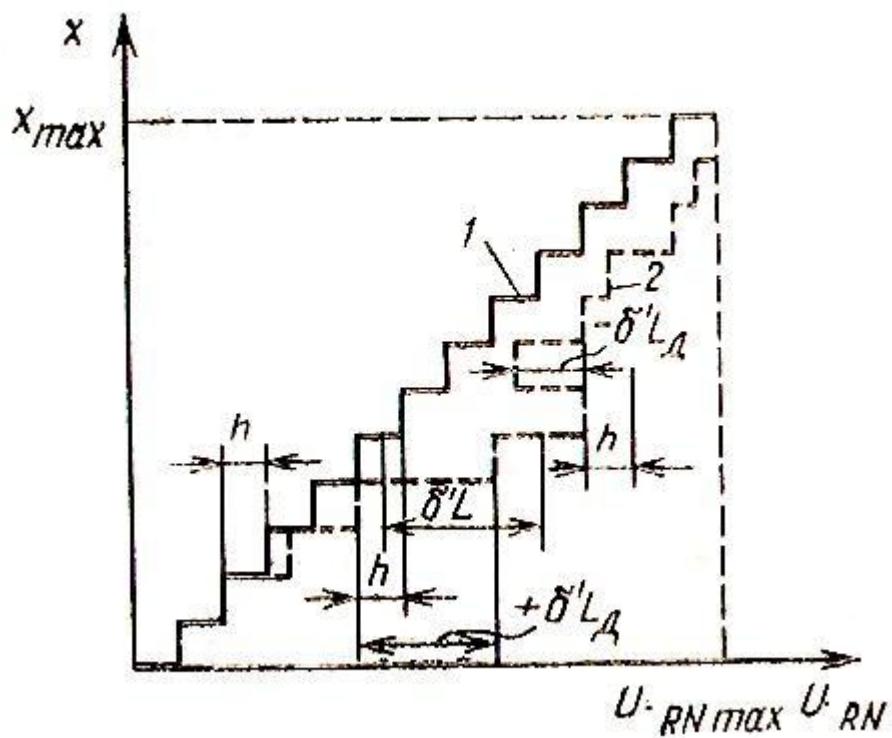


Рис. 1. Идеальная (1) и вариант реальной(2) характеристики передачи АЦП

Динамические свойства ЦАП и АЦП обычно характеризуют следующими параметрами:

*максимальная частота преобразования ( $f_{c \ max}$ )* — наибольшая частота дискретизации, при которой заданные параметры соответствуют установленным нормам;

*время установления выходного сигнала ( $t_s$ )* — интервал от момента заданного изменения кода на входе ЦАП до момента, при котором

выходной аналоговый сигнал окончательно войдет в зону заданной ширины, симметрично расположенную относительно установленного значения. Обычно ширина этой зоны задается равной 1ЕМР (рис. 1.4). Отсчет времени  $t_s$  ведется от момента достижения входным сигналом значения половины логического перепада.

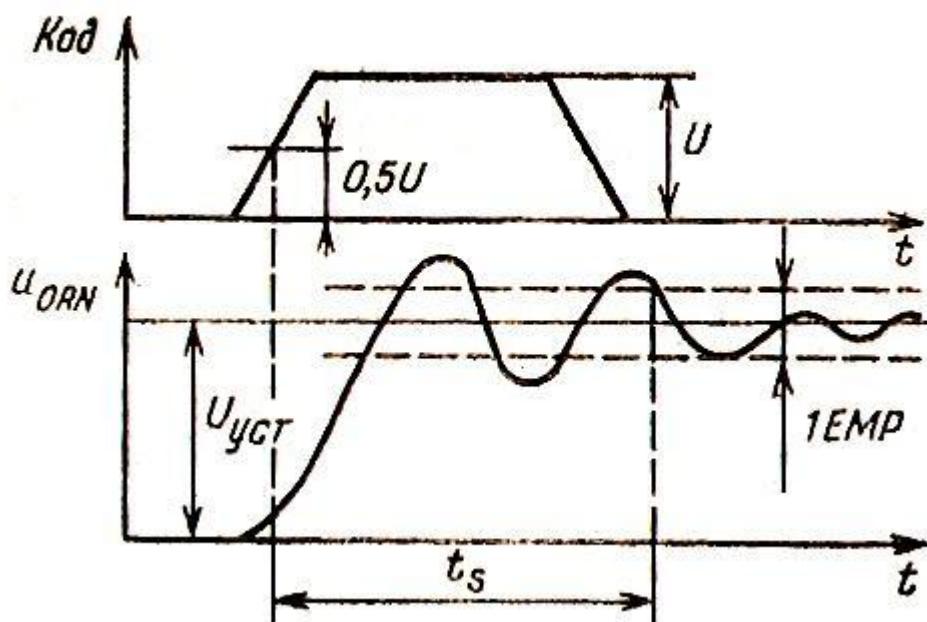


Рис.1.4 Определение времени преобразования ЦАП

### 1.3. ЦАП с суммированием токов

При построении ЦАП, реализующих метод суммирования нескольких различных эталонов, в качестве упомянутых эталонов можно использовать источники напряжения или тока. На практике наибольшее применение нашли схемы с эталонными источниками тока. Поэтому ниже остановимся только на особенностях построения устройств данного типа.

Принцип построения ЦАП, реализующих метод суммирования токов, иллюстрируется рис. 1.5, а. Данное устройство в общем случае

содержит  $B$  (по числу разрядов входного позиционного кода  $X$ ) источников тока и  $B$  управляемых разрядами этого кода переключателей  $S$ . Если в  $i$ -м разряде входного кода  $X$  присутствует сигнал лог. 1 ( $x_i = 1$ ), соответствующий переключатель  $S$ , подключает эталонный источник тока  $I_0 * 2^i$  к сопротивлению нагрузки  $R_H$  (вывод «а» схемы). В противном случае ( $x_i = 0$ ), переключатель  $S_i$  закорачивает соответствующий источник и ток  $I_0 * 2^i$  не протекает через нагрузку.

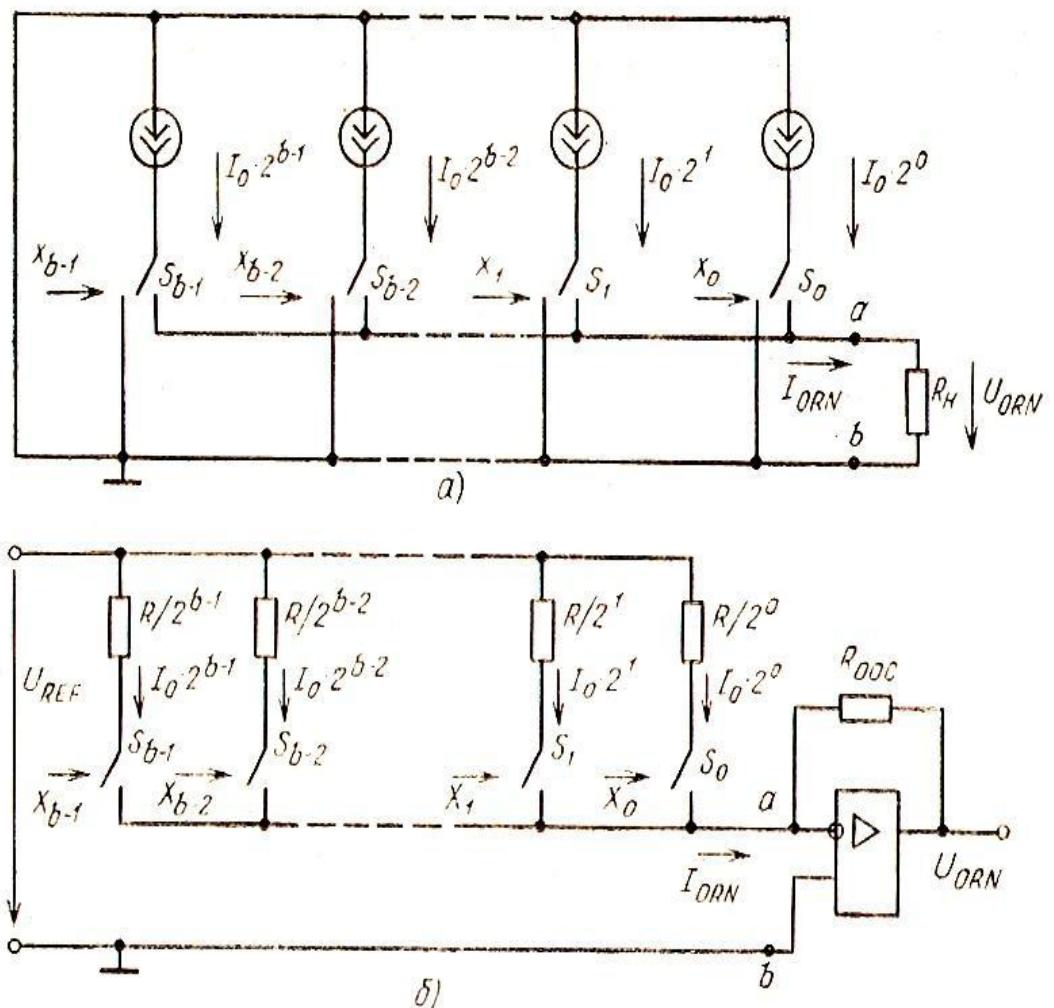


Рис.1.5. Структурная схема ЦАП с суммированием токов и ее реализации с использованием матрицы взвешенных резисторов

В результате ток резистора  $R_H$

$$I_{ORN} = I_0 \sum_{i=0}^{b-1} 2^i X_i$$

пропорционален значению входного кода. При условии  $R_H = \text{const}$  выходное напряжение схемы  $U_{ORN} = R_H I_{ORN}$  также пропорционально входному коду.

На практике для получения напряжения, пропорционального входному коду, к выводам «*a*», «*b*» подключают операционный усилитель (ОУ) (рис. 1.6). Ранее, было показано, что напряжение между входами ОУ всегда равно нулю. Поэтому для рассматриваемой схемы  $U_a = U_b = 0$  и по первому закону Кирхгофа  $I_{ORN} = U_{ORN}/R_{ooc}$ . Откуда

$$I_{ORN} = U_{ORN}/R_{ooc},$$

т. е. выходное напряжение ОУ прямо пропорционально выходному току ЦАП и сопротивлению  $R_{ooc}$  и не зависит от сопротивления выходной нагрузки ОУ.

Большинство серийно выпускаемых ИС ЦАП реализуют именно этот принцип. Их отличие состоит лишь в способе получения разрядных токов и используемой схемотехнике.

В простейшем случае для получения эталонных источников тока  $I_o * 2^i$  можно к источнику напряжения  $U_{REF}$  подключить ряд резисторов, сопротивления которых пропорциональны весовым коэффициентам входного кода (рис. 1.6). Такие резисторы называют *взвешенными*. Так как для ОУ  $U_a = U_b = 0$ , то токи резисторов схемы будут обратно пропорциональны их сопротивлениям  $I_i = U_{REF} - 2^i/R = I_o * 2^i$ , где  $I_o = U_{REF}/R$ .

Недостатком такого решения является широкий диапазон изменения сопротивлений взвешенных резисторов, используемых для формирования разрядных токов. К тому же для обеспечения точности преобразования абсолютные значения сопротивлений этих резисторов должны выдерживаться с прецизионной точностью. Так, в случае 12-разрядного ЦАП сопротивления разрядных резисторов должны отличаться в  $2^{11} = 2048$  раз, что весьма трудно выполнить технологически. Поэтому для получения источников эталонного тока

часто используют резистивные  $R$ - $2R$  матрицы, выполненные только на резисторах двух номиналов  $R$  и  $2R$ . В качестве примера рассмотрим приведенную на рис. 1.6 схему 4-разрядного ЦАП с матрицей  $R$ - $2R$ . Схема включает  $R$ - $2R$  матрицу, четыре переключателя  $S_3, \dots, S_0$ , на МДП-транзисторы  $VT_{3.1}, \dots, VT_{0.1}$  и  $VT_{3.2}, \dots, VT_{0.2}$ , четыре инвертора  $DD_3, \dots, DD_0$  и ОУ  $DA$  с цепью ООС. На входы инвертора подаются сигналы разрядов входного кода  $X_3 \dots X_0$ , а на вход матрицы  $R$ - $2R$  — напряжение от эталонного источника  $U_{REF}$ .

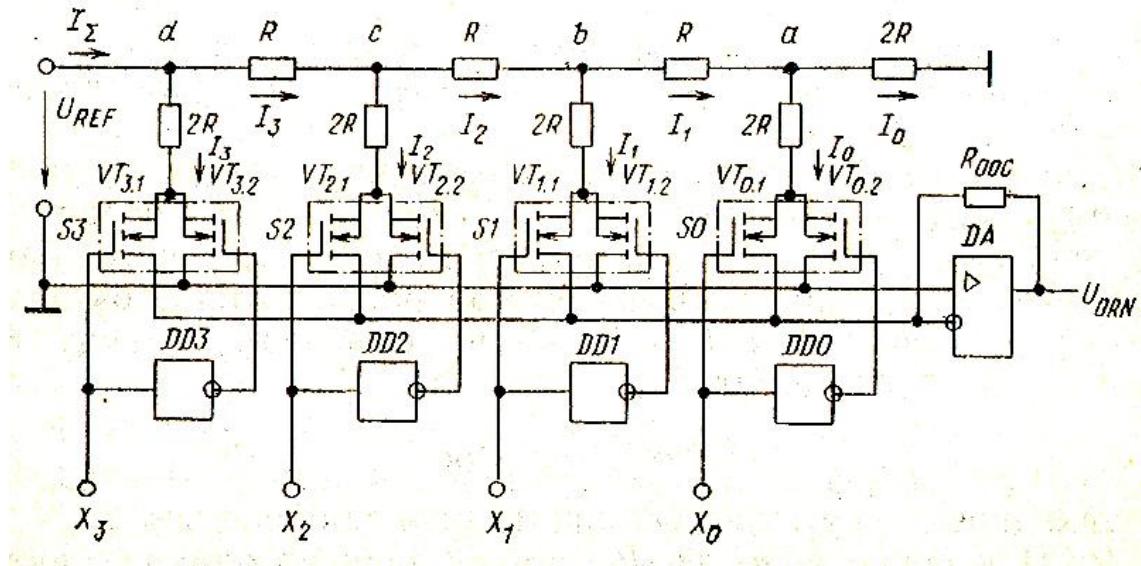


Рис 1.6. Структурная схема ЦАП с матрицей  $R-2R$

Рассмотрим сначала работу матрицы  $R-2R$ . Для удобства предположим, что на вход ЦАП подан нулевой код (0000). Тогда выходными сигналами инверторов  $DD3, \dots, DD0$  включены транзисторы  $VT_{3.2}, \dots, VT_{0.2}$  переключателей  $S3, \dots, S0$ , и нижние выводы всех резисторов  $2R$  матрицы подключены к общей шине.

Работа матрицы  $R-2R$  основана на том, что выходное сопротивление любой отсекаемой от нее выходной части схемы, содержащей целое число  $R-2R$  звеньев определяется параллельным соединением двух цепей, сопротивления каждой из которых равно  $2R$ . Поясним это. Между узлом «а» матрицы и общей шиной параллельно включены два резистора  $2R$  ( $VT_{o,2}$  — включен). Поэтому выходное сопротивление

матрицы относительно узла «» равно  $R$ . Между узлом « $B$ » и общей шиной схемы также параллельно включены резистор  $2R$  и последовательно соединенные резистор  $R$  и выходное сопротивление матрицы относительно узла « $a$ », равное  $R$ . Поэтому выходное сопротивление матрицы, измеренное относительно узла « $b$ », также равно  $R$  и т. д.

Согласно сказанному полное выходное сопротивление матрицы, измеренное относительно узла « $d$ », равно  $R$ , и ток, отбираемый матрицей от источника  $U_{REF}$ ,

$$I_{\Sigma} = U_{REF}/R.$$

Так как сопротивления ветвей матрицы, подключенных к точке равны, то  $I_3 = I_{\Sigma}/2 = U_{REF}/2R$ .

Ток  $I_3$ , втекающий в узел « $c$ », также разделится пополам, т. е.  $I_2 = I_3/2 = U_{REF}/2*2R$  и т. д.

Из приведенного анализа видно, что через переключатели  $S_3, \dots, S_0$  протекают токи, значения которых пропорциональны весовым коэффициентам двоичного кода.

Если на входы некоторых инверторов поданы сигналы лог. 1, то в соответствующих переключателях  $S$ , включены транзисторы  $VT_{i1}$  и токи, пропорциональные весовым коэффициентам данных разрядов, попадают на инвертирующий вход ОУ.

Определим напряжение, которое может быть сформировано на выходе схемы рис. 23.6 при подаче на се вход кода 1111.

$$U_{ORN_{\max}} = U_{REF} \left( \frac{1}{2^1} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \frac{1}{2^4} \right) = \frac{15}{16} U_{REF}$$

В общем случае, учитывая, что выражение в скобках представляет сумму членов геометрической прогрессии со знаменателем  $1/2$  для  $b$ -разрядного кода можно записать

$$U_{ORN_{\max}} = U_{REF} \frac{R_{ooc}}{R} \left( 1 - \frac{1}{2^b} \right)$$

Полученные выражения показывают, что в ЦАП рассматриваемого типа максимальное выходное напряжение всегда на  $\Delta U_{ORN}$  меньше опорного напряжения  $U_{REF}$ , причем

$$U_{ORN} = U_{REF} \frac{R_{OOC}}{R} \frac{1}{2^b}.$$

Это объясняется тем, что в последнем звене матрицы  $R-2R$  составляющая тока  $I_0$  всегда, минуя вход ОУ, замыкается на общую шину устройства. Величина  $\Delta U_{ORN}$  численно равна 1ЕМР. Следовательно, максимальное выходное напряжение ЦАП с суммированием токов всегда на величину абсолютной разрешающей способности меньше источника эталонного напряжения.

При выполнении рассмотренного устройства в виде ИС из нее иногда исключают источник эталонного напряжения  $U_{REF}$  и ОУ. Это позволяет расширить функциональные возможности устройства. В частности, если  $U_{REF}$  изменяется по заданному закону, схема может быть использована в качестве умножающего преобразователя.

Точность и стабильность параметров устройства в основном зависят от точности выполнения и стабильности сопротивлений его резисторов. Обычно соблюдается условие  $R_{ooc}/R=1$ . Поэтому резистор  $R_{ooc}=R$  вводится в состав ИС. В самой схеме все резисторы выполнены в виде идентичных по геометрическим размерам областей, одинаково ориентированных относительно осей кристалла. В качестве материала для резисторов используют пленку поликремния, обладающую высокой стабильностью собственного сопротивления.

Погрешность выходных параметров также зависит от падений напряжения на транзисторах токовых переключателей  $S_i$ . Для компенсации этих погрешностей площади транзисторов выполняются пропорциональными протекающему через них току. Этим достигается равенство падений напряжения на токовых переключателях всех разрядов.

При увеличении числа разрядов рабочие токи матрицы  $R-2R$  уменьшаются и становятся соизмеримыми с собственными шумами используемых элементов. Так, для 12-разрядного ЦАП отношение токов старшего и младшего разрядов равно  $2^{11} = 2048$ . Максимальный разрядный ток, определенный из условия допустимой рассеиваемой ИС мощности, обычно ограничивается на уровне в несколько миллиампер. Тогда токи младших разрядов ЦАП лежат на уровне десятых, сотых долей микроампера, что не позволяет обеспечить требуемую точность преобразования.

Решением проблемы является использование метода, подобного описанному ранее при рассмотрении счетчиков и сумматоров. Это выделение из структуры многоразрядного устройства нескольких однотипных ЦАП (групп) с меньшей разрядностью и последующим суммированием результатов, полученных в каждой из групп с помощью собственного масштабного сумматора. Реализацию данного принципа поясним с использованием структурной схемы 12-разрядного ЦАП, показанной на рис. 1.7.

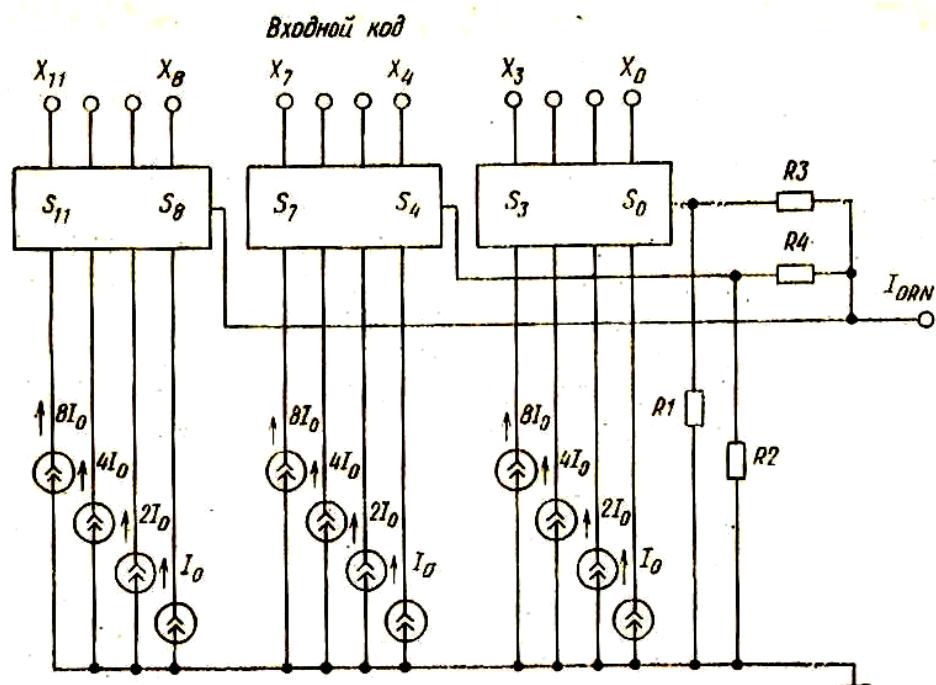


Рис 1.7 Структурная схема ЦАП с весовым суммированием выходных сигналов

Устройство состоит из трех 4-разрядных ЦАП. Так как кратность изменения сопротивлений в этом случае для каждого из них равна восьми, то для формирования весовых токов можно использовать как матрицы  $R-2R$  (см. рис. 1.6), так и взвешенные резисторы (см. рис. 1.5). На входы первого ЦАП подаются старшие разряды входного кода ( $X_{11}, \dots, X_8$ ), на входы второго ЦАП — средние разряды ( $X_{71}, \dots, A_4$ ), а на входы третьего ЦАП — младшие разряды кода ( $X_3, \dots, X_0$ ). Выходной сигнал ЦАП старших разрядов подается на выход устройства непосредственно, а сигналы ЦАП средних и младших разрядов через делители тока ( $R_1, R_3$  и  $R_2, R_4$ ), имеющие коэффициенты деления 1/16 и 1/128 соответственно. Таким образом при использовании рассматриваемой структурной схемы существует только два делителя с большими коэффициентами деления. В реальных схемах точность этих коэффициентов обеспечивается лазерной подгонкой соответствующих резисторов.

#### 1.4. АЦП последовательного счета

Принцип работы АЦП последовательного счета со счетчиком рассмотрим с использованием структурной схемы, показанной на рис. 1.8. Устройство содержит генератор тактовых импульсов (ГТИ), выход которого подключен к первому входу элемента 2И  $DD1$ . Выход элемента 2И соединен со счетным входом счетчика  $DD2$ , параллельные выходы которого соединены с входами ЦАП. Выход ЦАП подключен к инвертирующему входу безгистерезисного компаратора  $DA$ , к неинвертирующему входу которого подключается источник входного напряжения, преобразуемого в код. Выход компаратора соединен со вторым входом элемента 2И  $DD1$ .

Работает АЦП следующим образом. В исходном состоянии на вход установки в нуль счетчика  $DD2$  подан активный логический

сигнал. Счетчик сброшен. Его выходной код равен нулю. Равно нулю и выходное напряжение ЦАП. Поэтому, если  $U_{bx} > 0$ , то на выходе компаратора присутствует сигнал лог. 1 и тактовые импульсы с выхода ГТИ через элемент 2И  $DD1$  поступают на вход  $C$  счетчика. Однако, так как сигнал на входе  $R = 0$ , выходной код счетчика  $X=0$ .

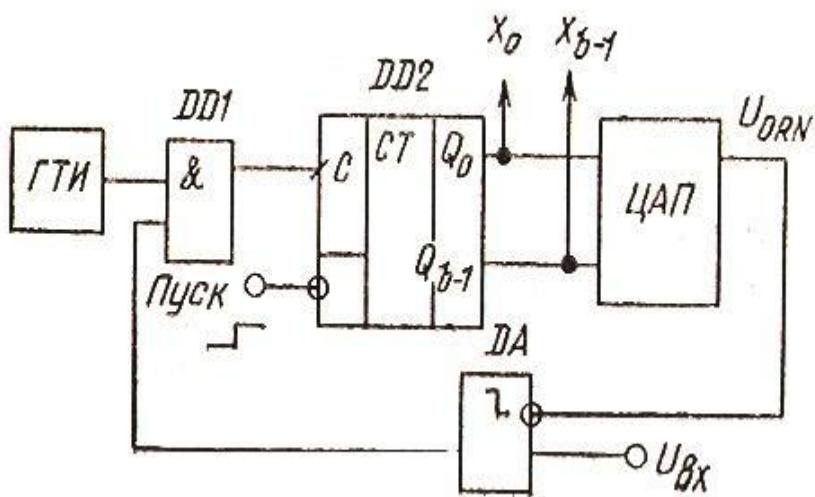


Рис 1.8. Структурная схема циклического АЦП  
последовательного счета

Преобразование начинается в момент снятия со входа  $R$  активного логического сигнала (импульс «Пуск»). В этом случае с приходом каждого тактового импульса с выхода ГТИ счетчик выполняет операцию инкремента. Его выходной код начинает увеличиваться. Соответственно увеличивается и выходное напряжение ЦАП (рис. 1.9). Этот процесс продолжается до тех пор, пока выходное напряжение ЦАП не превысит величину  $U_{bx}$ . В этот момент компаратор  $DA$  сформирует на выходе сигнал лог. 0. В результате на выходе элемента 2И  $DD1$  также будет сформирован сигнал лог. 0 и увеличение выходного кода счетчика прекратится. При этом значение выходного кода счетчика будет прямо пропорционально входному напряжению

$U_{BX}$  и обратно пропорционально абсолютной разрешающей способности используемого ЦАП

$$N_{\text{вых}} = U_{BX} / \alpha$$

Так как выходное напряжение ЦАП имеет форму ступенчатой функции, то напряжение  $N_{\text{вых}}$ , должно быть округлено до ближайшего целого числа, соответствующего номеру первого уровня  $U^*_N$ , превышающего значение  $U_{BX}$  (рис. 1.9). Для повторения цикла преобразования необходимо импульсом «Пуск» счетчик установить в нуль.

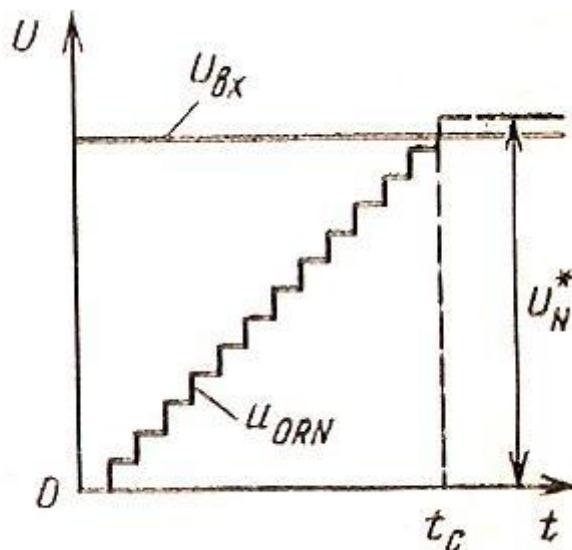


Рис.1.9. Временная диаграмма входного напряжения компаратора циклического АЦП

Очевидно, что время преобразования в рассмотренном АЦП прямо пропорционально его выходному коду и периоду следования импульсов ГТИ ( $T_{ГТИ}$ )

$$t_C = T_{ГТИ} N_{\text{вых}} = T_{ГТИ} U_{BX} / \alpha$$

Рассмотренный режим работы называется *циклическим*, так как каждый раз импульс «Пуск» сбрасывает счетчик  $DD2$  и поэтому счет (преобразование) всегда начинается с нуля.

Если в АЦП использовать реверсивный счетчик, то можно реализовать *нециклический* режим работы, характеризующийся более высоким быстродействием. В этом случае на выходе счетчика постоянно присутствует код, пропорциональный текущему значению входного напряжения. Структурная схема АЦП, реализующего нециклический режим работы, показана на рис. 1.10.

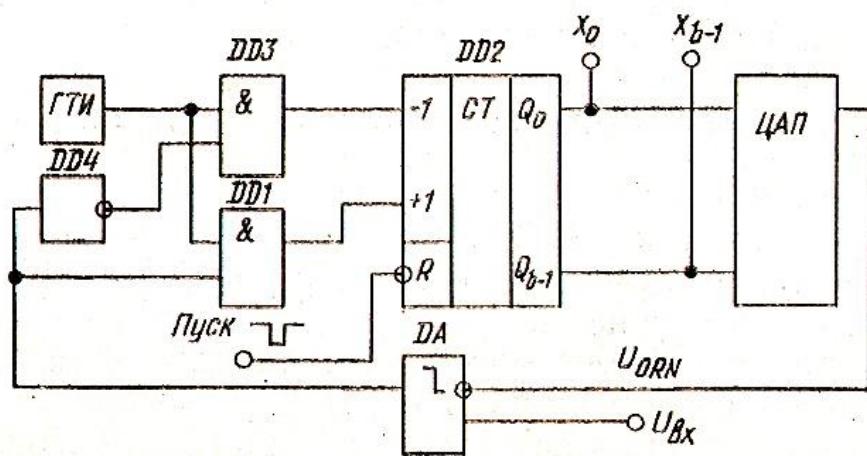


Рис.1.10. Структурная схема нециклического АЦП

В отличие от АЦП, работающего в циклическом режиме, в схему дополнительно введены инвертор  $DD4$  и еще один элемент 2И  $DD3$ .

Исходное состояние схемы аналогично состоянию циклического АЦП. Счетчик  $DD2$  сброшен. Выходное напряжение ЦАП  $U_{ORN} = 0$  и на вход «+1» счетчика  $DD2$  поступает последовательность выходных импульсов ГТИ. При снятии активного логического уровня с входа  $R$  счетчика его выходной код начинает увеличиваться. Увеличивается и выходное напряжение ЦАП. Этот процесс проходит до момента  $t_1$  (рис. 1.11), в который  $U_{ORN} > U_{bx}$ . Срабатывание компаратора  $DA$  приводит к тому, что на выходе элемента 2И  $DD1$  формируется пассивный для входа «+1» счетчика  $DD2$  сигнал. Одновременно инвертор  $DD4$  формирует на нижнем входе элемента  $DD3$  сигнал лог. 1. В результате этого на вход «—1» счетчика  $DD2$

начинают поступать импульсы ГТИ. При этом счетчик выполняет операцию декремента и его выходной код начинает уменьшаться. Уменьшается и напряжение ЦАП. В момент нарушения неравенства  $U_{\text{вх}} > U_{\text{ORN}}$  происходит очередное переключение компаратора  $DA$  и счетчик начинает увеличивать свой выходной код.

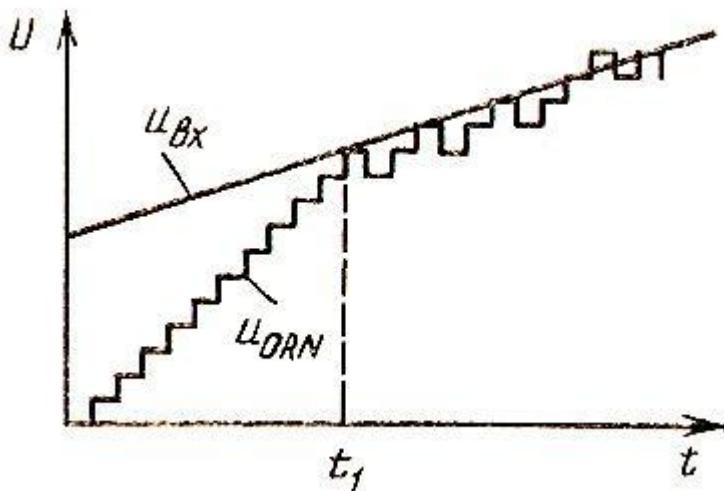


Рис.1.11. Временная диаграмма входного напряжения компаратора нециклического АЦП

Таким образом, с момента прихода импульса «Пуск» до момента  $t_1$  оба рассмотренных АЦП работают одинаково. Однако после  $t_1$  выходной код нециклического АЦП постоянно следит за изменением входного напряжения, что значительно снижает его время преобразования.

Общим недостатком рассмотренных схем является длительность интервала  $t_1$ , в течение которого выходной код счетчика должен достичь значения, эквивалентного входному напряжению. Причем увеличение точности требует увеличения разрядности используемых счетчика и ЦАП и ведет к падению быстродействия рассмотренных устройств. Вследствие сказанного, данный тип АЦП при разработке ИС не используется.

## 2.РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНУЮ И ПРИНЦИПИАЛЬНУЮ СХЕМУ

### 2.1 Анализ исходных данных

Необходимо разработать автономное устройство с батарейным питанием, которое бы записывало голосовую информацию в течении 1 часа. Устройство должно обеспечивать долговременное хранение записанной информации при выключении питания устройства. Необходимо предусмотреть индикацию режимов работы цифрового диктофона, а также органы управления режимами устройства.

Так как информация должна вводиться и преобразовываться для хранения в цифровой вид, то необходимо применить АЦП и оцифровывать сигнал по методу импульсно-кодовой модуляции, суть которой заключается в следующем. Если на рис.2.1 представлен исходный сигнал:

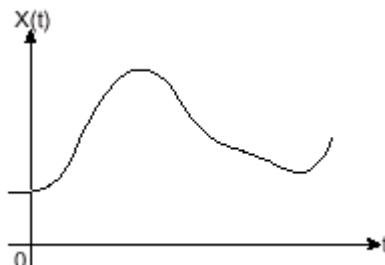


Рис.2.1. Исходный сигнал.

То для преобразования мы должны его разделить на временные отрезки(рис.2.2).

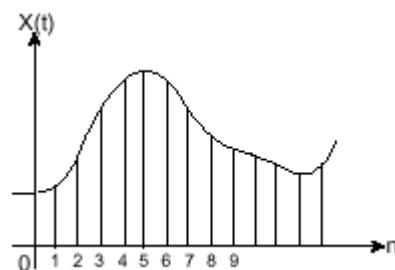


Рис.2.2. Дискретный сигнал.

Затем мы его должны квантизовать по уровням(рис.2.3).

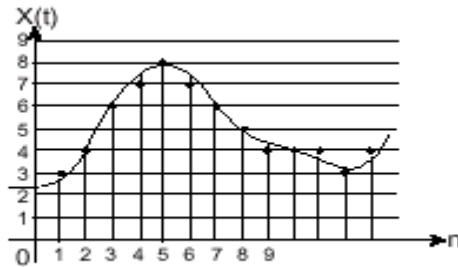


Рис.2.3. Квантизованный сигнал.

Только потом мы можем получить кодовые отсчеты сигнала(рис.2.4).

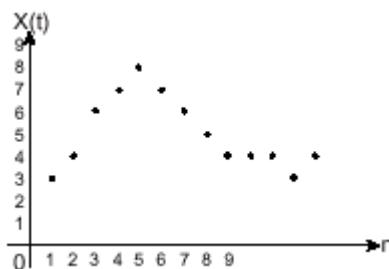


Рис.2.4. Оцифрованный сигнал.

Какой выбрать квант времени- об этом нам скажет теорема Котельникова, которая гласит, что для точного восстановления периодического сигнала нам необходимо взять минимум два отсчета за период. Таким образом, если принять верхнюю частотную границу человеческого голоса, при котором он хорошо различим за 4 кГц (в стандарте по передачи голосовой информации в телефонных линиях это число- 3,6кГц), то частота квантования по времени (дискретизации) составит 8 кГц.

Что касается квантования по уровню- то можно ограничиться 256 уровнями для обеспечения хорошего качества (в современных цифровых АТС используются от 32 до 256 уровней ). Таким образом, можно применить восьмибитовый АЦП, работающий на частоте Квантования 8 кГц.

Так как хранение информации должно производиться при выключенном питании, то в качестве устройства хранения нужно применить какую-нибудь энергонезависимую память. Объем этой памяти рассчитаем

следующим образом: Так как каждую секунду записывается 8000 отсчетов по 8 бит, что составляет 8 кб, то в течении часа нам необходимо будет записать 3600 X 8 кб, что составит примерно 29 Мб. Таким образом, применив память емкостью 32Мб, мы обеспечим нужное время записи. Применив же при записи алгоритмы архивации, мы сможем записать в пять раз больше информации (если принять коэффициент сжатия голосовой информации равным5).

Исходя из вышесказанного, можно решить стоящую перед нами проблему обеспечения цифровой записи голоса в течении длительного времени.

## 2.2. Структурная схема устройства.

Устройство работает с аналоговым сигналом, и, соответственно, чтобы обеспечить сопряжение с цифровой частью устройства применяется блок АЦП и блок входных цепей, которые обеспечивают усиление аналогового сигнала до необходимого уровня.

Устройство производит вывод записанной информации посредством блока ЦАП и блока выходных цепей, которые производят усиление выходного сигнала до необходимого уровня.

Контроль за работой блока ЦАП и блока АЦП производится модулем контроллера записи/чтения.

Индикацию режимов работы и управление ими диктофона выполняет блок индикации и управления.

Хранение записанной информации происходит в энергонезависимой памяти.

Таким образом в устройстве можно выделить следующие блоки (рис.2.5):

- входных цепей;
- АЦП;

- выходных цепей;
- ЦАП;
- контроллер записи/чтения;
- блок питания;
- тактового генератора;
- энергонезависимой памяти;
- блок индикации и управления.

Блок входных цепей соединяется информационной связью с блоком АЦП, который в свою очередь соединяется информационной связью с блоком энергонезависимой памяти и управляющими связями с тактовым генератором и блоком контроллера записи/чтения.

Блок выходных цепей соединяется информационной связью с блоком ЦАП, который в свою очередь соединяется информационной связью с блоком энергонезависимой памяти и управляющими связями с тактовым генератором и блоком контроллера записи/чтения.

Контроллер записи/чтения соединяется управляющей связью с энергонезависимой памятью.

Блок питания соединяется со всеми блоками.

Блок входных цепей обеспечивает усиление входного сигнала от микрофона и ограничение верхней частоты входного сигнала до 4 кГц.. Усиленный сигнал поступает на АЦП где преобразуется по сигналам от тактового генератора в кодовые отсчеты по уровню, представленные в двоичном коде. Кодовые отсчеты поступают в энергонезависимую память, где посредством контроллера записи/чтения происходит их запись. Контроллер записи/чтения формирует необходимые сигналы для записи и чтения из энергонезависимой памяти. В свою очередь, он получает управляющие сигналы от блока индикации и управления.

При воспроизведении голоса происходит выборка кодовых отсчетов из энергонезависимой памяти и подача их на ЦАП, где и происходит их преобразование в аналоговый сигнал.

Блок выходных цепей обеспечивает усиление выходного сигнала и ограничение верхней частоты выходного сигнала до 4 кГц, для того чтобы избавиться от высокочастотных гармоник в выходном сигнале, появляющихся при квантовании.

Блок питания необходим для обеспечения питания всех блоков диктофона.

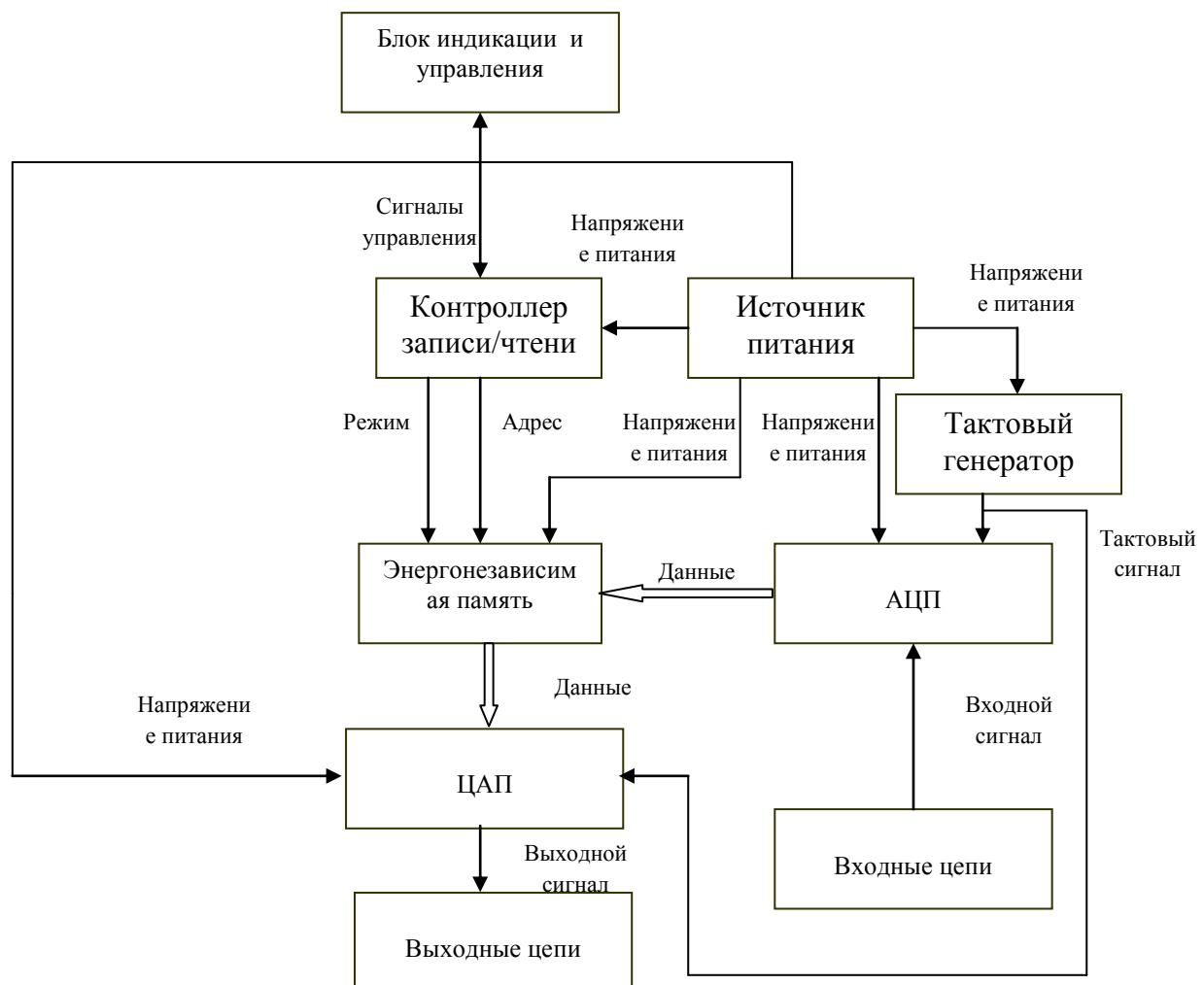


Рис.2.5 Структурная схема устройства.

### 2.3. Функциональная схема устройства

Устройство состоит из следующих функциональных элементов (см. схему электрическую функциональную рис.2.6): MCU-контроллер на базе микропроцессора, выполняющий функции управления устройством. В состав MCU также входят АЦП и ЦАП, поэтому микроконтроллер также выполняет

функции оцифровывания аналогового сигнала и преобразования цифровых кодов в аналоговый сигнал. Усилители U1 и U2 предназначены для усиления аналоговых сигналов и ограничения верхних граничных частот этих сигналов до 4 кГц. Микрофон МС и динамик SPK предназначены соответственно для ввода и воспроизведения голосовой информации. Генератор опорного напряжения U3 формирует опорное напряжение для встроенного АЦП микроконтроллера MCU. Тактовый генератор G предназначен для тактирования всех внутренних схем микроконтроллера. Энергонезависимая память nv RAM предназначена для хранения всей записываемой голосовой информации. Блок клавиатуры KBD предназначен для управления режимами устройства. Блок индикации LED предназначен для индикации режимов работы устройства.

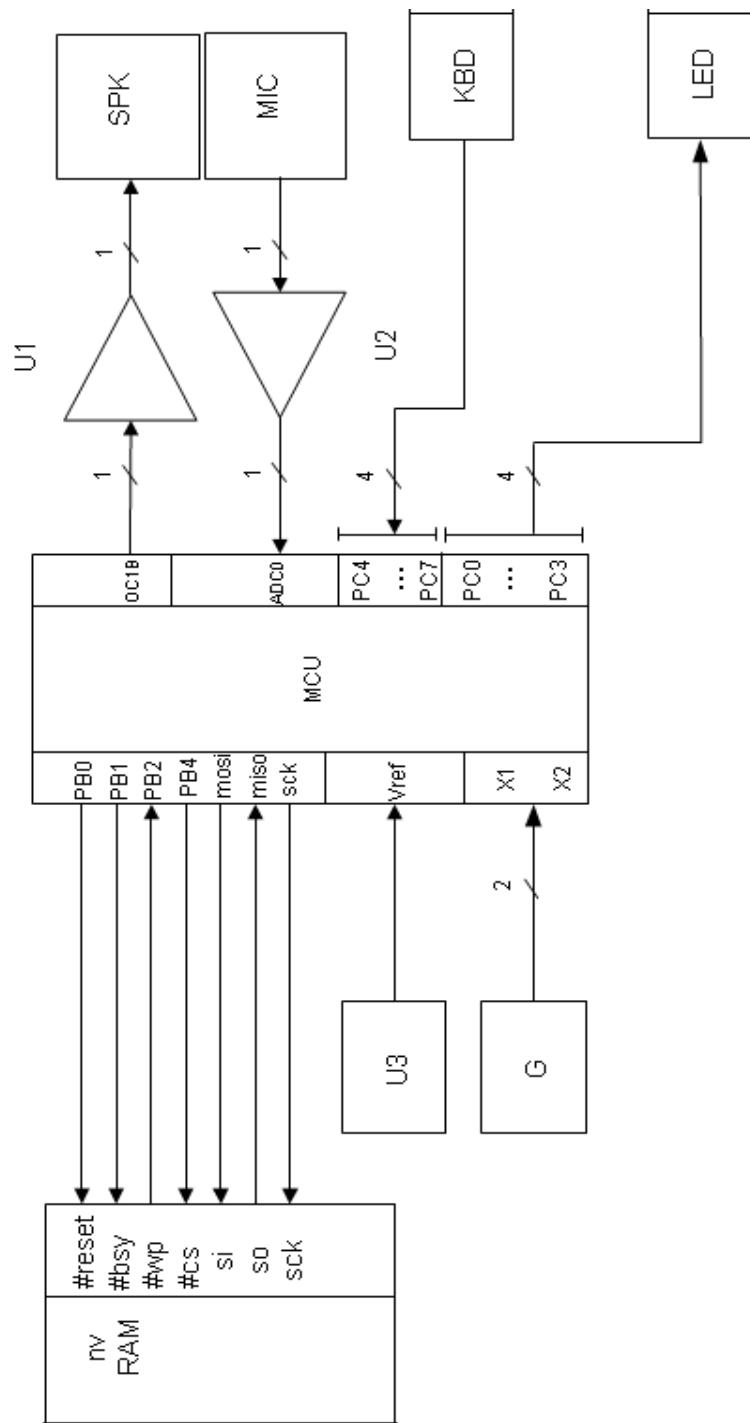


Рис. 2.6. Функциональная схема устройства

Входной сигнал с микрофона MIC поступает на усилитель-фильтр U1, где он усиливается до размаха в несколько вольт и ограничивается верхней частотой до 4 кГц. С выхода усилителя-фильтра U1 сигнал поступает на вход встроенного АЦП AD0. Обработанный сигнал програмно записывается в nv RAM по линиям, предусмотренным протоколом SPI(рис.2.7).

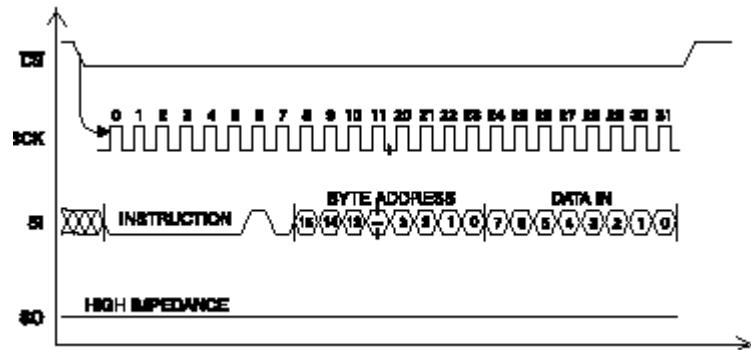


Рис.2.7. Запись в память.

После окончания записи сигнал может быть прочитан из памяти микроконтроллером( рис.2.8).

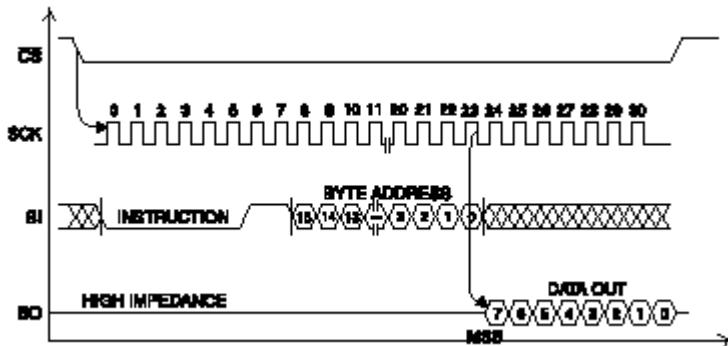


Рис.2.8. Чтение из памяти.

Микропроцессор MCU выдает через встроенный ЦАП сигналы на усилитель-фильтр U2, где они усиливаются и ограничиваются по верхней частоте до 4 кГц. В качестве ЦАП в микроконтроллере работает встроенный широтно-импульсный модулятор, который с помощью дифференцирующих сигналов и интегрирующей цепи может восстановить форму исходного сигнала. Отображение режимов работы устройства производят светоизлучающие диоды LED красного цвета свечения при высоком уровне

сигнала на соответствующем выходе микроконтроллера.



Рис.2.9. Восстановление сигнала при помощи широтно-импульсной модуляции.

В этом примере окончательный сигнал состоит из 8 бит. Теперь он может быть сохранён в DataFlash. DataFlash не требует отдельного цикла стирания перед программированием. При использовании команд «Буфер в основную страницу памяти программы с встроенным стиранием» и «Основная страница памяти программы сквозь буфер», DataFlash будет автоматически стирать определённую страницу в массиве памяти перед программированием действительных данных. Если система требует большую программную пропускную способность (больше 200K bps), то области массива основной памяти могут быть предварительно очищены, для уменьшения суммарного программного времени. При предварительной очистке части главного массива памяти, для уменьшения общего времени, может использоваться команда «Буфер в основную страницу памяти программы без встроенного стирания».

После очистки памяти данные могут записываться до тех пор, пока не заполняются все страницы.

Для записи в DataFlash используется буфер 1. Когда этот буфер заполнится (528 выборками), он записывается в память во время 529 преобразования. Данные записываются до тех пор, пока нажата кнопка

«Запись» или память не заполнилась. Если вся память заполнена, то новые данные не могут быть записаны, пока не очищена DataFlash. Если память заполнена лишь частично, то при повторном нажатии кнопки «Запись» новые данные будут добавлены сразу за уже записанными данными.

Воспроизведение звука всегда начинается с начала DataFlash. Оно прекращается, если все записанные данные воспроизведены или когда кнопка «Воспроизведение» отпущена.

DataFlash позволяет проигрывать данные либо напрямую из основной страницы памяти, либо путём копирования страницы в один из двух буферов и последующим чтением из буфера. Метод прямого доступа не подходит для этого примера, так как это метод двухадресный (один адрес для страницы, другой для позиции байта), и, следовательно, в DataFlash должна быть отправлена длинная загрузочная последовательность для каждого отдельного байта. Это занимает больше одного цикла ШИМ, который длится 510 тактовых импульсов для 8-битного ШИМ сигнала.

Поэтому, одна страница памяти копируется в один из двух буферов. Пока данные читаются из этого буфера, следующая страница памяти копируется в другой буфер. Когда все данные считаны из первого буфера, чтение продолжается из другого буфера, в это время первый буфер перезагружается. Чтение данных из буфера DataFlash синхронизируется частотой ШИМ.

Выходной фильтр сглаживает выходной сигнал и удаляет высокочастотную несущую ШИМ сигнала. Результирующий выходной сигнал для сигнала из примера похож на тот, что изображён на рисунке 2.10. Если исключить ошибку квантования и отсутствующее усиление, то сигнал полностью похож на входной аналоговый сигнал .

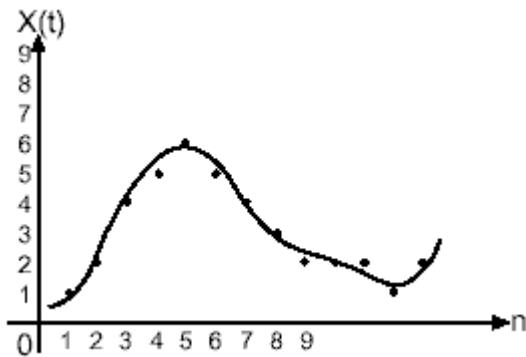


Рис 2.10. Выходной ШИМ сигнал

## 2.4. Выбор элементной базы и разработка структурной схемы

При проектировании принципиальной схемы, учитывая анализ входных данных и требований к выполнению работы, базовой технологией выбора интегральных микросхем была выбрана КМОП, и в соответствии с этим был произведен выбор следующих элементов:

В качестве устройства управления выбран высокопроизводительный микроконтроллер RISC-архитектуры серии AVR фирмы Atmel AT90S8535. Он обладает встроенной памятью программ объемом 4096 слов и памятью данных 512 байт. Любая его команда выполняется за 1 такт процессора. Тактовая частота 8 МГц [5].

На выполнение процессором программного кода для обработки и записи отсчетов, полученных от АЦП, потребуется до 20 мс, так что выбранный процессор вполне удовлетворяет требованию скорости работы и успевает обработать всю необходимую информацию.

Обеспечение протокола работы с памятью организуется тем же процессором программно - аппаратными методами, так как в микроконтроллере имеется аппаратная поддержка протокола SPI.

Для хранения записываемой информации выбрана FLASH ПЗУ AT45DB32 фирмы Atmel, объемом 32Мб.

Микропроцессор MCU (AT90S8535) управляет через порт В работой FLASH- памяти DD1(см. схему электрическую принципиальную рис 2.11). Так как в процессоре имеется аппаратная поддержка SPI протокола, то микросхема памяти, работающая по этому протоколу непосредственно подключается к выводам микроконтроллера DD2 miso, mosi, sck.

В режиме хранения информации микроконтроллер и микросхема памяти переключаются в спящий режим- микроконтроллер путем выполнения специальной команды, а микросхема памяти путем удержания микроконтроллером сигнала #cs в высоком уровне.

Микросхема памяти и микропроцессор выполнены по КМОП - технологии, что позволяет их непосредственно питать от аккумуляторных батарей небольшой емкости, которые подключаются через разъем X1.

Для обеспечения работы процессора на частоте 8 МГц применены элементы BQ1 - кварцевый резонатор и конденсаторы C8 и C9.

Опорное напряжение для АЦП берется напрямую с шины питания. Изменение его значения не приведет к структурному искажению сигнала, а только к его масштабированию.

К выходу широтно-импульсного модулятора подключена интегрирующая цепь C4, R1. Сигнал с нее подается на микросхему операционного усилителя DA2, охваченную частотно- зависимой отрицательной обратной связью.

Сигнал от микрофона усиливается микросхемой DA1 и подается на вход АЦП. Усилитель DA1 также охвачен частотно- зависимой отрицательной обратной связью, для того чтобы ограничить верхнюю частотную границу входного сигнала до 4 кГц.

К порту С микроконтроллера подключаются кнопки управления и светодиоды для индикации режимов работы устройства.

К разъему X1 подключается аккумуляторная батарея для питания устройства. Конденсаторы C1 и C2 служат для сглаживания пульсаций по цепи питания, которые могут возникнуть при протекании динамических процессов внутри микросхем.

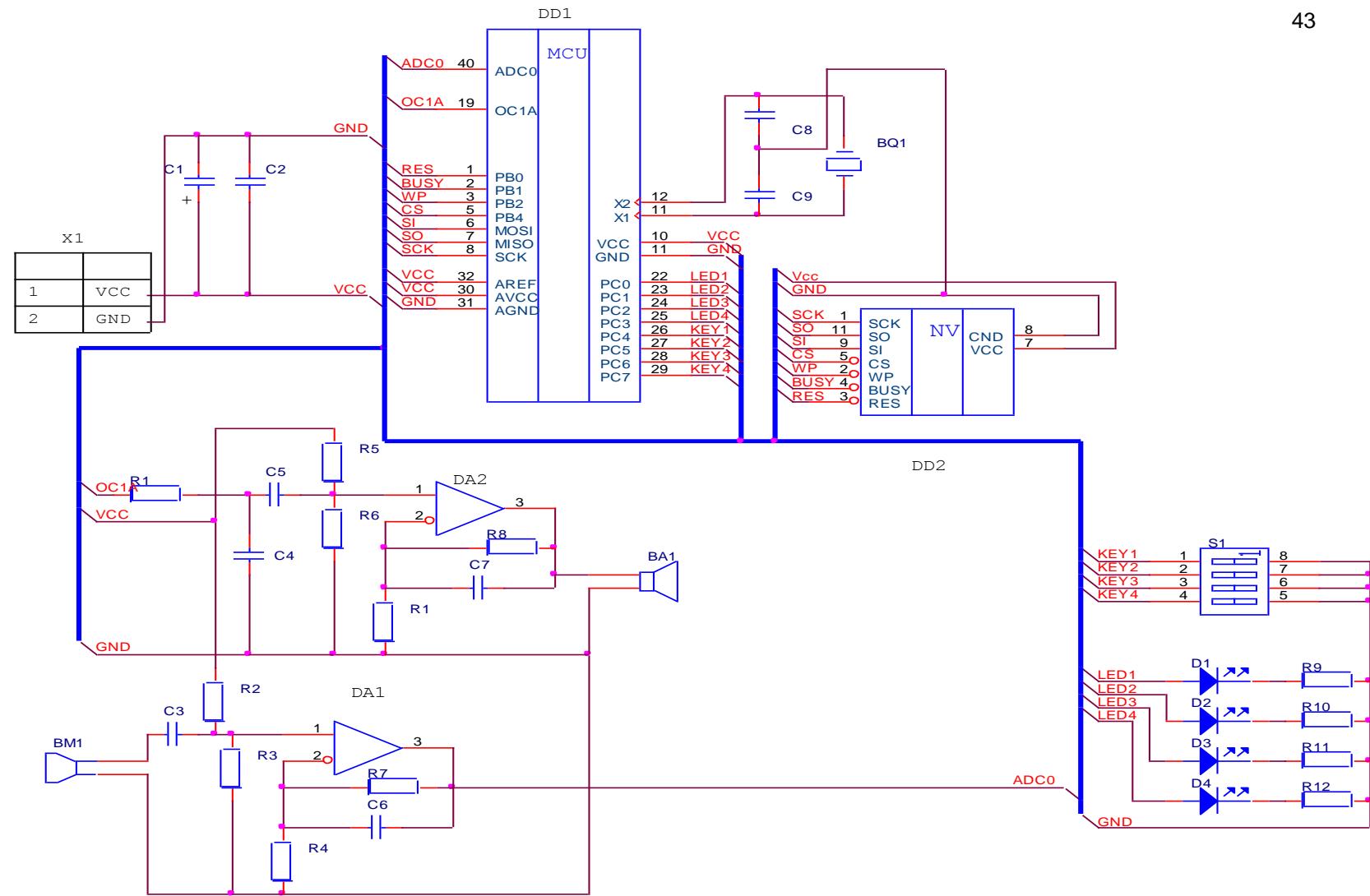


Рис. 2.11. принципиальная схема устройства

### 3. РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ

Надёжность – это свойство системы сохранять во времени и в установленных пределах значения всех информативных параметров, характеризирующих способность выполнять требуемые функции данной системы в данных режимах, условиях применения и технического обслуживания.

При разработке аппаратуры вопросам надёжности уделяется большое внимание. Характеристики надёжности называются критериями. Так как процесс появления отказа носит по своей физической природе случайный характер, то критерий надёжности является статистической величиной и определяется на основе правил математической статистики.

К критериям надёжности относятся:

- вероятность безотказной работы  $p(t)$ ;
- частота отказов  $v(t)$ ;
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$ .

Методика расчёта надёжности во многом зависит от вида закона распределения отказов.

В нашем случае будет учитываться только внезапный отказ. При этом будем считать, что выход из строя любого элемента приведёт к отказу всего устройства и вероятность безотказной работы устройства будет равна произведению вероятностей безотказной работы всех элементов:

$$P_c = \prod_{i=1}^N p_i(t), \quad (3.1)$$

где  $p_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

Для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) интенсивность отказов

считают постоянной ( $\lambda(t)$ -const), то есть берут нормальный участок эксплуатации, и поэтому здесь применим экспоненциальный закон распределения. При экспоненциальном законе распределения отказов во времени, который применим для большинства узлов и блоков РЭА, в том числе для интегральных микросхем (ИМС), интенсивность отказов не зависит от времени. Поэтому для экспоненциального закона имеем:

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (3.2)$$

Условия эксплуатации ИМС характеризуются комплексом действующих факторов, которые имеют различную физико-химическую природу, изменяются в достаточно широких пределах и по разному влияют на работоспособность ИМС и их надёжность. В зависимости от области применения ИМС подвергаются воздействию отдельных факторов, которые по разному влияют на работоспособность ИМС.

Интенсивность отказов полупроводниковых ИМС  $\lambda_{имс}$  с учетом того, что время появления внезапных отказов распределено по экспоненциальному закону определяется выражением:

$$\lambda_{имс} = \sum_{i=1}^m n_i \alpha_i k_i \lambda_i, \quad (3.3)$$

где  $m$ - число групп элементов;

$n_i$ - число элементов данного типа с одинаковым режимом работы;

$\alpha_i$  - поправочный коэффициент, учитывающий влияние окружающей среды и электрической нагрузки;

$k_i$ - поправочный коэффициент, учитывающий механическое воздействие, относительную влажность и изменения атмосферного давления;

$\lambda_i$ - интенсивность отказов элементов структуры (транзисторов, резисторов), металлизации, кристалла и конструкции (соединения, корпус).

Для примера рассчитаем интенсивность отказов ИМС К140УД5Б :

$n_p = 16$  - количество резисторов;  
 $n_{tp} = 16$  - количество транзисторов;  
 $n_d = 4$  - количество диодов;  
 $n_v = 14$  - количество выводов.

Интенсивность отказов элементов структуры микросхемы поправочные коэффициенты:

$\lambda_p = 0,6 \cdot 10^{-8}$  1/ч;  
 $\lambda_{tp} = 1 \cdot 10^{-8}$  1/ч;  
 $\lambda_d = 0,5 \cdot 10^{-8}$  1/ч;  
 $\lambda_v = 0,1 \cdot 10^{-8}$  1/ч;  
 $\alpha_p = \alpha_v = 1,15$ ;  
 $\alpha_{tp} = \alpha_d = 1,34$   
 $\kappa = 1$ .

Тогда получим:

$$\lambda_{имс} = 16 \cdot 1,15 \cdot 0,6 \cdot 10^{-8} + 4 \cdot 1,5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-8} + 16 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-8} + 14 \cdot 1,15 \cdot 0,1 \cdot 10^{-8} = 39,65 \cdot 10^{-8} \text{ (1/ч)}.$$

Микросхема AT45DB32 относится к микросхемам первой степени интеграции, поэтому  $\lambda = 47,2 \cdot 10^{-8}$  (1/ч).

Микросхема T90S8535 относится к микросхемам третьей степени интеграции, поэтому  $\lambda = 342,8 \cdot 10^{-8}$  (1/ч).

В таблице 3.1 приведен расчёт интенсивности отказов всех элементов устройства.

Интенсивность отказов элементов устройства:

$$\Lambda = 4099,3 \cdot 10^{-8} \text{ (1/ч)}$$

Среднее время наработки на отказ:

$$T_{ср}=1/\Lambda = 1/4099,3 \cdot 10^{-8} = 24394 \text{ (ч)}$$

Определим вероятность безотказной работы устройства по формуле:

$$P(t)=e^{-\Lambda \cdot t} \quad (4.4)$$

Расчёт величины  $P(t)$  приведён в таблице 3.2.

На рисунке 3.1 приведен график безотказной работы устройства.

Таблица 3.1  
Расчёт интенсивности отказов

Тип элемента	Количество штук	$\lambda_i, 1/\text{ч}$	$\lambda_c, 1/\text{ч}$
К140УД5Б	2	$39,65 \cdot 10^{-8}$	$79,3 \cdot 10^{-8}$
AT90S8535	1	$342,8 \cdot 10^{-8}$	$342,8 \cdot 10^{-8}$
AT45DB32	1	$47,2 \cdot 10^{-8}$	$47,2 \cdot 10^{-8}$
динамик	1	$110 \cdot 10^{-8}$	$110 \cdot 10^{-8}$
микрофон	1	$110 \cdot 10^{-8}$	$110 \cdot 10^{-8}$
переключатель	1	$130 \cdot 10^{-8}$	$130 \cdot 10^{-8}$
резисторы	12	$120 \cdot 10^{-8}$	$1440 \cdot 10^{-8}$
светодиоды	4	$100 \cdot 10^{-8}$	$400 \cdot 10^{-8}$
кварц	1	$80 \cdot 10^{-8}$	$80 \cdot 10^{-8}$
конденсаторы	9	$150 \cdot 10^{-8}$	$1350 \cdot 10^{-8}$
пайка	100	$0,1 \cdot 10^{-8}$	$10 \cdot 10^{-8}$
Итого $\Lambda, 1/\text{ч}$	-----	-----	$4099,3 \cdot 10^{-8}$

Таблица 4.2

## Расчёт вероятности безотказной работы

t, час	500	1000	2000	3000	5000	6000	8000
P(t)	0,98	0,96	0,92	0,88	0,81	0,77	0,71

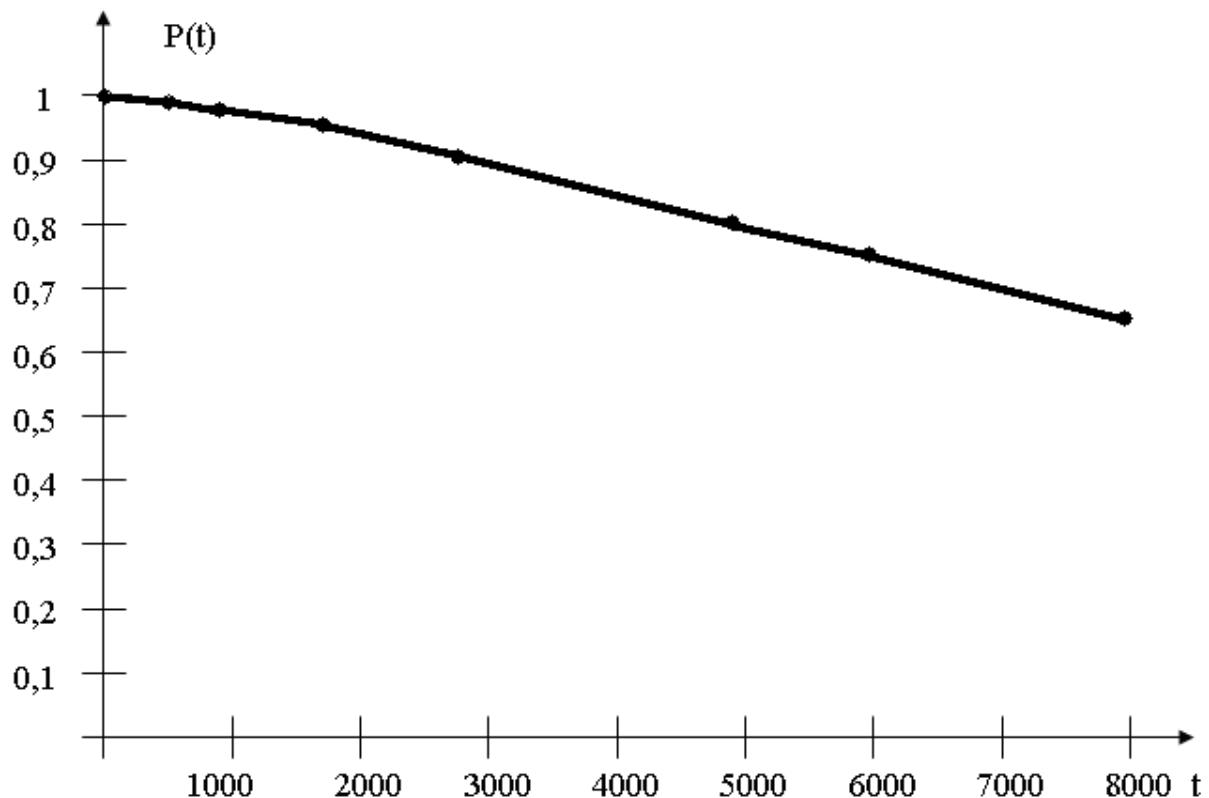


Рис 4.1. Вероятность безотказной работы устройства.

В связи с тем, что надёжность работы разработанного устройства получается невысокой, необходимо предложить следующие мероприятия по повышению надежности:

1. Снизить электрические нагрузки на детали.
2. использовать микросхемы после предварительного диагностирования для устранения постепенных отказов.
3. Использовать методы резервирования наиболее слабых узлов по надёжности.

## 4. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЁТ

### 4.1. Определение размеров монтажной платы.

Разработка конструктивного исполнения проектируемого устройства включает в себя выбор способа монтажа, определение размеров монтажной платы.

Среди множества способов монтажа радиоэлектронной аппаратуры наиболее рациональным считается печатный монтаж. Печатный монтаж обладает такими преимуществами, как минимальный объём, достаточная надежность, технологичность.

Компоновку блоков проектируемого устройства целесообразно выполнить моносхемным способом, при котором все элементы располагаются в одной плоскости печатной платы. При этом обеспечивается простота, себестоимость, уменьшаются общий вес и габариты, улучшаются электрические характеристики.

Для определения размеров печатной платы необходимо провести расчёт установочных параметров элементов. Установочную площадь элементов определяем по формуле:

$$S_{uscm} = a \cdot b \cdot l;$$

где  $a$  - коэффициент запаса,  $a=1,25$ ;

$b$  - ширина элемента;

$l$  - длина элемента.

При определении полной площади платы вводим коэффициент ее увеличения, равный  $M = 2$ , то есть полная площадь печатной платы будет в два раза больше установочной площади всех элементов. В таблице 4.1 приведен расчет размеров печатной платы.

Площадь платы разрабатываемого устройства получилась равной  $50 \cdot 55 = 2750 \text{ мм}^2$ . Исходя из этого размеры печатной платы выбираем следующими: длина  $l= 50\text{мм}$ , ширина  $b= 55\text{мм}$ .

На рис 4.1 приведено расположение элементов на плате разрабатываемого устройства.

Таблица 4.1  
Расчёт размеров печатной платы

Тип элемента	Кол-во	Ширина $b$ , мм	Длина $l$ , мм	Площадь $S_{усм}$ , мм <sup>2</sup>
AT90S8535	1	14,3	56,2	1004,6
К140УД5Б	2	7,3	16,8	306,6
AT45DB32	1	5,4	6,8	45,9
Итого	-	-	-	1357,1
С учётом запаса	-	-	-	2714,2

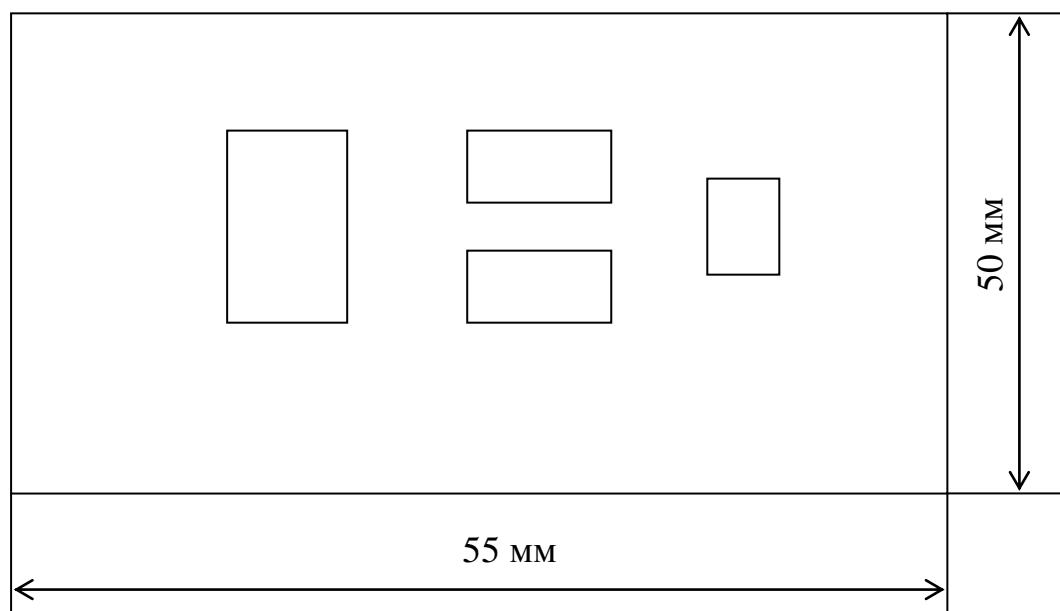


Рис.4.1 Расположение элементов на монтажной плате

## **5. ОХРАНЕ ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.**

### **Электробезопасность**

Обеспечение безопасности жизнедеятельности – задача первостепенного приоритета для личности, общества и государства. С момента своего появления на Земле человек перманентно живёт и действует в условиях постоянно изменяющихся потенциально опасностей. Реализуясь в пространстве и времени, опасности причиняют вред здоровью человека, который проявляется в нервных потрясениях, болезнях, инвалидных и летальных исходах и др. Профилактика опасности и защита от них – актуальнейшая гуманная, социально-экономическая и юридическая проблема, в решении которой государство не может быть не заинтересованным.

Для обеспечения электробезопасности необходимо строгое выполнение ряда организационно-технических мероприятий установленных правилами устройства электроустановок, правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей и правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляется в виде электротравм и профессиональных заболеваний. Электробезопасность в помещении обеспечивается техническими способами и средствами защиты, а так же организационными и техническими мероприятиями.

#### **5.1. Общие сведения**

Существуют следующие способы защиты, применяемые отдельно или в сочетании друг с другом: защитное заземление, зануление, защитное отключение, электрическое разделение сетей разного напряжения, применение малого напряжения, изоляция токоведущих частей, выравнивание потенциалов.

В электроустановках (ЭУ) напряжением до 1000В с изолированной

нейтралью и в электроустановках постоянного тока с изолированной средней точкой применяют защитное заземление в сочетании с контролем изоляции или защитное отключение.

В этих электроустановках сеть напряжением до 1000В, связанную с сетью напряжением выше 1000В через трансформатор, защищают от появления в этой сети высокого напряжения при повреждении изоляции между обмотками низшего и высшего напряжения пробивным предохранителем, который может быть установлен в каждой фазе на стороне низшего напряжения трансформатора.

В электроустановках напряжением до 1000В с глухозаземленной нейтралью или заземленной средней точкой в ЭУ постоянного тока применяется зануление или защитное отключение. В этих ЭУ заземление корпусов электроприемников без их заземления запрещается.

Защитное отключение применяется в качестве основного или дополнительного способа защиты в случае, если не может быть обеспечена безопасность применением защитного заземления или зануления или их применение вызывает трудности.

При невозможности применения защитного заземления, зануления или защитного отключения допускается обслуживание ЭУ с изолирующих площадок.

## 5.2 Напряжение прикосновения

Напряжением прикосновения называется напряжение на корпусе электрооборудования с поврежденной изоляцией, к которому может прикоснуться человек. Это напряжение зависит от состояния заземления, расстояния между человеком и заземлителем, сопротивления основания, на котором стоит человек.

На (рис. 5.1. а) показано влияние положения человека относительно заземлителя при одиночном заземлителе на величину напряжения

прикосновения. Напряжение прикосновения максимально в положении 1 человека, когда он стоит в зоне нулевого потенциала и касается заземленного оборудования; равняется нулю в положении 2, когда человек стоит на заземлителе или его проекции на поверхность земли, в некотором промежуточном положении человека напряжение прикосновения имеет промежуточное значение, которое меняется от 0 до  $U_3$ .

На (рис. 5.1. б) показана зависимость напряжения прикосновения от положения человека при групповом заземлителе. В этом случае  $U_{\text{пр}}$  имеет наибольшее значение в положении 1 человека, когда он находится между электродами заземлителя, наименьшее значение в положении 2, когда он стоит на заземлителе или его проекции на поверхность земли, в любом промежуточном положении  $U_{\text{пр}}$  изменяется от 6 до максимального значения.

### 5.3 Напряжение шага

Напряжение шага возникает между ногами человека, стоящего на земле, из-за разности потенциалов на поверхности земли при растекании в земле тока замыкания на землю. Напряжение шага отсутствует, если человек стоит или на линии равного потенциала или вне зоны растекания тока, т. е. на расстоянии более 20 м от заземлителя [14].

На рис. 5.2. показана зависимость величины напряжения шага от расстояния между человеком и одиночным заземлителем. Напряжение шага наибольшее в положении 1 человека, когда он стоит одной ногой на заземлителе. В положении человека между заземлителем и зоной нулевого потенциала, когда шаг направлен по радиусу к заземлителю, напряжение шага имеет промежуточное значение.

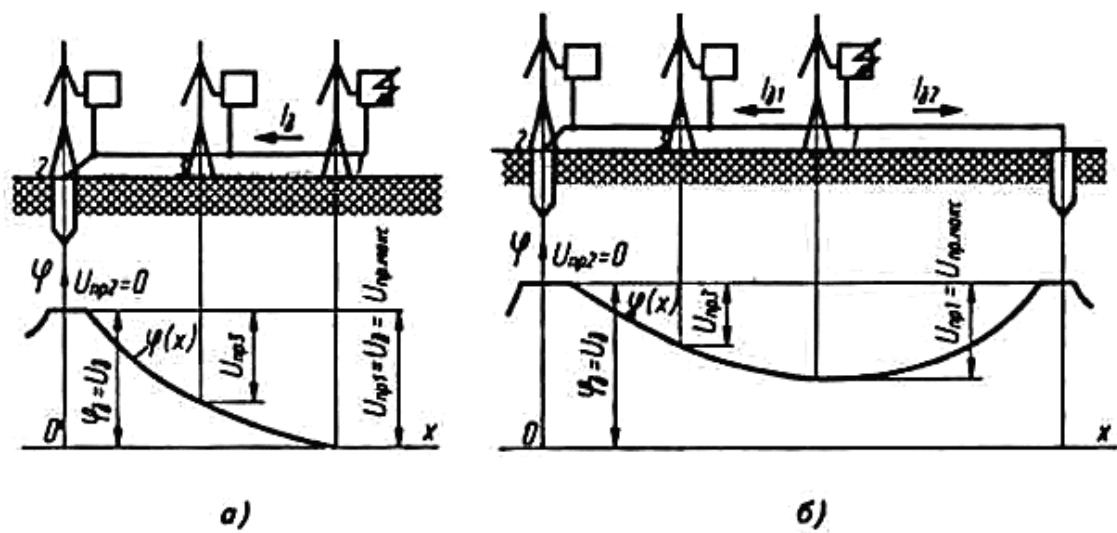


Рис. 5.1. Зависимость напряжения прикосновения от расстояния между человеком и заземлителем при *а*) одиночном и *б*) групповом заземлителях:  
 $U_{np}$  – напряжение прикосновения.

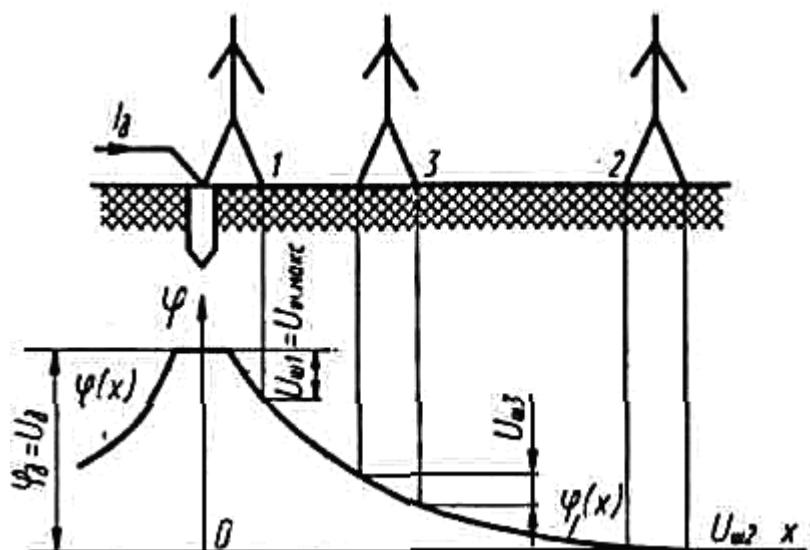


Рис.5.2. Величина напряжения шага в зависимости от расстояния между человеком и заземлителем:

## 5.5. Защитное заземление

Заземлением (рис. 5.3.) называется соединение с землей нетоковедущих металлических частей электрооборудования через металлические детали, закладываемые в землю и называемые заземлителями, и детали, прокладываемые между заземлителями и корпусами электрооборудования, называемые заземляющими проводниками. Проводники и заземлители обычно делаются из низкоуглеродистой стали, называемой в просторечии железом.

Заземлители в виде штырей, вбиваемых в землю, называются электродами, и могут быть одиночными или групповыми. Заземлитель имеет характеристики, обусловленные стеканием по нему тока в землю. К характеристикам заземлителя относятся:

- напряжение на заземлителе;
- изменение потенциалов точек в земле вокруг заземлителя в зависимости от их расстояния от заземлителя в зоне растекания тока — вид потенциальной кривой;
- вид линий равного потенциала — эквипотенциальных линий на поверхности земли;
- сопротивление заземляющего устройства;
- напряжения прикосновения и шага.

На (рис. 5.4.) показана схема простого заземлителя в виде стержня или трубы, забиваемых в землю и вид потенциальных кривых и эквипотенциальных линий.

При расстоянии менее 40 м между одиночными заземлителями в групповом заземлителе их зоны растекания накладываются друг на друга, и получается одна зона растекания группового заземлителя, которой соответствует своя потенциальная кривая.

## 5.6 Зануление

Зануление (рис. 5.5.) предусматривает глухое заземление нейтрали источника или трансформатора трехфазного тока, одного вывода источника однофазного тока, наличие нулевого провода и его повторного заземления.

Заземление нейтрали источника тока имеет целью понизить напряжение на корпусах оборудования и на нулевом проводе, с которым эти корпуса соединены, до безопасного значения при замыкании фазного проводника на землю, при этом создается путь для тока  $I_{\phi-z}$ .

Нулевой защитный проводник предназначен для увеличения тока короткого замыкания  $I_k$  с целью воздействия этого тока на защиту. Увеличение  $I_k$  происходит за счет уменьшения сопротивления току при наличии нулевого провода по сравнению с тем, если бы ток шел через землю.

Повторное заземление нулевого провода предназначено для снижения напряжения на корпусах оборудования при замыкании фазы на корпус как при исправном, так и при оборванном нулевом проводе.

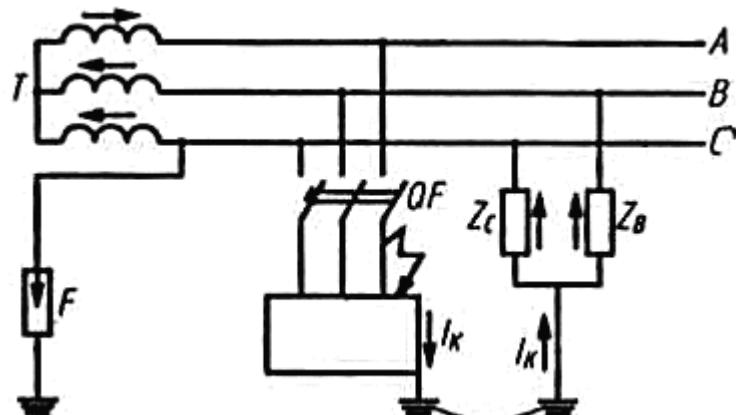


Рис. 5.3. Схема заземления в сети с изолированной нейтралью при наличии короткого замыкания:

$Z_c, Z_b$  - полные сопротивления проводов относительно земли,  
 $I_k$  – ток короткого замыкания,  
 $F$  – разрядник.

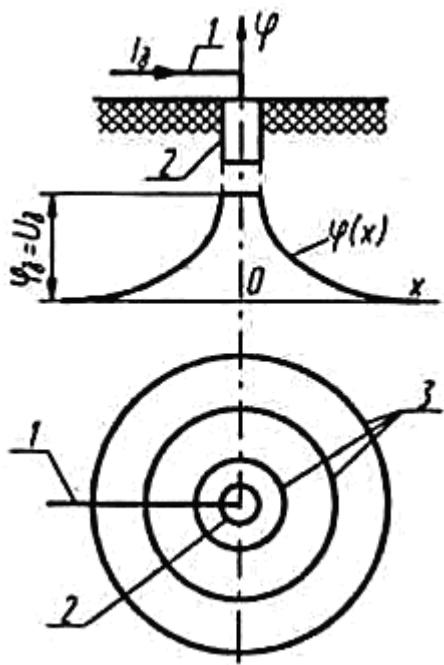


Рис. 5.4. Распределение потенциалов у поверхности земли в зоне растекания одиночного заземлителя:

- 1 – заземляющий проводник,
- 2 – заземлитель,
- 3 – эквипотенциальные линии.
- 0<sub>φ</sub> – ось величин потенциала,
- 0<sub>x</sub> – ось расстояний до заземлителя,

## 5.7 Защитное отключение

В процессе эксплуатации электроустановок нередко возникают ситуации, когда в результате несоблюдения правил техники безопасности или невнимательности, персонал попадает под напряжение. Такая опасность может возникнуть, в частности, при прикосновении человека непосредственно к токоведущей части электроустановки, находящейся под напряжением в рабочем (неаварийном) режиме. В этом случае защитное зануление не обеспечивает безопасности работающего, поскольку они действуют в аварийных режимах работы электроустановок. Для защиты персонала ЭВМ применим защитное отключение — быстродействующую

защиту, обеспечивающую автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения человека электрическим током. В настоящее время применение устройств защитного отключения (УЗО) является наиболее эффективным электрозащитным средством.

УЗО — это быстродействующий автоматический выключатель, реагирующий на дифференциальный ток (ток утечки), в проводниках, подводящих электроэнергию к защищаемой электроустановке. Основными элементами УЗО являются прибор защитного отключения и исполнительное устройство (автоматический выключатель). Прибор защитного отключения — это совокупность отдельных элементов, которые воспринимают входной сигнал, реагируют на его изменение и при заданном значении сигнала воздействуют на выключатель. Исполнительное устройство — автоматический выключатель, обеспечивающий отключение соответствующего участка электроустановки (электрической сети) при получении сигнала от прибора защитного отключения.

Важнейшим функциональным блоком УЗО является дифференциальный трансформатор тока 1 (Рис. 5.6). В абсолютном большинстве УЗО, производимых и эксплуатируемых в настоящее время во всем мире, в качестве датчика дифференциального тока используется именно трансформатор тока. В литературе по вопросам конструирования и применения УЗО этот трансформатор иногда называют трансформатором тока нулевой последовательности — ТТНП, хотя понятие «нулевая последовательность» применимо только к трехфазным цепям и используется при расчетах несимметричных режимов многофазных цепей.

## 5.8 Электрическое разделение сетей

Электрическое разделение сетей осуществляется через специальный разделительный трансформатор, который отделяет сеть с изолированной или глухозаземленной нейтралью от участка сети, питающего электроприемник.

При этом связь между питающей сетью и сетью приемника осуществляется через магнитные поля, участок сети приемника и сам приемник не связываются с землей. Разделительный трансформатор представляет собой специальный трансформатор с коэффициентом трансформации, равном единице, напряжением не более 380 В, с повышенной надежностью конструкции и изоляции. От трансформатора разрешается питание не более одного приемника с током не более 15 А. В качестве разделительных трансформаторов могут быть использованы трансформаторы понижающие со вторичным напряжением не более 42 В, если они удовлетворяют требованиям к разделительному трансформатору.

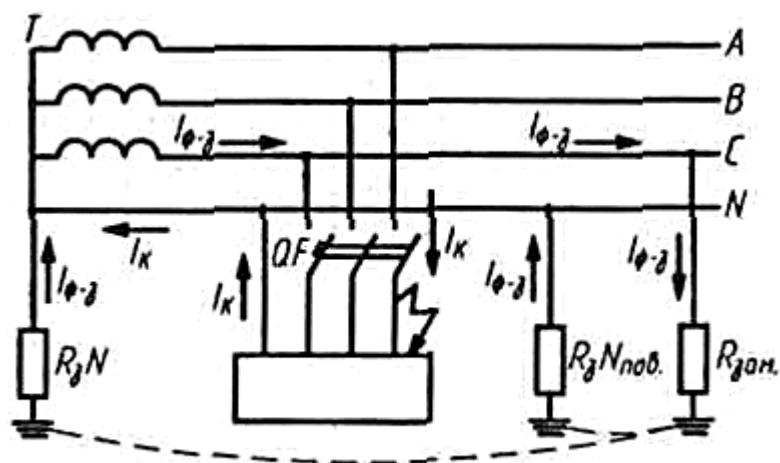


Рис. 5.5. Схема зануления при наличии короткого замыкания фазы  $A$  на корпус и замыкания фазы  $C$  на землю:

$N$  – нулевой проводник,  $I_{\phi-3}$  – ток замыкания на землю,  $I_k$  – ток короткого замыкания,  $R_{\phi-N}$  – сопротивление заземления нулевого провода,  $R_{\phi-N}$  – тоже повторное,  $R_{zam}$  – сопротивление замыкания фазы на землю.

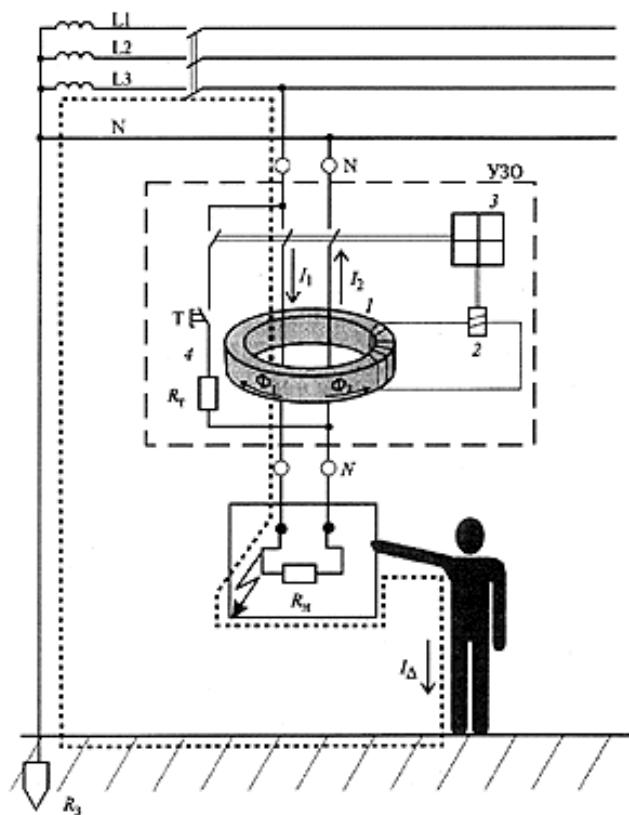


Рис. 5.6 Структура УЗО:

- 1 – дифференциальный трансформатор тока; 2 – пусковой орган (пороговый элемент); 3 – исполнительный механизм; 4 – цепь тестирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе разработан цифровое устройство записи звука.

В работе рассмотрены аналого – цифровые и цифро – аналоговые преобразователи.

Приведен принцип работы устройства, выбрана элементная база, произведен расчет основных узлов и составлена принципиальная схема.

Были произведены конструктивный расчет и расчет надежности. Среднее время наработка на отказ составило 24394 часов.

В работе также были рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович В. М. Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах. — М.: Связь. 1980. — 280 с.
2. Остапенко Г. С. Усилительные устройства. — М.: Радио и связь. 1989.— 399 с.
3. Алексенко А. Г., Шагурик И. И. Микросхемотехника.— М.: Радио и связь. 1990. —496 с.
4. Опадчий Ю.Ф, Глудкин О.П, Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника.— М.: Радио и связь. 1990.
5. Панцев С. Т. Охрана труда.— М.: Радио и связь, 1985. — 225 с

## **Приложение**