

Устройство для создания звуковых эффектов на базе 32-разрядного микроконтроллера

Павел Редькин (г. Ульяновск)

В статье описаны алгоритмы и программная реализация нескольких простых звуковых эффектов, получаемых цифровой обработкой аналогового сигнала. Приведена схема устройства на базе 32-разрядного микроконтроллера семейства LPC1700 (NXP).

К указанным звуковым эффектам относятся «эхо», «робот», а также эффект Pitch Conversion [1], основанный на сдвиге спектра исходного звукового сигнала по частоте. Описанное устройство может быть использовано при озвучивании театральных постановок, создании звуковых и видеоклипов, в учебных и демонстрационных целях, а также в качестве занимательной игрушки для детей и взрослых. Теоретические сведения из области цифровой обработки сигналов (ЦОС), которые легли в основу предлагаемой статьи были почерпнуты автором в [1].

Аналогичные возможности предоставляют компьютерные программы для изменения голоса, такие как Scramby, Generation Voice Changer, MorphVOX Pro и т.п. Однако предлагаемое устройство является автономным и не требует для своей работы компьютера со звуковой картой.

Последовательность и этапы обработки сигналов иллюстрируются структурной схемой, показанной на рисунке 1. Поступающий на вход встроенного модуля АЦП микроконтроллера (МК) предварительно усиленный аналоговый сигнал подвергается дискретизации. Полученная последовательность выборок в виде двоичных слов обрабатывается цифровым способом с использованием несложных математических операций, а также операций, связанных с записью и чтением выделенных управляющей программе об-

ластей (буферов) ОЗУ МК. После завершения цифровой обработки результирующая последовательность выборок подаётся на входную цифровую шину встроенного модуля ЦАП МК, с выхода которого аналоговый сигнал поступает на вход УМЗЧ. Заметим, что все перечисленные операции осуществляются в реальном времени или с несущественной задержкой.

Одним из базовых элементов ЦОС является элемент цифровой задержки. Сам по себе он не имеет очевидного прикладного значения, однако на его основе строятся многие алгоритмы ЦОС, например цифровые фильтры. В нашем случае элемент задержки используется для реализации эффекта «эхо» путём циклического сложения поступающей с выхода АЦП цифровой выборки с содержимым текущей ячейки кольцевого буфера задержки ОЗУ, причём второе слагаемое берётся с коэффицентом, принципиально меньшим единицы. Результат сложения в этом же цикле записывается обратно в текущую ячейку буфера задержки, а также используется в качестве аргумента модуля ЦАП для следующего цикла. В каждом цикле также производится инкрементирование и сравнение с заданным пределом указателя буфера задержки (проверка условия его закольцевания). При достижении этим указателем предельного значения, ему в этом же цикле присваивается начальное значение, чтобы обеспечить за-

полнение буфера новыми данными в следующем цикле. Коэффициент второго слагаемого суммы в программе выбран равным 1/3. При этом первое слагаемое имеет коэффициент 1. Отношение этих коэффициентов задаёт отношение уровней «прямого» и «отражённого» звука.

Блок-схема алгоритма реализации эффекта «эхо» приведена на рисунке 2. Этот алгоритм выполняется в основном цикле управляющей программы. При этом предполагается, что аналого-цифровое преобразование в МК производится периодически с заданной частотой, а его запуск осуществляется, например, в обработчике прерываний от какого-либо системного таймера МК (блок-схема обработчика на рисунке 2 не показана). Готовность результата очередного преобразования устанавливается путём опроса в основном цикле аппаратного бита (флага) завершения преобразования. Частота выборок АЦП составляет 38,5 кГц. Длительность задержки равна произведению периода выборки АЦП на количество ячеек буфера задержки. В нашем случае ёмкость этого буфера составляет 8000 ячеек, что обеспечивает хорошо заметную на слух задержку примерно в 200 мс.

Эффект «робот» достаточно просто реализуется путём двойного преобразования входного звукового сигнала в каждом программном цикле: оцифровки с помощью АЦП, затем обратного преобразования с помощью ЦАП без каких-либо математических операций над выборками. Однако значенные частоты преобразования в этом случае сильно занижены, поэтому в спектре выходного сигнала отсутствуют верхние частоты, без которых человеческий голос приобретает характерный «металлический» оттенок.

Сдвиг спектра исходного звукового сигнала в область более низких или более высоких частот, на первый взгляд, легко реализуется путём задания отличных друг от друга значений частот АЦП и ЦАП. Однако для устройства реального времени указанный способ в чистом виде не пригоден, так как требует дополнительного временного

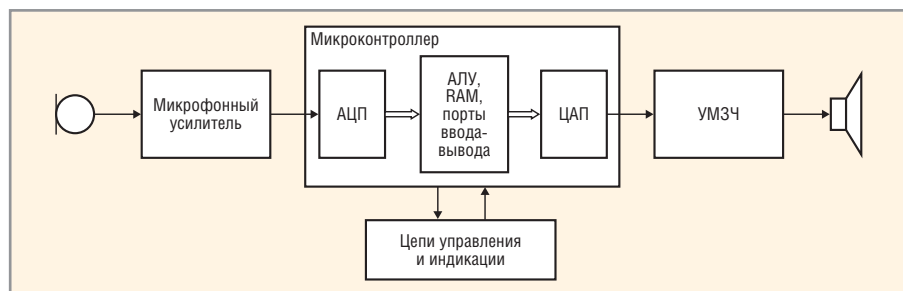


Рис. 1. Структурная схема устройства для создания звуковых эффектов

согласования входного и выходного потоков данных из-за различного количества выборок в единицу времени. Предложенный [1] способ сдвига спектра (Pitch Conversion) реализуется с помощью кольцевого буфера ОЗУ. Использование этого буфера вносит в преобразование некоторую задержку, однако из-за небольшого размера буфера она почти незаметна на слух.

Для кольцевого буфера в программе определяются указатели записи и чтения, как показано на рисунке 3. Первый используется для записи в ячейки буфера цифровых выборок с выхода АЦП. Второй указатель используется для чтения из буфера цифровых выборок, поступающих на вход ЦАП. И чтение, и запись осуществляются в буфере в одном направлении – от младших адресов к старшим. Поскольку частоты (скорости) записи и чтения в рассматриваемом случае принципиально различны, в каждый момент времени значения указателей записи и чтения в общем случае не совпадают. При этом частота аналогоцифрового преобразования по-прежнему задаётся с помощью программного делителя в обработчике прерываний от системного таймера МК и там же производится запуск АЦП. Частота выборки ЦАП задаётся в этом же обработчике с помощью другого программного делителя путём периодической установки некоего программного флага. Опрос состояния и сброс этого флага, а также запуск ЦАП осуществляются основной программой.

В каждом цикле основная программа производит последовательный опрос аппаратного флага завершения АЦП и программного флага необходимости запуска ЦАП. В случае обнаружения установленных флагов программа их сбрасывает и производит запись в кольцевой буфер последней выборки АЦП и подготовку нового аргумента для ЦАП и/или запуск ЦАП с новым аргументом, прочитанным из кольцевого буфера в предыдущем цикле. В этих случаях также производится инкрементирование, сравнение с заданным пределом и при необходимости сброс указателя записи и/или чтения кольцевого буфера.

Из-за неравномерного временного «растягивания» или «сжатия» фрагментов входного сигнала вследствие использования кольцевого буфера, предложенный способ спектрального сдвига приводит к некоторым искажениям формы напряжения выходного сигнала

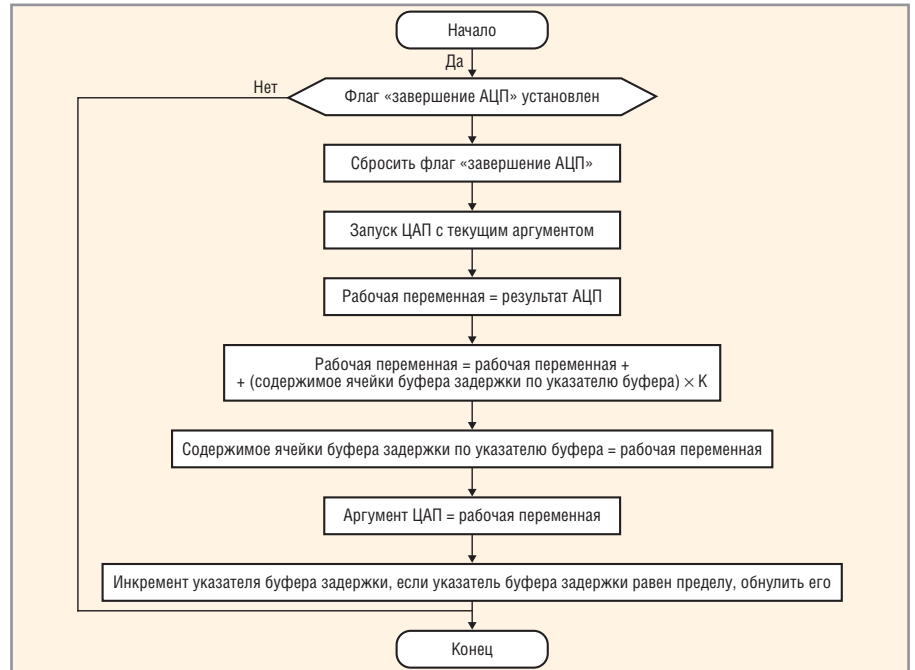


Рис. 2. Блок-схема алгоритма реализации эффекта «эхо»

ла по сравнению с входным. Однако при корректно подобранной величине задержки эти искажения оказываются малозаметными для речи. Рекомендуемая [1] оптимальная задержка, подобранная опытным путём, составляет 20 мс. С учётом требования теоремы отсчётов, этой задержке соответствует размер кольцевого буфера в несколько сотен ячеек.

Необходимо отметить, что описанный выше алгоритм Pitch Conversion имеет существенный недостаток. Если значение указателя записи кольцевого буфера приближается к значению указателя чтения (когда запись «догоняет» и «перегоняет» чтение), наступает момент, когда текущее прочитанное из буфера значение ещё относится к «старому» содержимому буфера, а следующее прочитанное – к «новому», только что записанному – поверх старого. В этот момент форма напряжения выходного сигнала теряет свою непрерывность из-за резкого перепада напряжения, как показано на рисунке 4а.

На слух такой перепад воспринимается как щелчок. При обработке достаточно длинных звуковых фрагментов эти щелчки будут слышны в каждом «проходе» чтения кольцевого буфера. Для устранения указанного явления предлагается [1] использовать дополнительный, так называемый смешивающий буфер (блэнд-буфер). Смысл его применения состоит в обеспечении непрерывности выходного сигнала в моменты максимального «сближения» и «наложения» указателей записи и

чтения кольцевого буфера. Использование смешивающего буфера иллюстрируется диаграммой, изображённой на рисунке 4б.

Алгоритм преобразования в этом случае выглядит следующим образом. Для смешивающего буфера в алгоритме определяется свой указатель, используемый как для записи, так и для чтения (в программе он назван `ble_w`). В каждом программном цикле, в котором обнаруживается установленный

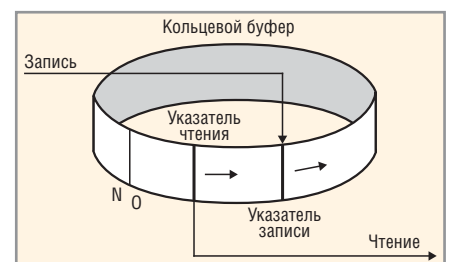


Рис. 3. Использование кольцевого буфера для сдвига спектра сигнала

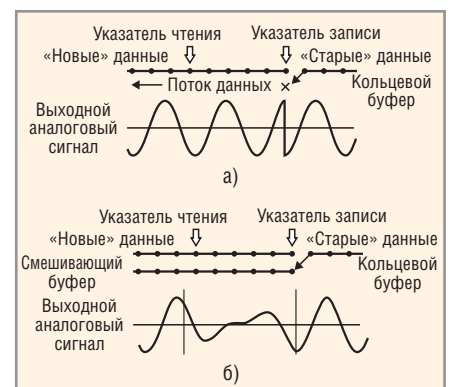


Рис. 4. Сдвиг спектра сигнала

- а) без использования смешивающего буфера,
- б) с использованием смешивающего буфера

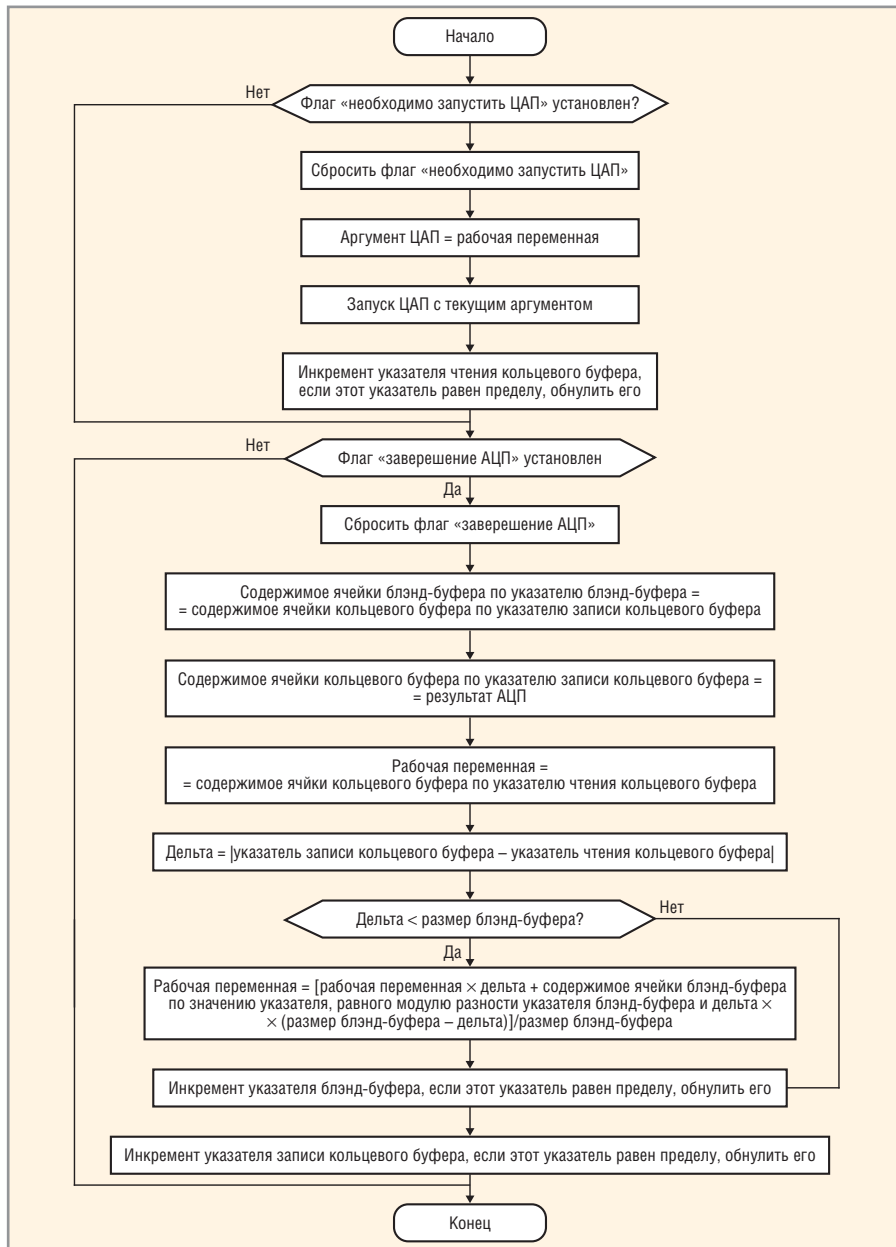


Рис. 5. Блок-схема алгоритма Pitch Conversion с использованием смешивающего буфера

флаг завершения преобразования АЦП, в текущую ячейку смешивающего буфера по его указателю копируется содержимое текущей ячейки кольцевого буфера по его указателю записи. В следующей команде в текущую ячейку кольцевого буфера по его указателю записи помещается последняя выбор-

ка АЦП. Следующей командой программа вычисляет абсолютную величину разности текущих значений указателей записи и чтения кольцевого буфера:

$$\text{delta} = |\text{buf_w} - \text{buf_r}|$$

Если это значение превышает размер смешивающего буфера, в качестве аргумента ЦАП для следующего цикла берётся содержимое текущей ячейки кольцевого буфера (по его указателю чтения) `buf_samp[buf_r]`. В противном случае в качестве аргумента ЦАП берётся «смесь» из содержимого текущей ячейки кольцевого буфера (по его указателю чтения) и ячейки смешивающего буфера. Дополнительно в эту формулу для задания «плавающих» весовых коэффициентов слагаемых $e\ddot{e}$

числителя входят текущее значение абсолютной величины разности указателей кольцевого буфера `delta` и размер блэнд-буфера `n`:

$$\text{sample_adc} = (\text{buf_samp}[\text{buf_r}] * \text{delta} + \text{buf_blend}[|\text{ble_w} - \text{delta}|] * |\text{n} - \text{delta}|) / \text{n}$$

В конце программа производит инкрементирование, сравнение с заданными пределами и при необходимости – сброс указателя записи кольцевого буфера и указателя смешивающего буфера.

Блок-схема алгоритма Pitch Conversion с использованием смешивающего буфера приведена на рисунке 5. Применённая в алгоритме формула вычисления аргумента ЦАП с учётом содержимого смешивающего буфера и значения абсолютной величины разности указателей взята из [2]. Рекомендуемый [1] оптимальный размер смешивающего буфера `n`, подобранный опытным путём, равен 32. Такого количества ячеек оказалось достаточно, чтобы полностью убрать щелчки от перепадов напряжения в выходном аналоговом сигнале.

Аппаратная платформа (МК) для реализации устройства генерации звуковых эффектов была выбрана с учётом наличия в МК встроенных модулей АЦП и ЦАП, а также достаточного объёма встроенного ОЗУ. К производительности процессорного ядра МК приложение никаких особых требований не предъявляет. Указанным условиям удовлетворяет МК LPC1768 [3], имеющий 12-разрядный модуль АЦП, 10-разрядный модуль ЦАП и 64 Кб встроенного ОЗУ. Для согласования между собой по диапазону 12-разрядных выходных значений АЦП и 10-разрядных входных значений ЦАП результат АЦП перед дальнейшей цифровой обработкой в управляющей программе МК необходимо поделить на 4.

В авторском варианте устройства для создания звуковых эффектов МК LPC1768 использовался в составе отладочной (демонстрационной) платы MCV1760 производства Keil Software, внешний вид которой показан на рисунке 6. На этой плате, помимо МК, имеется вся минимально необходимая для его функционирования аппаратная «обвязка»: кварцевый резонатор для стабилизации колебаний задающего генератора МК, линейка светодиодов для индикации режимов приложений, пятипозиционный кнопочный мани-



Рис. 6. Внешний вид отладочной платы MCV1760

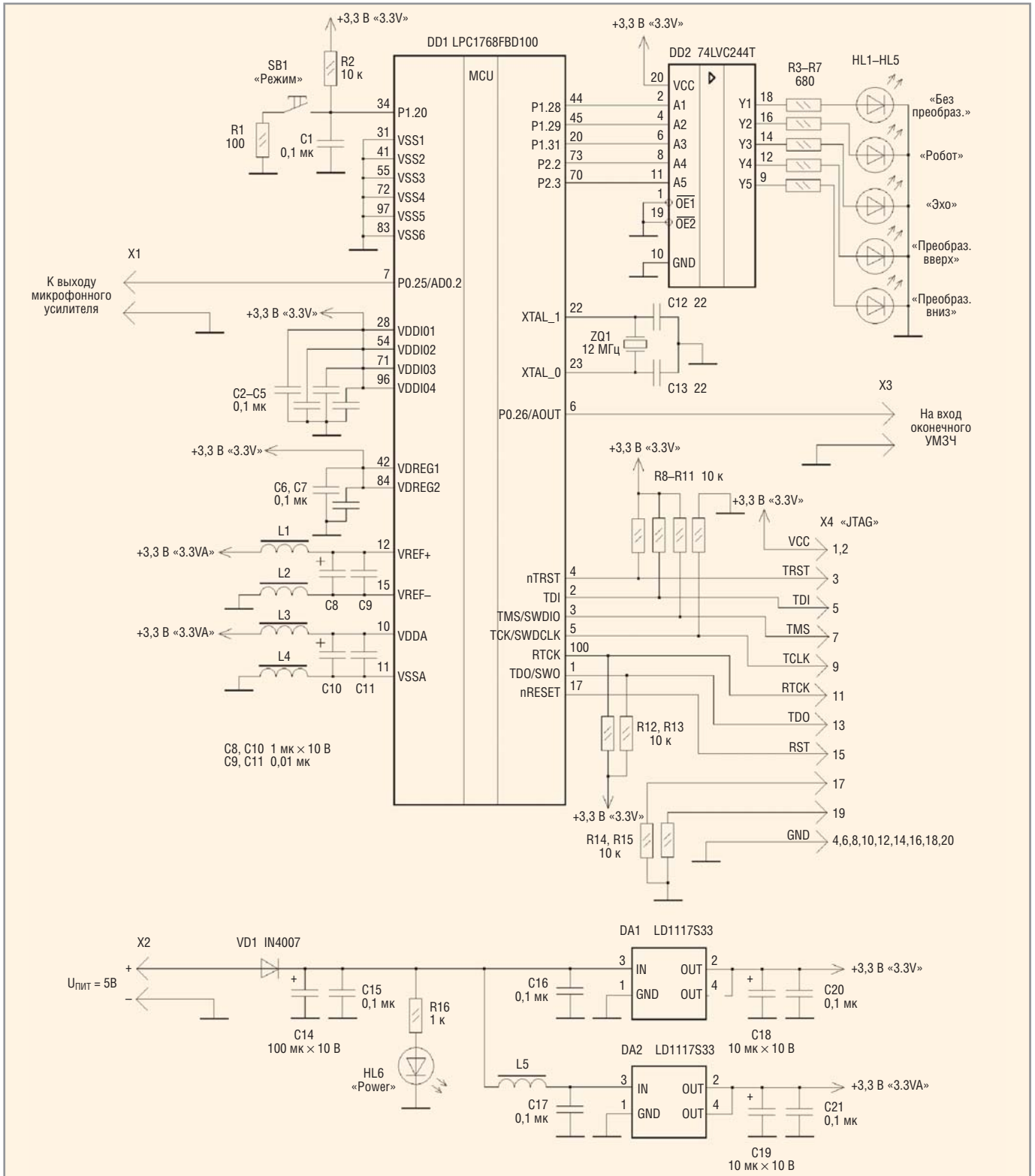


Рис. 7. Принципиальная схема цифровой части устройства

пулятор «джойстик» для управления режимами работы приложений, разъём для программирования и отладки встроенных программ МК (ARM Standard JTAG Connector), разъём для подачи внешнего напряжения питания +5 В, а также разъёмы для подачи входных и снятия выходных аналоговых сигналов. Типовой ток потребления платы от источника напряжения +5 В составляет 65 мА, максимальный – 120 мА.

Принципиальная схема цифровой (микроконтроллерной) части устройства показана на рисунке 7. Изображённая на рисунке схема представляет собой фрагмент принципиальной схемы отладочной платы MCB1760, содержащий все необходимые для функционирования устройства элементы, цепи и соединения. Заметим, что драйвер светодиодов DD2 из схемы можно исключить, однако в этом случае необходимо ис-

пользовать резисторы R3 – R7 сопротивлением не менее 860 Ом. В качестве индуктивностей фильтров питающих напряжений L1 – L5 можно использовать ферритовые бусинки с продетым через них проводом. Разъём X4 JTAG, предназначенный для загрузки и отладки управляющей программы МК, – стандартный 20-контактный (см. рис. 6). Каждый из конденсаторов C2 – C7 должен располагаться в непосредственной близости от

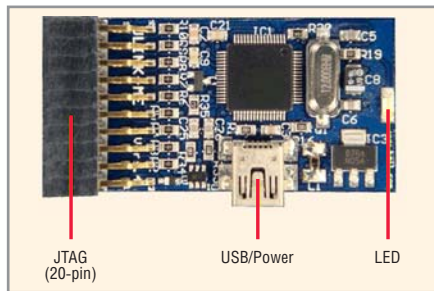


Рис. 8. Внешний вид JTAG-адаптера-программатора ULINK-ME

соответствующего ему вывода питания МК DD1. Светодиоды HL1 – HL6 – любые малогабаритные для поверхностного

монтажа, рассчитанные на рабочий ток 5...10 мА. Полная принципиальная схема отладочной платы MCB1760 в виде файла в формате pdf приведена в [4].

Исходный текст управляющей программы (и файл «прошивки» флэш-памяти МК), реализующей функции устройства для создания звуковых эффектов, содержится в каталоге проекта ZWUKEFF, архив которого доступен для загрузки с интернет-страницы журнала (www.soel.ru). Проект был подготовлен и отлажен в интегрированной среде разработки IDE μ Vision4 V4.23, входящей в программный пакет Microcontroller De-

velopment Kit (MDK-ARM) от Keil Software. Управляющая программа обеспечивает работу устройства в следующих режимах: режим последовательного прямого-обратного преобразования (АЦП-ЦАП) входного аналогового сигнала в выходной аналоговый сигнал (задан по умолчанию), режим «робот», режим «эхо», режим Pitch Conversion с использованием смешивающего буфера с преобразованием частоты вверх (скорость чтения больше скорости записи), а также режим Pitch Conversion с использованием смешивающего буфера с преобразованием частоты вниз (скорость чтения меньше скорости записи). В заданном по умолчанию режиме последовательного прямого-обратного преобразования устройство можно использовать в качестве обычного усилителя аналогового сигнала.

Размер кольцевого буфера задаётся в программе константой $N = 1024$, размер блэнд-буфера – константой $n = 32$, размер буфера задержки – константой $Nn = 8000$. В качестве источника периодических прерываний в управляющей программе используется входящий в состав МК архитектуры Cortex-M3 таймер системных сигналов времени SysTick. Задание периодичности прерываний от SysTick производится путём вызова функции SysTick_Config(SystemCoreClock/Sys_del), где значение константы Sys_del соответствует частоте прерываний, равной 358 000 Гц. При этом для получения нормальных скоростей записи или воспроизведения эта частота программно делится на 10, для получения повышенных скоростей – на 4, пониженных – на 15, а для получения скоростей записи и воспроизведения в режиме «робот» – на 200. Таким образом, отношение скоростей чтения и записи для случая преобразования частоты вверх задано в программе равным 2,5, для случая преобразования частоты вниз – 0,66; при реализации звукового эффекта «робот» запись и чтение производятся с частотой 1925 Гц. Все перечисленные значения могут быть легко изменены путём редактирования содержимого входящего в проект заголовочного файла `zduk.h`, где они содержатся, с последующей перекомпиляцией проекта.

Переключение режимов осуществляется в устройстве по кольцу с помощью манипулятора на отладочной плате, в котором используется только одна позиция – «нажатие вниз». В схеме на рисунке 7 эта позиция показана

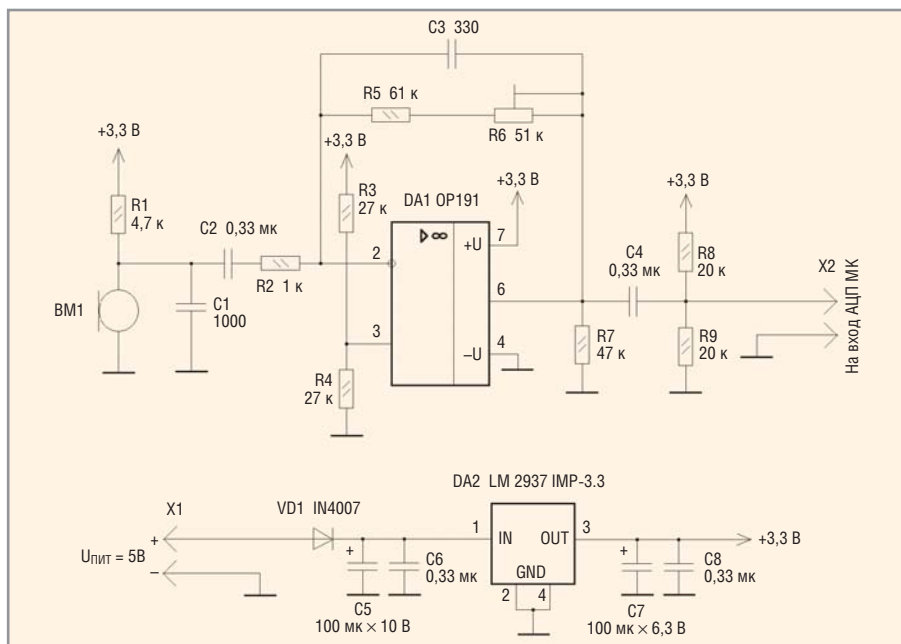


Рис. 9. Принципиальная схема микрофонного усилителя

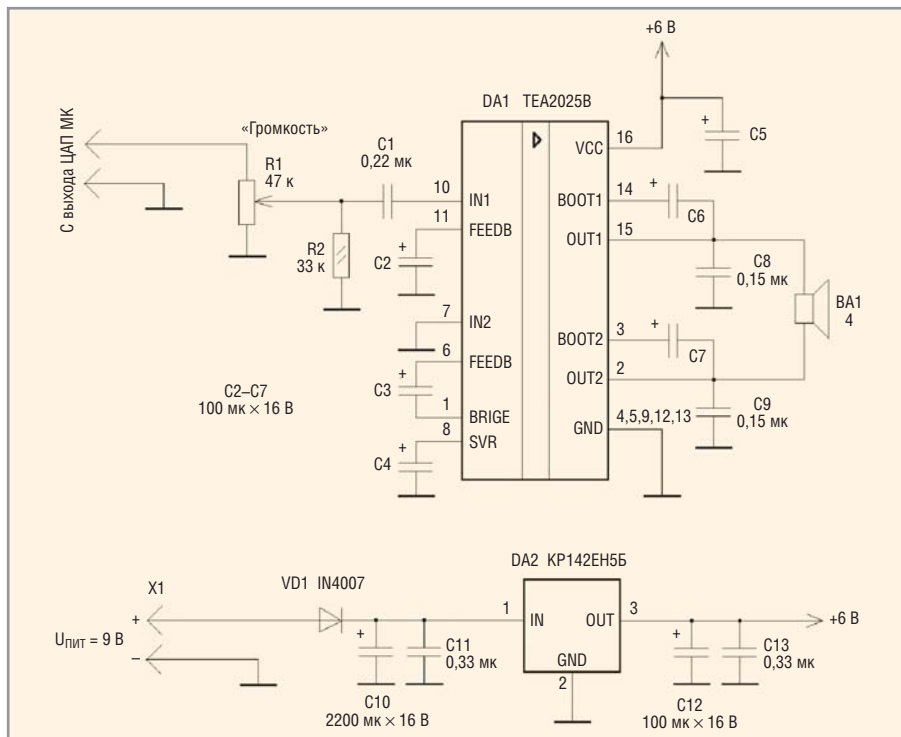


Рис. 10. Принципиальная схема УМЗЧ

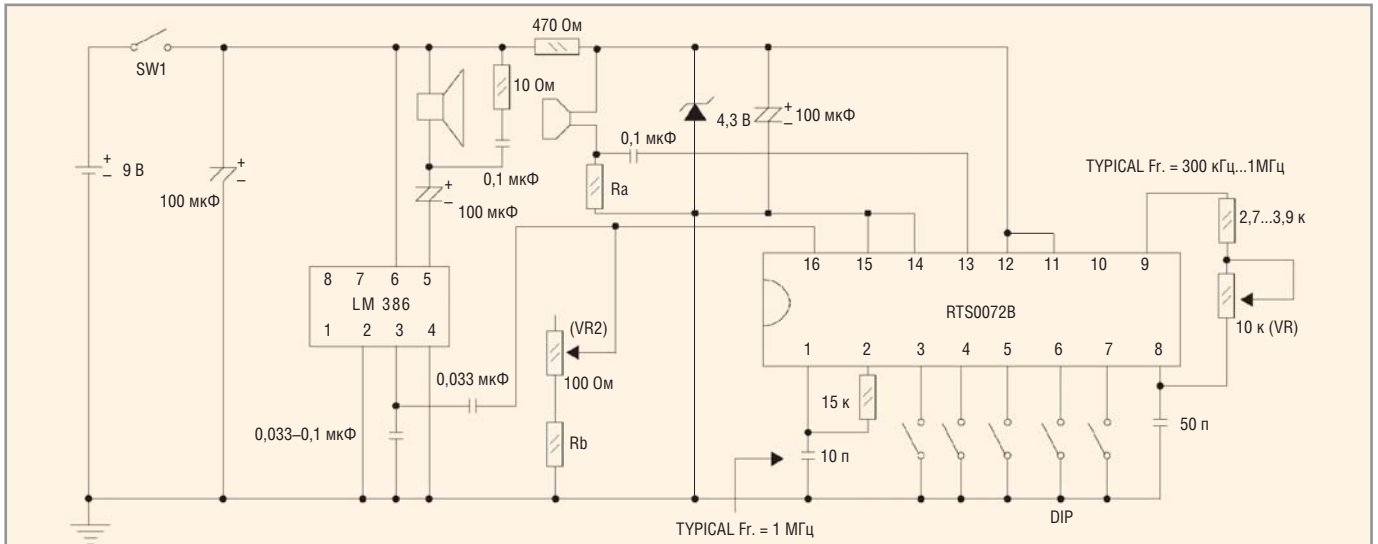


Рис. 11. Один из рекомендуемых производителем вариантов реализации устройства Voice Changer

в виде простой кнопки (SB1). Индикация текущего режима осуществляется свечением соответствующего светодиода HL1 – HL5 на плате.

Программирование и отладка встроенной программы МК производились с помощью миниатюрного бескорпусного JTAG-адаптера – программатора ULINK-ME (см. рис. 8), подключаемого к разъёму JTAG Connector МК отладочной платы и к ПК хоста через порт USB. В режиме программирования отладочная плата может получать питание от адаптера ULINK-ME, который, в свою очередь, питается от USB-порта ПК хоста. Однако, в этом случае «аналоговое» питающее напряжение (обозначенное на принципиальной схеме платы как «+3,3VA») не поступает на аналоговые периферийные модули АЦП и ЦАП, поэтому для нормального функционирования платы в составе устройства необходима подача на неё питания от внешнего источника +5 В, из которого на плате вырабатываются все необходимые питающие напряжения.

В качестве источника звукового сигнала в устройстве используется микрофон, сигналы которого перед подачей на вход АЦП (см. рис. 1) усиливаются с помощью микрофонного усилителя (см. рис. 9). Входящий в состав усилителя резистивный делитель на элементах R8, R9 служит для задания положительного уровня смещения выходного сигнала, равного половине напряжения питания усилителя (и половине опорного напряжения АЦП). Смещение необходимо вводить во входной аналоговый сигнал АЦП, поскольку модуль АЦП МК семейства LPC1700 может работать только в области положительных напряжений.

Требуемый уровень усиления (при условии отсутствия ограничения амплитуды выходного сигнала усилителя) выставляется с помощью подстроечного резистора R6.

Питание микрофонного усилителя в устройстве осуществляется от отдельного стабилизатора +3,3 В (DA2 на рис. 9) для минимизации влияния цифровых шумов от работы МК. По этим же соображениям точка подключения общего провода микрофонного усилителя к общему проводу всего устройства должна физически находиться как можно ближе к минусу первичного источника напряжения питания +5 В. Сам микрофонный усилитель желательно поместить в экранирующий корпус, например, из фольгированного стеклотекстолита, соединённый с общим проводом. Сигнал с выхода микрофонного усилителя на вход АЦП МК должен поступать по экранированному проводу.

Преобразованный звуковой сигнал с аналогового выхода ЦАП МК подаётся на УМЗЧ (см. рис. 10), нагруженный на динамическую головку. При указанных на схеме значениях питающего напряжения микросхемы DA1 (+6 В) и сопротивления динамической головки ВА1 (4 Ом) выходная мощность УМЗЧ составляет 2,8 Вт. Соответственно, номинальная мощность используемой динамической головки ВА1 должна быть не менее 3...5 Вт. Микросхема стабилизатора питающего напряжения УМЗЧ DA2 установлена на теплоотвод площадью 2...3 см².

К организации питания УМЗЧ в устройстве предъявляются требования, аналогичные требованиям к питанию микрофонного усилителя, однако, экранировать УМЗЧ не обязательно. Заме-

тим, что внешний УМЗЧ из состава устройства можно исключить, если использовать готовый усилитель, входящий в состав отладочной платы MCB1760.

Следует заметить, что в настоящее время на рынке элементной базы предлагаются и чисто аппаратные варианты реализации описанных в статье звуковых эффектов. Например, в продаже имеется микросхема RTS0072B производства Realtek [5], на основе которой можно собрать устройство под названием Voice Changer (преобразователь для голоса). Один из вариантов принципиальной схемы включения микросхемы RTS0072 в составе устройства Voice Changer приведён на рисунке 11. Устройство позволяет реализовать режим простого усилителя сигнала от микрофона, режим «робот», режим Pitch Conversion с преобразованием частоты вверх/вниз с возможностью дискретного и плавного задания значения отношения частот записи и чтения. Функциональные аналоги микросхемы RTS0072B других производителей, по информации автора, могут иметь обозначения WIN8072, HT8950, MSM6722.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cheap DSP Experiments. April 13, 2004. <http://elm-chan.org/works/vp/report.html>.
2. Нечитайлов Д. Обработка речи микроконтроллером Atmel AVR. http://www.rigexpert.com/index?s=articles&f=uc_voice&l=ru.
3. Редькин П. 32-битные микроконтроллеры NXP с ядром Cortex-M3 семейства LPC17xx. Полное руководство. Додэка-XXI. <http://www.dodeca.ru/books/228/>.
4. <http://www.keil.com/mcb1700/mcb1700-schematics.pdf>.
5. <http://www.masterkit.ru/zip/RTS0072.pdf>.

