

Цифровые микрофоны: от спецификации к готовому изделию

Владимир СУХОПЛЮЕВ
vsuhoplyuev@mail.ru
Алексей ШИШКИН

В последние годы на рынке электронных компонентов появились цифровые МЭМС-микрофоны. К их преимуществам относятся: высокая чувствительность, линейность АЧХ в рабочей полосе частот, повторяемость параметров и малые габаритные размеры. Использование цифрового МЭМС-микрофона избавляет также от проблем, связанных с шумами аналоговых цепей, и делает возможным непосредственное подключение микрофона к процессору. Эти преимущества нас заинтересовали, и мы попробовали реализовать их на практике.

На момент начала работ в ООО «Вторая лаборатория» имелось несколько опытных образцов микрофонов ADMP421 производства Analog Devices. Затем у нас появились цифровые МЭМС-микрофоны SPM0405HD4N-WB производства Knowles Electronics. Результаты работ с перечисленными микрофонами стали основой для написания этой статьи.

Цифровой микрофон можно подключить к аудиокодеку, имеющему соответствующий интерфейс [например, 8–10]. Но нас заинтересовала возможность непосредственного подключения цифрового микрофона к микроконтроллеру.

Такое решение позволяло отказаться от использования аудиокодека, что уменьшало габаритные размеры и дополнительно снижало цену изделия. Для предварительной оценки ожидаемых значений параметров (требуемая производительность микроконтроллера, потребляемая мощность, чувствительность, динамический диапазон, КНИ, полоса рабочих частот) была выполнена небольшая ОКР. По ее результатам было принято окончательное решение по схемотехнике, программному обеспечению и применяемой элементной базе.

Подключение цифровых микрофонов к микроконтроллерам

Интерфейс между микроконтроллером и цифровым микрофоном прост, а информация по его реализации в достаточном объеме выложена на сайтах производителей и подробно описана другими авторами [2, 4, 5]. Как правило, цифровые микрофоны имеют пять выводов, краткое описание которых дано в таблице. Электрические и временные параметры выводов микрофонов приведены в их спецификациях [4, 5].

Для оценки требуемой производительности микроконтроллера была использована отладочная плата ADSP-BF538 EZ KIT Lite компании Analog Devices. К этой плате микрофоны можно было подключить с помощью интерфейсов SPI или SPORT. Первый из названных интерфейсов более распространен, и поэтому мы использовали этот интерфейс в режиме Slave. Для формирования тактового сигнала CLK применялся имеющийся в микроконтроллере аппаратный таймер. Для получения выходных отсчетов со стандартной частотой дискретизации 16 кГц при коэффициенте децимации 128 требуемая тактовая частота CLK должна быть 2,048 МГц. В качестве источника тактового сигнала для процессора на отладочной плате использовался генератор с частотой 12,288 МГц, обеспечивающий при делении на 6 требуемую тактовую частоту для цифрового микрофона. Для минимизации информации от микрофонов, использовался механизм DMA-пересылки.

В процессе моделирования было рассчитано и экспериментально проверено, что для обработки данных с микрофона процессор должен обладать производительностью порядка 8 MIPS. Оценка требуемой производительности позволила сделать вывод о возможности применения более простого микроконтроллера с меньшей потребляемой мощностью. Из трех альтернативных вариантов (ARM, PIC, MSP430) был выбран микроконтроллер MSP430F5418 производства

Таблица. Описание выводов цифровых микрофонов

№	Название вывода	Краткое описание
1	VDD	Питание микрофона
2	GND	«Земля»
3	CLK	Входной тактирующий сигнал, синхронно с которым линия DATA переключает свои состояния
4	DATA	В течение одной половины CLK-цикла этот вывод находится в состоянии высокого импеданса, а в течение второй половины служит выводом для считывания данных с выхода Σ - Δ модулятора микрофона
5	L/R_Sel	Этот вывод используется для управления переключением линии DATA. Если L/R_Sel подключен к VDD, то через некоторое время после обнаружения возрастающего фронта сигнала CLK вывод DATA переходит в состояние высокого импеданса, а после прихода падающего фронта сигнала CLK вывод DATA подключается к выводу Σ - Δ модулятора микрофона. В случае если L/R_Sel подключен к GND, фронты сигнала CLK, по которым переключается линия DATA, изменяются на противоположные

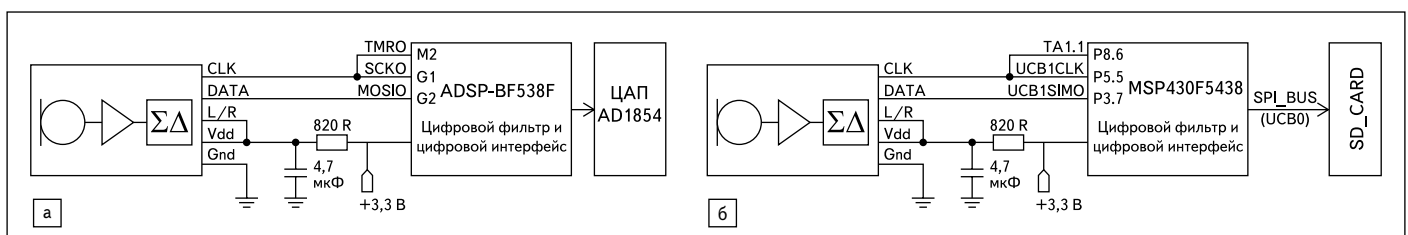


Рис. 1. Схема подключения цифрового микрофона к плате: а) ADSP-BF538 EZ KIT Lite; б) MSP-EXP430F5438

Texas Instruments, имеющий минимальную потребляемую мощность (165 мкА/МIPS). В дальнейшем для проверки потребляемой мощности и отработки программного обеспечения использовалась отладочная плата MSP-EXP430F5438 Experimenter Board этой же компании.

На рис. 1 представлены упрощенные схемы подключения цифровых микрофонов к использованным при макетировании отладочным платам, позволяющие полностью симитировать устройство считывания, воспроизведения или хранения данных с микрофонов.

Процесс преобразования входного аудиосигнала в микрофоне

Каждый цифровой МЭМС-микрофон можно упрощенно представить в виде модели, показанной на рис. 2. Входные звуковые колебания посредством МЭМС-мембраны преобразовываются в слабый электрический сигнал, который далее поступает на вход усилителя А. Далее преусиленный сигнал проходит через аналоговый фильтр низких частот, который необходим для защиты от наложения спектров. Конечным элементом обработки сигнала в микрофоне является Σ - Δ модулятор 4-го порядка, преобразующий входной аналоговый сигнал в однобитный цифровой поток. Частота следования битов данных с выхода Σ - Δ модулятора равна частоте входного тактирующего сигнала CLK и, как правило, лежит в диапазоне от 1 до 4 МГц.

Измерение параметров цифровых микрофонов

Для проведения измерений применялась следующая аппаратура: шумомер CENTER-325, генератор низкочастотных сигналов ГЗ-118, измеритель нелинейных искажений С6-11, излучатель от наушников Dialog M-881HV и ПЭВМ.

Во временной области данные с выхода Σ - Δ модулятора представляют беспорядочный набор нулей и единиц. Однако, если каждому высокому логическому уровню выхода микрофона сопоставить значение 1.0, а каждому низкому уровню значение -1.0 и затем выполнить преобразование Фурье, то получим спектрограмму выходных данных с микрофона. На рис. 3 и 4 представлены отклики микрофонов ADMP421 и SPM0405HD4H-WB на входной синусоидальный аудиосигнал с частотой 1 кГц и уровнем 94 дБ SPL. Измерения проводились для трех значений частоты CLK сигнала — 512, 1024 и 2048 кГц. (Для уменьшения объема публикации статьи материалы для частоты 1024 кГц не приводятся.) Спектрограммы были построены на длине выборки в 128×1024 отсчетов.

Судя по спектрограммам, шумы квантования смещены за пределы звукового диа-

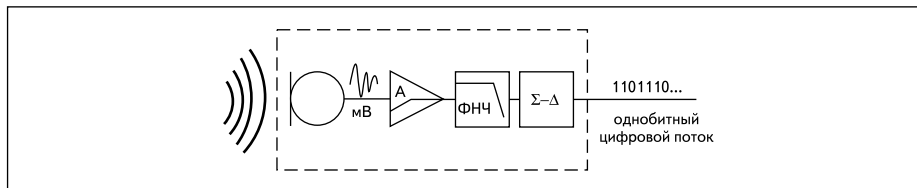


Рис. 2. Упрощенная модель МЭМС-микрофона

пазона частот и не влияют на входной аудио-сигнал. При этом шумы квантования смещаются тем дальше в область высоких частот, чем выше частота дискретизации микрофонов. Приблизительно граничную частоту, от которой начинается возрастание уровня шумов, можно определить как $F_{clk}/100$. Хотя в спецификациях на микрофоны рабочую частоту нормируют примерно в пределах от 1 до 3 МГц, но, как показывают спектрограммы, микрофоны нормально работают и на более низких тактовых частотах. Это может оказаться весьма полезным, когда возникнет необходимость снижения количества вычислений на микроконтроллере, хотя, конечно, при этом сузится и рабочая звуковая полоса.

Также можно наблюдать, что у обоих микрофонов в выходном сигнале содержится постоянная составляющая (в последних модификациях микрофонов этот эффект устранен [2]). Причем уровень постоянной

составляющей сопоставим по уровню с измеряемым сигналом. К тому же значение постоянной составляющей как минимум зависит от напряжения питания. Это свойство потребовало реализации в микроконтроллере рекурсивного алгоритма, устраняющего постоянное смещение.

Если сравнить микрофоны по уровням вносимых шумов, то нетрудно заметить, что микрофон ADMP421 имеет лучшее отношение сигнал/шум по сравнению с микрофоном SPM0405HD4H-WB — примерно на 5–6 дБ, а также более низкий уровень шумов квантования.

Если же сопоставить уровни нелинейных искажений, то будет видно, что в спектрограммах обоих микрофонов присутствуют только вторые гармоники, притом что амплитуда второй гармоники у микрофона фирмы Knowles Electronics существенно ниже, чем у микрофона фирмы Analog Devices. Этот факт представляет особый интерес, поскольку

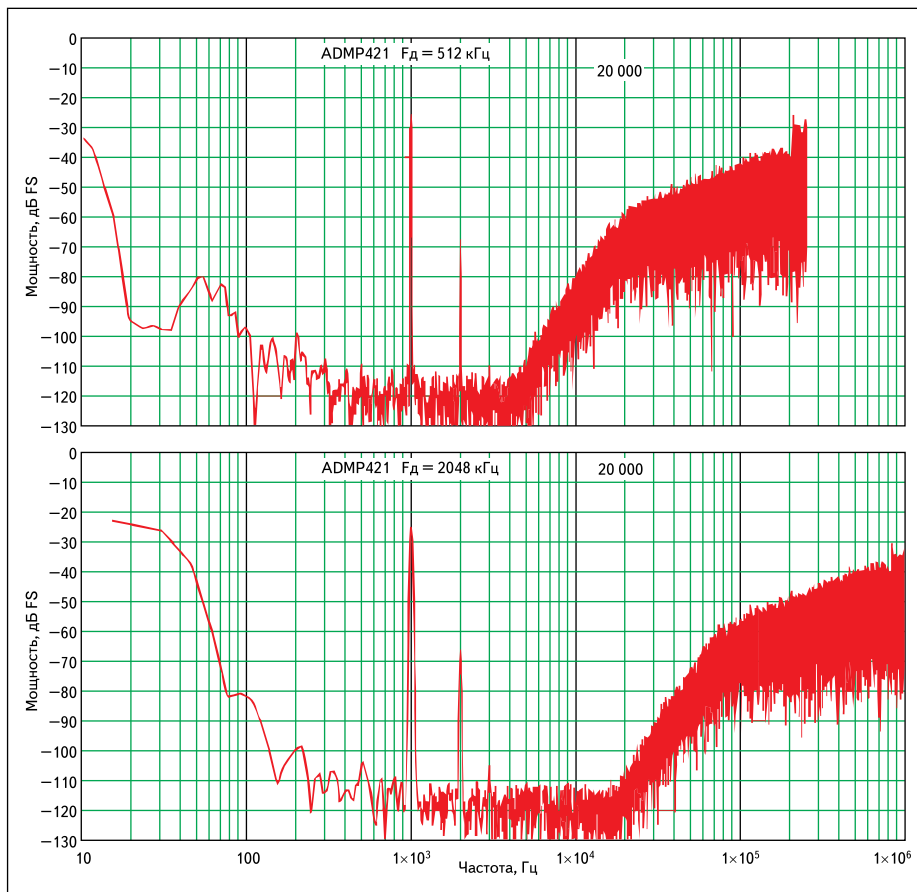


Рис. 3. Частотный отклик микрофона ADMP421

обе фирмы нормируют лишь максимальный КНИ и только для определенного уровня звукового давления [4, 5]. В реальности этих данных бывает недостаточно. Например, невозможно сравнить реальные значения КНИ различных микрофонов. К тому же в настоящее время общепринята практика нормировки КНИ по линейному входу записывающих устройств, без учета искажений, вносимых микрофонами.

Поэтому, чтобы оценить характер зависимости КНИ от уровня звукового давления, был поставлен эксперимент, который включал в себя следующие этапы:

- 1) Воздействие на микрофонный вход синусоидальным аудиосигналом с частотой 1 кГц и запись одноканальных данных с выхода микрофона на flash-память (звуковое давление входного сигнала изменяется от 87,5 до 115 дБ SPL с шагом 2,5 дБ SPL).
- 2) Математическая обработка одноканальных данных с микрофона при помощи цифрового фильтра нижних частот с целью получения детерминированного цифрового сигнала и отсека шумов квантования.
- 3) Воспроизведение на ПК обработанных цифровых данных и измерение КНИ сигнала с выхода звуковой карты ПК при помощи измерителя нелинейных искажений С6-11 (нелинейные искажения, вносимые самой звуковой картой, не превышают 0,1%).
- 4) Регистрация показаний прибора С6-11 для каждого значения звукового давления входного аудиосигнала.

Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 5. Из приведенного графика следует, что при звуковом давлении менее 97 дБ SPL КНИ микрофонов ADMP421 и SPM0405HD4H-WB не превышает 1% и 0,3% соответственно. При большем звуковом давлении КНИ микрофона ADMP421 значительно выше, чем микрофона SPM0405HD4H-WB, а при давлении выше

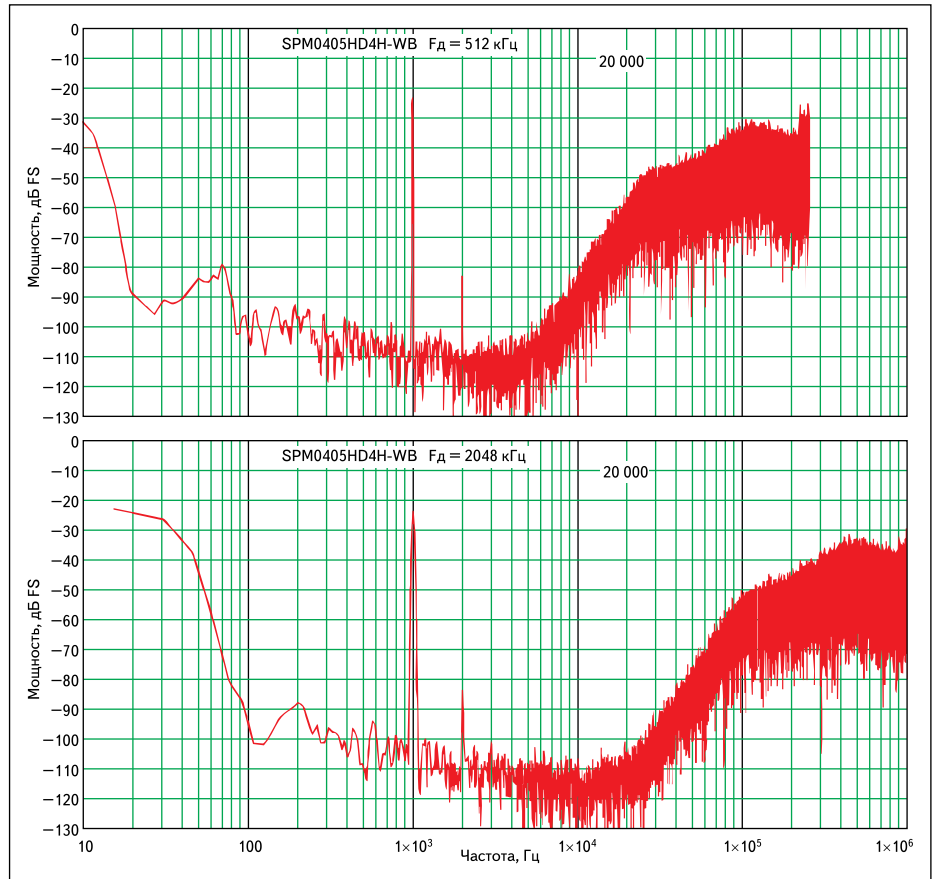


Рис. 4. Частотный отклик микрофона SPM0405HD4H-WB

110 дБ SPL у обоих микрофонов наблюдается резкое возрастание уровня нелинейных искажений. В целом можно сделать вывод, что микрофон фирмы Knowles Electronics пригоден для использования в более широком диапазоне звукового давления. Также следует отметить, что приводимые в документации значения КНИ микрофонов нормируются при максимальном звуковом давлении.

Реальные значения КНИ при меньших значениях звукового давления значительно ниже, и микрофоны можно использовать для высококачественной записи аудиосигналов.

Однако микрофон ADMP421 обладает другим преимуществом. Эта модель микрофонов практически нечувствительна к помехам по шине питания, даже если последние достигают значений 200–300 мВ. На рис. 6 показан случай, когда в шине питания микрофонов присутствуют искусственно введенные импульсные помехи. Такой случай возможен, если аудиоустройство работает в импульсном режиме потребления (например, циклическая запись данных с микрофона на flash-память при питании от маломощного источника).

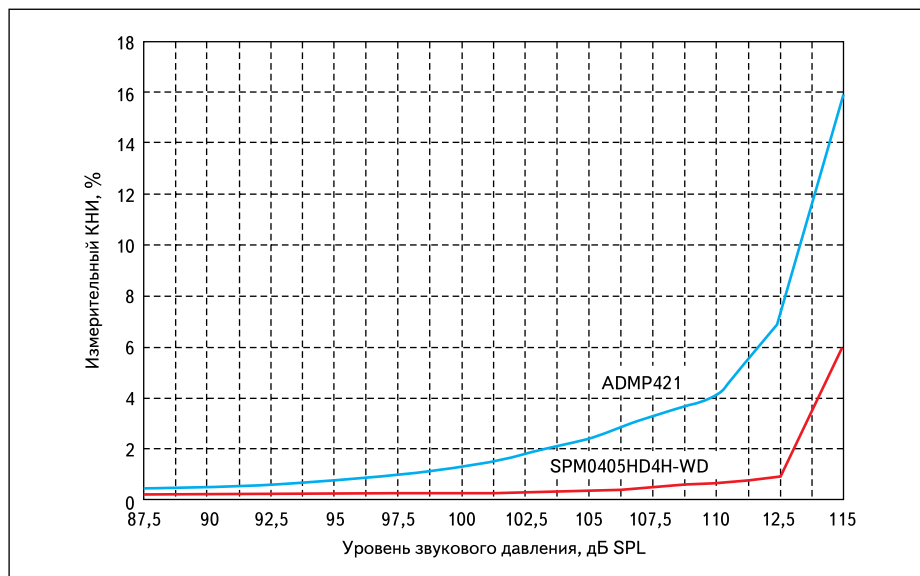


Рис. 5. Зависимость КНИ микрофонов от уровня звукового давления

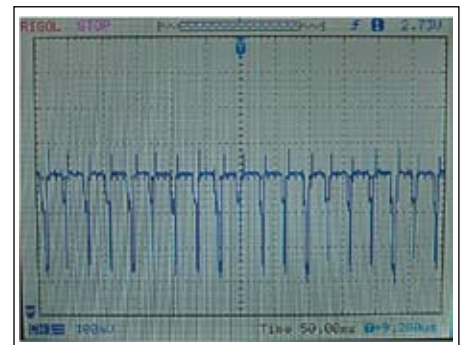


Рис. 6. Импульсные помехи в цепи питания микрофонов

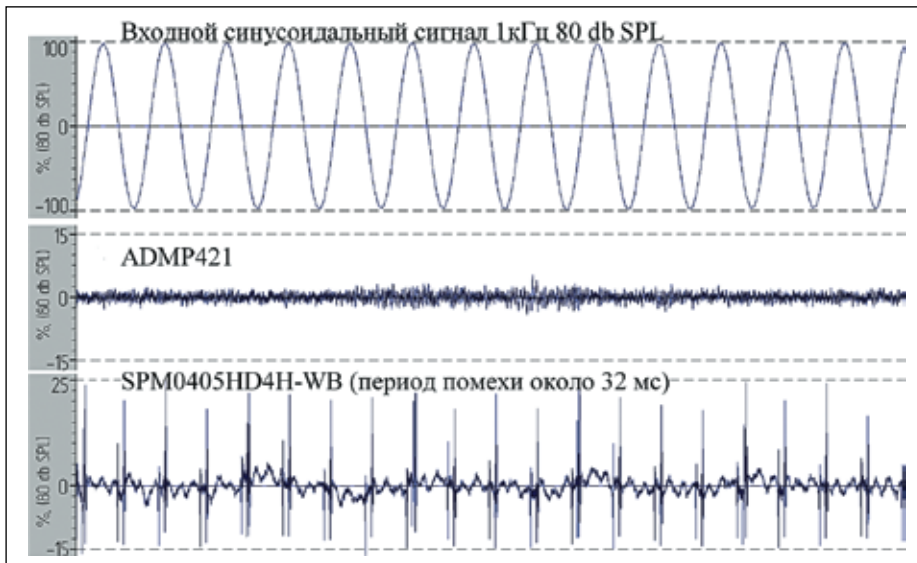


Рис. 7. Временная диаграмма сигнала с микрофонов при воздействии импульсной помехи в цепи питания

На рис. 7 представлен выходной сигнал с микрофонов, пропущенный через ЦФНЧ с амплитудно-частотной характеристикой, показанной на рис. 9. Для регистрации помех по питанию в процессе записи не использовался какой-либо опорный звуковой сигнал. Чтобы можно было оценить амплитуду помех с выхода микрофона, в верхней части рис. 7 приведен синусоидальный звуковой сигнал 80 дБ SPL, записанный в отсутствие помех по питанию.

Чтобы устранить влияние помех по цепям питания, нам пришлось использовать сглаживающий RC-фильтр.

Обработка данных с выхода цифрового микрофона

Для выделения сигнала звуковой полосы частот данные с микрофона должны быть отфильтрованы и передискретизованы с пониженной частотой (обычно в 50–128 раз меньшей частоты дискретизации Σ - Δ модулятора). Цифровой фильтр нижних частот отсеивает внешний шум и собственный шум микрофона за пределами рабочей полосы ($f > F_{clk}/2M$) с целью защиты от наложения спектров, а также дает возможность снизить частоту следования данных. На рис. 8 [1] представлен один из возможных вариантов обработки однобитового потока данных с микрофона, реализуемый программно на DSP или аппаратно в звуковых кодеках.

Изображенная на рис. 8 схема сжатия (компрессор) частоты дискретизации понижает частоту дискретизации за счет того, что из каждых M выборок отфильтрованного сигнала $w(mM)$ отбрасывается $M-1$ выборка. Вход и выход преобразователя, изображенного на рис. 8, связаны следующим выражением:

$$y(m) = w(mM) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(mM-k). \quad (1)$$

При программной реализации преобразователей частоты в качестве цифрового ФНЧ могут использоваться как КИХ-, так и БИХ-фильтры. Разработчикам следует очень внимательно подходить к выбору типа фильтра, его длины и разрядности, поскольку от этого напрямую зависит производительность всей системы в целом. Правильно рассчитанный

и реализованный дециматор (преобразователь частоты) в некоторых случаях позволит значительно снизить стоимость продукции и повысить ее технические характеристики. В качестве справки отметим, что в процессе разработки диктофонов «Сорока-1» и «Сорока-2» [3] программные дециматоры, понижающие частоту в 64 раза (с 1,024 МГц до 16 кГц), были успешно реализованы как на высокопроизводительном процессоре ADSP-BF538F, так и на микроконтроллере MSP430F5438 с рабочей тактовой частотой 12,288 МГц [6, 7]. Амплитудно-частотная характеристика цифрового ФНЧ, входящего в состав реализованного дециматора, приведена на рис. 9. Для получения полной информации по практическим вопросам цифровой фильтрации следует обратиться к главам 6–9 книги [1].

В качестве второго варианта для преобразования данных с выхода цифрового микрофона можно использовать приспособленные для этого звуковые кодеки, что существенно сократит время разработки изделия. Например, фирма Analog Devices предлагает использовать кодеки ADAU1361 и ADAU1761 [8, 9], которые одинаково подойдут для микрофонов ADMP421 и SPM0405HD4H.

Измерение с требуемой точностью АЧХ для рабочей полосы частот оказалось достаточно сложной задачей из-за отсутствия в ла-

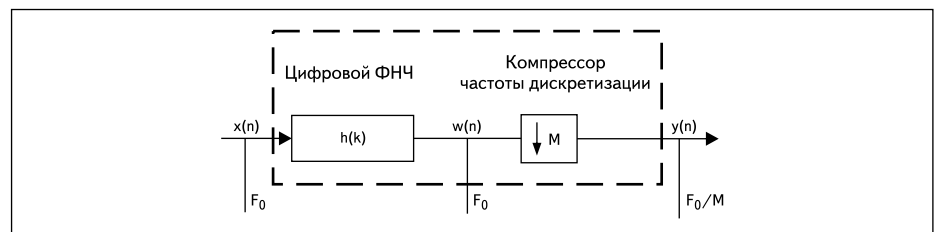


Рис. 8. Упрощенная схема цифрового преобразователя сигнала Σ - Δ модулятора

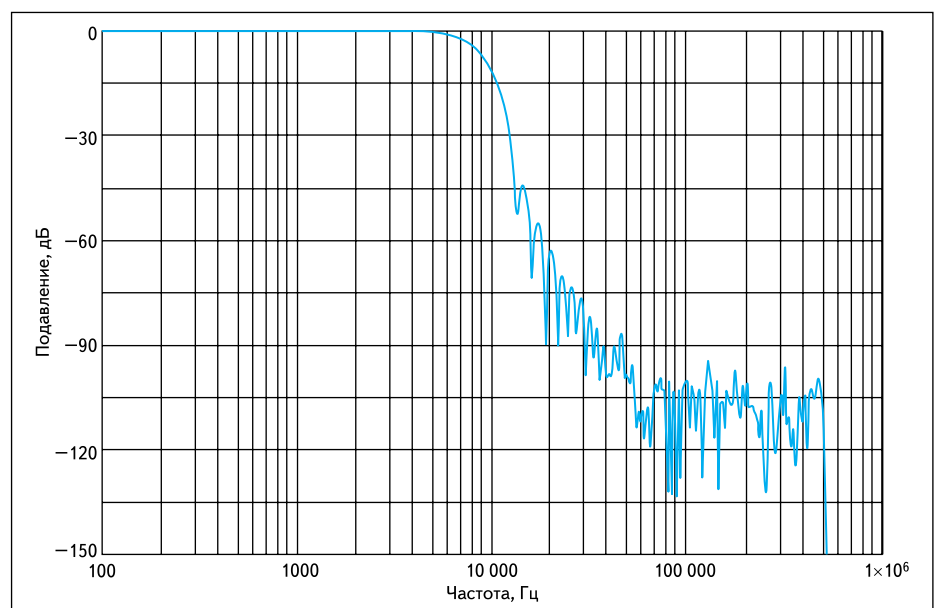


Рис. 9. АЧХ программного дециматора, реализованного на процессорах ADSP-BF538F и MSP430F5438

боратории акустического излучателя с линейной амплитудной характеристикой по звуковому давлению. Оценки результирующей АЧХ показывают ее линейность в рабочей полосе частот с погрешностью около ± 4 дБ. Поэтому при оценке линейности АЧХ мы сочли правильным опираться на заявленные характеристики производителей и расчетные характеристики фильтров низкой частоты с пульсацией в полосе пропускания менее 1 дБ.

МЭМС-микрофоны открывают перед разработчиками звуковой аппаратуры новые возможности. Процесс создания цифровых звуковых устройств становится простым в плане аппаратной реализации и сложным в плане написания программ для используемых микроконтроллеров. Мы надеемся, что приведенная в этой статье информация по методикам и параметрам будет интересна многим инженерам. ■

Литература

1. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Пер. с англ. М.: Вильямс, 2004.
2. Сысоева С. МЭМС-микрофоны // Компоненты и технологии. 2010. №№ 6, 7.
3. www.labi2.ru
4. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADMP421.pdf
5. http://www.knowles.com/search/prods_pdf/SPM0405HD4H-WB.PDF
6. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADSP-BF538_BF538F.pdf
7. <http://focus.ti.com/lit/ds/slas612c/slas612c.pdf>
8. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADAU1361.pdf
9. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADAU1761.pdf
10. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/tlv320aic3120.html>