

Преобразователь «напряжение-частота» (непрерывного типа) и имитатор шума ветра

Автор: Илья Мамонтов
Сопровождающий проект: есть
Семейство микросхем: Проект – CY8C27143
Среда разработки: PSoC Designer 4.3
Ссылки на дополнительные документы: AN2161, AN2???

Резюме

В статье описывается имитатор шума ветра, выполненный на основе микросхемы PSoC. Этот имитатор может использоваться в различных представлениях и шоу в качестве театрального реквизита. Его можно рассматривать и как оригинальный музыкальный инструмент, управляемый прикосновением. Скользя пальцем вверх или вниз, вы можете управлять высотой генерируемого звука («скоростью ветра»). Диапазон инструмента составляет более трех с половиной октав.

Достоинством проекта является полностью аппаратный способ получения звука – никакое вмешательство со стороны центрального процессора во время работы не требуется. В проекте решены две важные задачи – реализация преобразователя «напряжение-частота» (V-to-F) с широким рабочим диапазоном и построение двухканального звена, состоящего из двух перестраиваемых по частоте полосовых фильтров. Для работы требуются только два внешних компонента – регулируемый вручную резистивный делитель (например, линейный потенциометр, который может быть выполнен в виде грифа) и небольшая интегрирующая емкость.

Введение

Однажды, просматривая старые радиотехнические журналы, я неожиданно вспомнил про желание одного моего друга, музыканта, иметь портативное устройство, которое могло бы имитировать различные звуки природы. Импульс дала статья, где описывался имитатор человеческого голоса и прочих звуков. Устройство состояло из фильтров, управляемых вручную, и было выполнено с использованием большого числа операционных усилителей, резисторов, конденсаторов и сдвоенных потенциометров.

Тогда я подумал: а не может ли одна микросхема PSoC заменить все это электронное излишество? – и после некоторых усилий появилось устройство, описанное в данной статье.

Об инструменте

Большинство природных голосов имеют формантную структуру – генерируемый звук фильтруется резонансной природой окружающей среды. Это могут быть вибрации материалов, из которых источник звука сделан, резонирующие полости, расположенные

вблизи, турбулентные явления в воздушном потоке и т.д. Термин «форманта» означает ярко выраженную область в спектре звука, т.е. концентрацию акустической энергии в районе определенной частоты. Пример формантной структуры звука показан на Рисунке 1 (в качестве примера я записал с помощью звуковой карты свой голос «а»).

Видно, что в представленном спектре содержатся четыре форманты – 1100, 1500, 2300 и 3500 Гц, которые позволяют нашему уху идентифицировать этот звук как человеческое «а».

Замечательной особенностью всех «живых» голосов является динамически меняющаяся структура. Форманты могут меняться как по частоте, так и по ширине, высоте, а также в их различных комбинациях. Чтобы сымитировать реальные звуки, мы должны полностью повторить все эти изменения. Для сложных звуков (например, человеческой речи) это – трудная задача, другие же звуки (например, шум ветра) могут быть достаточно легко смоделированы.

Реальный шум ветра – это случайные флюктуации воздушного потока, вызванные турбулентными явлениями. Обычно это происходит на краях препятствий – деревьях, мачтах, проводах, стенах и т.д.

Я не буду касаться природы появления резонансных пиков в спектре шума ветра – этим занимается раздел математики, изучающий «динамический хаос». Для нас важно только то, что частоты формант зависят от скорости ветра и размеров препятствий. Если ветром обдуваются два препятствия, то в спектре присутствуют две форманты, как это показано на Рисунке 2. При изменении скорости ветра, положения пиков будут соответственно меняться (на Рисунке 2 красная кривая соответствует медленным потокам, зеленая и голубая – умеренным, фиолетовая – высоким).

Рисунок 1. Спектры звука «а», произносимого голосом (слева) и шепотом (справа). Основные форманты выделены цветом.

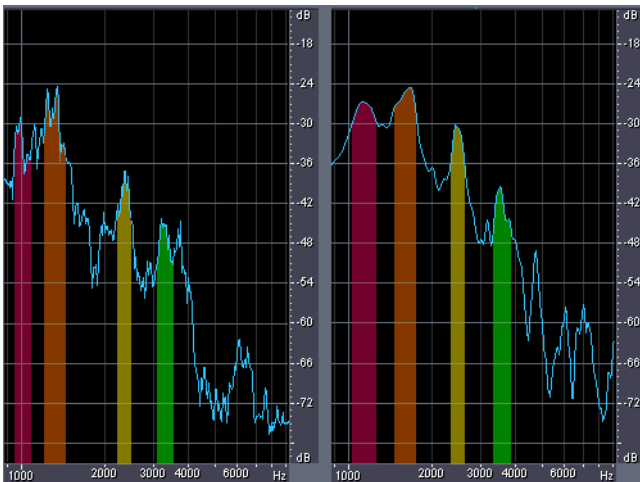


Рисунок 2. Возможные спектры «шума ветра» при различных скоростях.

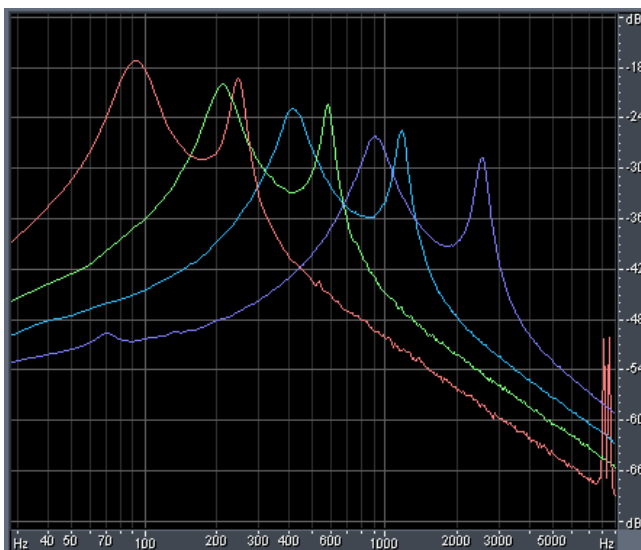
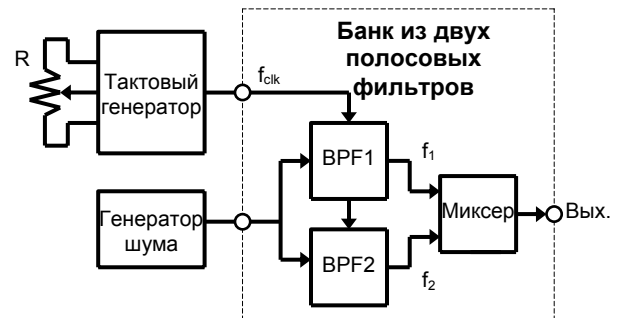


Рисунок 3. Блок-схема имитатора.



В заключение необходимо заметить, что два неподвижных пика – это еще не шум ветра, настоящий шум – это **двигающиеся** пики!

Структура имитатора показана на Рисунке 3. Основой устройства является генератор белого шума и набор из перестраиваемых полосовых фильтров (BPF). Изменяя резонансные частоты фильтров (посредством переменного резистора R), можно управлять высотой воспроизводимого звука (т.е. «скоростью ветра»).

Реализация на PSoC – первые шаги

Резонансные частоты фильтров могут меняться разными способами. В упомянутой ранее статье сдвоенные переменные резисторы просто включены в схему фильтров. Рациональный путь при использовании микросхем PSoC – применение модулей BPF2 (полосовых фильтров на основе «блоков с переключаемыми конденсаторами») и изменение их тактовой частоты в процессе работы.

Конечно, можно было бы оцифровать с помощью АЦП напряжение с переменного резистора, а затем программно управлять некоторым делителем частоты при тактировании модулей BPF (для этой цели могут использоваться модули Counter или PWM). Такое управление требует задействования центрального процессора, и кроме того – применения специальных алгоритмов для расчета плавно меняющейся частоты на основе дискретных входных данных (любой АЦП имеет конечное разрешение, конечную скорость оцифровки, и, плюс ко всему, у делителей частоты коэффициенты деления могут принимать дискретные значения).

Поэтому здесь подошел бы иной метод управления – изменение тактовой частоты фильтров BPF с помощью перестраиваемого генератора.

От дискретно работающего генератора – к «непрерывному»

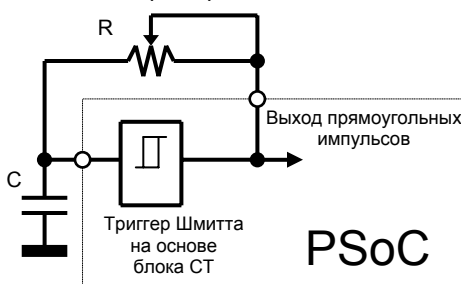
Один из типов генераторов с изменяемой частотой был описан в документе AN2161 – «Voltage-to-Frequency Converter». Этот генератор использует два аналоговых блока – «блок с переключаемыми конденсаторами» (SC block) в качестве интегратора и «непрерывный» (CT block) блок в качестве триггера Шмитта. К сожалению, предлагаемая структура имеет существенный недостаток – дискретный принцип работы. Этот факт ограничивает область применения данного генератора из-за следующих последствий:

- низкой рабочей частоты (до 10 кГц);
- джиттера в выходном сигнале (дрожание фронтов), что не приемлемо для аудио приложений.

Другой тип генератора может быть построен на основе триггера Шмитта, как это изображено на Рисунке 4 (этот вариант описан в документе AN2161 – «Schmitt Trigger on CT Block and Relaxation Oscillators with PSoC»). Такая структура имеет внешний компонент – небольшую емкость C (переменный резистор R не принимаем во внимание) – и может генерировать частоты до 5 МГц. У такого генератора есть свой недостаток, который связан с вовлечением переменного резистора R в сигнальную цепь:

- длинные провода и части резистора могут стать источником внешних помех;
- обратный случай – потенциальная восприимчивость к внешним наводкам.

Рисунок 4. Релаксационный генератор на основе триггера Шмитта.



В этой статье я предлагаю альтернативную структуру генератора, которая изображена на Рисунке 5.

Исходное состояние схемы – емкость C разряжена, ключ выходного драйвера находится в закрытом состоянии. Конденсатор C через резистор R начинает заряжаться по экспоненте (см. Рисунок 6). Когда напряжение на конденсаторе достигнет порогового уровня U_{ref} , сработает компаратор $CmpPrg$, и конденсатор C разрядится через открывшийся ключ выходного драйвера. В это же самое время компаратор переключится в исходное состояние. Периодический процесс возникает благодаря задержке

распространения сигнала от входа компаратора до выхода драйвера – t_d (около 0,1 мкс). Эта задержка позволяет конденсатору C разрядиться раньше, чем выходной драйвер переключится в исходное состояние. Время разряда должно быть меньше, чем задержка – это основное условие работы схемы.

Период T рассчитывается по простой формуле (1). Если $t_d \ll T$, то параметр t_d можно не учитывать.

$$T = R * C * \ln [V_{cc} / (V_{cc} - U_{ref})] + 2 t_d \quad (1)$$

Из-за особенности организации PSoC должен быть принят во внимание один важный момент – выход модуля $CmpPrg$ дискретизируется тактовой частотой аналогового столбца PSoC, поделенной на четыре. Кроме того, шина компаратора, которая используется для передачи сигнала от модуля $CmpPrg$ к модулю $DigBuf$, имеет собственную тактируемую регистр-защелку, которая также дискретизирует сигнал. Чтобы устранить взаимовлияние между тактовой и генерируемой частотами, все «защелки» должны быть выключены. К счастью, в приборах PSoC есть регистры, которые предусматривают такой режим. Нужную конфигурацию обеспечивает следующий код:

Код 1. Подготовка пути для цифрового сигнала.

```
or reg[CMP_CR1], 0b00010000 ;do transparent the
ComparatorBus0 latch
and reg[CMPPRG_1_COMP_CR2], 0b10111111 ;do
transparent the comparator's output
```

Обратите внимание, что цифровой сигнал после компаратора должен быть проинвертирован. Я сделал это при помощи функции «NOT» блока LUT на шине компаратора, хотя возможны и другие способы, например – установкой параметра «InvertInput1» модуля $DigBuf$ или же с помощью функции «NOT» выходного блока LUT.

Рисунок 5. Релаксационный генератор на основе процессов длинного заряда/короткого разряда.

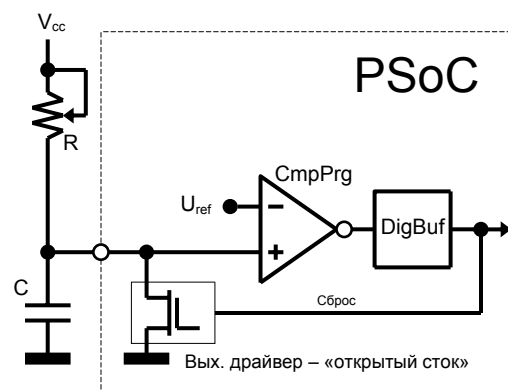


Рисунок 6. Диаграммы работы.

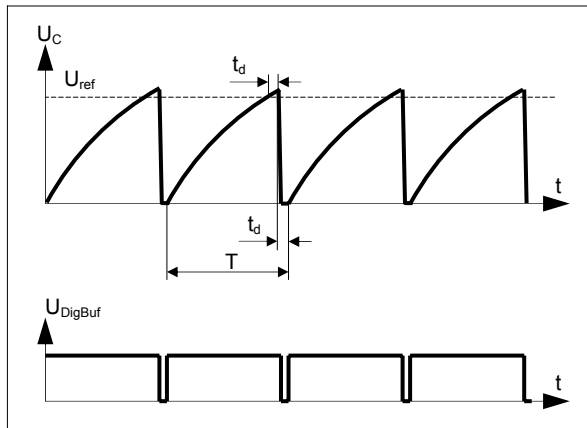
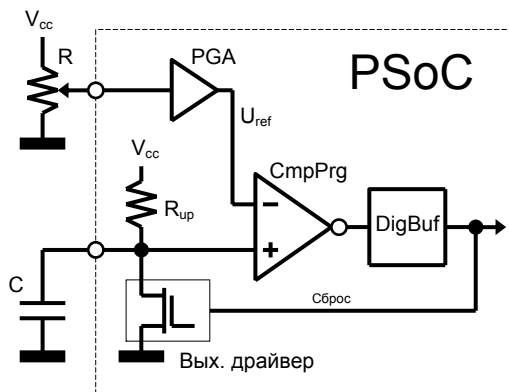


Рисунок 7. Релаксационный генератор, управляемый напряжением (преобразователь «напряжение-частота»).



Как и генератор, изображенный на Рисунке 4, новый генератор имеет тот же недостаток – вовлечение резистора R в сигнальную цепь. Но ведь можно в RC-цепочке сопротивление R сделать постоянным, а вместо него изменять пороговое напряжение U_{ref} ! Схема при этом немного изменится и придет к виду, показанному на Рисунке 7. Теперь вы можете с помощью напряжения также легко управлять частотой, как это делают специализированные микросхемы!

Изображенный на схеме R_{up} – это внутренний подтягивающий резистор выходного драйвера, его номинальное значение составляет 5,6к. Если вам нужна точность, вместо него вы можете использовать внешний резистор.

Для применения в музыке у такой схемы есть одно скрытое достоинство. Взгляните на гитарный гриф и сравните шкалу полутонов с фортепьянной клавиатурой (см. Рисунок 8). Вы заметите значительную нелинейность гитарной шкалы – геометрический шаг полутонов сокращается по направлению к центру грифа и далее. Считается, что линейная шкала улучшает игровые возможности музыкального инструмента, а

наиболее подходящая зависимость между частотой ноты F и координатой X – логарифмическая:

$$\log(F) = k * X \quad (2)$$

Схемы, показанные на Рисунках 4 и 5, дают линейные зависимости между периодом T и сопротивлением R, что означает нелинейную музыкальную шкалу вида:

$$F = F_0 * X_{max} / (X_{max} - X) \quad (3)$$

где X – координата ползунка резистора 0... X_{max} ,
 F_0 – частота при $X=0$.

Аналогичное соотношение получается и у гитарного грифа.

Между тем, зависимость (1) при переменном параметре U_{ref} обеспечивает более линейную шкалу (либо более широкий диапазон при той же степени комфортности игры). Примеры зависимостей, рассчитанных с помощью приложения Excel, представлены на Рисунке 9.

Рисунок 8. Высотные шкалы.

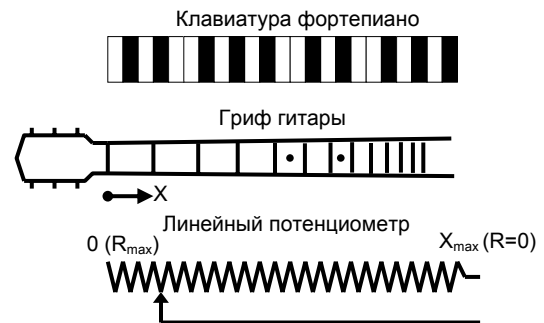
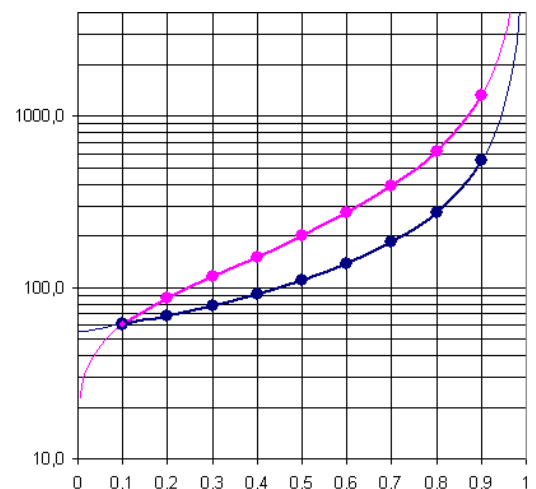


Рисунок 9. Зависимость частоты от относительного положения регулятора R (синяя кривая соответствует схеме Рис.5, лиловая – схеме Рис.7).



Банк из двух фильтров: уловки при объединении

Специфический порядок чередования блоков типов «С» и «D» в аналоговом массиве PSoC не позволяет смешивать сигналы двух модулей BPF2 с помощью только одного блока SC. Этот блок имеет входы «А» и «В» для соединения с соседними модулями и обеспечивает 32-шаговое изменение коэффициента передачи, независимое для каждого входа.

Кроме того, среда разработки PSoC Designer не позволяет осуществлять все возможные межсоединения.

В связи с этим, для построения многоканального фильтра требуется приложить некоторые усилия.

Как подавать шумовой сигнал?

Псевдослучайная последовательность («псевдо-белый шум») может быть сгенерирована с помощью модуля PRS. Я использовал 16-битный модуль из-за достаточно большого периода повторения. Подать сигнал в модуль BPF2 можно с помощью встроенного в него модулятора. Чтобы выбрать линию 0 шины Global Output Bus в качестве источника модуляции для аналоговых колонок 1 и 3 (в которых размещены модули BPF2), я модифицирую регистры управления следующим образом:

Код 2. Настройка модуляторов.

```
;set the modulator bits for column 1,3
M8C_SetBank1
or reg[AMD_CR1],0b00000010 ;modulation source for col 1
is GOE[0]
or reg[AMD_CR1],0b00100000 ;modulation source for col 3
is GOE[0]
M8C_SetBank0
```

Модуляция при отсутствующем входном сигнале даст нулевой результат, поэтому на входе модулей BPF2 должно присутствовать ненулевое напряжение. Чтобы выбрать RefHi в качестве входного источника, в установочную часть программы требуется включить следующий код:

Код 3. Конфигурация входов AMux.

```
and reg[BPF2_1_FLIN_CR1],0b00011111 ;clear AMux of
BPF2_1
or reg[BPF2_1_FLIN_CR1],0b01000000 ;set AMux inputs
to RefHi
and reg[BPF2_2_FLIN_CR1],0b00011111 ;clear AMux of
BPF2_2
or reg[BPF2_2_FLIN_CR1],0b01000000 ;set AMux inputs
to RefHi
```

Как смешивать сигналы?

Модуль BPF2 состоит из двух SC-блоков – типа «С» и «D», а выходной сигнал снимается с блока типа «С». Особый порядок чередования блоков в массиве PSoC не позволяет объединить выходы фильтров BPF2 с помощью смесителя, выполненного на одном SC-блоке

(модуле SCBLOCK). Но что произойдет, если мы снимем сигнал с блока «D», а не с блока «С»?

Рисунок 10 дает ответ на этот вопрос – там показаны амплитудно-частотные характеристики, которые я снял с выходов обоих блоков. Как видно из рисунка, выход с блока «D» имеет ту же резонансную частоту, что и выход с блока «С», но ход кривой АЧХ здесь несколько иной. Опытный разработчик отметил бы, что выход с блока «D» эквивалентен использованию модуля LPF2 (фильтра НЧ) с особыми параметрами, приводящими к появлению резонансного пика на частоте среза.

Несмотря на изменения в АЧХ, фильтр с новым отводом может использоваться в некоторых аудио приложениях. Принимая это допущение, банк из двух фильтров теперь легко реализуется – как показано на Рисунке 11.

Вход BMux модуля SCBLOCK_1 соединяется с модулем BPF2_2 программным способом. Параметры модулей BPF2_1, BPF2_2 и SCBLOCK_1 перечислены в Приложении А. Структура преобразователя «напряжение-частота» (V-to-F) была описана ранее.

Код 4. Конфигурирование входа BMux

```
and reg[SCBLOCK_1_cr3],0b11111011 ;set BMux of
SCBLOCK_1 to ASD13
```

Рисунок 10. АЧХ модуля BPF2 (красная кривая – на обычном выходе, голубая – на выходе блока «D»)

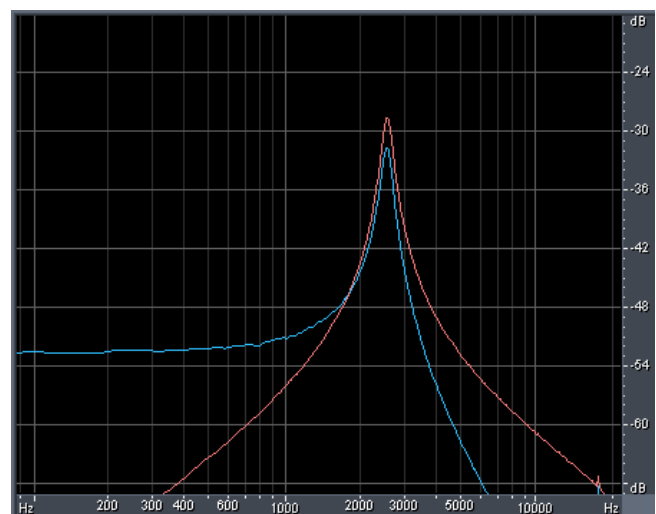
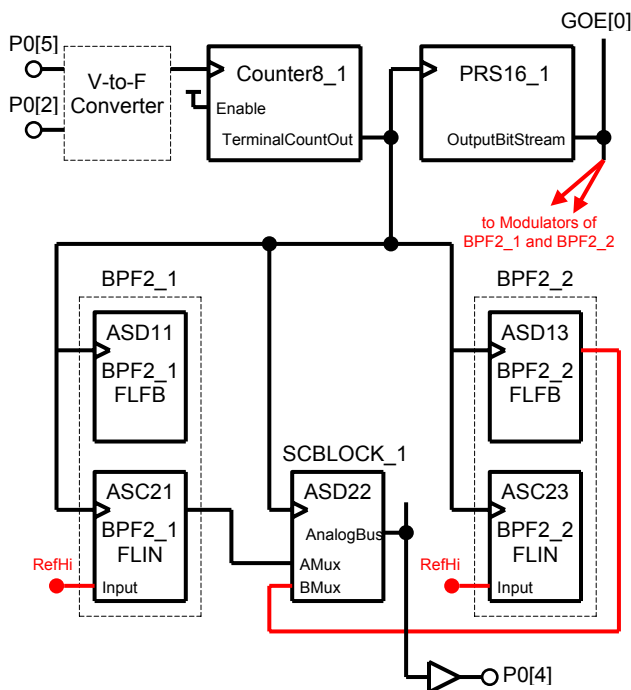


Рисунок 11. Конфигурация PSoC (красным цветом показаны соединения, выполненные программно)



Результаты тестирования

Схема имитатора шума предельно проста (см. Рисунок 12). Переменный резистор R1 выполняет функцию регулятора высоты тона. В качестве R1 я использовал линейный потенциометр от старого плоттера – как готовый к употреблению гриф. Этот потенциометр имеет бегунок, который может перемещаться в диапазоне 27 см (около 11 дюймов).

Интересным решением является вариант с сенсорным управлением – вы можете убрать бегунок и взамен него использовать проводимость собственного пальца. Скользя пальцем вверх и вниз, вы меняете высоту создаваемого звука. Когда палец убирается с грифа, емкость C1 хранит напряжение, которое было на входе микросхемы в последний момент.

C2 – это интегрирующая емкость для преобразователя «напряжение-частота». При значении 680 пФ она обеспечивает среднюю частоту 380 кГц (соответствует положению бегунка в середине грифа). Диапазон инструмента для комфортной игры составляет более 3,5 октав, хотя полный диапазон значительно шире.

Макет устройства (см. Фото 1) имеет батарейное питание. Выходной сигнал регулируется переменным резистором R2 (колесикового типа) и через 3,5-мм разъем J1 поступает на внешний усилитель.

Спектры сгенерированного шума при различных положениях резистора R1 показаны на Рисунке 2.

Рисунок 12. Схема инструмента. R1 – линейный потенциометр, располагаемый на грифе. Вместо движка вы можете использовать проводимость собственного пальца.

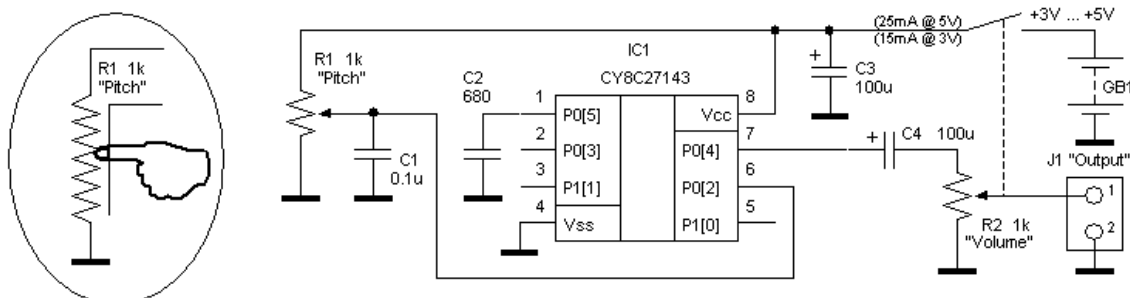
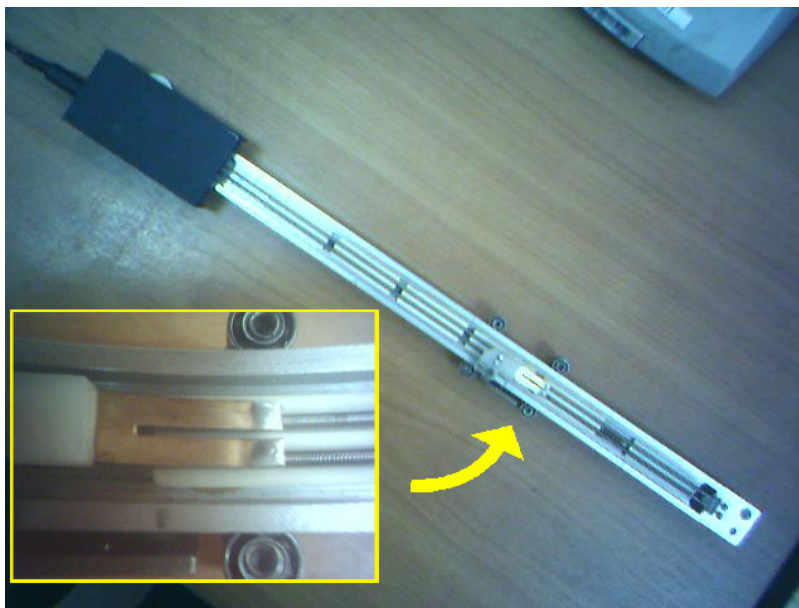


Фото 1. Пробный экземпляр в действии (вариант со скользящим контактом). В качестве готового грифа я использовал линейный потенциометр от старого плоттера (служит там датчиком положения).



Заключение

В проекте реализован полностью аппаратный способ генерации шума ветра.

Было продемонстрировано, что, используя аналоговые и цифровые блоки PSoC, можно построить преобразователь «напряжение-частота», работающий в широких пределах. Такой преобразователь может использоваться и в других приложениях – синтезаторах радиочастот, частотных модуляторах и т.д.

Допуская некоторые изменения АЧХ у модуля BPF2, вызванные его нестандартным включением, можно на пяти аналоговых блоках PSoC реализовать банк, состоящий из двух полосовых фильтров. Коэффициенты смещения и тактовые частоты могут быть выставлены независимо для каждого фильтра – для получения специальных звуковых эффектов.

С тем же допущением можно построить и 3-х канальный фильтр – для использования, например, при синтезе речи.

Об авторе

Имя: Илья Мамонтов
Титул: Инженер-«электроник»
Кратко: В 1989 г закончил Московский Авиационный институт (Российская Федерация) и 6 лет работал в космической отрасли. Сейчас работает в атомной промышленности. Область интересов – разработка, модернизация, обслуживание и ремонт аналитических измерительных приборов.

Контакты: ilka@elsite.ru
или
illinoys@narod.ru
используйте тему: PSOC AN

Приложение А. Параметры модулей BPF2_1, BPF2_2 и SCBLOCK_1.

BPF2_1		BPF2_2		SCBLOCK_1	
User Module Parameter	Value	User Module Parameter	Value	User Module Parameter	Value
C1	1	C1	1	FCap	32
C2	1	C2	8	ClockPhase	Norm
C3	4	C3	4	ASign	Neg
C4	4	C4	4	ACap	16
CA	32	CA	32	AMux	ASC21
CB	32	CB	32	BCap	16
Input	?	Input	?	AnalogBus	AnalogOutBus_2
AnalogBus	DISABLE	AnalogBus	DISABLE	CompBus	Disable
CompBus	DISABLE	CompBus	DISABLE	AutoZero	0n
Polarity	Non-Inverting	Polarity	Non-Inverting	CCap	0
				ARefMux	AGND
				FSW1	0n
				FSW0	0n
				BSW	0n
				BMux	?
				Power	High

Cypress Semiconductor
 198 Champion Court
 San Jose, CA 95134-1709
 Phone: 408-943-2600
 Fax: 408-943-4730
<http://www.cypress.com>

© Cypress Semiconductor Corporation, 2006. The information contained herein is subject to change without notice. Cypress Semiconductor Corporation assumes no responsibility for the use of any circuitry other than circuitry embodied in a Cypress product. Nor does it convey or imply any license under patent or other rights. Cypress products are not warranted nor intended to be used for medical, life support, life saving, critical control or safety applications, unless pursuant to an express written agreement with Cypress. Furthermore, Cypress does not authorize its products for use as critical components in life-support systems where a malfunction or failure may reasonably be expected to result in significant injury to the user. The inclusion of Cypress products in life-support systems application implies that the manufacturer assumes all risk of such use and in doing so indemnifies Cypress against all charges.