

# Современные интегральные микросхемы для построения емкостных сенсоров

Игорь КРИВЧЕНКО  
ik@efo.ru

**Емкостными сенсорами или сенсорными переключателями обычно называют емкостные датчики приближения/касания. Передовые технологии по изготовлению интегральных микросхем позволяют успешно комбинировать лучшие решения аналоговой и цифровой схемотехники при создании новых сенсорных устройств. Производители полупроводниковых компонентов активно соперничают друг с другом на этом сегменте рынка, внедряя свои разработки в автомобильную электронику, бытовую технику, промышленную автоматику.**

Не секрет, что для успешной продажи новых изделий, в первую очередь бытовой электроники, они должны поступать на современный потребительский рынок, обладая новыми отличительными качествами, начиная с изящно изготовленного корпуса и заканчивая удобным, интуитивно понятным и функциональным пользовательским интерфейсом. Реализация востребованных рынком конечных приложений во многом зависит от двух основных компонентов: устройств ввода информации (кнопки, переключатели и т. д.) и устройств вывода информации (индикаторы, дисплеи). Основное внимание разработчиков и дизайнеров обычно уделяется именно дисплеям, в постоянное совершенствование которых вкладываются огромные ресурсы. Тем не менее, устройства ввода также развиваются, в том числе и в области технологии. Дизайнерам необходима простая и надежная реализация технологии, чувствительной к нажатию/касанию, которая обеспечивала бы свободу проектирования интерфейса «человек-машина» при конечной стоимости, приемлемой для бытовых приложений массового спроса. Стандартные механические кнопки и переключатели изнашиваются, слабо защищены от воздействий окружающей среды и диктуют оформление дизайна конечного продукта. Пленочные мембранные клавиатуры имеют относительно высокую стоимость и точно так же изнашиваются. Сенсорные переключатели представляют собой привлекательный компромисс стоимости, надежности и производительности.

Современные сенсорные технологии позволяют создавать клавиши, матрицы переключателей, слайдеры, панели управления разнообразной формы и даже сенсорные дис-

плеи, которые лишены традиционных проблем прошлого: сложности в разработке, низкой надежности и нестабильности в работе (рис. 1). Сегодня сенсоры являются зачастую более дешевыми и более надежными, чем их электромеханические конкуренты. Ушли в прошлое дни, когда выбор сенсорного переключателя или сенсорной панели требовал заказного производства или специального дизайна. Растущее разнообразие на рынке новых специализированных микросхем делает допустимым и экономически оправданным даже однократную разработку.

Существует несколько популярных бесконтактных сенсорных технологий: резистивные пленки (наиболее популярна), генерация электрического поля, емкостная, акустическая, инфракрасная и некоторые другие, более экзотичные (см., например, [1]). Каждая технология имеет свои достоинства и недостатки, и необходимую можно выбрать, сообразуясь с конкретными нуждами будущего прибора и планируемого характера его использования. Если говорить в общем, то такие решения предлагают разработчикам практически неограниченную свободу действий для дифференциации их конечного оборудования



Рис. 1. Сенсорная панель управления современной варочной поверхности

на рынке. В предлагаемой статье рассматриваются емкостные сенсоры.

Емкостные сенсоры быстро вытесняют механические устройства ввода и способствуют повышению удобства работы и улучшению внешнего вида, в первую очередь, таких устройств массового потребления, как пульты дистанционного управления, сотовые телефоны, MP3-плееры, игровые консоли и цифровые камеры. В промышленных и медицинских приложениях на базе емкостных сенсоров можно построить бесконтактную клавиатуру, способную продолжительное время работать в агрессивных средах. Применение в таких же условиях пленочных или контактных клавиатур зачастую может оказаться более дорогим и менее долговечным решением.

Несколько слов скажем о самом понятии «емкость». Электрическая емкость определяется как способность объекта или поверхности хранить электрический заряд и соотносится с физическим размером объекта. Но емкость объекта зависит и от его расположения относительно других предметов. В то время как одиночный объект в открытом пространстве будет иметь одно значение емкости (соотносящееся с его физическими размерами), то по мере приближения к нему другого объекта это значение емкости будет возрастать.

В 99% случаев под емкостью подразумевается взаимная емкость между двумя соседними объектами, которые отделены друг от друга посредством некоей непроводящей субстанции, или просто воздухом/вакуумом. Эта форма емкости гораздо более важна и обычно доминирует над простой емкостью в свободном пространстве, которая обычно либо очень мала, либо не так важна для рассмот-

рения. Футбольный мяч, летящий в воздухе, имеет взаимную емкость по отношению к Земле, точно так же, как Земля и Луна имеют взаимную емкость по отношению друг к другу. Каждый объект имеет способность для хранения заряда по отношению к другому объекту при условии, что они не соединены друг с другом чем-то хорошо проводящим электричество (иначе заряд мгновенно бы перераспределился между объектами).

Величина емкости между двумя объектами обратно пропорциональна расстоянию между ними и прямо пропорциональна их геометрическим размерам. Наличие промежуточной субстанции между двумя объектами также сильно влияет на величину взаимной емкости; в качестве численной оценки выступает диэлектрическая проницаемость материала. Чем больше ее значение, тем больше заряда можно «запастись» между объектами. Вакуум (и в большинстве случаев — воздух) имеет значение диэлектрической проницаемости 1, различные пластики — от 2 до 5, обычное стекло — около 8, чистая вода — 80, некоторые керамические материалы — до 1000.

Любой емкостный сенсорный переключатель имеет «плавающую» собственную фоновую емкость, которой соответствует определенный уровень выходного сигнала. При касании сенсора эта емкость изменяется, приводя к изменению выходного сигнала. Если оно превышает некоторый установленный порог, то сенсор регистрирует факт нажатия клавиши. Когда такой сенсор входит в состав носимого устройства, то для обеспечения устойчивой работы приходится решать ряд дополнительных проблем (под термином «устойчивость» будем понимать способность датчика надежно идентифицировать факт нажатия в зависимости от конструктивного и дизайнерского исполнения приборной панели, а также при различных внешних условиях работы). Например, устройство может находиться относительно далеко от окружающих предметов, а затем пользователь располагает его рядом с компьютером, сотовым телефоном или другим электронным оборудованием, которое излучает непредсказуемые (для сенсора) частотные компоненты при различных величинах напряженности поля. Добавим сюда электростатические разряды как потенциальные источники ложных срабатываний, капли и пленки воды и прочих загрязняющих веществ. Для того чтобы преодолеть эти и другие проблемы, например температурный и временной дрейф, микросхемы сенсорных переключателей часто имеют встроенные цифровые и аналоговые подсистемы, которые непрерывно калибруют сенсор. Путем периодического определения параметров индивидуальных каналов и регулярной калибровки подобные технологии помогают создавать разнообразные клавиатуры с бесчисленными сочетаниями формы и размеров клавиш,

учитывать разницу в геометрии и емкости пальцев разных пользователей. Это помогает улучшить определение нажатия клавиш и расширять возможности разработчика конечного продукта.

Рассмотрим существующие решения, доступные на современном электронном рынке. Микросхемы емкостных сенсоров, выпускаемые сегодня компаниями Analog Devices, Cypress Semiconductor, Freescale Semiconductor и Quantum Research Group, демонстрируют различные подходы к созданию чувствительного элемента. Эти производители также предлагают отладочные наборы, что облегчает разработчикам сравнение простоты дизайна и устойчивости работы сенсоров.

Компанией Freescale по технологии Motorola SmartMOS серийно выпускается микросхема MC33794 — бесконтактный емкостный датчик электрического поля (рис. 2). Кристалл был разработан компанией Motorola для рынка автоэлектроники. Основной задачей являлся трехмерный анализ внутреннего пространства салона автомобиля для оптимизации срабатывания и развертывания подушек безопасности в случаях, когда пассажиры значительно различаются по массогабаритным характеристикам, а также произвольно размещаются по внутреннему объему салона. Пространственное электрическое поле формировалось набором электродов, встроенных в переднюю панель автомобиля и в сидения. С технической точки зрения ничего революционного в решении Motorola нет, но ряд несомненных достоинств присутствует.



Рис. 2. Принцип работы емкостного датчика электрического поля

Во-первых, для определения местоположения тела пассажира используется модифицированный емкостный датчик с повышенной чувствительностью. Во-вторых, сенсор позволяет определить не только факт присутствия/отсутствия пассажира, но также размеры и положение его в пространстве. И, наконец, использование MC33794 позволяет заменить несколько десятков дискретных электронных компонентов одной микросхемой при решении подобных задач. Над разработ-

кой технологии, помогающей определять размеры и положение объекта в пространстве, совместно работали компания Motorola и Массачусетский технологический университет (MIT, США). В проекте также участвовала фирма Eleys North America, которая одной из первых применила данную технологию на практике.

Конечно, можно найти целый ряд других приложений, в которых может использоваться MC33794. В первую очередь — это охрана и безопасность: разнообразные охранные системы, системы оповещения, контроля доступа, автоматического управления освещением и т. п. Используя уникальную особенность микросхемы детектировать положение и размеры объекта в пространстве, можно конструировать различные бесконтактные выключатели силового электрооборудования и бытовых электроприборов, интеллектуальные бесконтактные клавиатуры для работы в агрессивных средах. Можно осуществлять контроль безопасного открывания/закрывания двери гаража, определять дисбаланс вращающихся деталей и узлов, например, барабанов в бытовых сушильных агрегатах и стиральных машинах и т. п. Системы автоматического оттаивания холодильников тоже являются потенциальным приложением, точно так же, как и построение разнообразных детекторов уровня вплоть до обнаружения лужицы пролитой жидкости на варочной поверхности кухонной плиты.

Микросхема MC33794 выпускается в корпусе SOIC54 и работает в диапазоне питающих напряжений от 9 до 18 В. Она имеет 9 выводов для подключения сенсорных электродов и 2 опорных входа для измерения внешней эталонной емкости известной величины (обычно 10 и 100 пФ). Данная калибровка необходима для устранения влияния нежелательных внешних воздействий — температуры, внешнего электромагнитного поля и пр. Сигнальные электроды возбуждаются внутренним генератором низкочастотного синусоидального сигнала с частотой 120 кГц. Это напряжение прикладывается к чувствительным электродам через резистор, который образует одну из половин делителя напряжения. Вторая половина делителя образуется соседней «земляной» поверхностью и сенсорным электродом. В качестве электродов могут использоваться металлические пластины или металлизированные участки поверхности. Типовая схема включения MC33794 приведена на рис. 3.

Электроды могут подключаться к микросхеме MC33794 как непосредственно, так и с помощью коаксиального кабеля. В последнем случае для компенсации емкостных эффектов возбуждаемый электрод следует подключить к центральной жиле кабеля. Оплетка коаксиального кабеля присоединяется к специальному выводу Shield микросхемы. Благодаря тому, что этот вывод находится под тем же напряжением, что и вывод, к которому

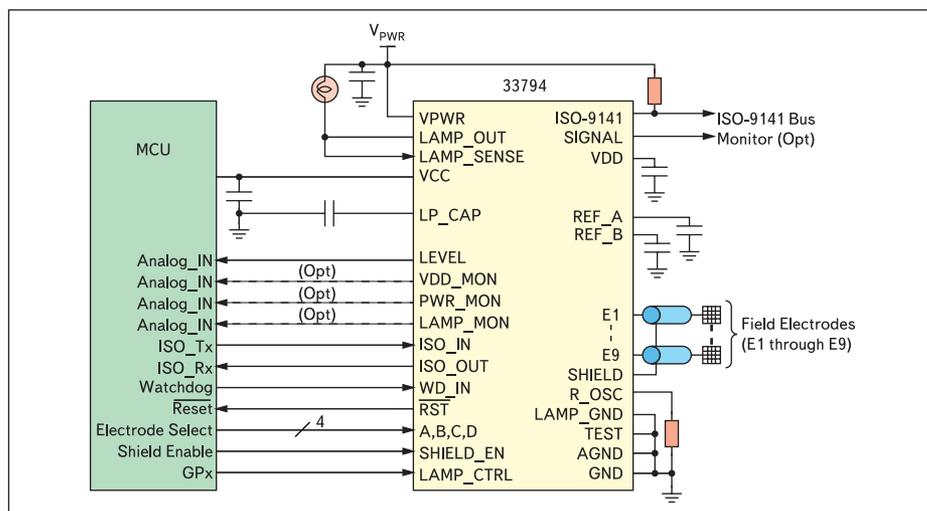


Рис. 3. Стандартная схема включения MC33794

подключен сенсорный электрод, можно устранить погрешность, вызванную собственной емкостью коаксиального кабеля. Подачей напряжения на вывод Shield управляет дополнительный вывод Shield DIS. Это также позволяет осуществлять диагностику обрыва в линии электрода.

Выбор относительно низкой частоты для создания поля минимизирует проблемы электромагнитной совместимости, включая интерференцию с автомобильными радиоприемниками. В каждый момент времени только один электрод, заданный четырьмя внешними адресными входами, является источником генерируемого слабого электрического поля. Остальные сенсорные входы при помощи внутреннего мультиплексора соединяются с общим проводом. Ток утечки между излучающим и заземленными электродами является информационным сигналом для внутренней измерительной цепи, которая преобразует его в сигнал постоянного тока, а также выполняет фильтрацию и нормализацию выходного сигнала в диапазоне напряжений от 0 до 4 В.

Если в генерируемое поле поместить некоторый объект, то его емкость будет шунтировать измерительную цепь и детектируемый сигнал изменится. По изменению амплитуды детектируемого сигнала можно судить об удаленности объекта от электрода. Выходной сигнал постоянного тока MC33794 можно подавать на внешний АЦП или на микроконтроллер со встроенным АЦП. Последний вариант предпочтительнее, так как микроконтроллер может одновременно управлять работой MC33794 и осуществлять обработку сигнала по заданному алгоритму. При использовании типовых параметров АЦП для встраиваемых микроконтроллеров измерения емкости можно проводить с точностью до 0,4 пФ при 8-разрядном АЦП и до 0,1 пФ при 10-разрядном. Применение высокоточных АЦП дает возможность детектировать малые объекты на большем расстоянии [2].

MC33794 имеет ряд дополнительных узлов для выполнения сервисных функций: два встроенных регулятора напряжения, схему Power-On-Reset, сторожевой таймер и драйвер сигнальной лампы — встроенный ключ нижнего уровня с нагрузочной способностью до 1,7 А. Интерфейс физического уровня ISO-9141 (K-line) облегчает подключение микросхемы к внутренней информационной сети автомобиля. Шина K-line является одной из трех официально разрешенных в США к эксплуатации коммуникационных шин для автомобильных бортовых систем диагностики и связи.

Отладочный комплект KIT33794DWBEVM, предназначенный для работы с этим интересным датчиком, содержит микросхему MC33794 и 8-разрядный микроконтроллер 68HC908GR8 с заранее запрограммированной демонстрационной прикладной программой (рис. 4). На прилагаемом к набору CD имеется вся необходимая техническая информация, в том числе и программа для подключения к персональному компьютеру, реализующая интерфейс пользователя.

Компания Freescale также выпускает «облегченную» модификацию датчика объемного электромагнитного поля — MC34940. Новая микросхема предназначена прежде всего для рынка бытовой электроники. Изделие выпускается в корпусе SOIC24, имеет 7 выводов для подключения сенсорных электродов и вывод Shield. Данная модификация позво-



Рис. 4. Отладочный комплект для MC33794

ляет реализовать до 28 емкостных сенсоров различной конфигурации. Функции слайдера, подавления нажатия соседних клавиш и периодической калибровки реализуются программно. Компания Freescale для работы с этой микросхемой предлагает драйверы на языке C, которые доступны из-под интегрированной среды разработки CodeWarrior для различных микроконтроллеров Freescale, включая перспективное семейство HCS08.

Демонстрационная плата DEMO1985MC34940E, разработанная на базе микроконтроллера 68HC908QY4, включает примеры готовых кодов и приложение для компьютера верхнего уровня, написанное на VisualBasic. Это позволяет программистам модифицировать код по собственному усмотрению.

Решение компании Analog Devices для целевого рынка мобильной электроники использует похожий принцип обнаружения: емкость объекта влияет на электромагнитное поле, которое генерирует микросхема сенсора. Кристалл AD7142 (пока единственный у Analog Devices) имеет 14 измерительных каналов, работает при напряжении питания от 2,7 до 3,3 В и опрессовывается в безвыводный корпус LFCSP размерами 5×5 мм, имеющий 32 контактные площадки.

Работа сенсора основана на генерации сигнала прямоугольной формы с частотой 240 кГц, который приложен к одному из электродов. Интенсивность создаваемого при этом электрического поля измеряется на соседнем электроде с помощью 16-разрядного сигма-дельта преобразователя емкости в цифровой код (CDC). Этот преобразователь в микросхеме единственный: входные сигналы от электродов-приемников последовательно коммутируются на его вход. Присутствие пальца или другого проводящего предмета шунтирует собственную емкость соответствующей клавиши, заставляя выходной код CDC изменяться (рис. 5). Когда это изменение превышает программно установленный порог срабатывания, сенсор регистрирует нажатие клавиши.

Каждый из каналов преобразования AD7142 имеет свой собственный регистр результата, считываемый внешним процессором по последовательному интерфейсу. Тип интерфейса (SPI или I<sup>2</sup>C) определяется модификацией микросхемы. Блок синтезатора на кристалле поддерживает до 12 стадий преобразования на измерительную последовательность, поэтому можно оптимизировать производительность работы и энергопотребление микросхемы путем баланса между количеством преобразований и частотой дискретизации CDC. Компания Analog Devices рекомендует устанавливать общее время для измерительной последовательности от 35 до 40 миллисекунд.

Внутренняя процедура калибровки на кристалле выполняется после каждой измерительной последовательности «прозрачно» для пользователя. Это необходимо для определения изменений в собственной емкости сенсора, что позволяет исключить влияние

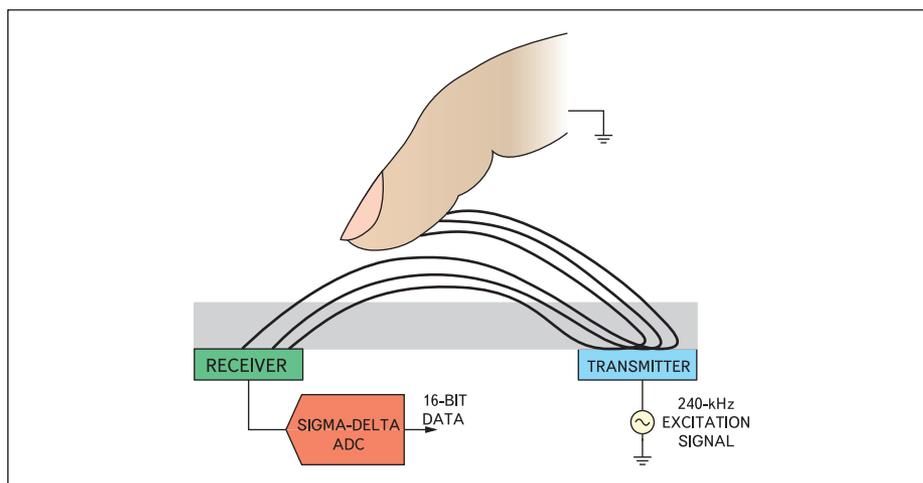


Рис. 5. Принцип работы микросхемы AD7142

на результат преобразования таких воздействий внешней среды, как температура, влажность и пр. Программируемые регистры позволяют разработчику подстраивать время задержки калибровки для режимов работы микросхемы на полной и пониженной мощности. Это помогает реализовать защиту против «зависания» пальца пользователя на кнопке на продолжительное время, запрещая тем самым процесс калибровки. Остающиеся на панели влага и жировая пленка от пальца пользователя тоже могут создавать эффект «зависания», поэтому форсирование калибровки помогает сенсору поддерживать оптимальную производительность определения. AD7142 имеет программируемый адаптивный порог срабатывания и алгоритм управления чувствительностью, что позволяет конечному изделию работать в руках у пользователей с разными размерами пальцев.

Данная микросхема создавалась фирмой Analog Devices, прежде всего, для применения в портативных устройствах с целью реализации современного и надежного интерфейса управления. За счет автоматической постоянной калибровки AD7142 обеспечивает высокую устойчивость работы в изменяющихся внешних условиях (температура, влажность), которые могут со временем ухудшить параметры емкостного сенсора. Имея 14 входов, микросхема может быть запрограммирована для работы с различными конфигурациями датчиков. ADI предлагает также образцы конструкций датчиков для различных применений вместе с соответствующим программным обеспечением, которое обеспечивает высокую точность и чувствительность сенсора.

AD7142 может работать в режимах полной и пониженной мощности и в спящем режиме. В основном режиме (полной мощности) кристалл непрерывно осуществляет преобразование и автокалибровку с постоянным темпом. Режим пониженной мощности позволяет программно выбирать различные значения частоты обновления сигнала на выходе и, соответственно, различные уровни энергопо-

требления. Например, частота измерительных последовательностей может быть снижена до 1 раза в 400 мс до тех пор, пока не определится новый факт нажатия клавиши, после чего кристалл возвращается к рекомендованной производителем последовательности в 40 мс. Для приведенных значений времени режим пониженной мощности снижает ток общего энергопотребления кристалла приблизительно в 20 раз. В спящем режиме ток покоя снижается до 2 мкА.

Для демонстрации возможностей сенсора и оценки его возможностей Analog Devices выпускает отладочную плату EVAL-AD7142EB и демонстрационный набор Scrollwheel-3, знакомый многим посетителям выставок. Он поставляется в пластмассовом корпусе размерами 67×67×28 мм и содержит две печатные платы. Набор собран на базе микроконвертора ADuC841, который управляет микросхемой AD7142 по SPI-интерфейсу. Связь с внешним компьютером осуществляется по интерфейсу USB, реализованному на кристалле Cypress CY7C68013A. «Сердцем» системы является плата с сенсором. Гибкая подложка разделяет ее чувствительную зону на 8 радиальных секторов одинакового размера. ADI отмечает, что реализация джойстиковых панелей и слайдеров требует специальных обслуживающих программ для интерполяции между чувствительными зонами. Компания оценивает размер кода для обслуживания слайдера как 3 К памяти программ и 500 байт SRAM, а также рекомендует процессор с производительностью 1 MIPS и более.

Британская компания Quantum Research Group, не имеющая собственных производственных мощностей, использует другой подход при создании емкостных сенсоров. Quantum выпускает ряд микросхем на базе технологии переноса заряда — QT. В сущности, QT-сенсор представляет собой специализированный микроконтроллер, который запрограммирован на заряд чувствительной поверхности неизвестной емкости до известного потенциала с последующим измере-

нием перенесенного заряда. Чувствительная поверхность может быть любой — от площадки на печатной плате до оптически прозрачного участка  $\text{In-SnO}_2$  на поверхности сенсорного дисплея. Измеряя заряд этой поверхности после одного или нескольких циклов заряда/переноса, микроконтроллер определяет емкость чувствительной поверхности. При определенном алгоритме следования циклов «заряд-измерение» и вариациях их длительности гарантируется надежное определение касания.

Сенсоры компании Quantum обычно используют частоту зондирования около 100 кГц, но некоторые из них могут работать на эффективных частотах до 10 МГц и более, используя выборки порядка 100 нс. Они постоянно измеряют собственную емкость объекта и принимают это измеренное значение как «тару», а затем следят за очень маленькими изменениями в измеряемом сигнале, которые вызваны присутствием вблизи сенсора другого объекта. Такой подход позволяет системе автоматически отстраиваться от значительных величин собственной емкости сенсорной панели. Это дает возможность превращать почти любой предмет в сенсор.

Данная технология хорошо подходит для проектирования и изготовления сенсорных экранов. Сенсоры Quantum могут различать объекты через стекло толщиной до 50 мм или через слой других материалов, толщина которого определяется значением диэлектрической проницаемости. Для того чтобы обезопасить систему от ложных срабатываний из-за мгновенных непреднамеренных касаний, случайного приближения объекта, электростатических разрядов и пр., в микросхемах Quantum аппаратно реализована мажоритарная система голосования, которая анализирует количество успешных выборок перед принятием решения о совершившемся нажатии, работая как противодребезговый фильтр. Обработывающие событие процедуры реализуют подавление нажатий соседних клавиш и итерационную калибровку сенсора. Имеется схема автоматической компенсации дрейфа, что необходимо для надежного распознавания нажатия, когда колебания температуры на поверхности управления могут достигать значительных величин (например, микроволновые печи). Алгоритм периодически оценивает уровень базового сигнала от каждого входа, когда никто не прикасается к сенсорам, подстраивая уровень определения так, чтобы обеспечить постоянную чувствительность. В зависимости от типа микросхемы разработчики устанавливают требуемый уровень срабатывания, используя опорные конденсаторы или программируя внутренние регистры.

Спектр выпускаемых Quantum микросхем покрывает многие потребности разработчиков конечной аппаратуры от одиночных/рядных клавиш до матричных клавиатур, одно- и двумерных слайдеров и сенсорных панелей.

Так, кристалл QT118N для построения одиночной сенсорной клавиши чувствует прикосновение пальца через толстое стекло и потребляет при этом приблизительно 12 мкА от источника питания 3,3 В. Микросхема содержит 14-разрядный АЦП на переключаемых конденсаторах. Последовательно формируются импульсы накачки и измеряется уровень заряда сенсора, что обеспечивает калибровку «на лету». Единственный внешний компонент — недорогой конденсатор — определяет чувствительность устройства. Длительность цикла переноса заряда составляет 2 мкс, длительность измерительного пакета — от 0,5 до 7 мс. Типовое время между пакетами установлено как 95 мс. Но так как встроенные алгоритмы распознавания требуют как минимум четырех непрерывно следующих друг за другом активных измерительных выборок для регистрации нажатия клавиши, то после начального определения факта нажатия микросхема уменьшает время между выборками до 2 мс. Это сделано для того, чтобы не увеличивать среднее время отклика более 95 мс. Два вывода микросхемы используются для конфигурации типа выходного сигнала. Для контроля работоспособности микросхемы она постоянно вырабатывает специальный сигнал HeartBeat длительностью 350 мкс.

Еще один пример продукции компании Quantum — микросхема QT511, предназначенная для реализации кольцевых секторных панелей и слайдеров. Она использует трехэлектродные секционные площадки для формирования области, чувствительной к касанию (рис. 6). Интерполирующая логика на кристалле обеспечивает разрешение до 128 точек. Три опорных конденсатора, значения емкости которых зависят от толщины и диэлектрических свойств материала панели, определяют чувствительность сенсора. Выходные данные считываются из микросхемы по интерфейсу SPI. Внешний микроконтроллер управляет режимами работы QT511.

Сенсоры Quantum для кнопочных панелей произвольного дизайна обеспечивают индивидуальную подстройку чувствительности для каждой клавиши, позволяя разработчикам максимально гибко подстраиваться под существующие кнопки различных размеров и формы. Для OEM-клиентов компания также может изготавливать заказные однокристалльные решения под нужды малогабаритного и дешевого конечного изделия (например, кухонного блендера), используя наличие встроенного микроконтроллера.

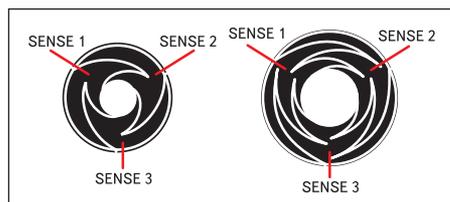


Рис. 6. Примеры кольцевых сенсорных площадок



Рис. 7. Отладочная плата для сенсора QT160

Компания выпускает демонстрационные и отладочные средства разработчика для своих микросхем.

На рис. 7 показана отладочная плата E160 для микросхемы QT160. Эта прочная конструкция определяет «нажатия» 6 клавиш через толстую пластиковую прозрачную панель. Питание платы осуществляется от батареи. E160 имеет функцию подстройки максимального времени автокалибровки, что необходимо для распознавания необычно длинных прикосновений.

Подавление касания соседних клавиш является отличительной чертой этого отладочного средства: надежно определяется максимально «сильное» из трех конкурирующих касаний.

Продукция компании Cypress Semiconductor для создания емкостных сенсоров выпускается под торговой маркой CapSense. В основе решения от Cypress лежат PSoC — программируемые системы на кристалле CY8C21x34 и CY8C24x94, которые также можно назвать микроконтроллерами для совместной обработки аналоговых и цифровых сигналов. Микросхемы PSoC отличаются от обычных микроконтроллеров именно тем, что центральное процессорное ядро M8C обрамляют конфигурируемые цифровые и аналоговые блоки, а не законченные функциональные узлы, в которых можно менять некоторые параметры, но не назначение всего узла. В общем виде цифровой блок в PSoC представляет собой конечный автомат, на базе которого пользователь может создать различные функциональные узлы (UART, SPI, таймер, PWM и т. д.), просто изменяя содержимое конфигурационных регистров. Сходным образом технология Cypress PSoC поддерживает аналоговые функциональные блоки, которые включают в себя операционные усилители, компараторы, массивы резисторов, а также блоки на переключаемых конденсаторах, что позволяет строить блоки фильтров, АЦП и ЦАП (рис. 8). Каждый модуль PSoC имеет собственный DataSheet с электрическими параметрами и стратегией разработки проекта. Средство разводки проекта, входящее в программный пакет PSoC Designer, обеспечивает визуализацию необходимых соединений.

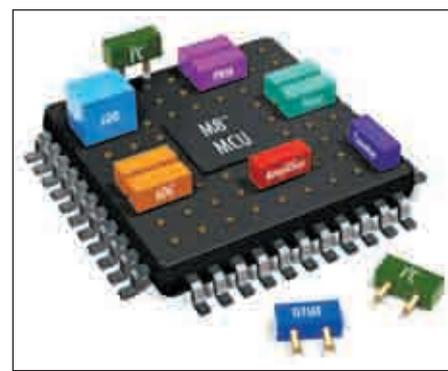


Рис. 8. Идеология микросхем PSoC

Среда разработки PSoC Designer также обеспечивает драйверы и функции API, включающие установку регистров и функции вызова на языке C или ассемблере.

Наличие стандартного процессорного ядра в PSoC выгодно отличает данное техническое решение от описанных выше. Именно наличие процессора позволяет небольшому семейству CapSense работать с самыми разными типами сенсоров — от одиночных клавиш до круговых слайдеров и сенсорных панелей. Все это обеспечивает простоту навигации в каталогах файлов музыки, изображений или видеозаписей. Микросхемы Cypress доступны для заказа в 4 типах корпусов — от стандартного SOIC16 до малогабаритного MLF с размерами 5×5 мм — и работают в диапазоне питающих напряжений 2,4–5,25 В. CY8C21x34 имеют 8 К Flash-памяти, 512 байт SRAM, а также последовательные порты I<sup>2</sup>C/SPI/UART. Микросхемы CY8C24x94 выпускаются в корпусе с 56 выводами (минимальный — 8×8 мм MLF), имеют 16 К Flash-памяти, 1024 байта SRAM, а в качестве последовательных портов — I2C/SPI/UART и USB 2.0 (full-speed).

Основным конкурентом PSoC можно считать микросхему AD7142. Но она проигрывает по возможному количеству реализуемых сенсоров — 14 против 28 у CY8C21634 или 50 у CY8C24794. Причем, при реализации тех же 14 сенсоров остальные выводы у микросхем PSoC могут использоваться в качестве дополнительных линий ввода/вывода, а микросхемы CY8C24x94 имеют на кристалле отдельный аппаратный блок USB 2.0.

Архитектура PSoC позволяет разработчикам быстро и гибко объединять разнообразные элементы для построения сенсорных панелей в конечном приложении в рамках одного проекта. «Клавиши» CapSense способны чувствовать палец через стекло или пластик толщиной до 5 мм. Только часть микросхемы PSoC нужна для поддержки технологии CapSense, остальные аналоговые и цифровые ресурсы кристалла могут использоваться по другому назначению — управлять светодиодами, двигателями, реле, источниками звукового сигнала и т. п.

В основу решения Cypress положен релаксационный генератор, который состоит из

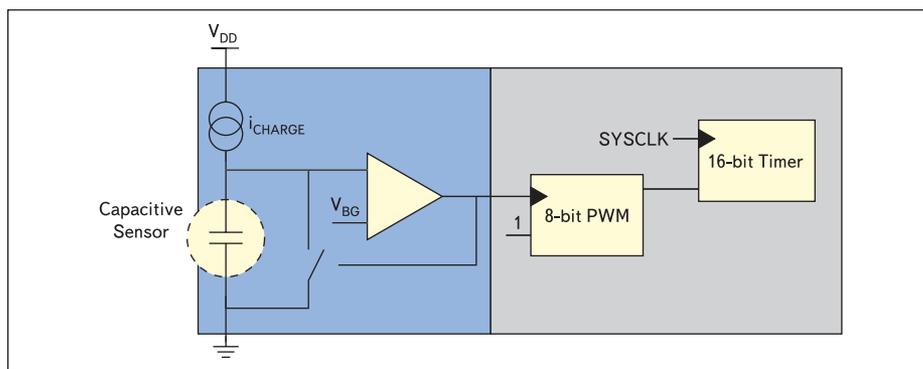


Рис. 9. Принцип работы технологии CapSense

источника тока, «чувствующей» емкости неизвестного заранее значения, компаратора и разряжающего ключа. Емкость между чувствительным электродом и общим проводом является времязадающим элементом в генераторе пилообразного напряжения. Источник постоянного тока заряжает конденсатор до тех пор, пока напряжение на нем не достигает порогового уровня. Срабатывает компаратор, замыкается ключ и конденсатор разряжается. После этого весь цикл повторяется. Этот процесс создает пилообразное напряжение, тактирующее модуль ШИМ, который в свою очередь разрешает или запрещает работу 16-битного таймера (рис. 9). Поскольку ток заряда и величина емкости определяют частоту генерации, устройство по такой схеме «чувствует» приближение емкости постороннего проводящего объекта, например, пальца пользователя. Когда палец подносится к чувствительному электроду, взаимная емкость увеличивается, и, следовательно, нужно больше времени для ее заряда. Это вызывает удлинение временного импульса блока ШИМ, а значит, увеличивается и количество импульсов основной тактовой частоты, которые считает 16-битный таймер. Если результаты подсчета при переходе от одного импульса к другому изменяются больше, чем на величину заранее установленного порога, то регистрируется присутствие проводящего объекта. Компания Cypress опубликовала целый ряд документов Application Note, которые раскрывают принцип действия CapSense и описывают подходящие формы контактных площадок, пригодных для сенсоров данного типа.

Технология CapSense предоставляет отличные возможности в первую очередь для мобильных, носимых и портативных устройств именно из-за непредсказуемости их использования в различных внешних условиях. Программное обеспечение Cypress через функции API позволяет разработчикам компенсировать различные дрейфовые внешние воздействия. Можно периодически запускать корректирующий алгоритм, который обновляет конфигурационный регистр каждого электрода. Можно устанавливать как порог шума, так и уровни срабатывания сенсора, позволяя

действующей программе подстраивать работу системы, испытывающей на себе частые изменения внешних условий. Можно также осуществлять баланс энергопотребления устройства и чувствительность определения нажатия путем настройки на конкретный тип и конфигурацию сенсорной панели, включая покрытие различными материалами. Использование слайдеров, например, обеспечивает высокий уровень функциональности конечного дизайна и значительно более высокое разрешение по сравнению с набором отдельных сенсорных клавиш. Увеличение разрешения достигается путем программной интерполяции. Изменение емкости при касании измеряется на всех чувствительных элементах слайдера, и значения емкости на соседних элементах используются для определения позиции.

Возможно также достижение еще большего разрешения или увеличения размеров слайдера путем дуплексирования выводов (рис. 10). Каждый вход CapSense PSoC одновременно присоединяется к двум чувствительным элементам. Эти пары чувствительных элементов размещены в определенном геометрическом порядке друг относительно друга по длине слайдера, что исключает ошибки в определении, какая из сторон слайдера в настоящий момент является активной. Программный алгоритм, вызываемый в качестве API-функции, определяет случайные выбросы и место касания.

Компания Cypress постоянно работает над совершенствованием технологии CapSense. В первую очередь внимание уделяется температурной компенсации и стабильности источника тока. Новые версии кристаллов в этой серии имеют на борту линейный стабилизатор и обладают более низким энергопотреб-

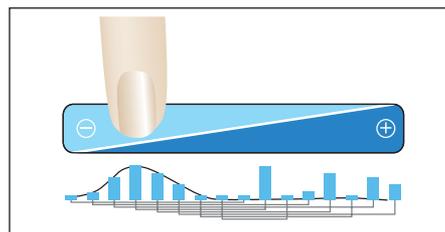


Рис. 10. Дуплексирование для линейного слайдера

лением. Cypress также активно работает над снижением восприимчивости кристалла к различным электромагнитным помехам.

Отладочный набор CAPSense от Cypress содержит базовую печатную плату с размерами 127×77 мм, на которой расположена микросхема сенсора CY8C21001, линейный источник питания 5 В, пьезоизлучатель и чувствительные области для 7 кнопок и линейного слайдера (рис. 11). Кристалл CY8C21001 эмулирует все микросхемы CapSense PSoC. Посредством штыревых разъемов разработчику обеспечен доступ к порту IC микросхемы и линиям для внутрисхемного программирования. К отладочному набору прилагается программатор MiniProg для PSoC вместе с mini-USB кабелем для связи с внешним компьютером. Двухрядный 16-символьный ЖКИ, расположенный на плате, отображает статус системы. Через дополнительный разъем RJ-45 можно подключить внешний внутрисхемный эмулятор ICE-Cube. Данный эмулятор является ключевым компонентом более дорогого и серьезного отладочного набора PSoC CY3215DK, в состав которого также входит лицензия на C-компилятор пакета PSoC Designer.



Рис. 11. Отладочный набор CY3212-CAPSense

В заключение отметим еще раз, что современные сенсорные переключатели являются реальными конкурентами для существующих электромеханических решений, в том числе и по стоимости. Разнообразие доступных сенсорных технологий действительно предоставляет разработчику широкие возможности для реализации интерфейса ввода информации в каждом конкретном приложении. ■

## Литература

1. Гармаев Б. Мануальное воздействие: технологии сенсорных экранов // [www.terralab.ru/input/37214](http://www.terralab.ru/input/37214)
2. Иванов В. С., Чепурин И. Н. Новые решения Freescale Semiconductor для встраиваемых систем управления и сбора информации // [www.freescale.com/files/abstract/global/RUSSIA\\_ART\\_3.doc](http://www.freescale.com/files/abstract/global/RUSSIA_ART_3.doc)
3. Marsh D. Capacitive touch sensors gain fans // EDN. 2006. № 13.
4. [www.analog.com](http://www.analog.com)
5. [www.cypress.com](http://www.cypress.com)
6. [www.qprox.com](http://www.qprox.com)
7. [www.freescale.com](http://www.freescale.com)