

# Технология mTouch. Создание емкостных клавиатур и сенсоров.

## Часть 1. Обзор методов измерения емкости. Аппаратные методы повышения помехоустойчивости, экранирование

**В первой части статьи представлен обзор основных методов измерения, используемых при реализации емкостных сенсорных панелей на основе технологий Microchip. Особое внимание уделено методу CVD, обладающему следующими преимуществами: аппаратное подавление наводимых помех, широкий выбор микроконтроллеров для реализации за счет применения обычной периферии и малое число внешних компонентов.**

Илья АФАНАСЬЕВ

### Введение

Наверняка каждый из нас хоть раз сталкивался, а многие уже давно пользуются приборами с емкостными кнопками и емкостными экранами. Сенсорными панелями оборудованы бытовые приборы, компьютерная техника (Touch Pad ноутбуков), платежные терминалы, планшетные компьютеры, смартфоны и другие массовые приборы. Преимущества сенсорных технологий очевидны — увеличение надежности по сравнению с контактными кнопками и улучшение внешнего вида приборов.

Компания Microchip уделяет большое внимание сенсорным технологиям и предлагает разработчикам различные методы работы с сенсорами; микроконтроллеры (МК), поддерживаемые библиотеками программ; специализированные микросхемы для работы как с одиночными емкостными сенсорами, так и с емкостными экранами с поддержкой multi Touch, распознавания 2D- и 3D-жестов. В статье представлен анализ технологий, предлагаемых компанией Microchip Technology под общим наименованием mTouch.

### Основы работы емкостной кнопки и сенсоров приближения (Proximity)

В основе работы с емкостными сенсорами лежит измерение емкости. Емкость конденсатора описывается формулой:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 (S/d), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_r$  — диэлектрическая проницаемость материала;  $S$  — площадь конденсатора, а  $d$  — расстояние между его обкладками.

Обычно емкостный сенсор — это участок металлизации на печатной плате (хотя это не обязательно так — другие варианты мы рассмотрим позже). Емкость такого сенсора определяется базовой (паразитной) емкостью сенсора ( $C_p$ ) и емкостью  $C_F$ , вносимой при «касании» сенсора или покрывающей его лицевой панели либо при приближении к сенсорной поверхности при реализации датчика приближения. Таким образом, детектирование касания сенсора — это задача измерения емкости  $C_F$ . Причем нам не нужно знать абсолютное значение вносимой емкости, главное — детектировать изменение емкости.

Общая емкость сенсора  $C_{SENSOR}$  определяется как:

$$C_{SENSOR} = C_F + C_p \quad (2)$$

где  $C_F$  — емкость, вносимая при «касании» сенсора;  $C_p$  — паразитная емкость сенсора.

В зависимости от конфигурации печатной платы величина паразитной емкости может достигать значений 50–100 пФ, в то время как вносимая при касании емкость лежит в диапазоне 1–15 пФ. Таким образом, задача определения «касания» сенсора состоит в детектировании достаточно малых изменений емкости.

### Методы измерения емкости

Существует несколько методов измерения емкости, рассмотрим некоторые из них. Самый простой способ измерения емкости — это частотный метод. Здесь емкостный сенсор является частотозадающим элементом генератора. Для построения такого генератора может использоваться интегрированная в PIC-микроконтроллеры периферия — от простого компаратора [1] до связки компараторов с RS-триггером [2] или специализированного периферийного модуля CSM [3].

Простейшую емкостную кнопку или датчик приближения можно сделать на одном 6-выводном микроконтроллере с интегрированным компаратором PIC10F и двух внешних элементах — диоде и резисторе [1]. Более совершенные схемы для реализации многоканального сенсорного управления могут быть построены с помощью встроенного RS-триггера и двух компараторов (рис. 1) или специализированного периферийного модуля CSM (Capacitive Sensing Module). (Это тоже частотный метод измерения, при котором не нужны внешние элементы.)

Количество сенсоров легко увеличить за счет интегрированного входного мультиплексора (рис. 2).

Недостатком частотного метода является сравнительно низкое быстродействие и больший уровень генерируемых шумов.

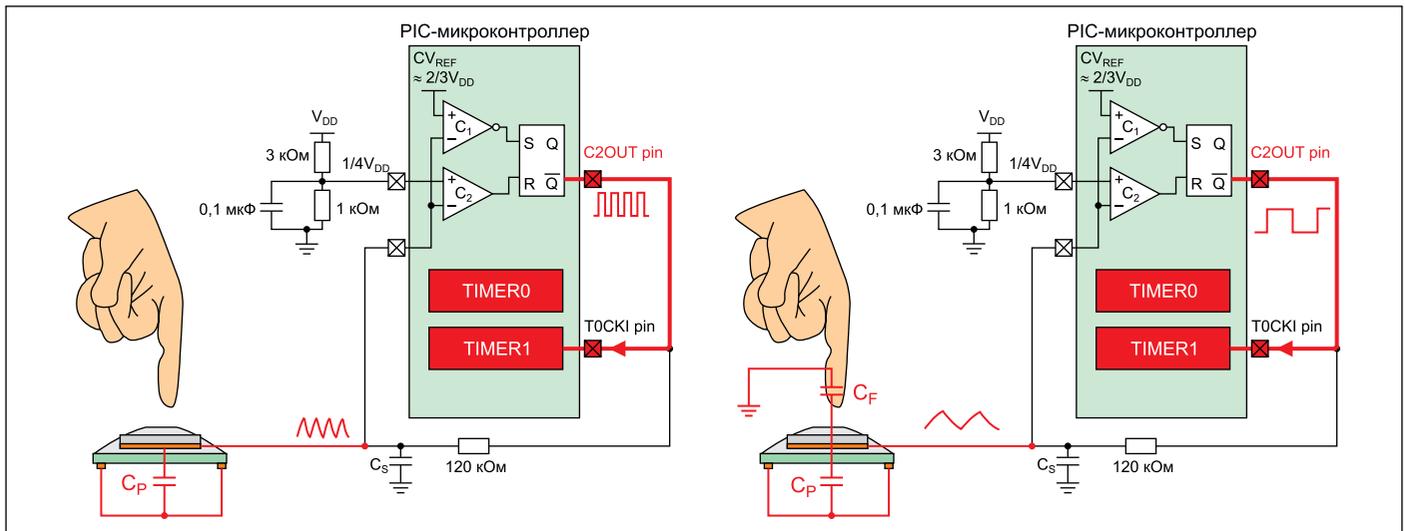


Рис. 1. Пример реализации сенсорной кнопки на RS-триггере и двух компараторах, встроенных в микроконтроллер

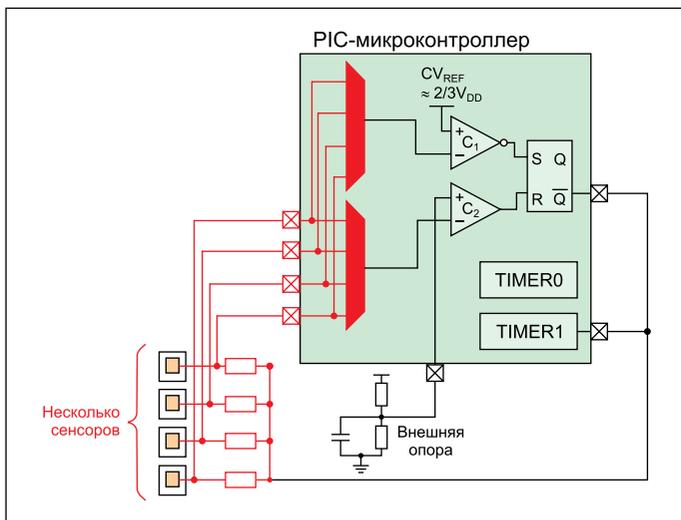


Рис. 2. Увеличение числа емкостных кнопок за счет использования встроенного мультиплексора

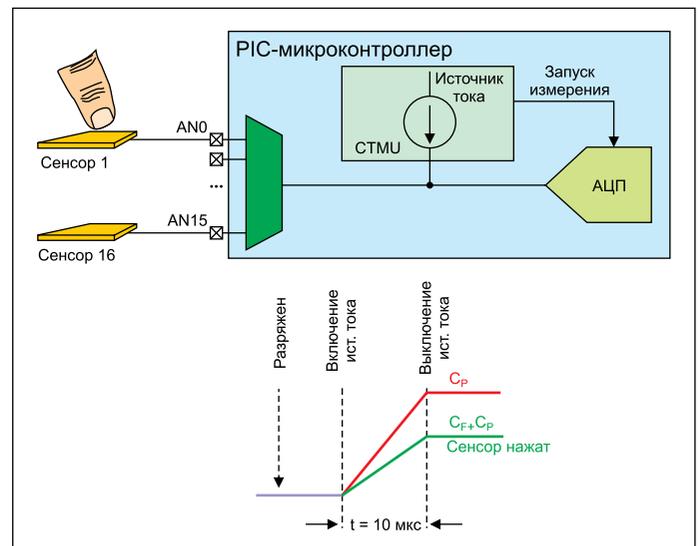


Рис. 3. Измерение емкости с помощью модуля CTMU

Подробное описание применения частотного метода при построении емкостных клавиатур есть в [4].

Другой метод измерения емкости основан на заряде емкости и измерении полученного напряжения после фиксированного интервала времени. Напряжение на конденсаторе определяется выражением:

$$V = I(t/C), \quad (3)$$

где  $I$  — ток;  $t$  — время заряда;  $C$  — емкость.

Многие микроконтроллеры семейств PIC18, PIC24 и PIC32 имеют аппаратный модуль измерения времени заряда (Charge Time Measurement Unit, CTMU), в состав которого входит программируемый источник тока. При постоянном токе и заданном времени заряда напряжение на конденсаторе будет зависеть только от емкости конденсатора (рис. 3). Подробно об измерении емкости с помощью модуля CTMU рассказано в [4].

### Емкостный делитель напряжения

Рассмотрим метод измерения емкости с помощью емкостного делителя напряжения (Capacitive Voltage Divider, CVD). Метод основан на уравнивании зарядов двух емкостей. Например, мы имеем два конденсатора: емкость одного из них постоянна ( $C_1$ ), а емкость другого ( $C_2$ ) может меняться. Если зарядить  $C_1$  до напряжения  $V_{DD}$  и подключить к разряженному  $C_2$ , то часть заряда «перетечет» из  $C_1$  в  $C_2$  и изменится общее напряжение на обоих конденсаторах. Результирующее напряжение будет зависеть от соотношения емкостей  $C_1$  и  $C_2$ , при изменении одной из емкостей так же будет меняться и напряжение.

Для применения метода CVD для построения сенсорных клавиатур в качестве  $C_1$  используют емкость устройства выборки и хранения (УВХ) АЦП ( $C_{HOLD}$ ), а в качестве  $C_2$  — емкость сенсора ( $C_{SENSOR} = C_F + C_P$ ).

Метод CVD имеет несколько преимуществ:

- Используется только модуль АЦП микроконтроллера, что позволяет применять этот метод для большинства микроконтроллеров.
- Низкая температурная зависимость: при изменении температуры от  $-20$  до  $+60$  °C смещение сигнала изменяется лишь на 1–3%.
- Низкое влияние изменения напряжения питания.
- Возможность дифференциального измерения — для увеличения чувствительности и фильтрации низкочастотных помех.

Метод CVD позволяет измерять емкость сенсора относительно емкости устройства выборки и хранения АЦП. Спецификация PIC-микроконтроллеров определяет типовое значение емкости УВХ АЦП, однако из-за технологических особенностей производства величина емкости в зависимости от экзем-

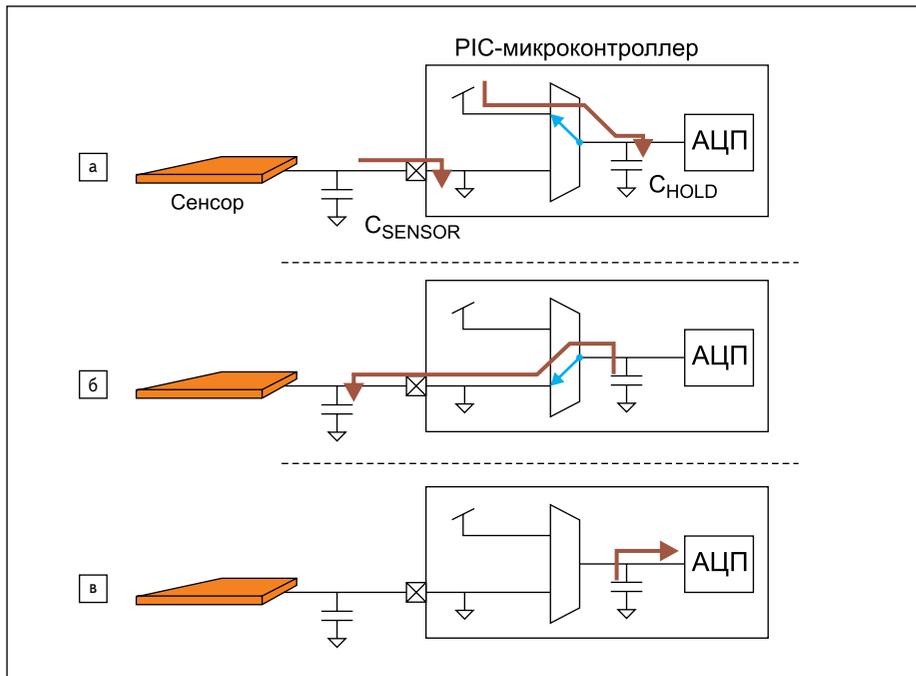


Рис. 4. Этапы измерения емкости методом CVD:  
а) предварительный заряд емкостей; б) уравнивание напряжений; в) измерение напряжения

пляра микроконтроллера может отличаться на величину до 20%. По этой причине метод CVD не рекомендован для измерения абсолютного значения емкости. Емкостные сенсоры приближения и касания не требуют измерения абсолютного значения емкости, главное — точно измерить изменение емкости. Именно для этой задачи предназначен метод CVD.

Рассмотрим три стадии последовательности действий при измерении емкости с помощью метода CVD.

1. Предварительный заряд (рис. 4а). Обе емкости заряжаются до фиксированных разнополярных значений напряжения. (\$C\_{HOLD}\$ заряжен до напряжения питания \$V\_{DD}\$, \$C\_{SENSOR}\$ — до \$V\_{SS}\$). Вывод МК настроен как выход, с уровнем «лог. 0».) Тогда заряды на емкостях:

$$Q_{HOLD} = V_{HOLD} C_{HOLD}$$

$$Q_{SENSOR} = V_{SENSOR} C_{SENSOR} \quad (4)$$

2. Выравнивание зарядов (рис. 4б). АЦП подключается к входу с сенсором, то есть емкость УВХ подключается параллельно с емкостью сенсора. Вывод микроконтроллера с сенсором настраивается как вход.

$$C_{TOTAL} = C_{HOLD} + C_{SENSOR} \quad (5)$$

3. Измерение результирующего напряжения (рис. 4в) \$V\_{SAMPLE}\$:

$$V_{SAMPLE} = \frac{V_{HOLD} C_{HOLD} + V_{SENSOR} C_{SENSOR}}{C_{HOLD} + C_{SENSOR}} \quad (6)$$

При дифференциальном CVD-методе проводятся два последовательных измерения: в первом измерении (стадия А) \$C\_{HOLD}\$ изначально заряжен, а \$C\_{SENSOR}\$ разряжен, а во втором измерении (стадия В) наоборот: \$C\_{HOLD}\$ изначально разряжен, а \$C\_{SENSOR}\$ заряжен (рис. 5).

Тогда измеренные напряжения для каждой стадии А и В:

$$\begin{aligned} V_A &= V_{SAMPLE} \\ \text{при } V_{HOLD} &= V_{DD}, V_{SENSOR} = 0, \\ V_B &= V_{SAMPLE} \\ \text{при } V_{HOLD} &= 0, V_{SENSOR} = V_{DD}. \end{aligned} \quad (7)$$

В дифференциальном методе интерес представляет разница полученных напряже-

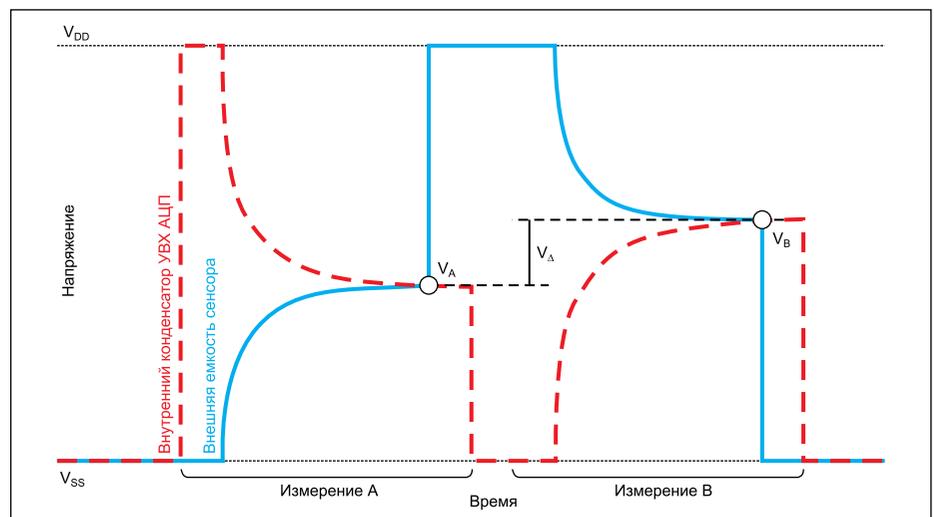


Рис. 5. Дифференциальный CVD-метод измерения

ний (рис. 6), потому что такое измерение позволяет фильтровать помехи:

$$V_{\Delta} = |V_B - V_A|. \quad (8)$$

Тогда для двух состояний сенсора (нажатом и не нажатом) следует:

$$V_{\Delta PRESSION} = \frac{C_P + C_F - C_{HOLD}}{C_P + C_F + C_{HOLD}} V_{DD},$$

$$V_{\Delta RELEASED} = \frac{C_P - C_{HOLD}}{C_P + C_{HOLD}} V_{DD}. \quad (9)$$

Время между измерениями А и В должно быть минимизировано для увеличения полосы и подавления влияния низкочастотных помех.

Для уменьшения влияния высокочастотных шумов на результаты измерений рекомендуется установить резистор между сенсорной площадкой и входом микроконтроллера.

С точки зрения помехоустойчивости и максимальной точности измерения идеальным является вариант, когда установившееся напряжение \$V\_{SAMPLE}\$ при измерении А и В равно примерно половине напряжения питания. Это можно обеспечить, если емкости УВХ и сенсора одинаковы. На практике сложно получить такую трассировку печатной платы и конфигурацию сенсоров для обеспечения равенства внутренней и внешних емкостей. Если внутренняя емкость будет больше внешней (или наоборот), то установившееся напряжение будет пропорционально смещено в ту или иную сторону относительно \$V\_{DD}/2\$. Для решения этой проблемы можно повторить стадию выравнивания зарядов для последовательного приближения установившегося напряжения к значению \$V\_{DD}/2\$ (многоступенчатое накопление заряда).

Рассмотрим два примера.

1. Внешняя емкость намного больше, чем емкость УВХ. В этом случае перед второй

стадией уравнивания повторно подзаряжем меньшую емкость УВХ (рис. 7а) и переносим заряд в емкость сенсора, тем самым приближая установившееся значение напряжения к уровню  $V_{DD}/2$ .

- Внешняя емкость намного меньше, чем емкость УВХ. В этом случае перед второй стадией уравнивания подзаряжаем меньшую емкость сенсора (рис. 7б).

### Влияние длительности стадий CVD на результат измерений

Длительность первой стадии (предварительный заряд) мало влияет на чувствительность системы. Однако желательно, чтобы на этой стадии емкости были полностью заряжены/разряжены, так как иначе изменение емкости сенсора приведет к разному начальному напряжению на сенсоре при нажатом и не нажатом состоянии.

Во время уравнивания зарядов вывод микроконтроллера переводится в состояние входа (высокоимпедансное состояние). Поэтому любой низкоимпедансный источник сигнала рядом с сенсором будет влиять на результат установившегося напряжения. Другими словами, в этот период микроконтроллер наиболее подвержен влиянию помех, и необходимо минимизировать время нахождения в этой стадии. Однако слишком малое время не позволит зарядам уравниваться, и чувствительность сенсора уменьшится.

Время между измерениями А и В должно быть минимальным для подавления низкочастотного шума, наводимого на сенсоры. Для дополнительного подавления низкочастотных шумов можно ввести небольшую случайную задержку между измерениями А и В.

Время между измерениями одного канала методом CVD (между одним измерением А и другим измерением В) не должно быть постоянным для уменьшения влияния шумов, вызванных гармониками частоты опроса сенсоров.

**Примечание.** При всей видимой простоте метода CVD специалисты Microchip не рекомендуют реализовывать его самостоятельно. Компания Microchip предлагает программные библиотеки *tTouch*, в которых представлено автоматическое сканирование каналов. Библиотеки *tTouch* отлажены и протестированы для обеспечения высокого уровня подавления шумов.

### Аппаратный модуль CVD

В некоторые новые PIC-микроконтроллеры входит модуль АЦП с возможностью формирования аппаратного измерения CVD. Аппаратный модуль CVD добавляет следующую функциональность 10-битного АЦП:

- Автоматическое формирование последовательности стадий дифференциального CVD на любом аналоговом входе.
- Два набора регистров для хранения результатов преобразования АЦП на стадиях А и В.

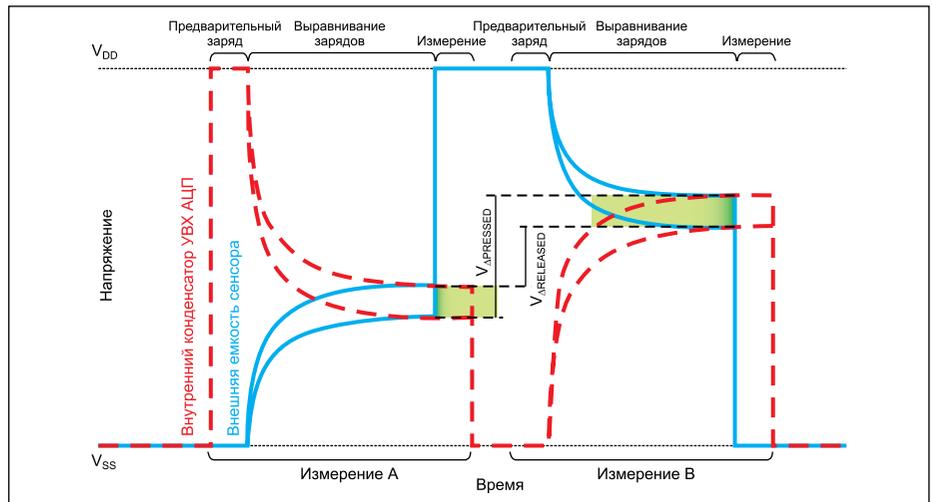


Рис. 6. Диаграммы напряжений при нажатом и не нажатом сенсоре

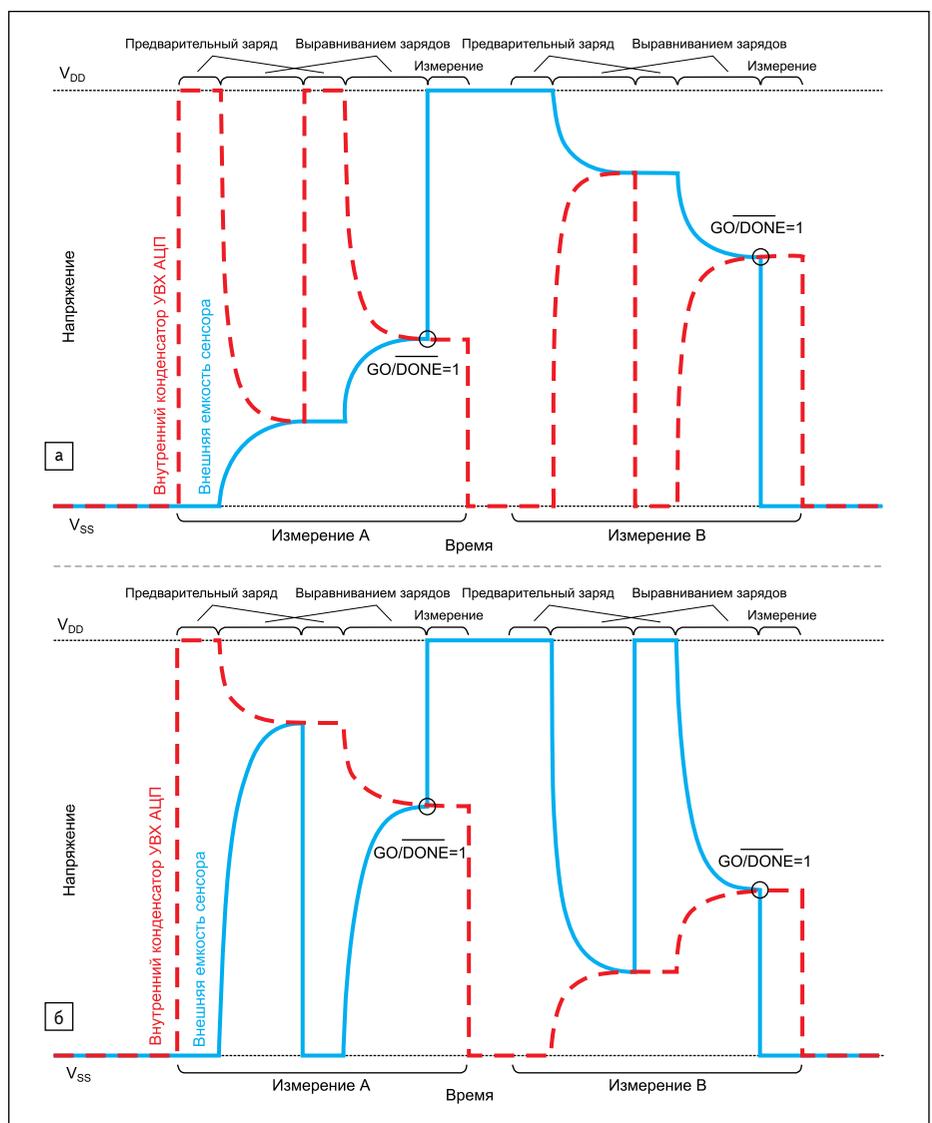


Рис. 7. Двухшаговый дифференциальный CVD-метод

- Программно подключаемый к входу АЦП набор конденсаторов (от 0 до 28 пФ с шагом 4 пФ).
- Конфигурируемое время задержек для стадий предварительного заряда и уравнивания зарядов.

- Синхронное управление защитным проводником (о влиянии защитного проводника см. в разделе «Способы увеличения помехоустойчивости»).

- Опциональное подключение входа АЦП для наблюдения формы сигналов.

Набор внутренних конденсаторов поможет в случае, если емкость сенсора гораздо больше емкости УВХ. При подключении дополнительных внутренних конденсаторов можно приблизить установившееся напряжение к величине  $V_{DD}/2$ .

### Аппаратные способы увеличения помехоустойчивости.

#### Советы по проектированию

Для увеличения устойчивости к помехам можно применить экранирование. Однако к экранированию нужно относиться с учетом следующих моментов.

Экранирующая заливка верхнего слоя печатной платы, выполненная с малым зазором до сенсора, увеличит величину емкости  $C_p$  и уменьшит чувствительность (рис. 8б). Рекомендуется заземление верхнего слоя печатной платы выполнять сплошной заливкой (увеличивает вносимую емкость  $C_F$ ) с зазором до сенсора, равным не менее одного-двух значений толщины лицевой панели.

Экранирование (заземление) нижнего слоя существенно уменьшает чувствительность сенсора (рис. 8в) и увеличивает емкость  $C_p$ , что в свою очередь снижает чувствительность системы (меньше соотношение  $C_F/C_p$  — меньше величина полезного сигнала).

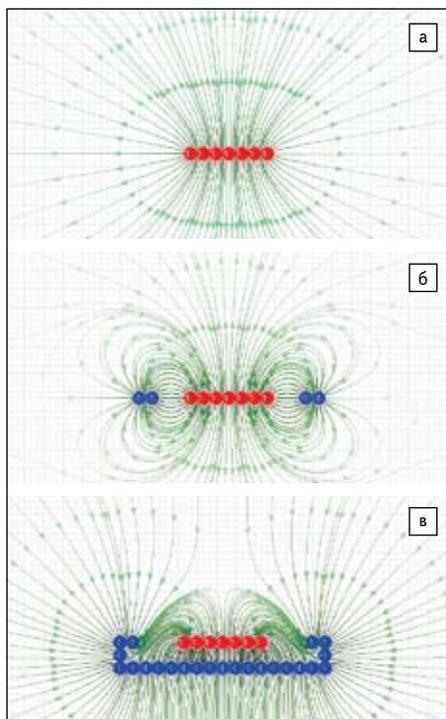


Рис. 8. Влияние экранирования на чувствительность емкостного сенсора

**Таблица 1. Сравнение методов измерения**

Метод	Необходимая периферия	Быстродействие (время на канал)	Потребление	Достоинства и недостатки
Частотный	Компаратор, RS-триггер или модуль CSM, таймер	Единицы — десятки мс	Среднее	Недостатки: шумы Достоинства: возможность работы с емкостными экранами (с модулем CSM)
CVD	АЦП или аппаратный модуль CVD	Десятки мкс	Низкое	Хорошо работает, если величина емкости сенсора меньше или сопоставима с емкостью УВХ АЦП. Применим для измерения относительного изменения емкости. Подавляет НЧ-помехи
CTMU	Модуль CTMU	Единицы мкс	Низкое	Больше точность, чем у CVD, при емкости сенсора больше емкости УВХ. Применим для измерения относительного и абсолютного значения емкости

**Таблица 2. Параметры микроконтроллеров с аппаратным модулем CVD**

Микроконтроллер	Память		10-разрядный АЦП с CVD	UART	I <sup>2</sup> C/SPI	Число выводов
	Программ, кслов	ОЗУ, байт				
PIC12LF1552	2	256	5	—	1	8
PIC16F1512	2	128	17	1	1	28
PIC16F1513	4	256	17	1	1	28

Поэтому сплошное экранирование под сенсором применять не рекомендуется. Экранирующий полигон в виде сетки (рис. 9) будет иметь меньшую величину базовой емкости, увеличит чувствительность сенсора и сохранит защиту сенсора от помех [5].

Существенно повысить чувствительность можно путем введения защитного проводника-кольца (Guard Ring), который, по сути, является тем же низкоимпедансным экраном, но не с потенциалом «земли», а с потенциалом сенсора (рис. 10).

Защитное кольцо вокруг сенсора экранирует емкостный сенсор от внешних помех. При этом, если защитный проводник имеет тот же потенциал, что и защищаемый, то емкость между сенсором и экраном будет равна нулю (минимизировано значение  $C_p$ ). Минимизированы будут также значения утечки, и сенсор защищен от помех.

Классическим способом управления защитным кольцом является применение буферного усилителя, повторяющего напряжение сенсора на окружающее защитное кольцо [6]. Однако такая схема удорожает конструкцию и требует дополнительных внешних элементов.

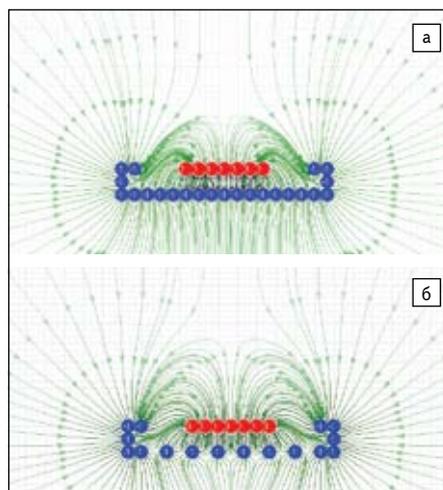


Рис. 9. Изменение чувствительности сенсора от типа экрана

Наиболее просто можно реализовать драйвер защитного кольца с помощью порта микроконтроллера или двух выходов порта микроконтроллера с двумя резисторами (рис. 11).

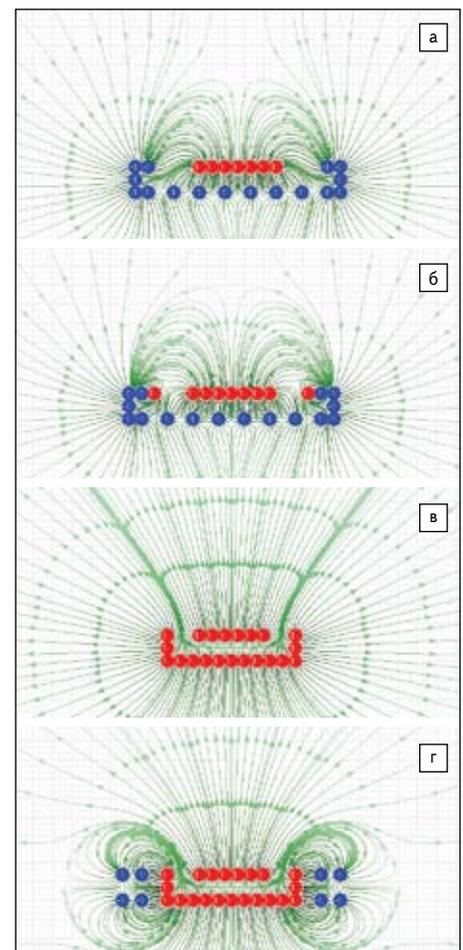


Рис. 10. Влияние на чувствительность емкостного сенсора Guard Ring:  
а) экранирование без защитного кольца;  
б) экранирование с защитным кольцом вокруг сенсора;  
в) экранирование защитным кольцом, потенциал экрана равен потенциалу сенсора;  
г) влияние других проводников и компонентов на защищенный сенсор

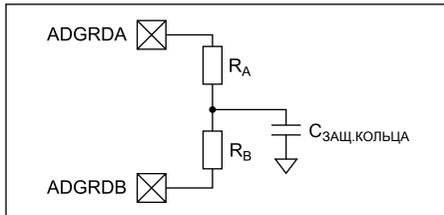


Рис. 11. Схема управления защитным кольцом с помощью портов ВВ

$C_{GUARD}$  — емкость защитного кольца на печатной плате. Значения сопротивления резисторов  $R_A$  и  $R_B$  подбираются экспериментально для максимального совпадения профиля напряжения на защитном кольце с профилем измерения емкости. Простым делителем сложно добиться совпадения профилей изменения потенциалов на сенсоре и защитном кольце (рис. 12б), однако, как показывают практические результаты, такой метод дает 50–70% эффективности

### Рекомендации по трассировке печатной платы с защитным проводником

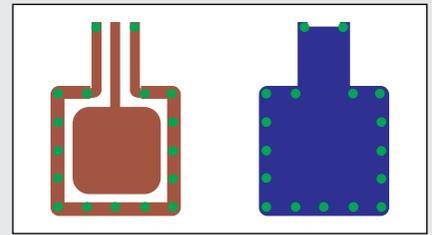


Рисунок. Емкостная сенсорная кнопка с защитным проводником: а) верхний слой печатной платы; б) нижний слой печатной платы

Защитное кольцо рекомендуется располагать на расстоянии 2–3 мм от площадки сенсора. Ширина защитного проводника — примерно 1 мм. Связь с защитным слоем на обратной стороне платы следует осуществлять через ряд переходных отверстий с шагом 3–8 мм. Проводник от сенсорной площадки до вывода PIC-микроконтроллера, а также защитные проводники рекомендуется выполнять шириной 0,1–0,3 мм, расстояние между сенсорным проводником и защитным — менее 0,5 мм (рисунок).

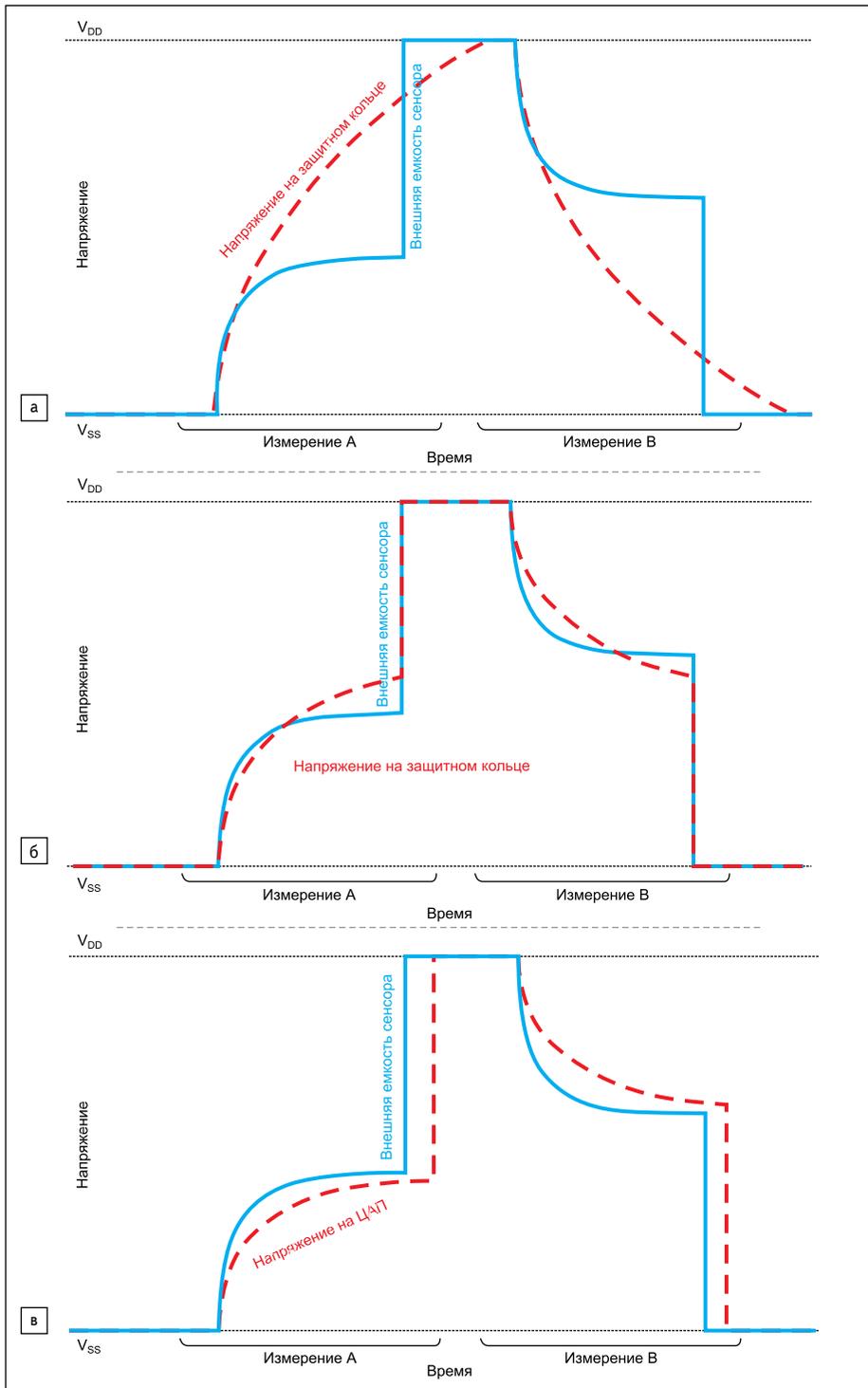


Рис. 12. Диаграмма управления защитным кольцом: а) с помощью одного порта ВВ; б) с помощью двух портов ВВ; в) с помощью ЦАП

при сравнении со случаем полного следования профилю изменения потенциала на сенсоре.

В некоторых новых микроконтроллерах Microchip введен аппаратный модуль CVD с возможностью управления драйвером защитного проводника Guard Ring.

Другой способ управления защитным кольцом — использование ЦАП микроконтроллера. Этот метод позволяет, во-первых, более точно управлять профилем напряжения на защитном проводнике, а во-вторых, достичь 70–90% эффективности по сравнению с классическим методом с буферным усилителем.

В следующей части мы рассмотрим вопросы проектирования программного обеспечения, его настройки, а также замечания по реализации лицевых панелей сенсорных клавиатур.

### Литература

1. AN1202. Capacitive Sensing with PIC10F. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
2. AN1101. Introduction to Capacitive Sensing. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
3. AN1268. mTouch Solution using the Period CSM Measurement. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
4. Никифоров И. Решения Microchip Technology для реализации сенсорного управления // Компоненты и технологии. 2008. № 9.
5. AN1334. Techniques for Robust Touch Sensing Design. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В трех томах: Т. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1993.