

Преобразователи емкость-код с промежуточным времяимпульсным преобразованием

Рассмотрен метод преобразования емкость-код с промежуточным времяимпульсным преобразованием с использованием относительного и разностного алгоритмов обработки результатов измерения, устраняющих влияние нестабильности времязадающих цепей преобразователя на результат измерения. Метод может быть реализован на базе современных универсальных микроконтроллеров. Повышение скорости преобразования может быть достигнуто с помощью пикосекундных преобразователей время-код фирмы Asat.

Показано, как использование относительного алгоритма преобразования емкость-время-код наряду с другими запатентованными методами обработки результатов измерения и технологическими достижениями позволили фирме Asat создать семейство устройств PICOCAP, обладающих уникальными возможностями по диапазону измеряемых емкостей (от долей пикофарад до сотен нанофарад), разрешающей способности (до десятка аттофарад (10^{-18} Ф), по быстродействию (частота преобразования до сотен кГц), а также имеющих малую потребляемую мощность (токи потребления в микроамперном диапазоне).

Юрий ТРОИЦКИЙ
troickii_yurii@mail.ru

Расширение областей применения современных емкостных датчиков приводит к ужесточению требований к средствам преобразования емкость-код, как по разрешающей способности, так и по времени преобразования и помехозащищенности. При этом следует учитывать, что номинальные значения основных емкостных датчиков лежат в пределах от единиц пикофарад до сотен и выше нанофарад. Требования к частоте преобразования измеряемого параметра может изменяться от десятков минут (например, при измерении влажности зерна) до десятков килогерц (в том числе для датчиков ускорения, микрофонных датчиков или МЭМС-датчиков).

На сегодня наивысшую точность преобразования емкость-код обеспечивают преобразователи с $\Sigma\Delta$ -модуляцией. Так, микросхема AD7745/AD7746 24-битного преобразователя CDC позволяет обеспечивать преобразование емкость-код с эффективной разрешающей способностью до 4 аФ, что соответствует 21-разрядной эффективной разрешающей способности АЦП. Микросхема имеет встроенные средства калибровки смещения и коэффициента передачи преобразователя, а также встроенный термометр, позволяющий учесть темпера-

турные погрешности измерения [1]. К недостаткам устройства следует отнести ограниченный диапазон преобразуемых емкостей (до 17 пФ) и низкую частоту преобразования (от 10 до 90 Гц).

Хрестоматийным методом преобразования емкость-код является метод с промежуточным времяимпульсным преобразованием, основанным на измерении времени заряда (разряда) исследуемой емкости через эталонный резистор и последующим преобразованием время-код [2]. К недостаткам метода нужно отнести влияние на точность измерения отклонения от номинала эталонного резистора в зарядной цепи конденсатора и резисторов, формирующих фиксированный уровень разряда, а также напряжение смещения и входного сопротивления компаратора напряжения. Решение этих проблем обеспечивается при использовании разностного (subtraction algorithm) или относительного (ratiometric algorithm) алгоритма и применении современных информационных технологий.

В основе таких алгоритмов лежит метод последовательного кодоимпульсного преобразования эталонной емкости C_r и емкости датчика C_s с последующим вычитанием или делением полученных результатов.

Преобразование происходит в следующем порядке: эталонная емкость C_r ключом SW1 (рис. 1) подключается к цепи заряда/разряда и разряжается через ключ SW2 в течение некоторого времени t_{ch} , затем замыканием ключа SW2 реализуется режим заряда емкости C_r от источника напряжения через резистор R до напряжения U_{ref} фиксируемого компаратором напряжения через интервал времени t_p , фиксируемый преобразователем емкость-время-код. Переход в режим заряда емкости и одновременный запуск преобразователя емкость-время-код сигналом «старт» инициируется центральным процессором (ЦП). Останов преобразователя время-код осуществляется сигналом «стоп», формируемым компаратором напряжения через время t_p и определяется выражением:

$$U_{ref} = U \left(1 - e^{-\frac{t_p}{\tau_r}} \right), \quad (1)$$

где $\tau_r = R \times C_r$ — постоянная времени цепи заряда эталонной емкости.

Время t_p с помощью преобразователя время-код преобразуется в код. Затем ключ SW1 перебрасывается в состояние «б», и в той же последовательности с использова-

нием того же резистора и компаратора напряжения осуществляется преобразование емкости датчика SW1 во временной интервал t_s :

$$U_{ref} = U \left(1 - e^{-\frac{t_s}{\tau}} \right). \quad (2)$$

Совместное решение уравнений (1) и (2) дает следующие соотношения:

$$t_s/t_r = C_s/C_r \quad (3)$$

или

$$\Delta t = \pm \Delta C \times R, \quad (4)$$

где $\Delta t = t_s - t_r$, $\Delta C = C_s - C_r$.

Выражение (3) реализуется ЦП при использовании относительного алгоритма преобразования. Как следует из (3), результат преобразования не зависит от нестабильности напряжения источника заряда U и источника опорного напряжения U_{ref} , а также от нестабильности величины сопротивления цепи заряда R и порога срабатывания компаратора напряжения, но зависит от времени его срабатывания (рис. 2). Последний фактор может оказать существенное влияние при использовании универсальных микроконтроллеров.

Выражение (4) реализуется с помощью разностного алгоритма преобразования. Как следует из выражения, в этом случае сохраняется независимость результатов преобразования от нестабильности источников напряжения, порога срабатывания компаратора и времени его задержки, но сохраняются жесткие требования к точности сопротивления цепи заряда R .

Результаты преобразования t_s и t_r в код можно представить как:

$$\begin{aligned} N_s &= t_s \times f_{idc} \\ N_r &= t_r \times f_{idc} \end{aligned}$$

где f_{idc} — частота квантования преобразователя время-код. Выбор значения f_{idc} определяется совокупностью требований, прежде всего обеспечением требуемой разрешающей способности. Наиболее наглядно этот выбор можно проиллюстрировать на примере реализации разностного алгоритма, описываемого выражением (4).

В этом случае результат времяимпульсно-го преобразования можно представить как:

$$\Delta N = f_{idc} \times \Delta C \times R. \quad (5)$$

Отсюда требования к частоте квантования определяются как:

$$f_{idc} \geq 1/\Delta C_{max} \times R \times \delta C, \quad (6)$$

$$\delta C = \Delta \Delta C / \Delta C_{max} = 1/\Delta N_{max}, \quad (7)$$

где δC — относительная погрешность квантования преобразуемого разностного зна-

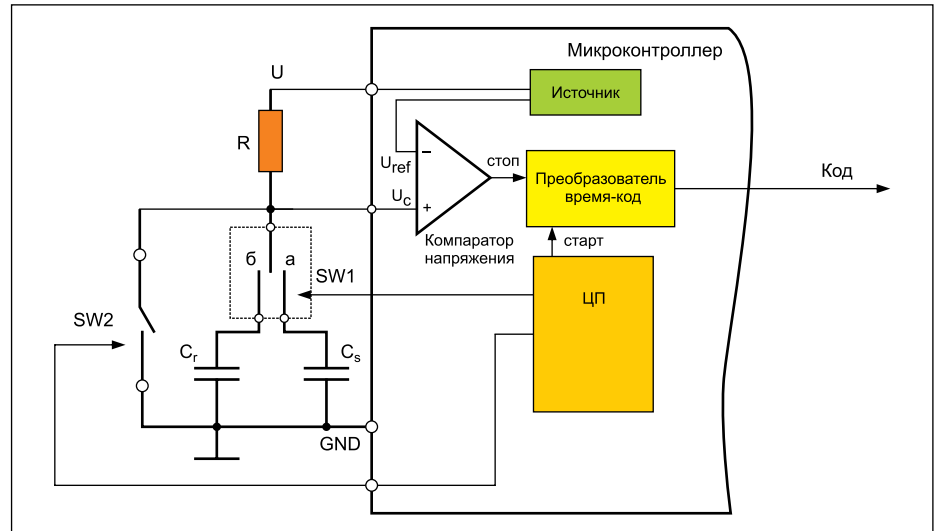


Рис. 1. Структурная схема разностного и относительного алгоритма преобразователя емкость-время-код

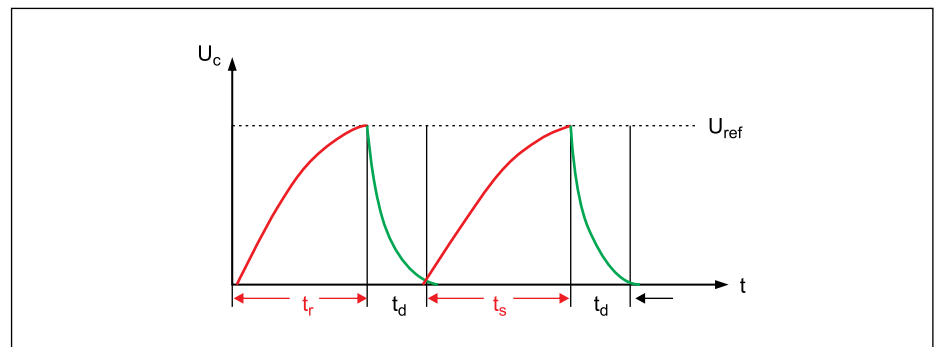


Рис. 2. Временные диаграммы заряда/разряда эталонной и контролируемой емкости

чения емкости ΔC_{max} ; ΔC — абсолютное значение квантованной величины емкости; $\Delta N_{max} = 1/\delta C$ — цифровой эквивалент величины ΔC_{max} .

Величина сопротивления R ограничивается требованиями к времени преобразования, влиянием входного сопротивления компаратора напряжения и собственными шумами преобразователя напряжения и собственными шумами резистора. Обычно величину этого сопротивления ограничивают значением 1 МОм. Нетрудно показать, что в соответствии с выражением (6) для измерения значения приращения емкости в нанофарадном диапазоне с погрешностью в десять доли процента вполне можно ограничиться частотами до 100 МГц, что легко реализуется в современных универсальных микроконтроллерах.

Требования к полной разрядности преобразователя время-код N_{max} определяются условием:

$$N_{max} \geq (C_r/\Delta C_{max} + 1)\Delta N_{max}. \quad (8)$$

Величину опорной емкости C_r , как правило, выбирают примерно равной среднему значению величины измеряемой емкости, нетрудно показать, что для обеспечения погрешности измерения приращения емкости с погрешностью квантования 0,1% в диапа-

зоне 5% отклонения измеряемой величины от эталона достаточно использование 16-разрядного таймера, что поддерживается большинством 8-разрядных микроконтроллеров.

Применение микроконтроллеров семейства Cortex M3 с тактовой частотой свыше 100 МГц и 32-разрядными таймерами, очевидно, позволяет на порядок расширить возможности преобразований время-код. Время преобразования (без учета времени обработки информации) можно оценить из условия:

$$t_{n\ max} \geq 2N_{max}/f_{idc} \quad (9)$$

В соответствии с условием (9) время преобразования ($t_{ov\ max}$) для рассмотренного выше примера при $f_{idc} = 100$ МГц не превышает 2,4 мс, что соответствует более 440 преобразований в секунду.

Нетрудно показать, что все приведенные соображения действительны и при использовании относительного алгоритма.

Проблема реализации высокоскоростного и высокоточного преобразования в пикофарадном диапазоне на базе таймеров универсальных микроконтроллеров вызывает определенные трудности, поскольку необходимо перейти в гигагерцовый диапазон частот квантования.

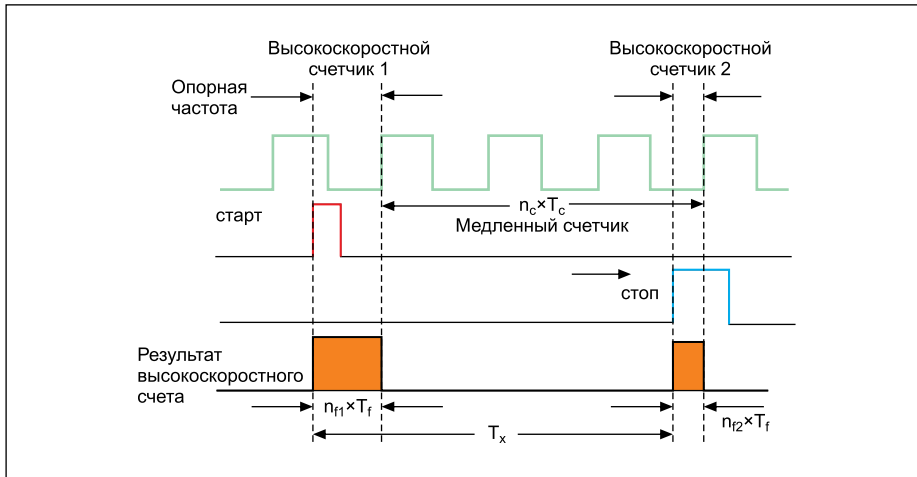


Рис. 3. Временные диаграммы двухступенчатого (нониусного) преобразования время-код

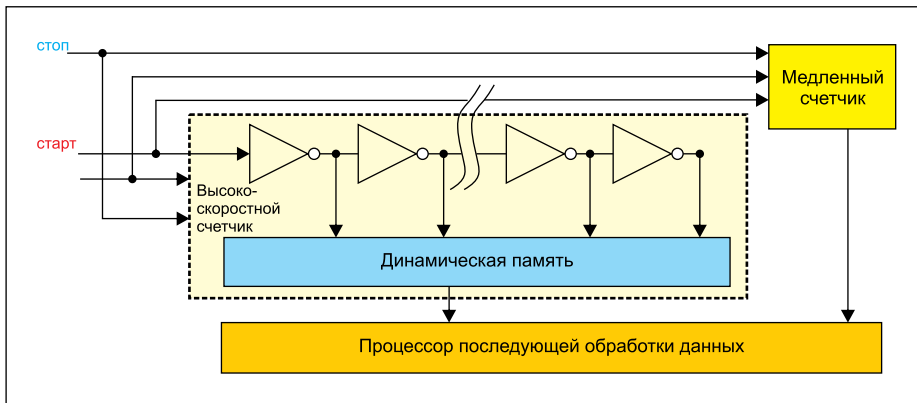


Рис. 4. Упрощенная функциональная схема преобразования время-код конвертера с двухступенчатым (нониусным) методом преобразования

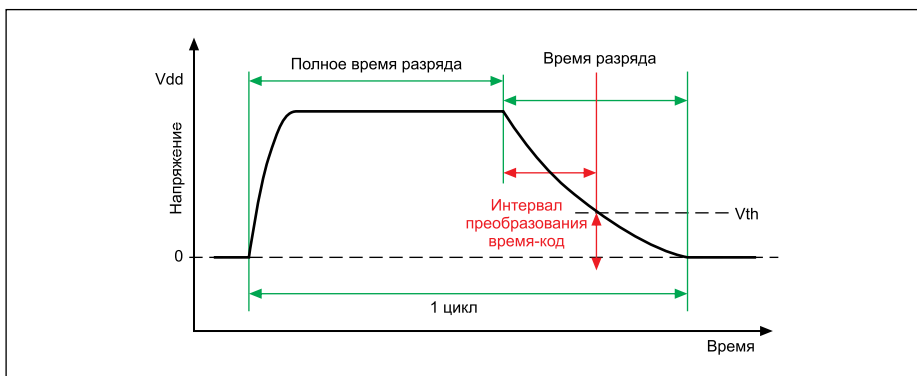


Рис. 5. Временная диаграмма преобразования емкость-время при измерении времени разряда

формируется высокоскоростным счетчиком, подсчитывающим задержку n_1 между фронтом импульса «старт» и фронтом первого счетного импульса опорной частоты, а также задержку n_2 между фронтом импульса «стоп» и фронтом последнего счетного импульса. Результат высокоскоростного счета фиксируется в динамической памяти. Далее результат с обоих счетчиков заносится в процессор последующей обработки данных, где измеряемый временной отрезок T_x подсчитывается по формуле:

$$T_x = n_c \times T_c + (n_1 - n_2) T_f \quad (10)$$

Уникальный метод преобразования емкость-время-код фирмы Asam со встроенными преобразователями время-код с пикосекундным разрешением позволил создать целое семейство PICOCAP-устройств, отличающихся широким диапазоном измеряемых емкостей (от долей пикофарад до сотен нанофарад), высокой разрешающей способностью (до десятка аттофарад), высоким быстродействием, малой потребляемой мощностью [5, 6]. Используемые в устройствах методы компенсации основных источников погрешностей измерения обеспечивают высокую точность и стабильность результатов преобразования. Всю необходимую обработку полученной информации поддерживает интегрированный на кристалле 48-разрядный DSP-процессор.

В основе преобразования емкость-время лежит рассмотренный выше относительный алгоритм. Непринципиальным отличием является то, что необходимую информацию об измеряемой емкости получают не на стадии заряда емкости, а на стадии ее разряда (рис. 5), при этом соотношение (3) остается неизменным.

Повышение помехозащищенности и точности измерения достигается в том числе размещением на кристалле всех элементов измерительной цепи, в частности набора опорных емкостей $C_{r/int}$ и резисторов разряда $R_{discharg/int}$ (рис. 6).

Пользователю предоставляется также возможность расширения диапазона преобразования за счет применения внешней опорной емкости $C_{Aux/ext}$ и/или разрядного сопротивления $R_{discharg/ext}$.

Как известно, для снижения влияния внешних помех используют симметричное (плавающее) подключение емкостных датчиков через экранированные линии подключения (рис. 7).

Влияние паразитных емкостей линий подключения датчика C_{pex0} , C_{pex1} и собственные паразитные емкости измерителя C_{pint} могут быть скомпенсированы встроенными аппаратно-программными средствами PICOCAP-преобразователя (рис. 8).

Результаты измерения паразитных емкостей запоминаются и используются при обработке результатов измерения встроенным

Требуемую разрешающую способность в этом диапазоне можно реализовать при помощи преобразователя емкость-время-код фирмы Asam с разрешением в пикосекундном диапазоне [3, 4].

В основе преобразования лежит нониусный метод, при котором используется две временные шкалы:

- с разрешением в наносекундном диапазоне;
- точного отсчета с разрешением в пикосекундном диапазоне (рис. 3).

Шкала грубого отсчета осуществляется грубым счетчиком путем подсчета импульсов опорной частоты наносекундного диапазона с периодом T_c в интервале между сигналом запуска «старт» и останова «стоп».

В основе принципа формирования шкалы точного отсчета, реализуемого счетчиком, лежит подсчет абсолютного числа прохождений фронтов измеряемого сигнала через линии задержки с временем задержки T_f , выполненные на базе простых логических элементов [3, 4] (рис. 4). Шкала точного отсчета

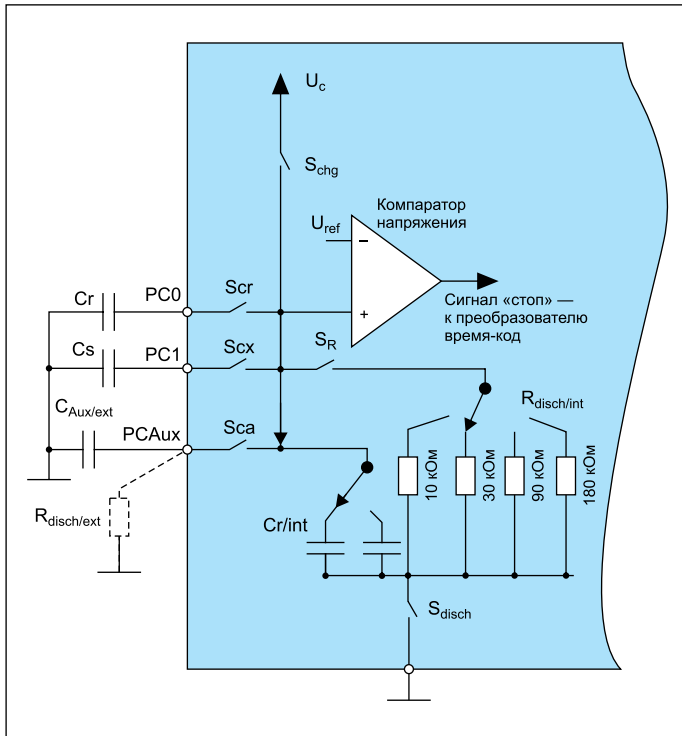


Рис. 6. Структурная схема преобразования емкость-время с интегрированными на кристалле резисторами разряда и опорными емкостями

DSP-процессором. Предлагаются также фирменные методы компенсации влияния сопротивления утечки, вносимые цепями подключения датчиков.

Значительную помощь при разработке измерительных приборов, основанных на методе преобразования электрической емкости в цифровой код, оказывают комплекты разработчика: PCap01-EVA-KIT — универсальный набор с возможностью подключения различных измерительных датчиков, и PCap01-HUM-EVA — набор для разработки измерителей влажности по методу преобразования электрической емкости.

В состав наборов входят: электронные платы с портами и коннекторами для подключения к емкостным датчикам и программатор PICOPROG 2.0 с USB, являющийся одновременно и интерфейсом всей системы с компьютером IBM PC.

Базовый элемент набора PCap01-EVA-KIT — материнская плата с установленным на ней измерительным модулем. Набор производит измерения емкости и температуры, кроме цифрового интерфейсного

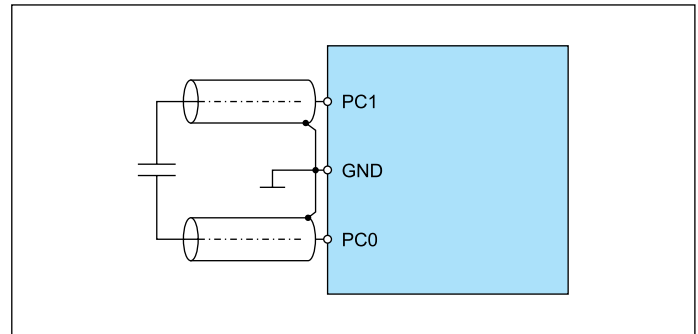


Рис. 7. Симметричное подключение емкостного датчика

выхода имеются импульсные выходы, выдающие результаты измерений в виде ШИМ- или ПДМ- (плотностно-импульсно-модулированного) сигнала. Коммуникации с USB-портом компьютера происходят через модуль программатора PICOPROG V2.0. Прилагаемое программное обеспечение имеет дружественную оболочку под Windows, позволяет как получать цифровые результаты измерений, так и строить графики, а кроме того, данные могут быть экспортированы в текстовые файлы.

Проведенный обзор показал, что использование относительно и разностного метода преобразования емкость-время-код значительно повышает точность измерения емкости по сравнению с традиционными методами времяимпульсного преобразования. Повышение тактовой частоты и увеличение разрядности встроенных таймеров/счетчиков современных универсальных микроконтроллеров, таких как микроконтроллеры семейства Cortex-M3, Cortex-M4, позволяют организовывать многоканальную систему мониторинга параметров состояния технологических, медицинских объектов, параметров системы «умный дом» и других систем с использованием емкостных датчиков различного назначения.

Особого внимания заслуживают устройства семейства PICOCAP (таблица, рис. 9), обеспечивающие уникальные возможности по точности, быстродействию и диапазону преобразования параметров емкостных датчиков различного назначения. Запатентованный алгоритм обеспечивает хорошую защиту от паразитных емкостей и хорошую температурную стабильность. Прецизионность, достигаемая методом PICOCAP, соответствует возможностям 24-разрядного АЦП высокого класса и обладает широким диапазоном измерения.

В комбинации с очень низким потреблением мощности PICOCAP прекрасно соответствует требованиям приложений, где необходимо портативное исполнение с минимальным питанием от батареек при широком диапазоне измерений с высокой разрешающей способностью и высокой точностью.

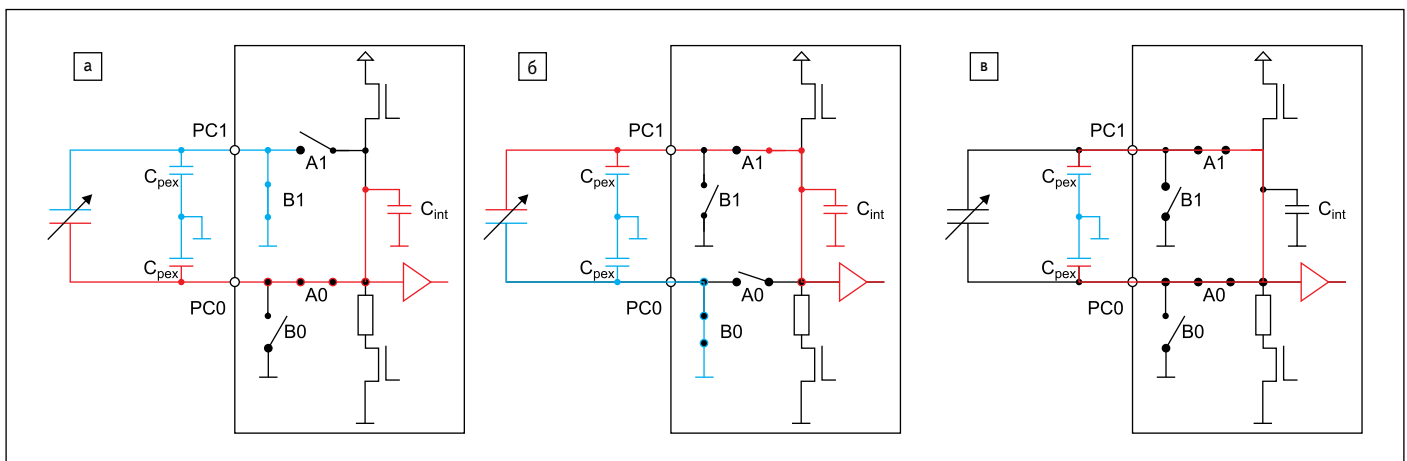


Рис. 8. Измерение паразитных емкостей: а) $C_{\text{pint}} + C_{\text{pex0}}$; б) $C_{\text{pint}} + C_{\text{pex1}}$; в) $C_{\text{pint}} + C_{\text{pex0}} + C_{\text{pex1}}$

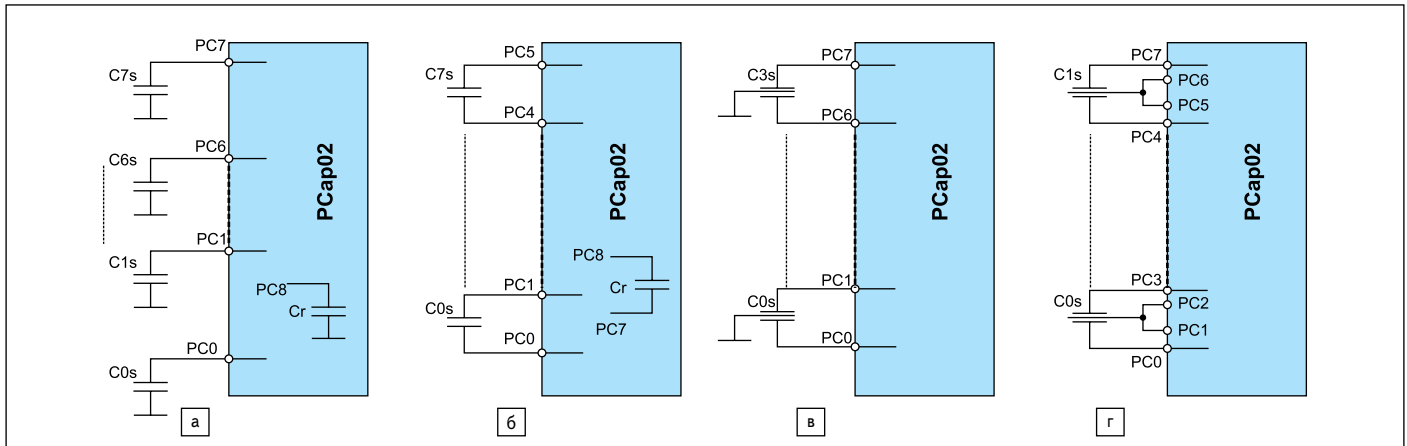


Рис. 9. Основные способы подключения емкостных датчиков к выводам преобразователя PCap02:

- а) восемь датчиков с заземленной обкладкой; б) четыре датчика с плавающими обкладками;
 в) три дифференциальных датчика с заземленной средней точкой; г) два дифференциальных датчика с плавающей средней точкой

Литература

- 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7745/AD7746 Analog Devices // www.analog.com
- Троицкий Ю. Аналого-цифровые преобразователи «емкость-время-код» и «емкость-напряжение-код» // Ремонт и сервис. 2013. № 6.
- Метод измерения. Интегрированные время-цифровые преобразователи (ВЦП) // http://acam-e.ru/?page_id=582
- Kashyap Vijaya and Porwal Saurabh. Resolution, Range and Area Comparison of Digital CMOS Time to Digital Converter Techniques. Research Journal of Engineering Sciences ISSN 2278-9472 Vol. 3(4), April (2014) Res. J. Engineering Sci. 33.
- Single-chip Solution for Capacitance Measurement PCap02A. March 13, 2013, Version 1.4.
- PCap01 Single-chip Solution for Capacitance Measurement with Standart Firmware 03.01.02. July 15, 2013.

Таблица. Основные параметры устройств семейства PICOCAP

Параметры	PCap01	PCap02	PCap03
Количество подключаемых емкостных датчиков	8 (с заземленной обкладкой) 4 (с плавающими обкладками)	8 (с заземленной обкладкой) 4 (с плавающими обкладками)	6 (с заземленной обкладкой) 3 (с плавающими обкладками)
Разрешающая способность	4 аФ или 21 бит при 2 Гц, 10 пФ базовая емкость 25 аФ или 22 бит при 2 Гц, 100 пФ базовая емкость	23 аФ или 18,7 бит при 5 Гц, 10 пФ базовая емкость 650 аФ или 17,1 бит при 5 Гц, 100 пФ базовая емкость	8 аФ или 20,2 бит при 3 Гц, 10 пФ базовая емкость 390 аФ или 14,6 бит при 9 кГц, 10 пФ базовая емкость
Предельная частота преобразования, кГц	до 500	до 500	—
Интегрированные опорные емкости	нет	Программируемая с шагом 2 пФ в диапазоне до 31 пФ	—
Интегрированные разрядные резисторы, кОм	10, 30, 90, 180	10, 30, 90, 180, 1000	—
Компенсация внутренней и внешней паразитной емкости	есть	есть	есть