

Измерение уровня жидкости в диагностических системах при помощи преобразователей емкости в цифровой код

В гематологических анализаторах крови, системах диагностики *in vitro* и многих других приборах биохимического анализа требуется перемещение жидкостей из одного сосуда в другой, например для забора материала из кювет или реагентов из бутылок. Подобные лабораторные системы зачастую предназначены для работы с большими количествами образцов, поэтому очень важно минимизировать время обработки индивидуального образца материала. Для повышения эффективности пробоотборники, используемые для забора, должны перемещаться с высокой скоростью, что обуславливает необходимость точного определения положения пробоотборника по отношению к поверхности забираемой жидкости. В статье демонстрируется новый способ реализации этой функции при помощи преобразователя емкости в цифровой код: этот способ обеспечивает повышенную точность.

Джим СКАРЛЕТТ (Jim SCARLETT)

Технология преобразования емкости в цифровой код

В базовой архитектуре $\Sigma\Delta$ -АЦП используется простая схема балансировки заряда с известным опорным напряжением и неизвестным входным напряжением, прикладываемым к интегрированным входным конденсаторам фиксированного номинала. Принцип балансировки заряда обеспечивает определение неизвестного входного напряжения. Отличие преобразователей емкости в цифровой код на базе $\Sigma\Delta$ -модуляции заключается в том, что неизвестной величиной

является номинал входного конденсатора. К входу схемы прикладывается известное входное напряжение, а принцип балансировки заряда используется для определения изменения емкости неизвестного входного конденсатора, как показано на рис. 1. При этом преобразователь емкости в цифровой код сохраняет те же разрешение и линейность, которыми обладает базовая архитектура $\Sigma\Delta$ -АЦП.

Интегрированные преобразователи емкости в цифровой код реализуются двумя способами. Одноканальный 24-разрядный преобразователь AD7745 и двухканальный

24-разрядный преобразователь AD7746 работают с двумя емкостными электродами, один из которых подключен к выходу источника напряжения возбуждения, а другой — к входу преобразователя. В одноэлектродных устройствах, таких как 24-разрядный преобразователь AD7747 с датчиком температуры или 16-разрядный программируемый контроллер CapTouch AD7147, напряжение возбуждения прикладывается к тому же электроду, с которого считывается емкость. Второй электрод, который заземлен, может быть реальным электродом или пальцем пользователя, как, например, в случае работы с сенсорным экраном. Для измерения уровня жидкости можно использовать преобразователь любого типа.

Конденсатор

В простейшей форме конденсатор представляет собой две параллельные обкладки, разделенные диэлектрическим материалом. Величина емкости зависит от площади обкладок, расстояния между ними и диэлектрической проницаемости. Учитывая эту зависимость, мы можем измерить изменение конденсатора нестандартной формы и определить на основании полученных показаний расстояние от пробоотборника до поверхности жидкости.

В рассматриваемой задаче конденсатор образуется проводящей пластиной, которая находится под ковтовой, и перемеща-

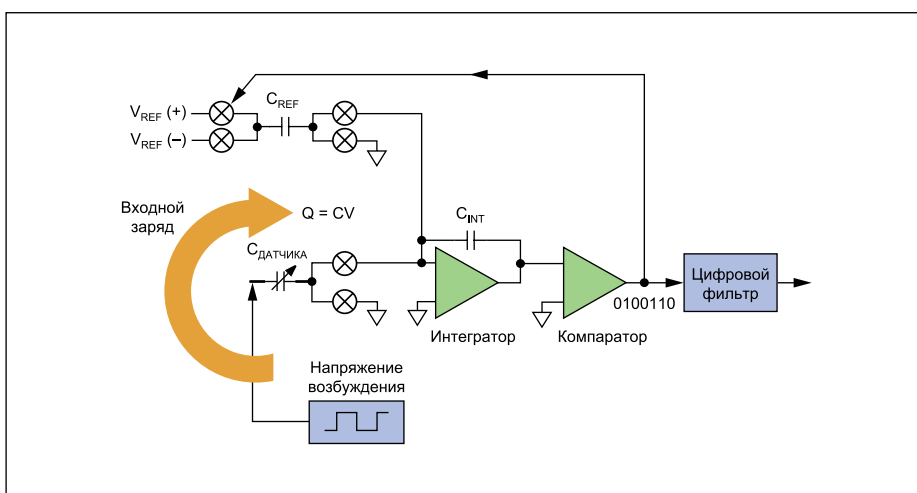


Рис. 1. Базовая архитектура преобразователя емкости в цифровой код

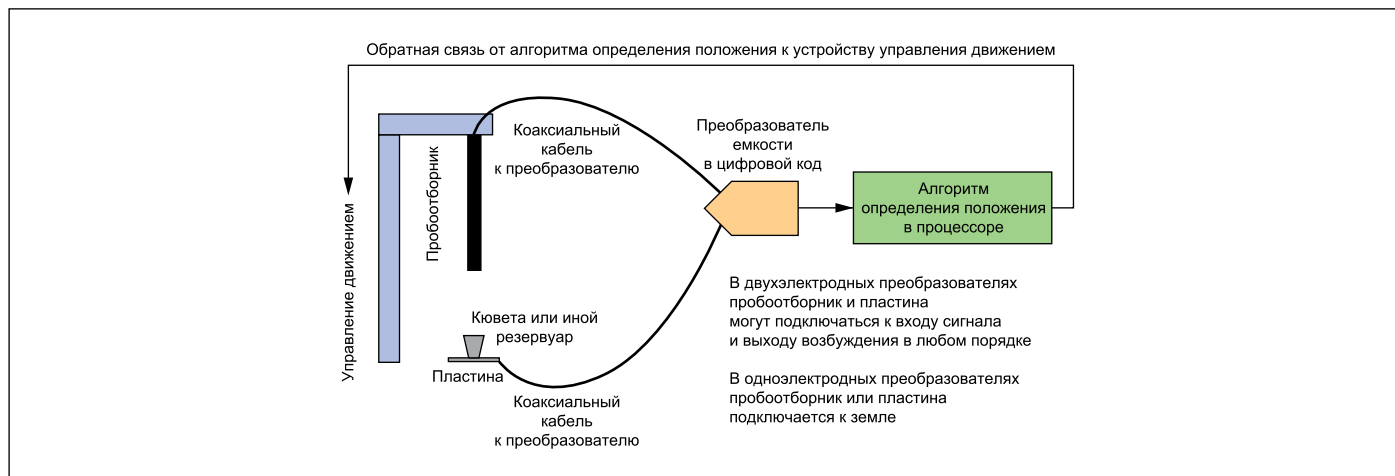


Рис. 2. Блок-схема системы измерения уровня жидкости

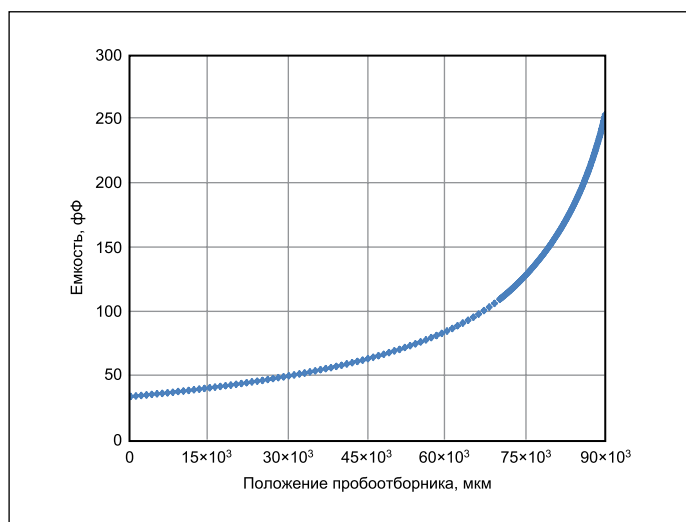


Рис. 3. Результаты измерения емкости при пустой кювете

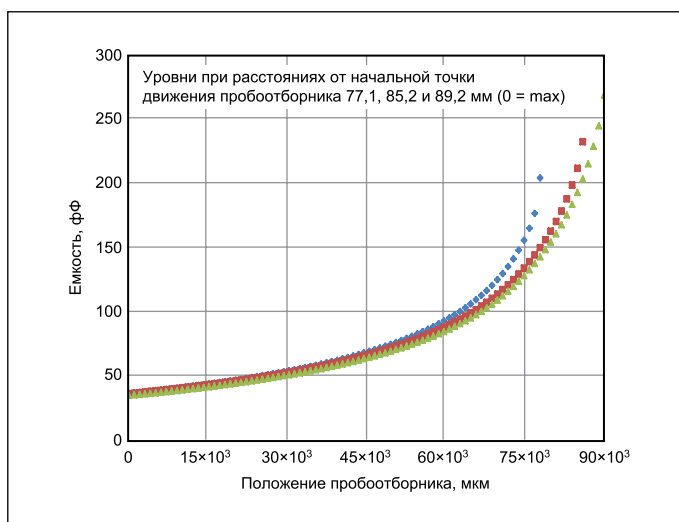


Рис. 4. Результаты измерения емкости при наполненной кювете

емым проботоотборником, как показано на рис. 2. Сигнал возбуждения прикладывается к одному из электродов, а второй электрод подключается к входу преобразователя. Показание емкости сохраняет свое значение независимо от того, какой из электродов подключен к напряжению возбуждения, а какой — к входу преобразователя. Абсолютный номинал конденсатора зависит от фактора пластины и проботоотборника, типа диэлектрика, расстояния от проботоотборника до пластины и состояния окружающей среды. Следует отметить, что диэлектрик включает в себя воздух, материал кюветы и жидкость, находящуюся в ней. Предлагаемый метод измерения основан на изменении состава диэлектрика по мере приближения проботоотборника к пластине и, что более важно, к поверхности жидкости.

На рис. 3 показано, как емкость возрастает по мере приближения проботоотборника к пустой кювете. Анализ графика показывает, что изменение емкости описывается степенной функцией (квадратичной). При этом если в кювете есть жидкость, то характер функции сохраняется, но коэффициенты изменяются. Диэлектрическая постоянная жидкости намного выше диэлектрической проницаемости воздуха, поэтому, когда процентное соотношение жидкости в составе диэлектрика увеличивается, емкость растет быстрее.

Когда расстояние от проботоотборника до поверхности жидкости становится очень маленьким, измеренное значение емкости резко возрастает, как показано на рис. 4. Это резкое изменение может быть использовано для определения близости к поверхности жидкости.

Нормировка данных

Достоверность определения уровня жидкости можно повысить путем нормировки данных. Если точно известно положение про-

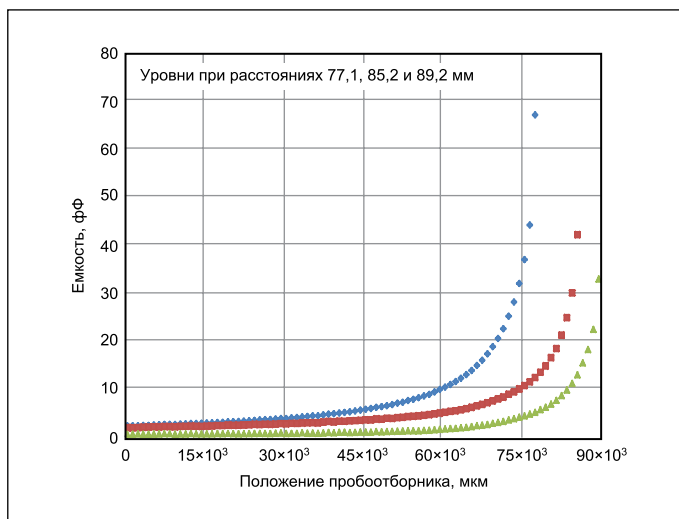


Рис. 5. Нормированные результаты измерения емкости

боотоборника по отношению к некоторой отсчетной точке, то можно снять характеристику системы, проведя несколько измерений в разных точках при отсутствии жидкости. После этого результаты измерений, получаемые при движении к поверхности жидкости, можно подвергнуть нормировке, вычитая из них данные, полученные при сухой кювете (рис. 5).

Нормировка устраняет систематические погрешности измерения емкости, за исключением погрешностей, вызванных изменением температуры, влажности и других параметров окружающей среды. Благодаря нормировке исключается влияние размеров электрода, расстояния от пробоотборника до пластины, а также диэлектрических эффектов воздуха и кюветы. После нормировки данные характеризуют эффект добавления жидкости к диэлектрической смеси, упрощая контроль перемещения пробоотборника.

В то же время применение нормированных данных возможно не всегда. Так, например, система управления движением может не обладать достаточной точностью для определения положения с необходимой погрешностью, или скорость обмена данными с контроллером электрического двигателя может быть слишком мала по сравнению с частотой обновления выходных данных преобразования. Описываемая в статье методика измерений работает, даже если нормированные данные недоступны.

Использование производной характеристики и точек разрыва

Как уже было сказано, показания емкости начинают расти быстрее по мере приближения пробоотборника к поверхности жидкости, однако использование этой информации для управления скоростью пробоотборника сопряжено с трудностями. Когда уровень наполнения мал, показания емкости без учета нормировки будут выше, чем при высоком уровне наполнения контейнера. При использовании нормированных данных наблюдается обратная картина. Это дополнительно усложняет поиск порога для оптимального переключения скорости движения пробоотборника.

Вместо абсолютного значения емкости может быть использована производная характеристики, то есть скорость изменения емкости в зависимости от изменения положения. При перемещении пробоотборника с постоянной скоростью производную характеристики можно аппроксимировать, вычитая предыдущее показание емкости из текущего значения. Как показано на рис. 6, производная характеристики имеет такой же характер, как и данные, полученные без учета нормировки.

Производная характеристики, полученная с использованием нормированных или ненормированных показаний емкости, дает гораздо

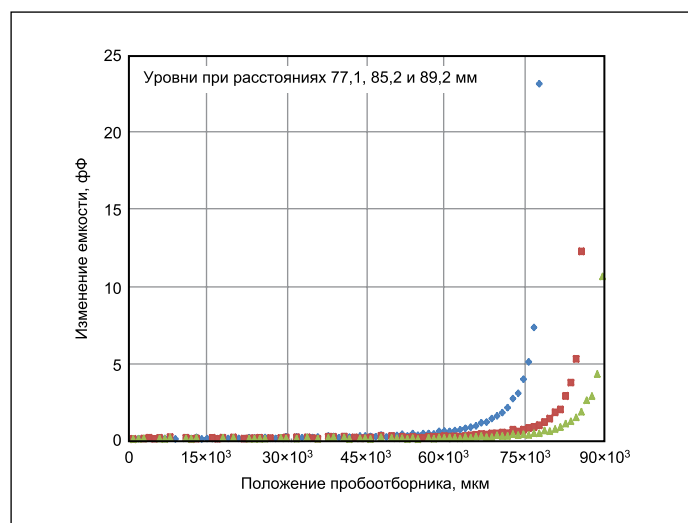


Рис. 6. Производная характеристики, полученная с использованием нормированных показаний емкости

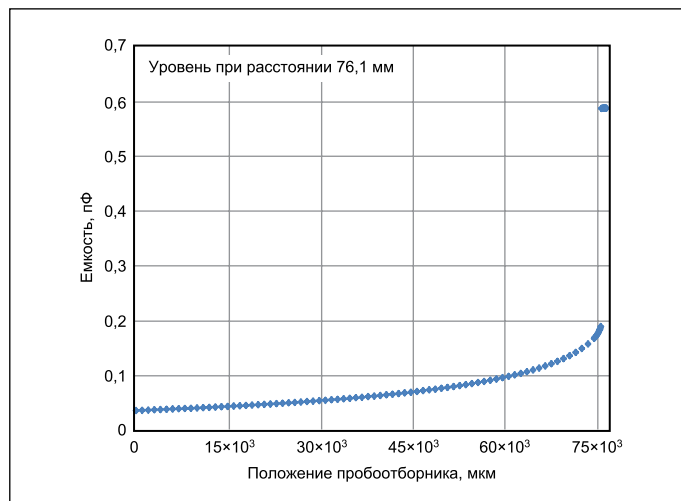


Рис. 7. Разрыв в данных при вхождении пробоотборника в контакт с жидкостью

более достоверную оценку при изменяющихся уровнях наполнения, чем сами абсолютные показания. Выбор порога, надежно работающего независимо от уровня наполнения, в данном случае также более очевиден. Значения производной содержат чуть больше шума по сравнению с непосредственными показаниями емкости, поэтому может оказаться полезным усреднение. Рассчитанное значение производной, превышающее уровень шума, свидетельствует о том, что пробоотборник находится очень близко к поверхности жидкости. Рассмотренный метод позволяет получить очень высокую устойчивость оценки.

Пока мы рассматривали поведение системы при приближении пробоотборника к поверхности жидкости, однако ключевым аспектом предлагаемого метода измерений является поведение при вхождении пробоотборника в контакт с жидкостью. В этот момент, как показано на рис. 7, имеет место большой разрыв. Он не похож на нормальное поведение кривой емкости, как следует из показаний, получаемых после контакта. Показание емкости в этой точке более чем в два раза превышает показание в точке, предшествующей контакту. Это соотношение может изменяться в зависимости от конфигурации системы, однако для отдельно взятой конфигурации величина скачка остается стабильной при многократных измерениях. Такой разрыв в данных позволяет сравнительно легко определить порог емкости, который будет являться надежным показателем преодоления поверхности жидкости. В рассматриваемой задаче цель заключается в погружении пробоотборника на известное, небольшое расстояние в жидкость, и такое поведение характеристики является важным фактором для корректной работы системы.

Чтобы достичь максимального быстродействия, пробоотборники должны перемещаться с наибольшей возможной скоростью, но, в то же время, опасность повреждения из-за слишком глубокого погружения пробоотборника должна быть минимизирована. Разработчику может быть недоступна прецизионная система управления электрическим двигателем, поэтому решение должно работать, даже если точное положение пробоотборника неизвестно. Описанная ниже методика позволяет сделать это с высокой долей уверенности.

Методика

На рис. 8 изображен алгоритм, используемый для перемещения пробоотборника по направлению к жидкости.

Перемещение пробоотборника производится с максимально возможной скоростью, пока он не оказывается предельно близко к поверхности жидкости. В зависимости от информации о положении, доступных вычислительных ресурсов и возможности заранее предсказать поведение системы эта точка может быть определена путем вычисления степенной функции, порога емкости или ее производной. Усреднение

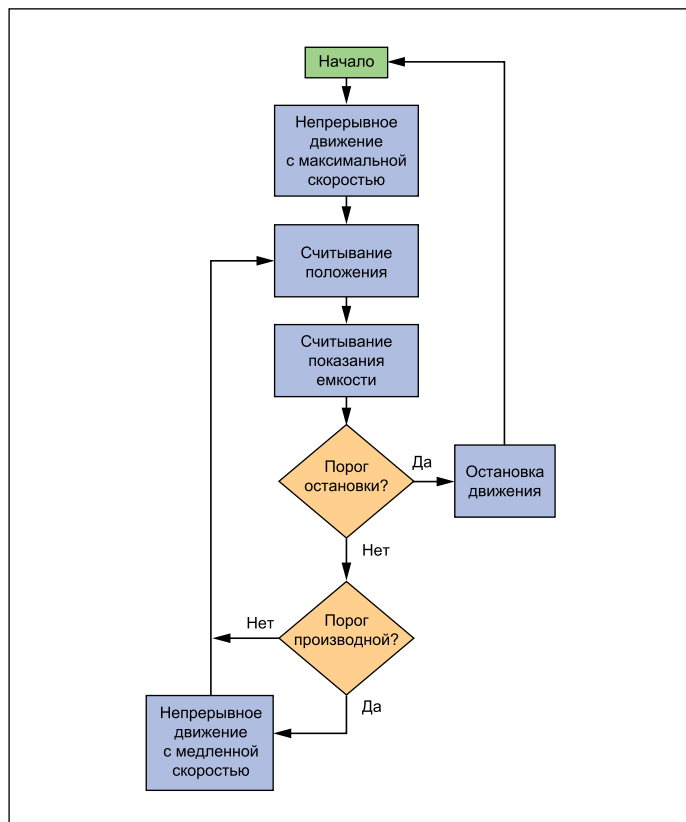


Рис. 8. Упрощенный алгоритм процесса управления

данных способно повысить устойчивость оценки. Нормировка показаний емкости также делает систему более устойчивой.

Когда пробоотборник будет помещен достаточно близко к поверхности, его скорость нужно существенно уменьшить для выполнения контакта с поверхностью жидкости. Для достижения максимальной эффективности эта точка должна находиться как можно ближе к поверхности, однако перед погружением скорость перемещения должна быть снижена, чтобы надежно контролировать глубину погружения перед полной остановкой пробоотборника.

Момент контакта с поверхностью жидкости определяется по разрыву в показаниях емкости или ее производной, который имеет место в данной точке. Для уменьшения шума можно использовать усреднение, однако большой скачок надежно обнаруживается и без него. Нормировка показаний емкости способна повысить устойчивость, однако ее влияние не столь высоко, как в фазе приближения.

Затем пробник можно погрузить на заданную глубину под поверхность. При наличии прецизионной схемы управления электродвигателем сделать это несложно. Если такая схема недоступна, можно произвести оценку скорости и продолжить перемещение пробоотборника в течение необходимого интервала времени.

После преодоления поверхности жидкости показания емкости демонстрируют два интересных свойства. Во-первых, измеренное значение сравнительно слабо меняется по мере погружения в жидкость. Была надежда, что стабильные значения скорости изменения емкости могут помочь определить глубину погружения, однако она не оправдалась. Во-вторых, измеренное значение очень слабо зависит от уровня жидкости, как показано на рис. 9. Значения емкости, измеренные сразу после преодоления поверхности при полном сосуде и при почти пустом сосуде, были практически одинаковы.

В то же время при нормированных данных картина отличается. По мере уменьшения уровня жидкости значение нормированной емкости становится меньше. Этот факт может быть использован для определения пониженного уровня жидкости в ситуации, когда надежных данных о положении нет.

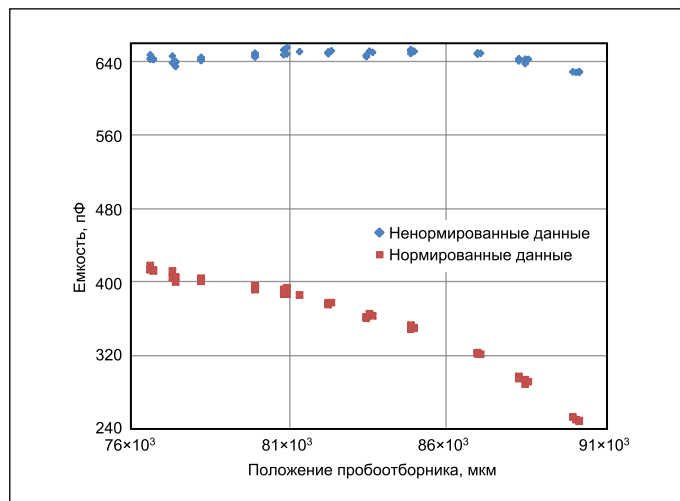


Рис. 9. Зависимость емкости от уровня жидкости

Необходимый момент остановки пробоотборника после преодоления поверхности зависит от нескольких факторов, включая саму систему управления двигателем, однако хорошо продуманный профиль дает возможность жесткого контроля при одновременном поддержании максимальной скорости движения пробоотборника. В ходе лабораторных испытаний пробник, который при максимальной скорости перемещения передвигался примерно на 0,45 мм между получением показаний емкости, мог быть остановлен на расстоянии 0,25 мм до преодолеваемой поверхности. При большей частоте обновления данных пробоотборник, передвигавшийся приблизительно на 0,085 мм между получением показаний, мог быть остановлен в пределах 0,05 мм до поверхности жидкости. В обоих случаях для поддержания максимальной эффективности и быстродействия пробоотборник перемещался с наивысшей скоростью до достижения примерно 1–3 мм от поверхности жидкости.

Заключение

Рассмотренный нетрадиционный способ применения интегрированного преобразователя емкости в цифровой код позволяет реализовать простое, надежное решение для измерения уровня жидкости. Управление движением пробоотборника осуществляется в соответствии с профилем, в котором используются показания емкости или ее производной. Альтернативные варианты реализации позволяют добиться большей устойчивости или обеспечить дополнительную информацию. Предложенное решение дает возможность быстро и безопасно остановить пробоотборник после преодоления поверхности, поддерживая при этом максимальную скорость перемещения пробоотборника до последнего возможного момента.

В статье дан лишь поверхностный взгляд на применение технологии преобразования емкости в цифровой код для измерения уровня жидкости. Опытные инженеры могут использовать изложенные идеи в качестве отправной точки для создания улучшенного решения, оптимизированного для конкретной ситуации.

Литература

- <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/capacitance-to-digital-converters/products/index.html>
- http://www.analog.com/en/content/CU_over_CDC_Technology/fca.html
- Circuit Note CN0095. Using the AD7150 Capacitance-to-Digital Converter (CDC) for Proximity Sensing Applications. http://www.analog.com/static/imported-files/circuit_notes/CN0095.pdf
- Jia Ning. ADI Capacitance-to-Digital Converter Technology in Healthcare Applications // Analog Dialogue. Vol. 46. 2012. No 2.