



СТМ12

СТМУ в задачах измерения расхода воды и газа, реализация датчиков приближения, измерения уровня, влажности, давления

Что такое СТМУ?

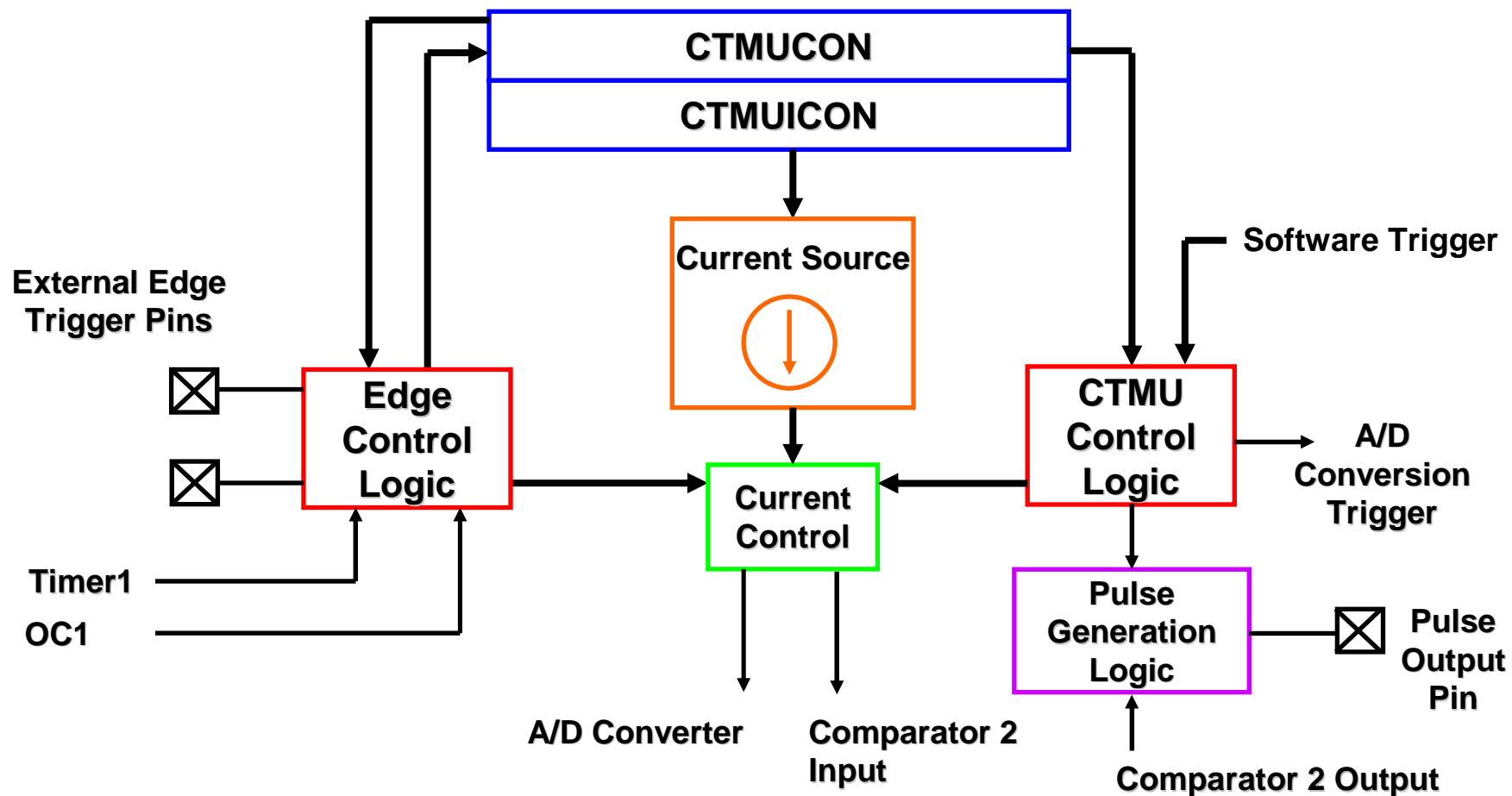
Charge Time Measurement Unit

**Модуль Измерения Времени
Заряда**

Что такое СТМУ?

- СТМУ означает “**Модуль Измерения Времени Заряда**”
- Позволяет реализовывать:
 - Прецизионное измерение времени
 - Измерять Абсолютное значение и Относительное изменение емкости
 - Измерять Абсолютное значение и Относительное изменение индуктивности
 - Асинхронное формирование импульсов.
- **Доступен во многих 8-и, 16-и и 32-х разрядных PIC-микроконтроллерах.**

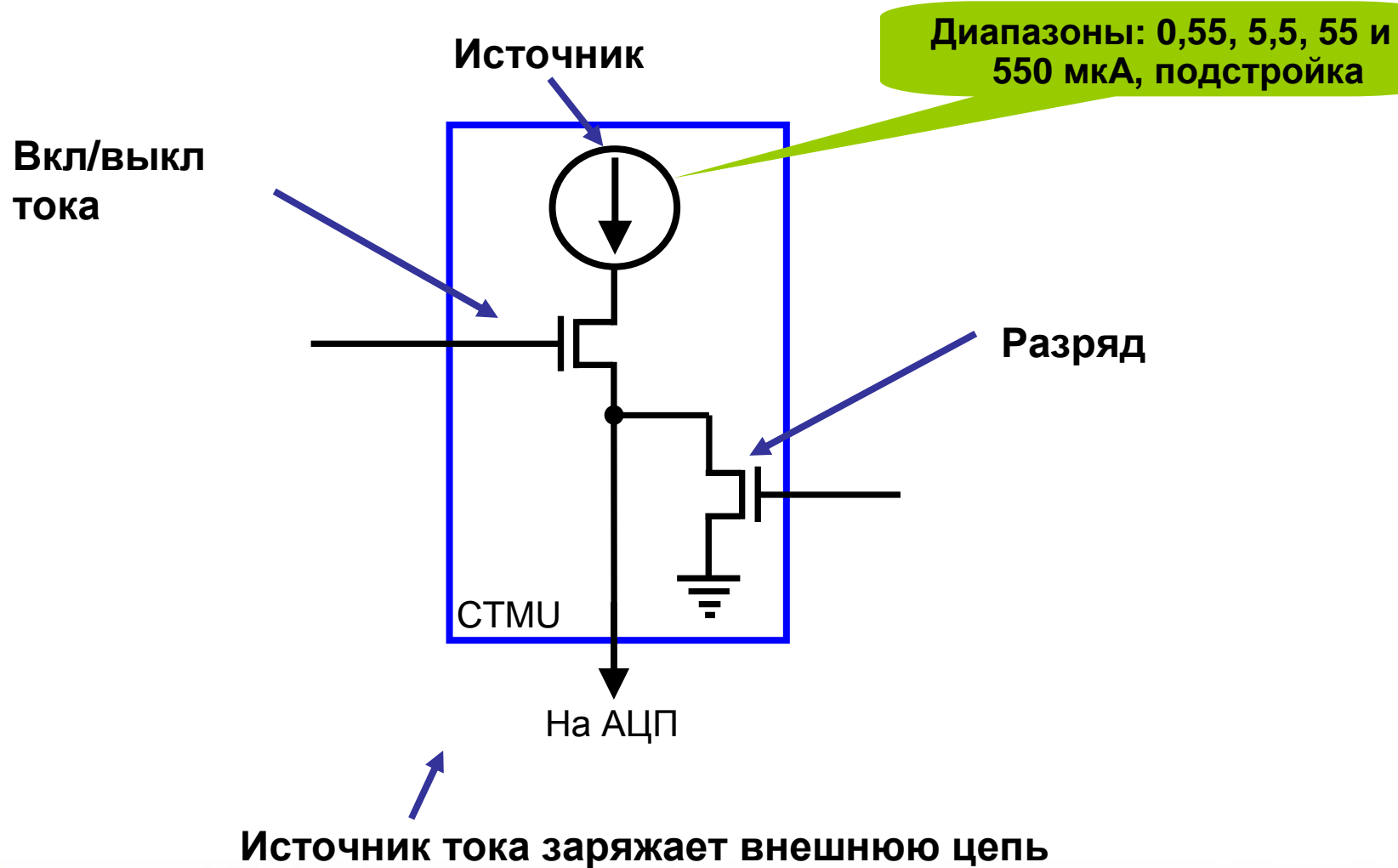
СТМУ. Структурная схема



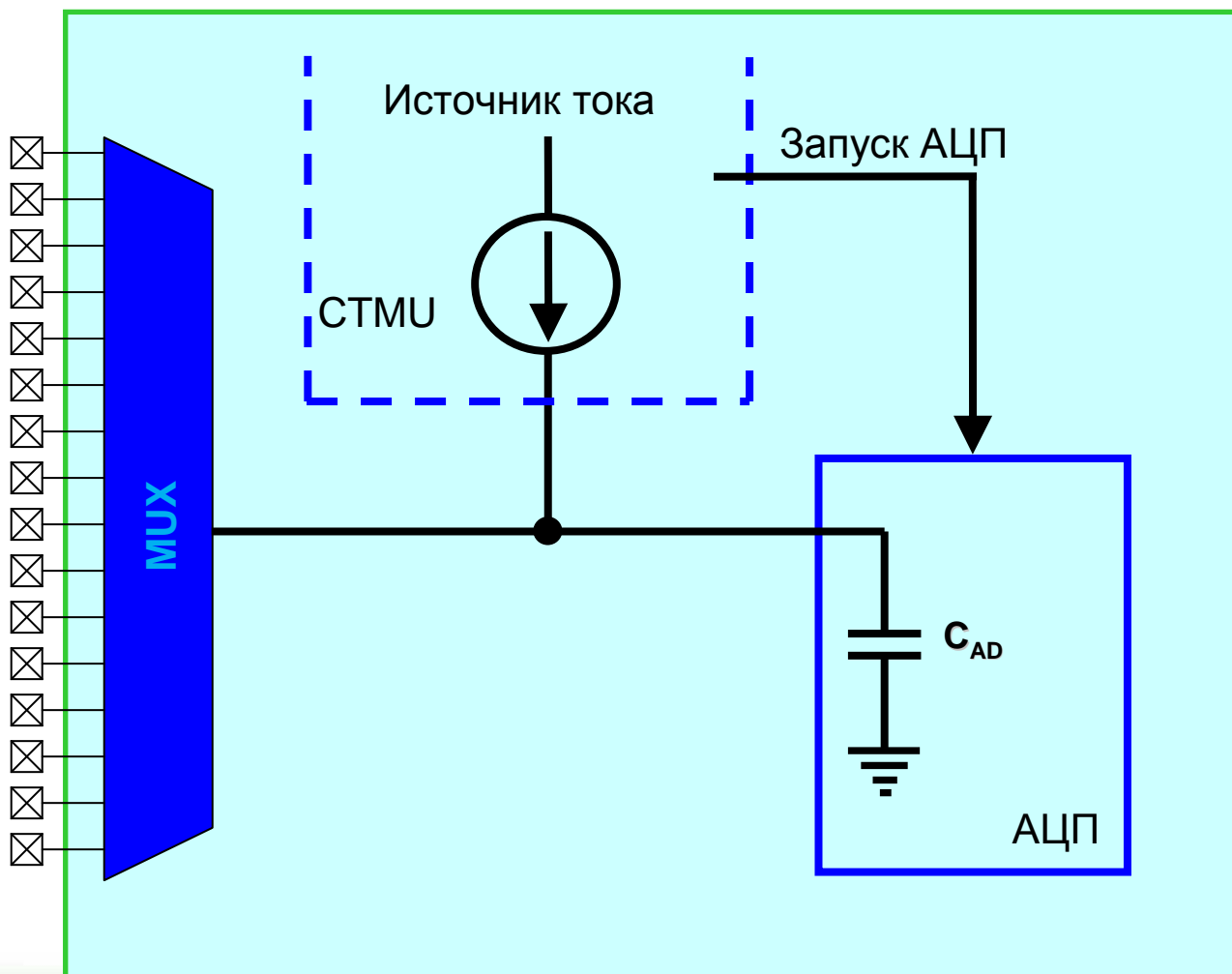
Ключевые особенности СТМУ

- **Источник постоянного тока**
 - Диапазоны: 0.55мкА, 5.5мкА, 55мкА и 550мкА
 - Подстройка до +/- 62% в каждом диапазоне с шагом 2%
- **Запуск и останов по внешним и внутренним событиям**
 - Любые комбинации срабатывания :Timer1, модуль сравнения, программный триггер и два внешних вывода
 - Четыре или более внешних выводов со срабатыванием по фронту/спаду
 - Управление полярностью для каждого источника
 - Управление по заданной последовательности событий
- **Совместная работа с АЦП**
 - СТМУ может управлять стартом АЦП

СТМУ. Источник тока



СТМУ. Взаимодействие с АЦП



Применение СТМУ

- **Измерение времени**
 - Измерение длины кабеля
 - Измерение времени прохождения сигнала (ультразвук)
 - Скорость потока, расходомеры
 - Расстояние
- **Измерение Емкости**
 - Емкостные клавиатуры (Capacitive Touch)
 - Датчики приближения
 - Измерение влажности
 - Измерение емкости
- **Измерение Сопротивления**
 - Резистивные Датчики
- **Измерение Индуктивности**
 - Скорость потока, расходомеры
 - Измерение R, L, C
- **Измерение температуры**

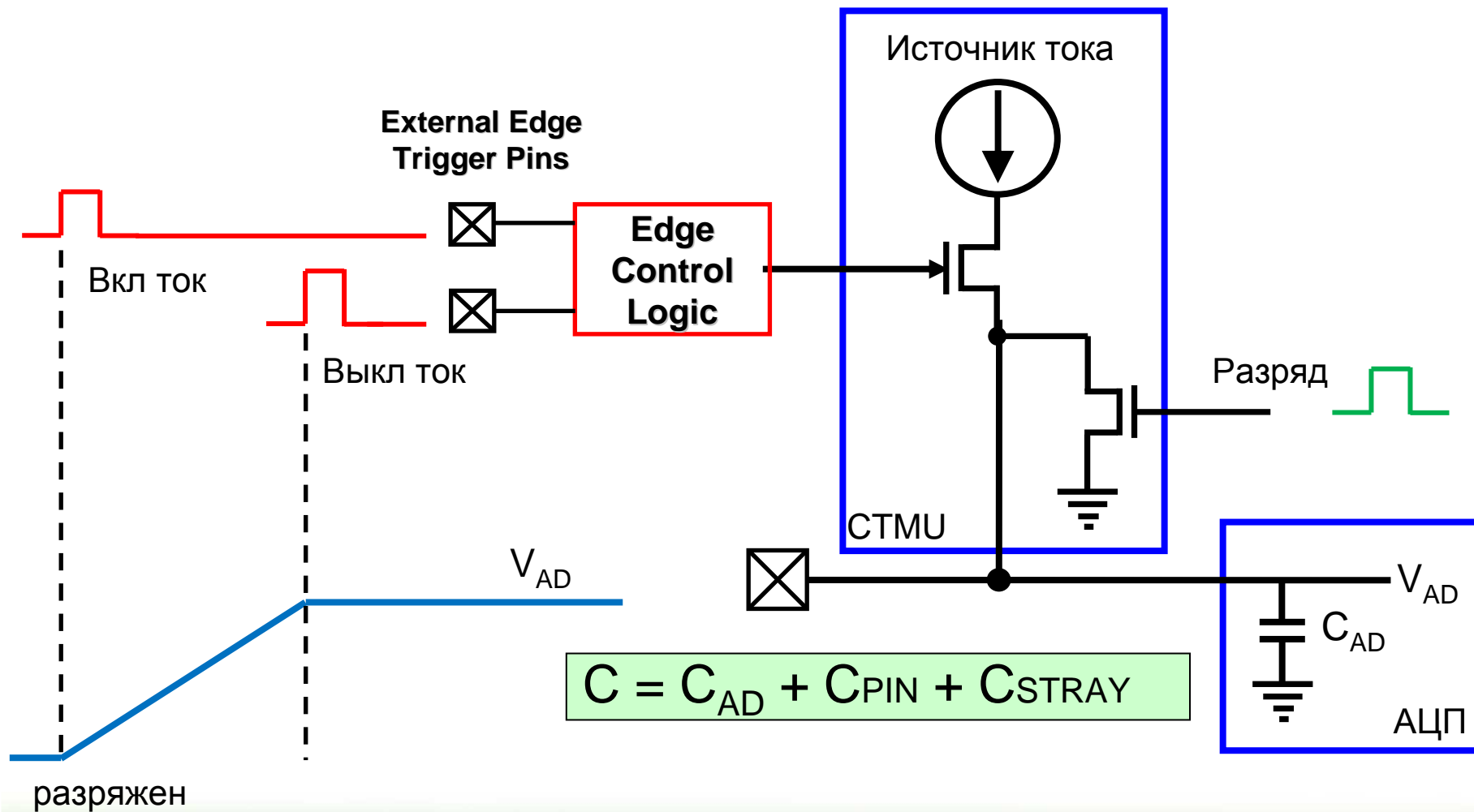


MICROCHIP

MASTERS 2012

Измерение временных интервалов с помощью СТМУ

Измерение времени с помощью СТМУ



Измерение времени

- Ток через Емкость описывается выражением:

$$i = C * (dv / dt)$$

- I** и **C** не изменяются, значит...

$$dt = (C / I) * dv$$

- После интегрирования:

$$t = (C / I) * V + K \quad \text{EQ 1}$$

- в основном $K = 0$

- Таким образом **Время t** пропорционально **Напряжению V**

Разрешающая способность

Пример:

- При 10-и разр. АЦП (1024 значений)

- Дано

- $I = 55 \text{ мкА}$
- $C = C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY} = 15 \text{ пФ}$
- A/D VREF = VDD

$$t = \frac{C}{I} V$$

- Если $V_{DD} = 3.0\text{В}$, тогда 1 дискрет АЦП =
 $V = 3.0/1024 = 2.93 \text{ мВ}$

- Разрешение по времени СТМУ

$$t = (C/I) * V = (15 \text{ пФ} / 55 \text{ мкА}) * 2.93 \text{ мВ} = 0.799 \text{ нсек}$$

Как увеличить разрешающую способность

Несколько способов...

- **Уменьшить опорное напряжение для АЦП**
 - Внешний источник опорного напряжения 2.5В
 - $t = (15 \text{ пФ} / 55 \text{ мкА}) * (2.5 / 1024) = 0.666 \text{ нсек}$
- **Применение внутреннего канала СТМУ (нет внешних соединений)**
 - Только C_{AD} , Исключаются $C_{PIN} + C_{STRAY}$
 - $t = (4 \text{ пФ} / 55 \text{ мкА}) * (2.5 / 1024) = 0.178 \text{ нсек}$
- **Увеличить ток СТМУ**
 - Больше ток – меньше время. ($t = C / I$)
 - $t = (4 \text{ пФ} / 89 \text{ мкА}) * (2.5 / 1024) = 0.109 \text{ нсек}$
- **Увеличить разрядность АЦП**
 - Применение 12-bit АЦП (4096 значений)
 - Допустим, что емкость в 2 раза больше – 30 пФ (для вн. АЦП)
 - $t = (30 \text{ пФ} / 550 \text{ мкА}) * (2.5 \text{ В} / 4096) = 33.29 \text{ псек !!!}$

Динамический диапазон СТМУ

- **Динамический диапазон измерения ограничен:**
 - Общей емкостью ($C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY}$)
 - Зарядным током
 - Напряжением питания аналоговых цепей микроконтроллера (V_{DD}/V_{SS}) и опорным напряжением АЦП

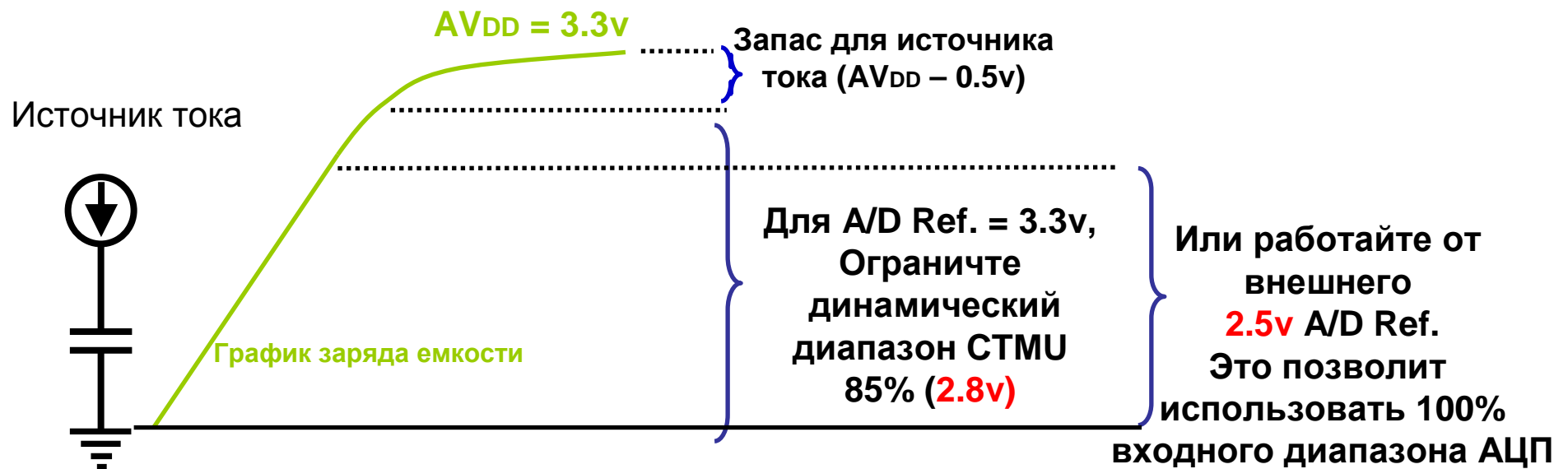
Пример:

- **Примем:**
 - 10-bit A/D (1024 отсчетов)
 - $I = 55 \text{ мкА}$
 - $C = C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY} = 15 \text{ пФ}$
 - $V_{ref} = 2.5\text{В}$
- **Тогда динамический диапазон измерения времени**
 - $(15 \text{ пФ}/55 \text{ мкА}) * 2.5\text{В} = 682 \text{ нсек}$

$$t = \frac{C}{I} V$$

Выбор опорного напряжения АЦП

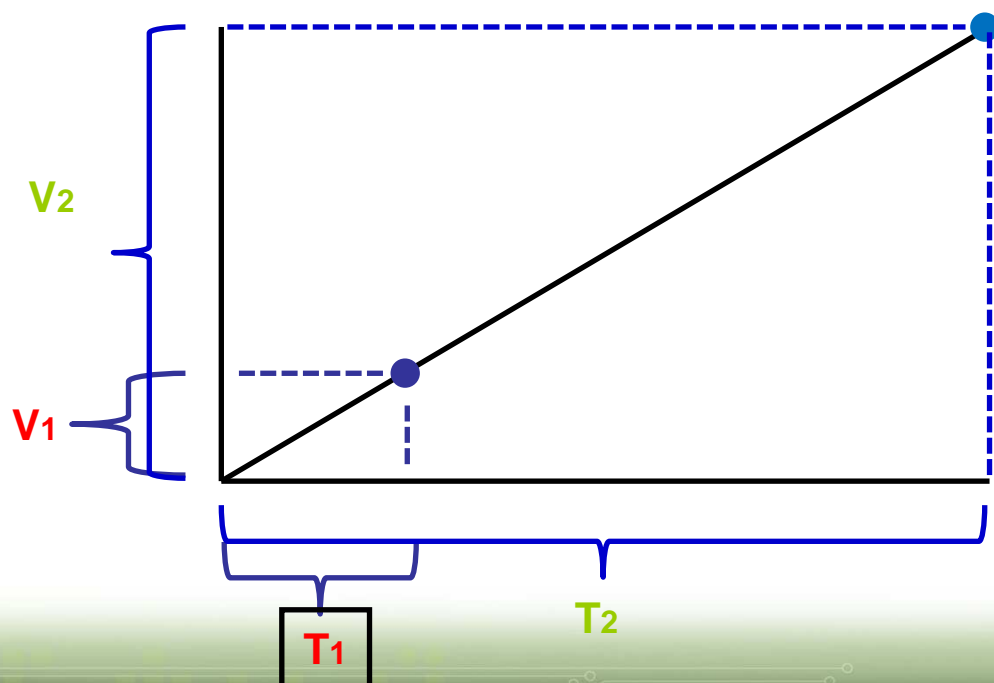
- **СТМУ источник тока требует небольшой запас напряжения чтобы поддерживать постоянный ток, обычно $AV_{DD} - 0.5v$**





Калибровка СТМУ

- Калибровка определяет крутизну и смещение
- **НЕТ НЕОБХОДИМОСТИ** находить отдельно значения емкости и тока, а только их отношение (крутизну)
- 1 Шаг – заряд в течении известного времени, $t_1 (= 2 T_{cy})$; измерение V_1
- 2 Шаг – заряд в течении известного времени, $t_2 (= 8 T_{cy})$; измерение V_2
- 3 Шаг- определить крутизну $(t_2 - t_1) / (V_2 - V_1) = C/I$
- 4 Шаг – определить смещение $t_2 - (C/I * V_2)$



Как измерять большие интервалы времени

- Возможно ли увеличить диапазон измерения?
- Конечно! – Вот несколько способов...

- Увеличить емкость

$$t = (100 \text{ пФ} / 55 \text{ мкА}) * 2.5\text{В} = 4.54 \text{ мксек}$$

- Уменьшить ток

$$t = (15 \text{ пФ} / 34 \text{ мкА}) * 2.5\text{В} = 1.1 \text{ мксек}$$

- В обоих случаях требуется больше времени для заряда емкости и увеличивается период измерения
- Оба этих решения уменьшают разрешающую способность

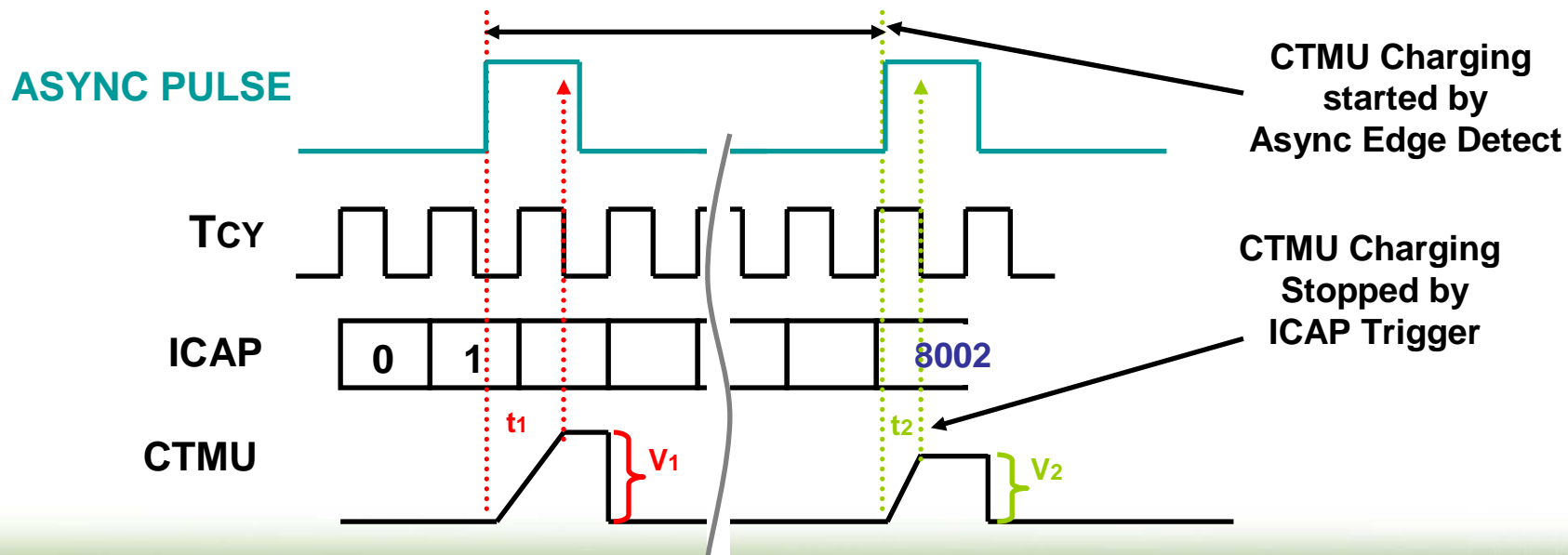
$$t = \frac{C}{I} V$$

- Как увеличить динамический диапазон без потери разрешения?

- Это **ключевая особенность** модуля СТМУ, поэтому обсудим более подробно на следующих слайдах...

Измерение длительных интервалов

- Комбинирование СТМУ с модулем захвата (ICAP), модулем сравнения (OCMP) или Timer1
 - Предоставляет “Грубые” синхронизированные временные интервалы, на основе тактовой частоты, **T_{cy}** (напр. 62.5нсек @ 16 MIPS для PIC24F)
 - СТМУ обеспечивает “Точное” асинхронное измерение временных интервалов
 - Общее измеренное время это «Грубое» + «Точное»
- ICAP: Пример = $T_{cy} * (8002 - 2) + (t_1 - t_2) = 500 \text{ мксек} + (t_1 - t_2)$



Точность СТМУ

- Точность источника тока СТМУ ~ 1%
 - На всех диапазонах , напряжениях питания и температурах

Пример:

- Допустим
 - $I = 55 \text{ uA}$
 - $C = C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY} = 15 \text{ pF}$
 - $V_{ref} = 2.5\text{v}$
- Динамический Диапазон
 - $t = (C/I)*V = (15 \text{ pF}/55 \text{ uA}) * 2.5\text{v} = 682 \text{ nS}$
- Точность
 - $\sim 1\% * 682 \text{ ns} = \sim 6.8 \text{ nS}$

На сколько точны измерения длительных интервалов

- **Точность «Грубого» измерения**
 - Точность зависит от кварца
 - Кварц 100 ppm (0.01%)
 - Точность составляет две точности генератора, т.е. 0.02%
 - Влияние «джиттера» – может быть уменьшено за счет нескольких измерений
- **Точность «Точного» измерения**
 - Ошибка СТМУ после калибровки
 - Пусть диапазон СТМУ 500 нсек
 - Точность СТМУ примерно 1%
 - $1\% * (500 \text{ нсек} / 500 \text{ мксек}) \sim 0.001\%$
- **Выводы**
 - «Грубое» (0.02%) + «Точное» (0.001%) = 0.021%
 - Точность в основном определяется точностью кварца

Измерение времени в задачах:

- **Измерение длины кабеля (TDR)**
- **Ультразвук**
 - Расходомеры, измерение потока
 - Измерение расстояния
- **Лазеры и Радио**
 - Измерение дальности
 - Адаптивный круиз-контроль
 - Исправность тормозов
- **Измерение длительности импульсов**



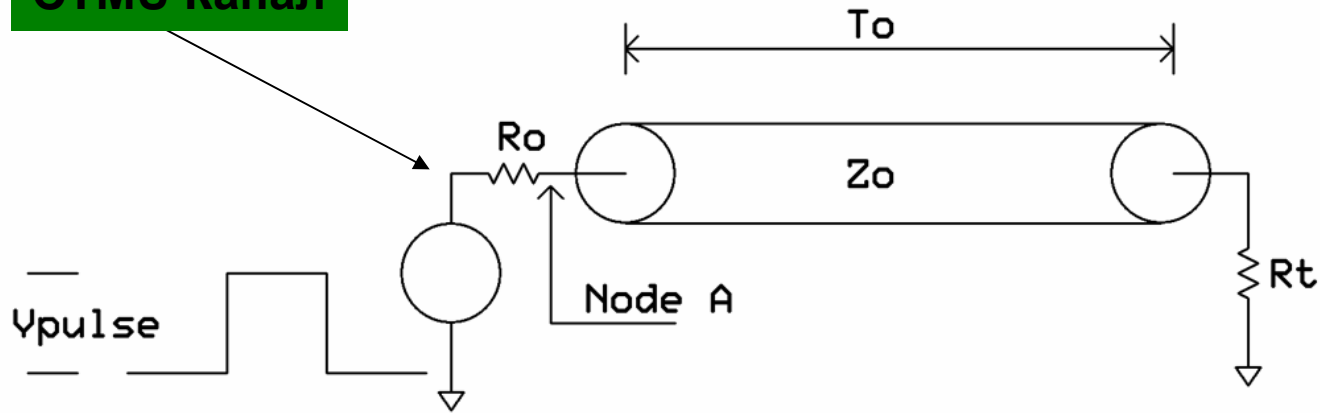
MICROCHIP

MASTERS 2012

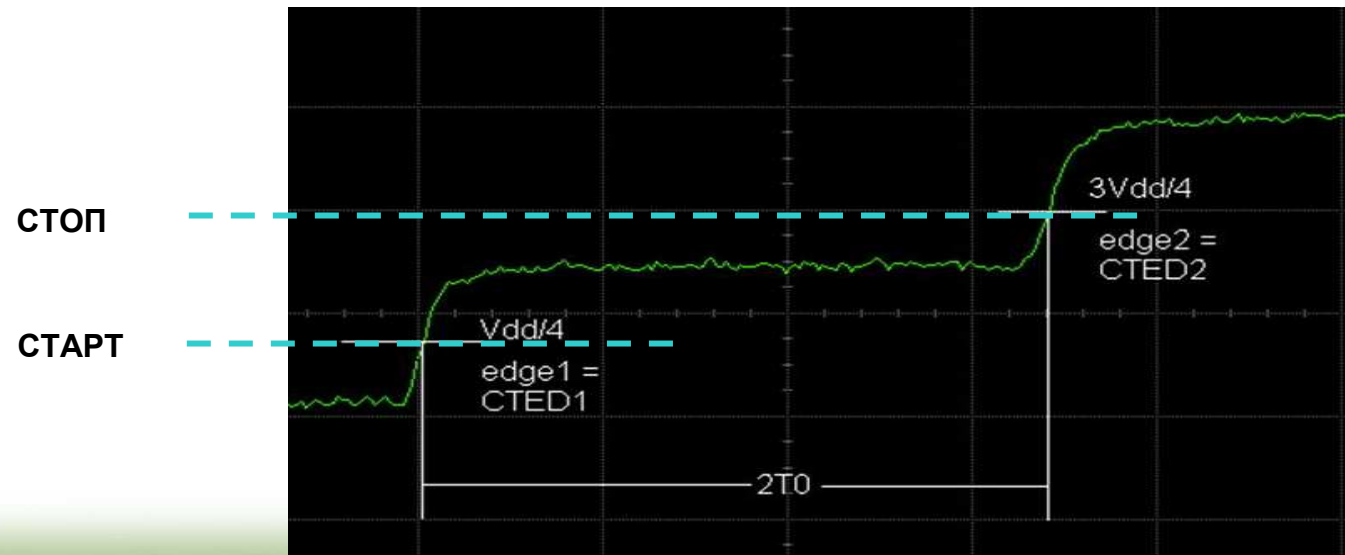
Измерение Времени Пролета Отраженного Сигнала Используя СТМУ (TDR)

TDR – Теория

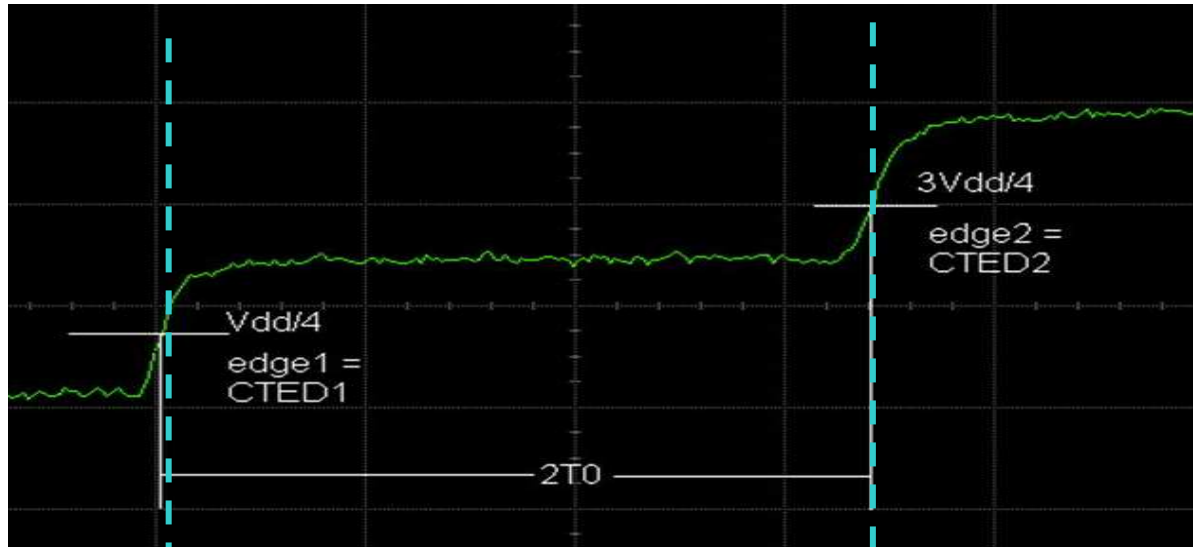
CTMU Канал



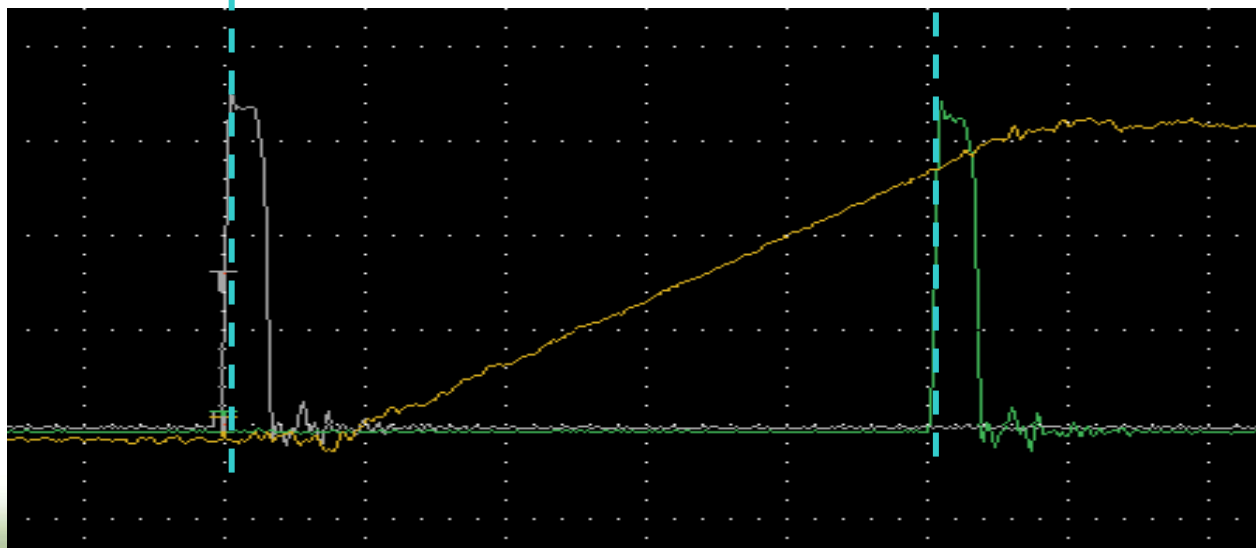
$R_o = 50 \text{ Ом}$
 $Z_o = 50 \text{ Ом}$
 $R_t = \text{бесконечность Ом}$
 (Разомкнуто)



TDR. Измерения



$2t_0$ напрямую
связано с длиной
кабеля





MICROCHIP

MASTERS 2012

Ультразвуковой метод измерения расхода жидкости и газа

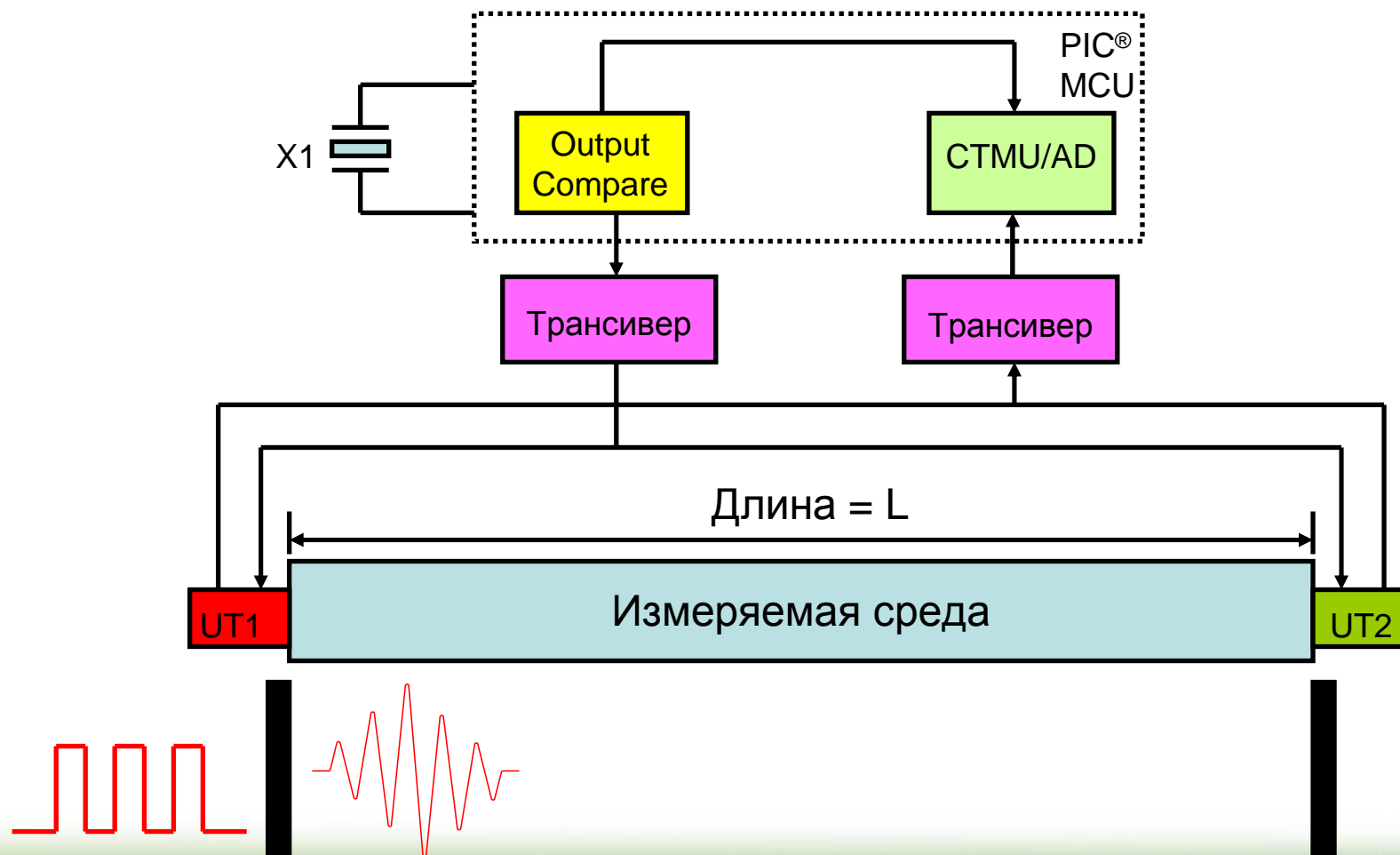
Ультразвуковой расходомер

- **Методы**
 - Доплер
 - Время прохождения сигнала
- **Конфигурация датчиков**

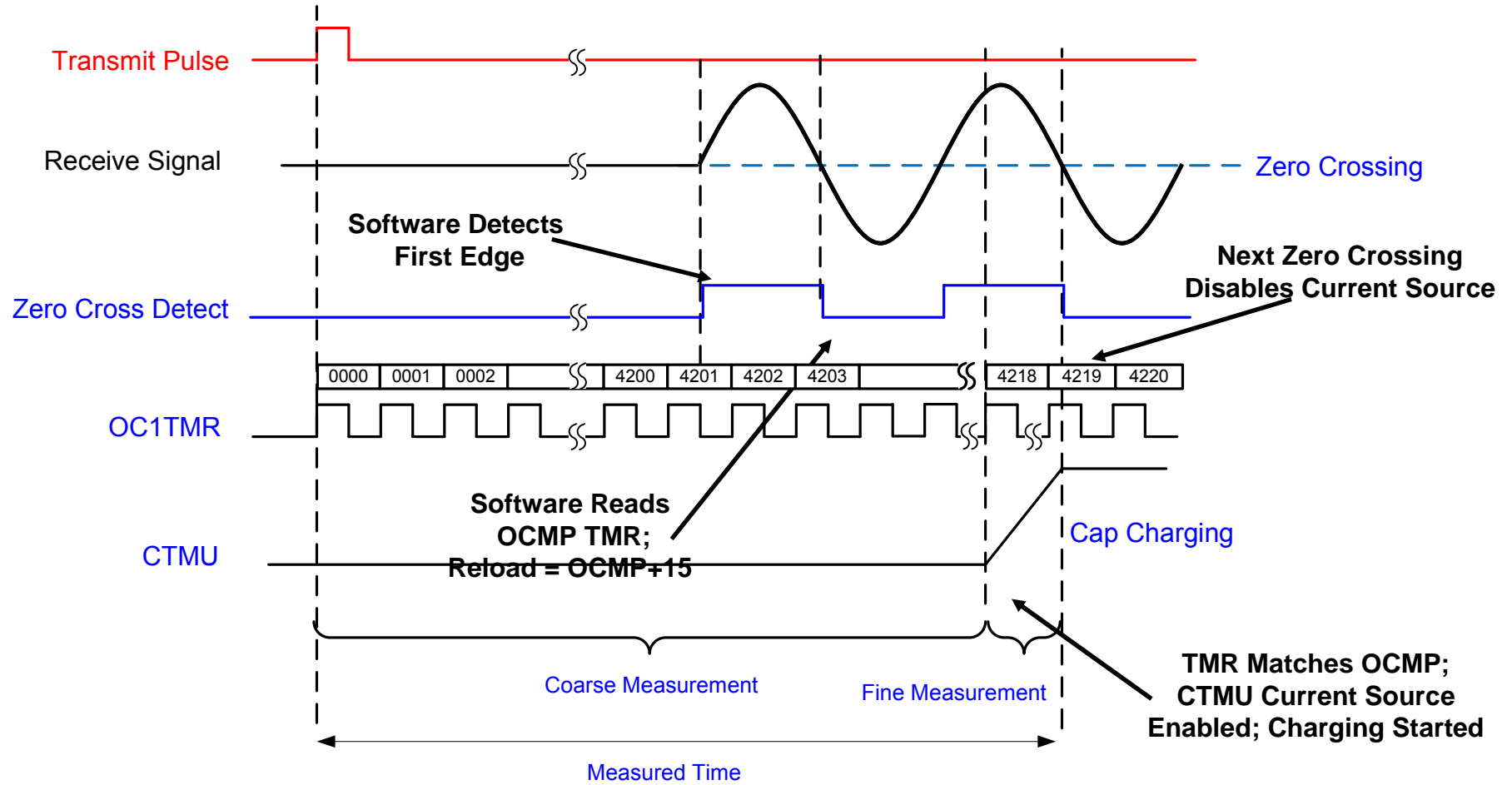


УЗ расходомер. Использование СТМУ

- Структурная схема



Измерение времени пролета сигнала



Ультразвуковой расходомер

- **Результаты**
 - Разрешение по времени 53.67 псек
 - Соответствует разрешению по скорости 1.37 мм/сек.
- **Диапазон измерений**
 - По теории диапазон определяется суммой скорости звука и скорости движения среды где звук распространяется
 - На практике он ограничен максимальной скоростью потока когда поток является ламинарным (что является механическим ограничением)

СТМУ

Что может еще СТМУ?

- **Измерение емкости**
 - Абсолютной
 - Относительной
- **Измерение температуры**
- **Измерение Индуктивности**



MICROCHIP

MASTERS 2012

Измерение емкости с помощью СТМУ

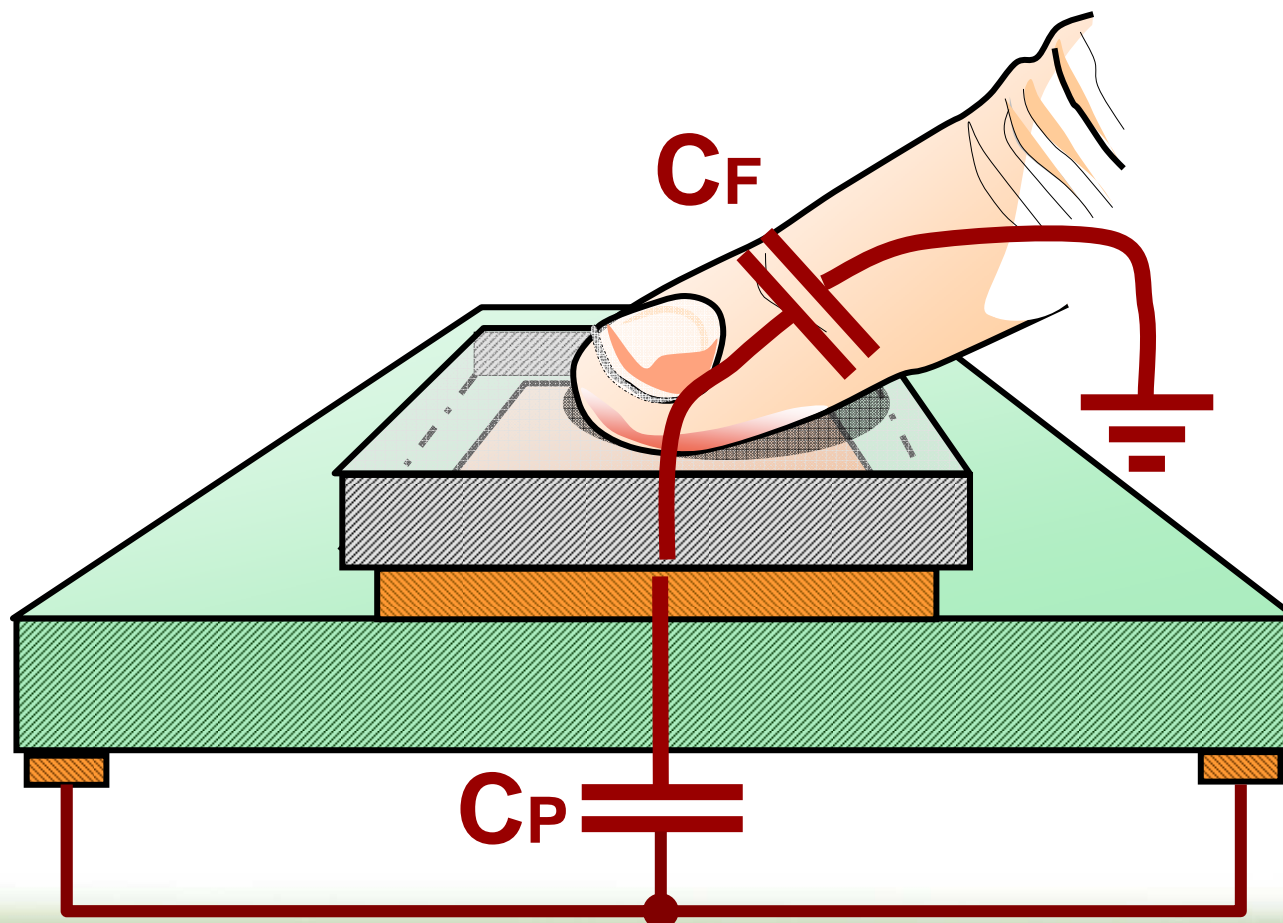
Измерение емкости с помощью СТМУ

Типовые задачи

- **Относительные измерения**
 - CapTouch (сенсорные клавиатуры и т.п.)
 - Емкостные микрофоны
- **Абсолютные измерения**
 - Измерители R-L-C
 - Измерение влажности

CapTouch Как это работает?

Поднесение пальца вносит емкость

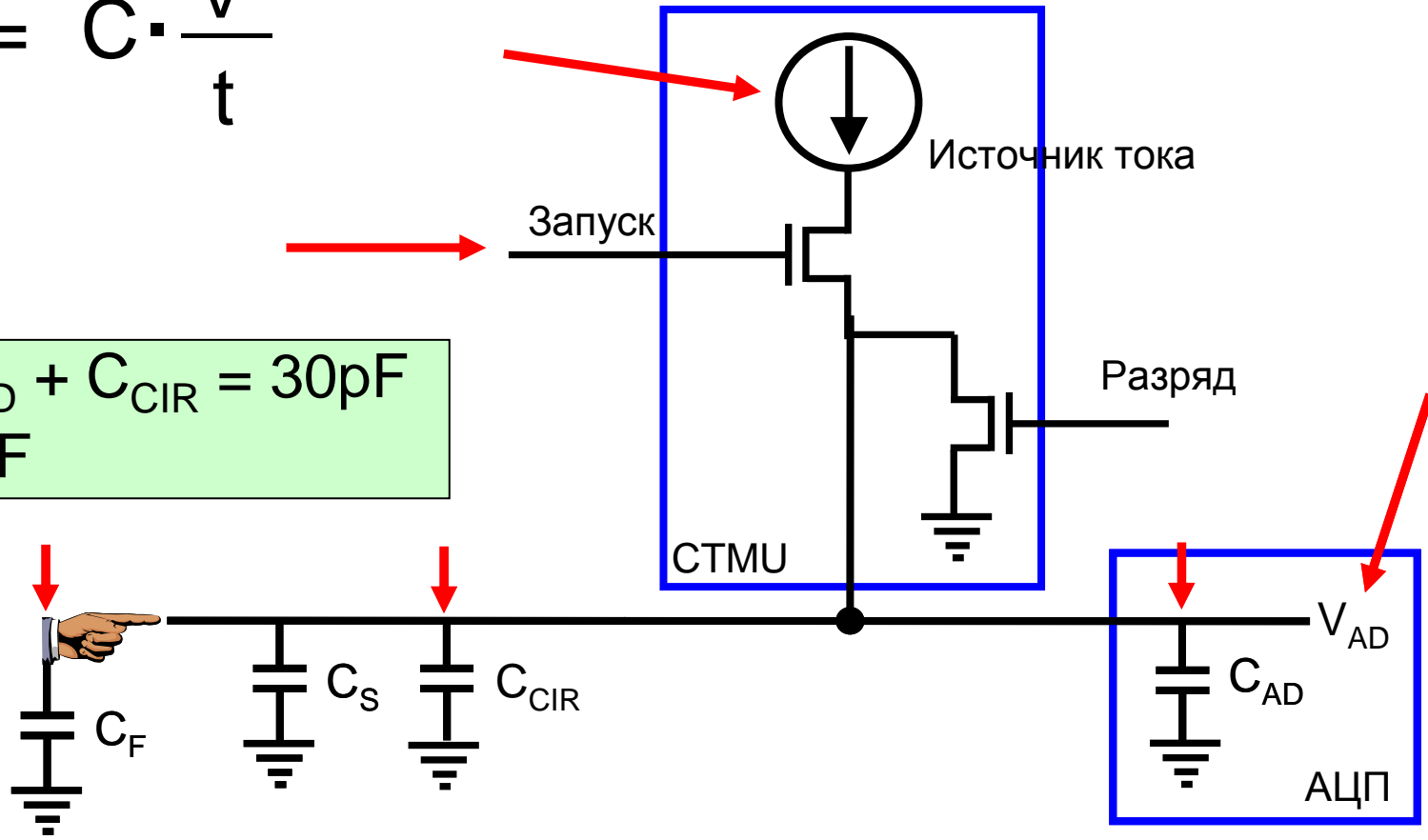


СТМУ для детектирования касания

$$I = C \cdot \frac{V}{t}$$

$$C_S = C_{AD} + C_{CIR} = 30\text{pF}$$

$$C_F = 7\text{pF}$$



Измерение емкости

- Ток через конденсатор описывается выражением

$$i = C * (dV/dt)$$

- Так как I и C постоянны:

$$I = C * V/t \quad \longrightarrow \quad I * t = C * V$$

- Значит

$$C = (I*t)/V$$

- Если C увеличивается, значит V должно уменьшаться

Относительное измерение

- Из предыдущего слайда...

$$C = (I * t) / V \quad \longrightarrow \quad V = (I * t) / C$$

- Для capTouch приложений интересно только изменение **C**, не абсолютное значение
- Когда ток **I** и время заряда **t** постоянны, нужно определить только напряжение **V** – Это просто!
- Не нужны точные значения тока **I** и времени **t** для измерения **относительного изменения емкости.**

Измерение Абсолютной Емкости

- Из предыдущих слайдов...

$$C = (I * t) / V \quad \longrightarrow \quad V = (I * t) / C$$

- Известно время заряда **t**.
- Для точного измерения емкости нужно калибровать ток **I**.

Калибровка СТМУ

Первый метод

- C_{system} должна быть известна
- Заряжаем в течении точного интервала времени
- Определяем напряжение
- Вычисляем значение тока |

Калибровка СТМУ

Второй метод

- Добавление точного резистора на плату
 - Измеряется напряжение на точном резисторе с помощью АЦП
 - Вычисляем ток

Измерения Емкости. Разрешающая способность.

- Пусть дано:
 - 10-bit АЦП
 - $t = 500$ нсек (известно)
 - $V = 1$ В (измерено)
 - $I = 55$ мкА (известно)
 - $C = (55 \text{ мкА} * 500 \text{ нс}) / 1 \text{В} = 27.5$ пФ
 - Разрешение по напряжению $3.00 / 1024 = 2.93$ мВ
 - Тогда 1 квант АЦП
 - $C = (55 \text{ уа} * 500 \text{ нс}) / 1.00293 = 27.42$ пФ
 - $\Delta C = (27.5 - 27.4) \text{ пФ} = 0.08$ пФ

Измерение Температуры с помощью СТМУ

Измерение температуры

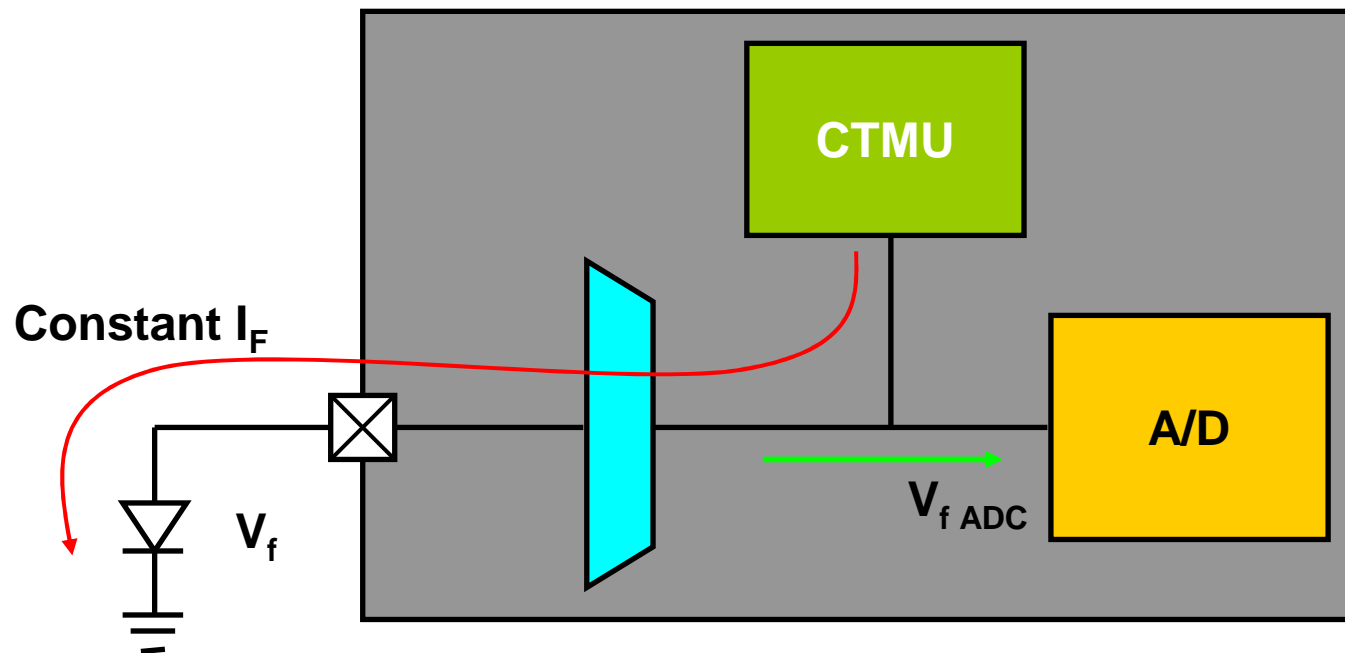
Где применяется:

- **Климат контроль в помещениях**
- **Контроль температуры в приборах**
- **Дешевые медицинские термометры**
- **...**

Измерение температуры

- **Напряжение на диоде
изменяется с температурой**
- **СТМУ Источник тока СТМУ
постоянен с изменением
напряжения питания и
температуры**

Измерение температуры СТМУ и ДИОД



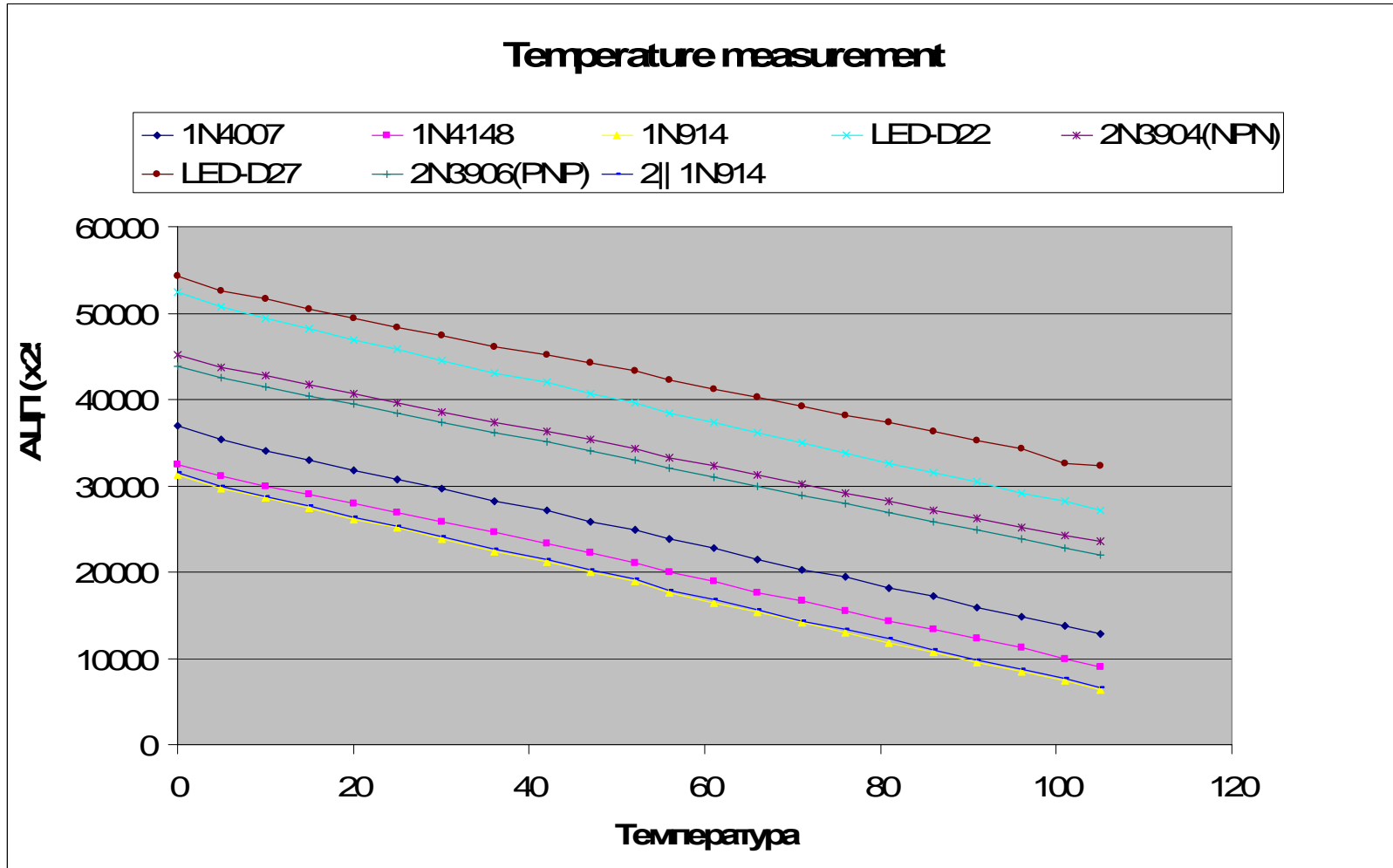
$$T \propto V_f$$

Измерение температуры

Основные вычисления

- $I = I_0(e^{(qV/kT)} - 1)$ EQ 1
- $I/I_0 + 1 = e^{(qV/kT)}$ EQ 2
- $\ln(I/I_0 + 1) = qV/kT$ EQ 3
- $\ln(I/I_0 + 1) = V$ EQ 4
- $T = qV/kV$ EQ 5
- Таким образом температура T пропорциональна напряжению V на диоде

Измерение температуры



* Многие PIC24 и PIC18 устройства имеют внутренний диод для измерения температуры .

Измерение температуры

Калибровка

- Из графиков следует линейная зависимость между температурой и напряжением
- Измерить напряжение при двух температурах
 - Если устраивает низкая точность, то можно калибровать в одной точке
- Рассчитать наклон и смещение

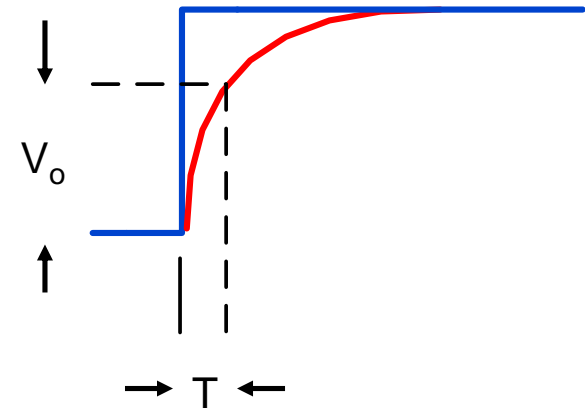
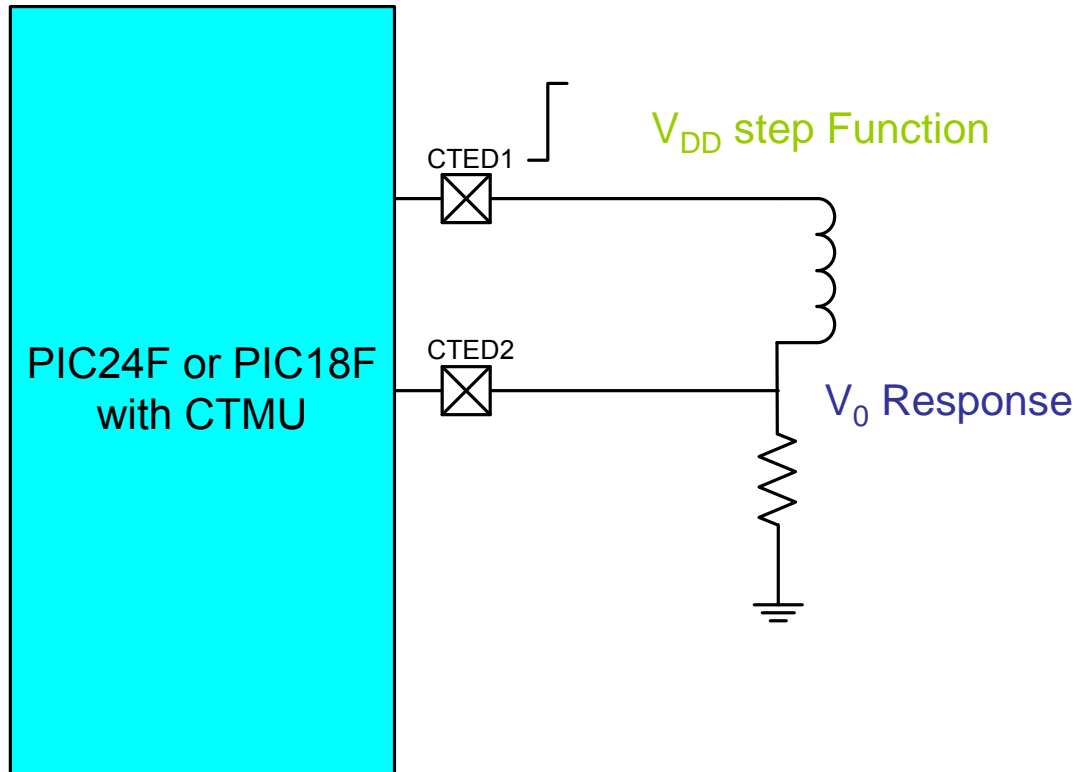


MICROCHIP

MASTERS 2012

Измерение индуктивности с помощью СТМУ

Измерение индуктивности



Измерение ИНДУКТИВНОСТИ

Основные вычисления

- $I = V_{DD}/R(1 - e^{(-tR/L)})$ EQ 1
- $V_0 = V_{DD} (1 - e^{(-tR/L)})$ Where $V_0 = IR$ EQ 2
- $1 - V_0/V_{DD} = e^{(-tR/L)}$ EQ 3
- $-tR/L = B$ Where $B = \ln(1 - V_0/V_{DD})$ EQ 4
- $L = -tR/B$ EQ 5
- Таким образом индуктивность прямо пропорциональна времени

Разрешение Измерения Индуктивности

Допустим:

- $R = 1\text{K}$
- $V_0 = 1\text{V}$
- $V_{DD} = 3\text{V}$
- $t = 500\text{ nS}$
- $L = (-1000/-.405)*500\text{ nS} = 1.233\text{ mH}$
- Для разрешения по времени 0.8 ns
- $L = (-1000/-.405)*500.8\text{ nS} = 1.235\text{ mH}$
- Разрешение 2 uH



MICROCHIP

MASTERS 2012

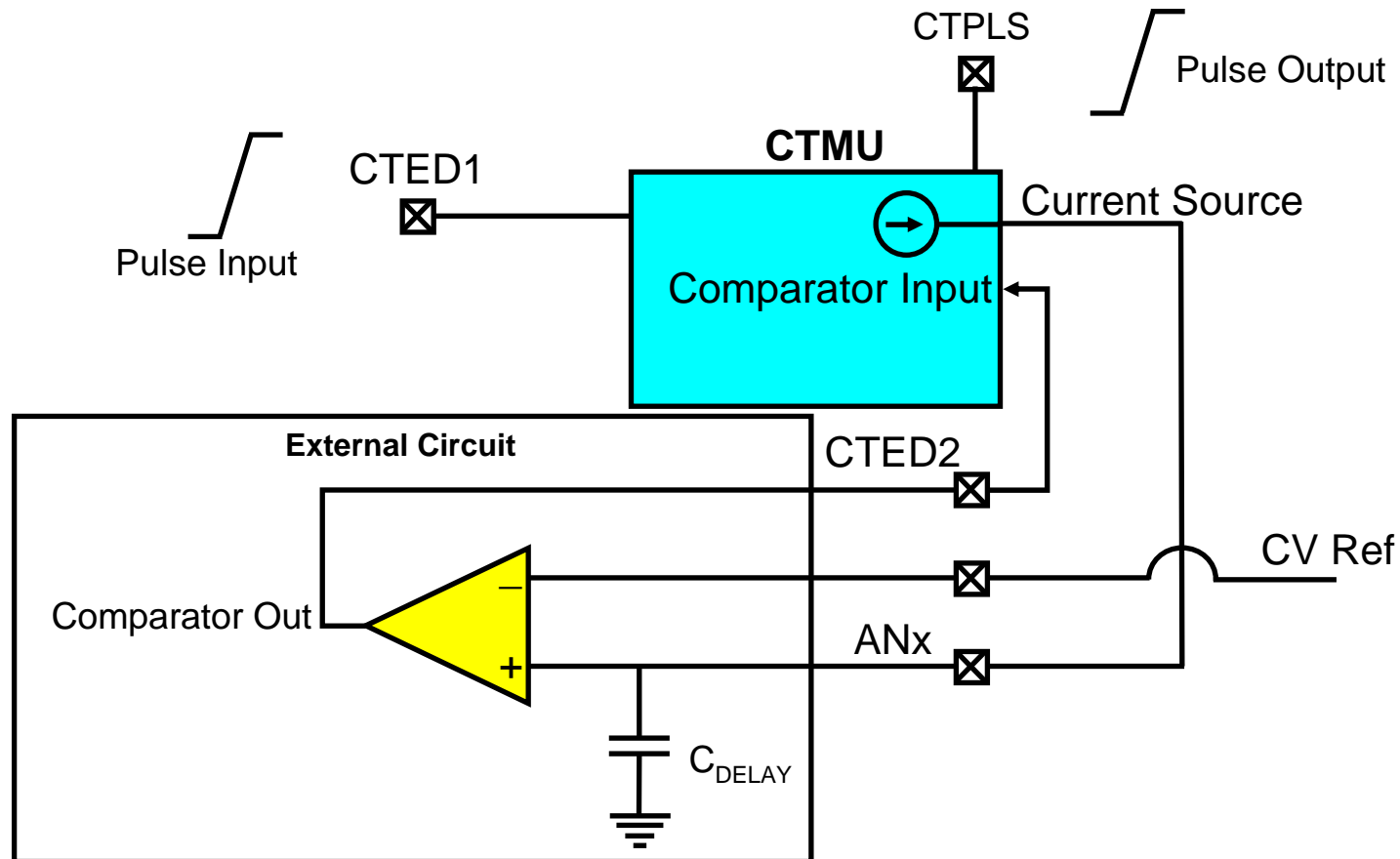
ШИМ / Задержка импульса с помощью СТМУ

ШИМ / Задержка

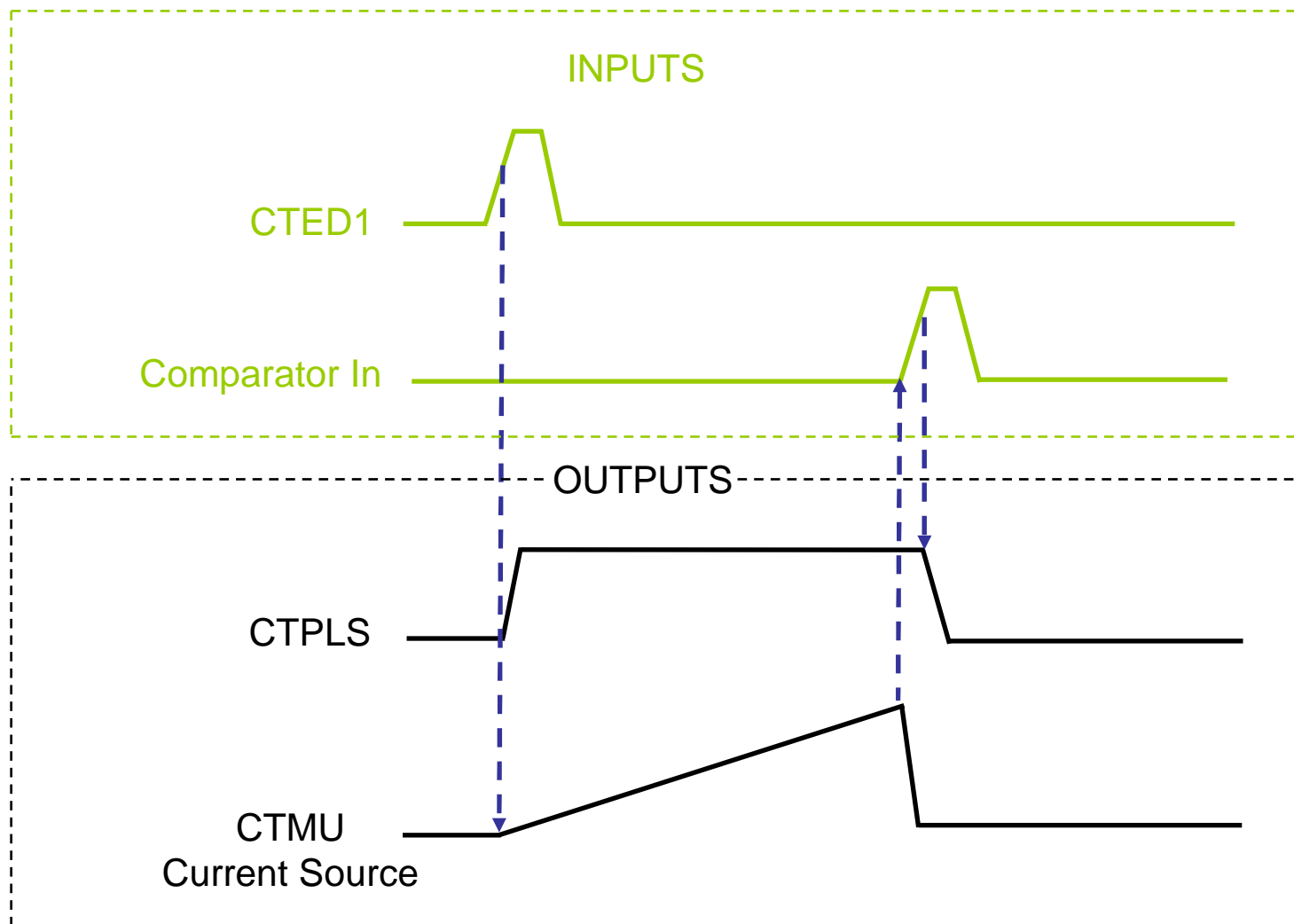
Типовые задачи

- **Гасящий импульс для радаров и сонаров**
- **Высокочастотный ШИМ**
- **Точная задержка фронта сигнала для тестового оборудования**

ШИМ / Задержка конфигурация системы



ШИМ / Задержка - СТМУ



Измерение уровня жидкости



Измерение уровня

- **Важные факторы**
 - **Скорость наполнения**
 - **Форма емкости**
 - **Материал емкости**
 - **Форма и размер датчиков**
 - **Температурный диапазон**
 - **Разрешение**

Измерение уровня

1й эксперимент:

**Измерение уровня воды в
пластиковом цилиндре**

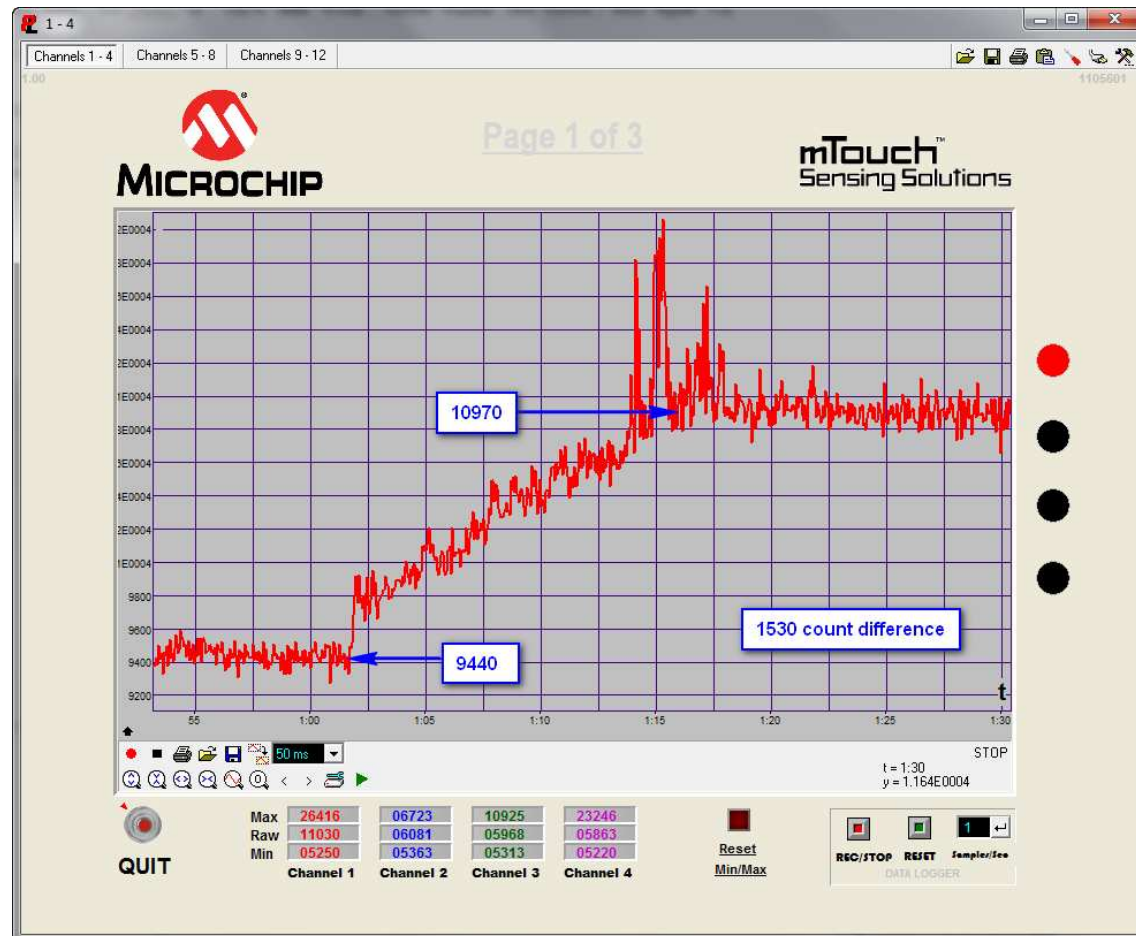
3 сенсора разной ширины



Измерение уровня

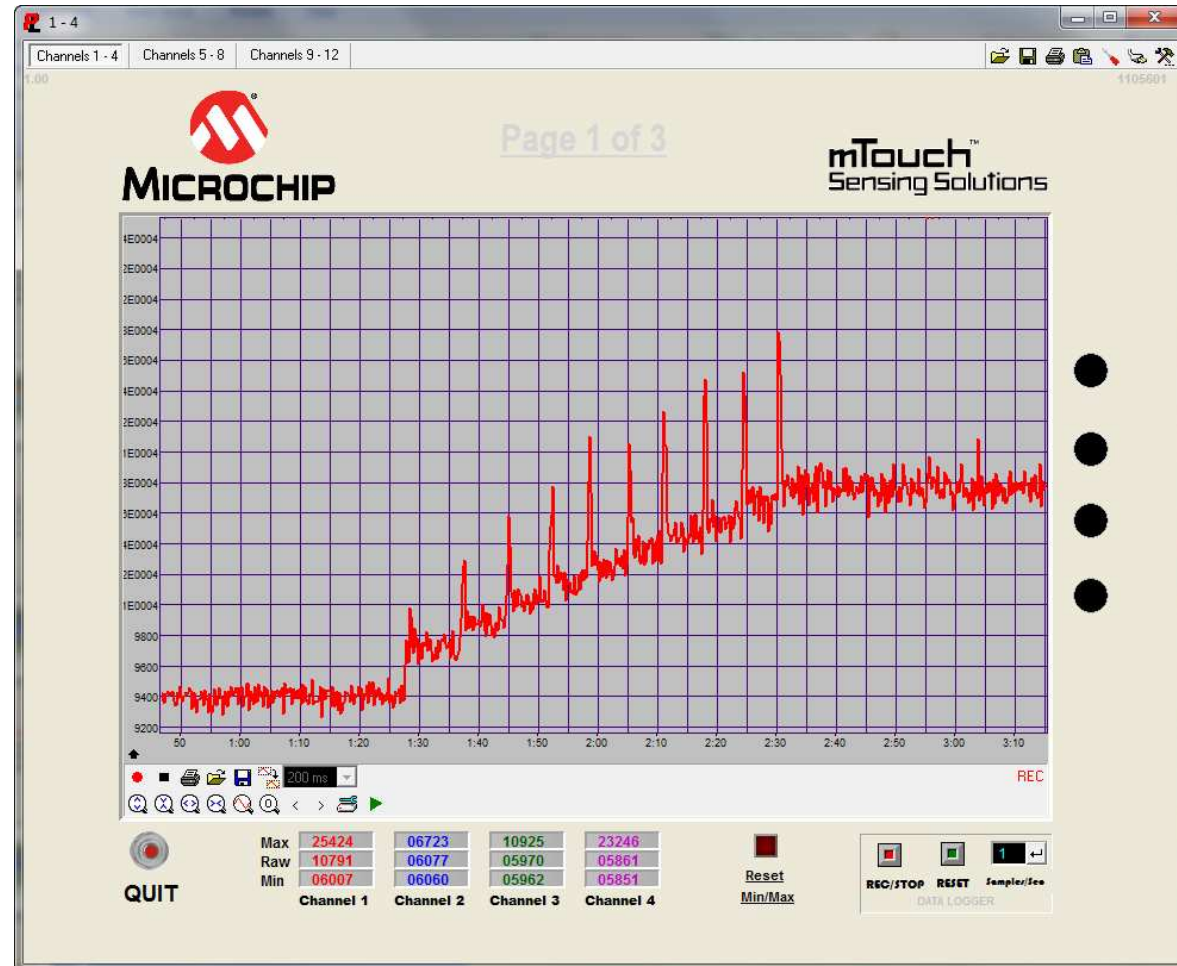
Что происходит при наполнении цилиндра?

При малой скорости наполнения нет никаких всплесков в значениях вплоть до полного наполнения емкости



Измерение уровня

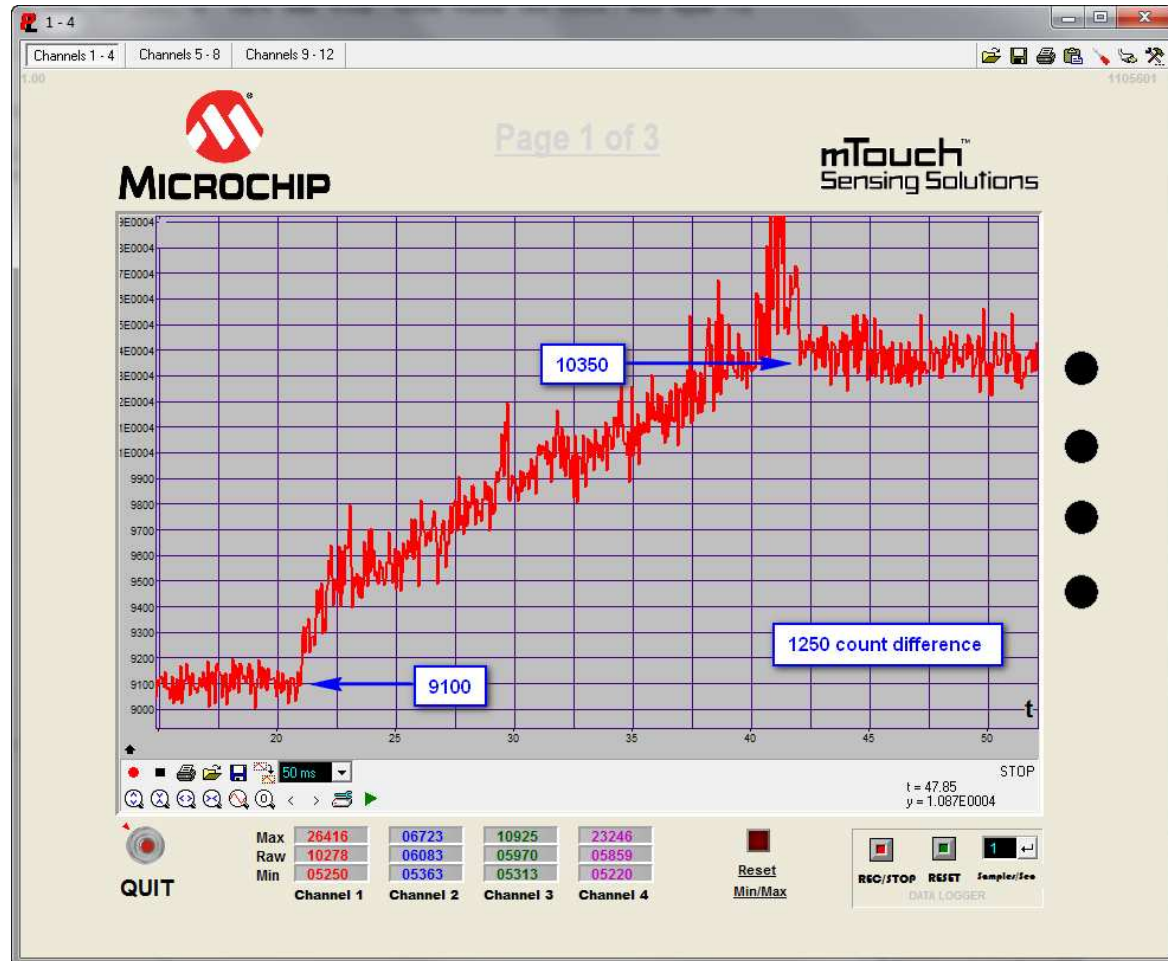
Наполняя
цилиндр
малыми
порциями по 25
мл (10% от
полного
объема),
показания
меняются
линейно с
небольшим
смещением при
первом
наполнении



Измерение уровня

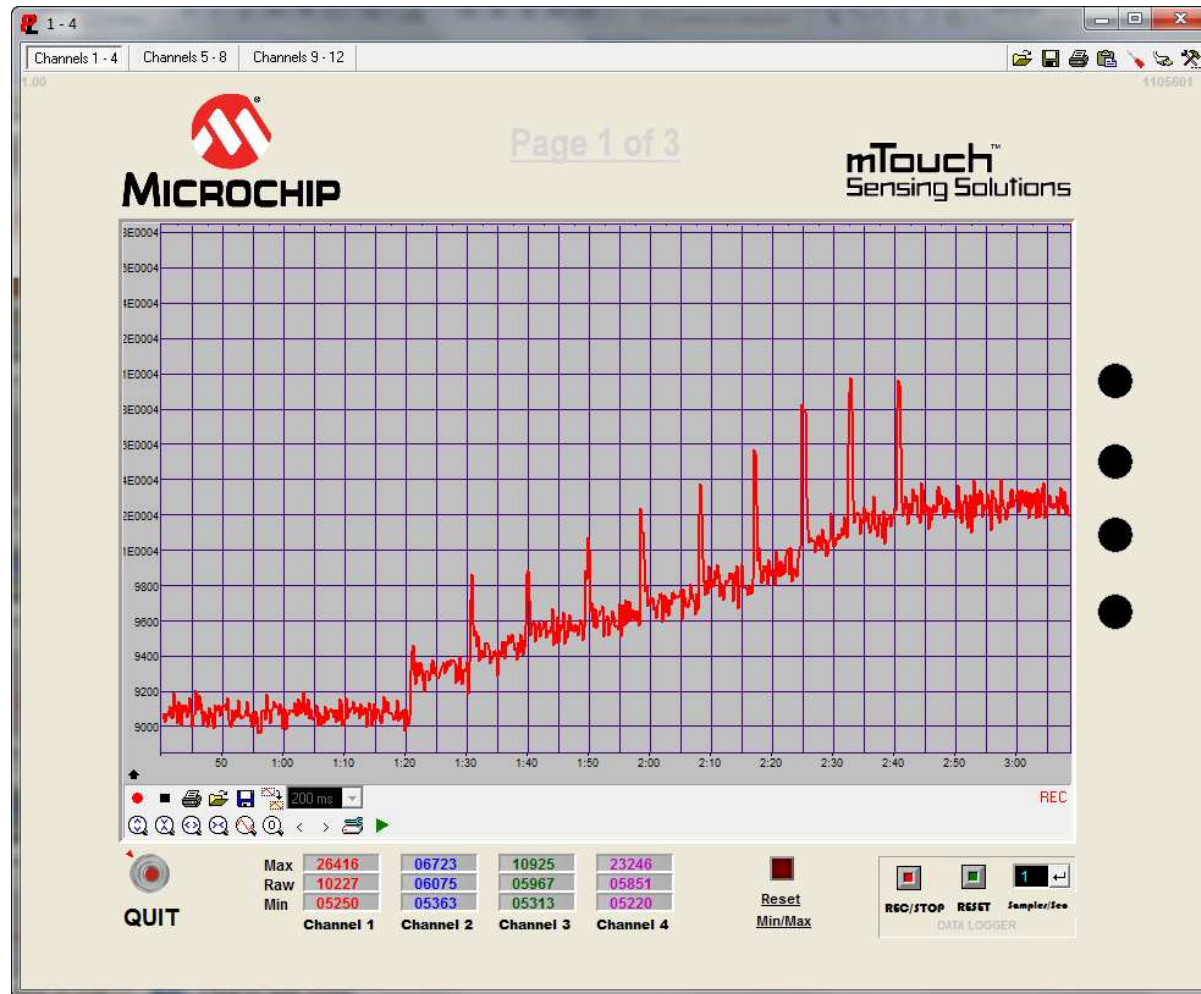
Уменьшим
вдвое ширину
сенсоров

При
изначальной
ширине
диапазон
значений был
9440..10970 (1530
точек). Узкий
датчик работает
в диапазоне
9100..10350 (1250
точек), т.е. -18%



Измерение уровня

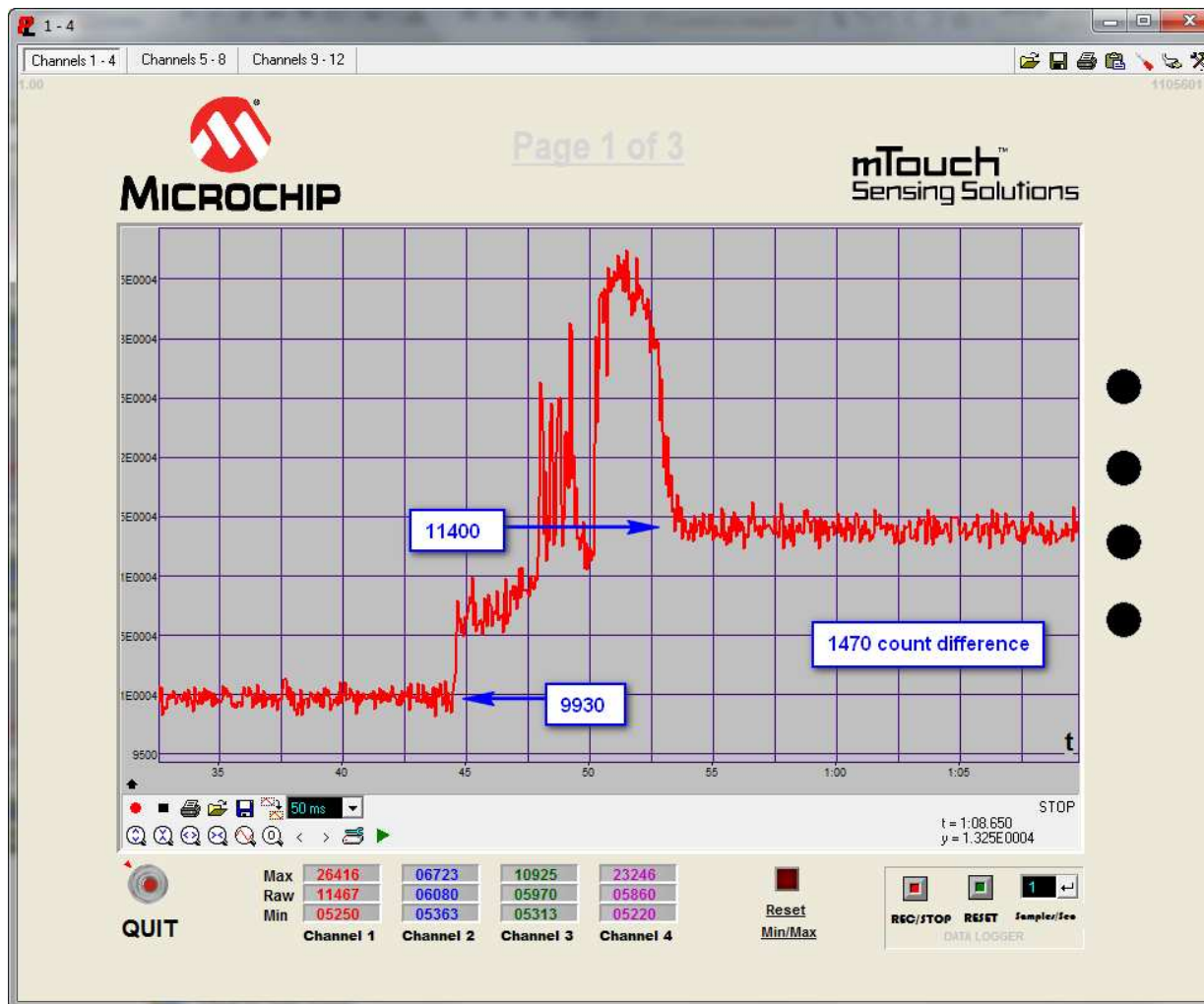
Наполняя
цилиндр
малыми
порциями по 25
мл (10% от
полного
объема),
показания
меняются
линейно с
небольшим
смещением при
первом
наполнении



Измерение уровня

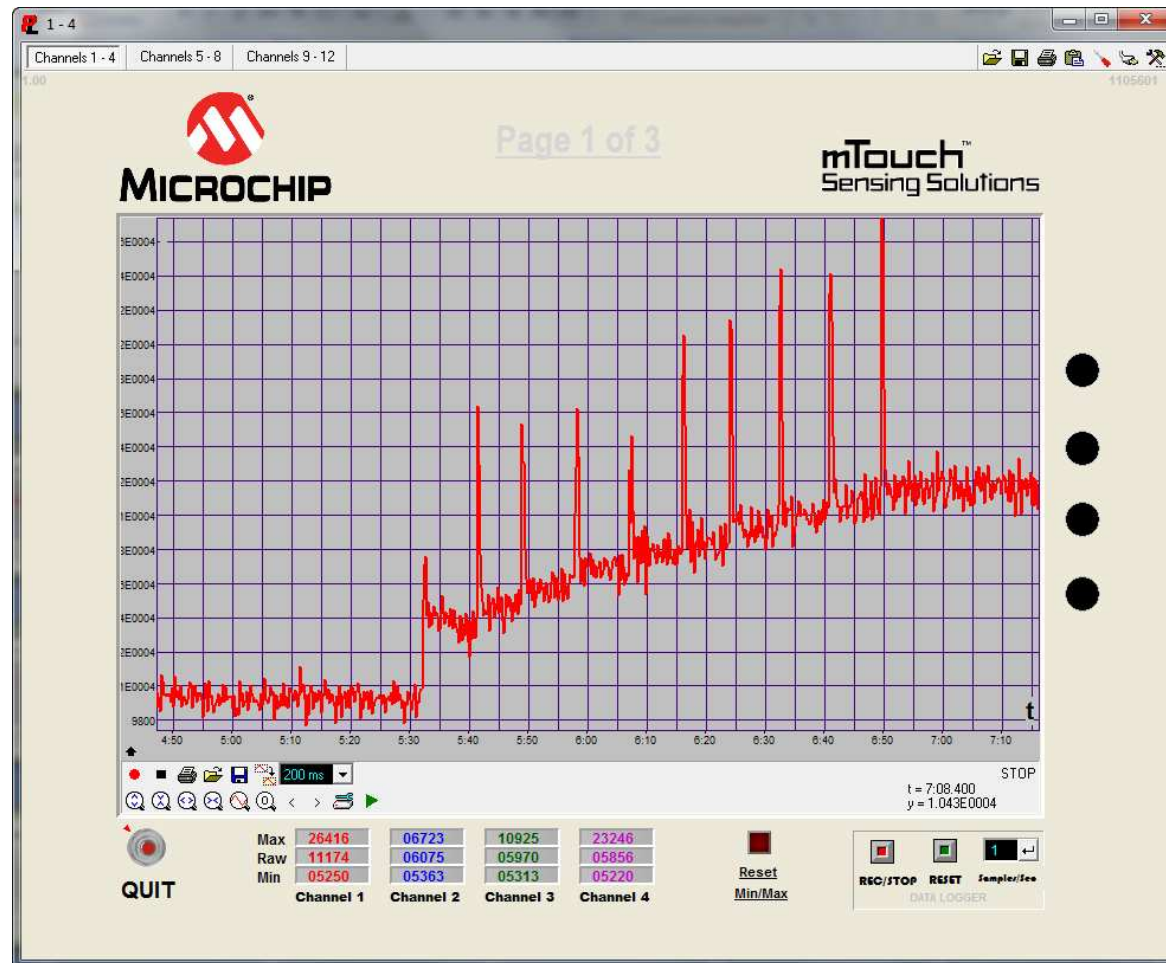
Увеличим вдвое
ширину
сенсоров

При
изначальной
ширине
диапазон
значений был
9440..10970 (1530
точек). Широкий
датчик работает
в диапазоне
9930..11400 (1470
точек), т.е. -4%



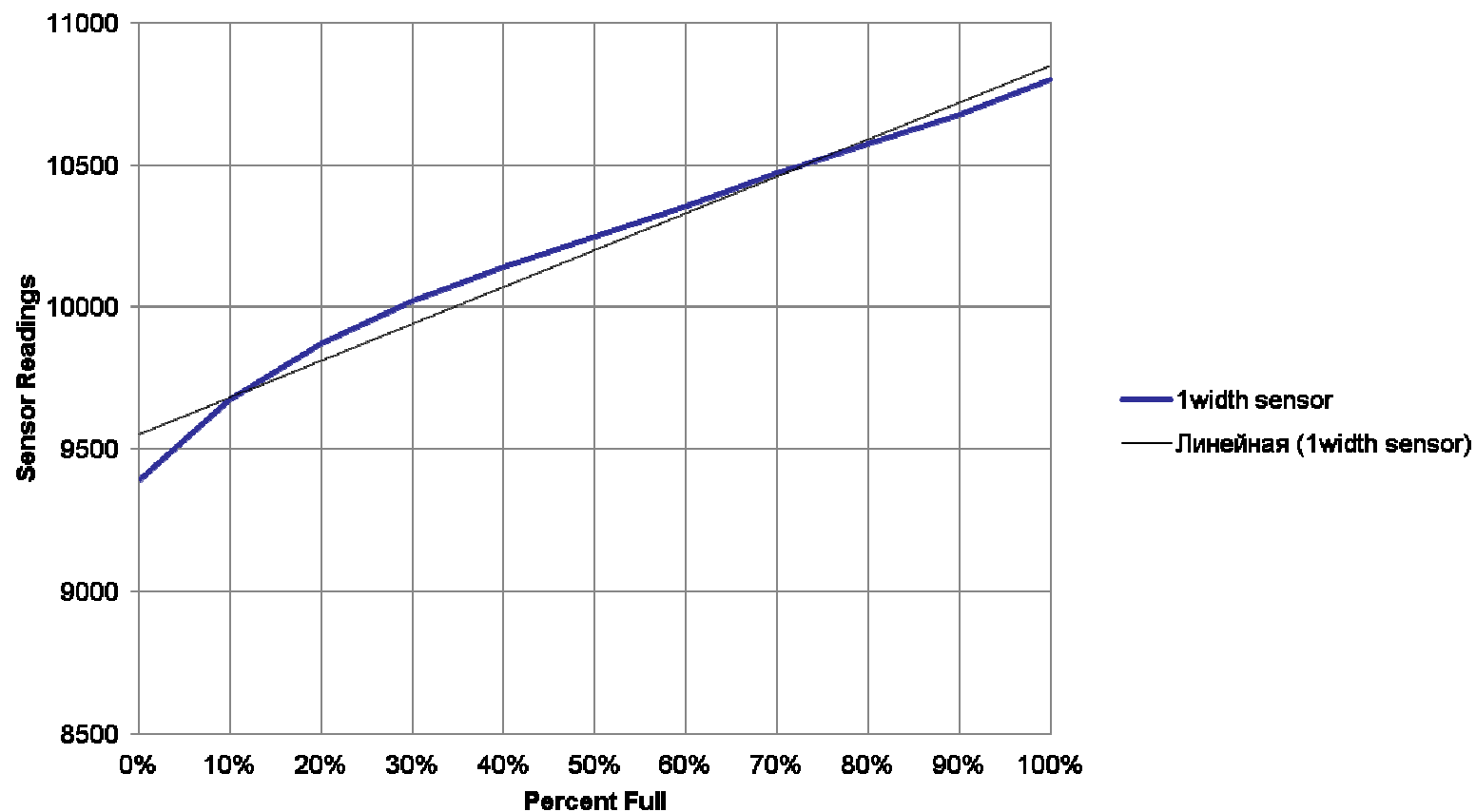
Измерение уровня

Наполняя цилиндр малыми порциями по 25 мл (10% от полного объема), показания меняются не очень линейно с большим смещением при первом наполнении



Измерение уровня

Plastic graduated cylinder - one sensor width



Измерение уровня

2й эксперимент:

**Измерение уровня воды в
стеклянном цилиндре**

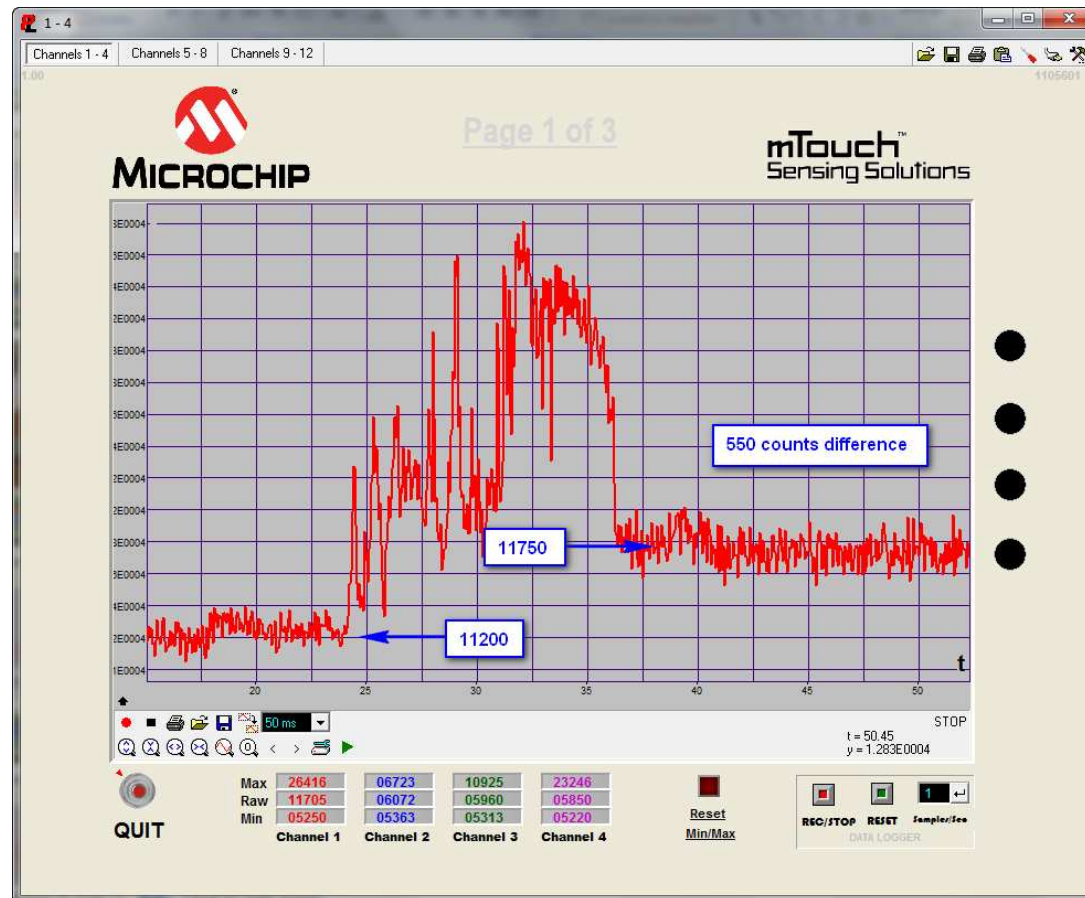
3 сенсора разной ширины



Измерение уровня

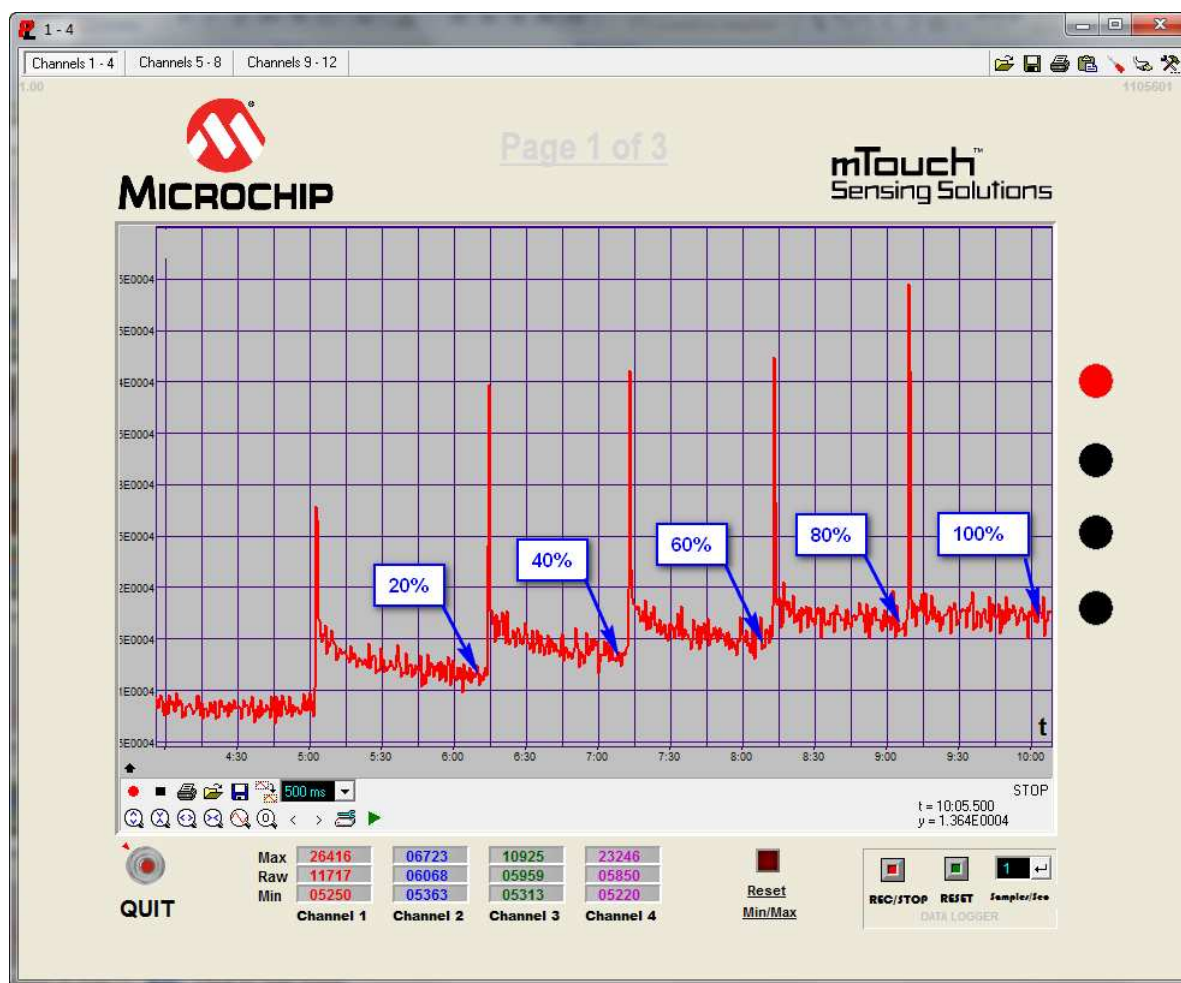
Что происходит при наполнении цилиндра?

В отличие от пластиковой емкости, сразу же начинаются большие выбросы показаний, даже выше установленного значения



Измерение уровня

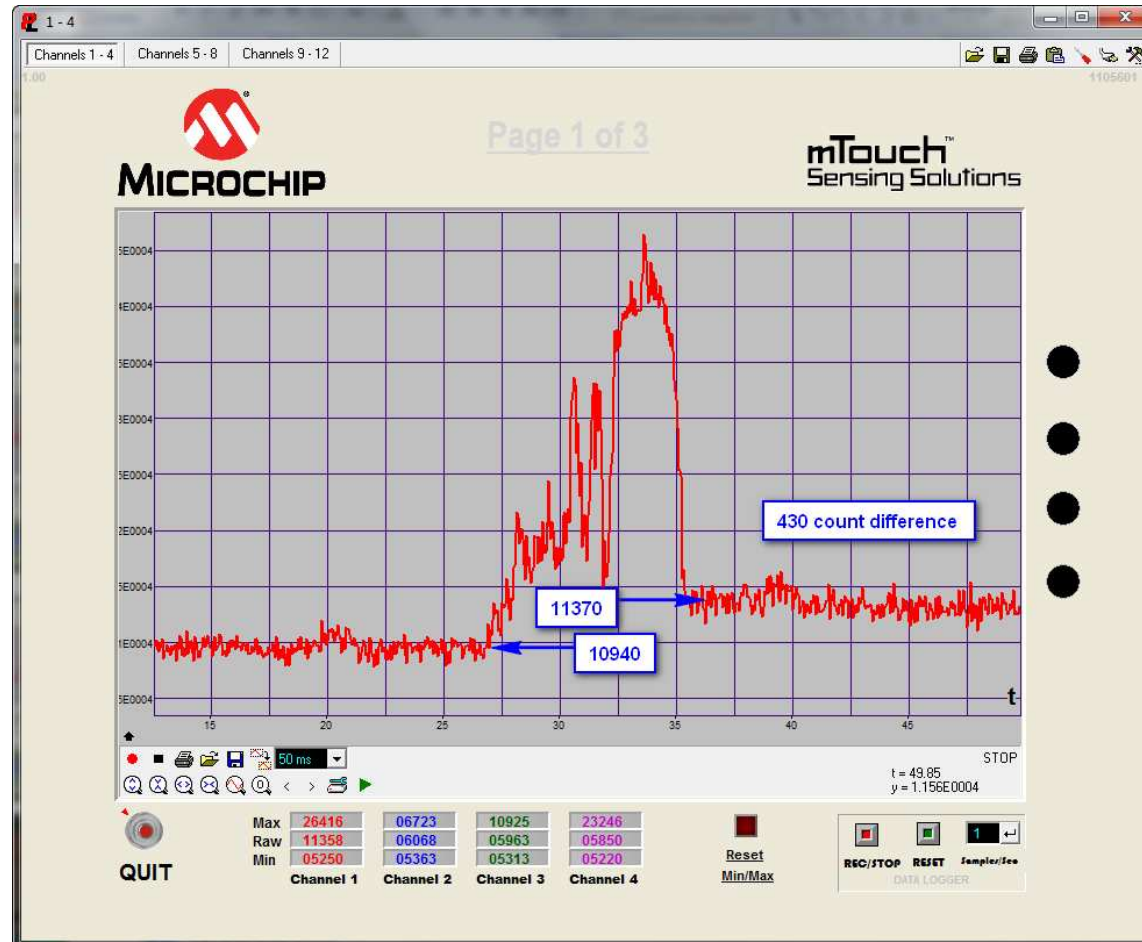
Показания
нелинейны и
требуется больше
времени для их
стабилизации
(около 60 с).
Доливка
осуществлялась
порциями 20%



Измерение уровня

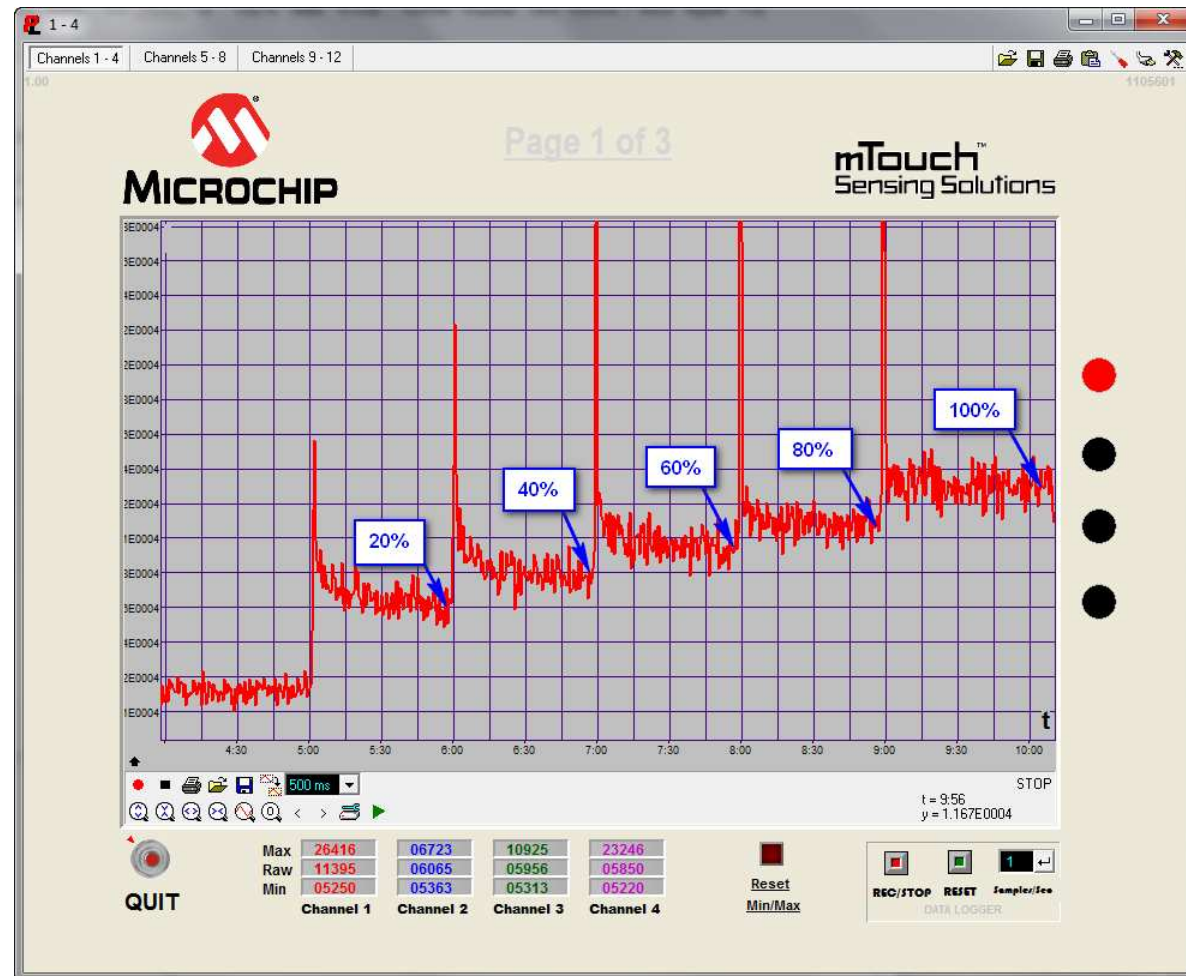
Уменьшим
вдвое ширину
сенсоров

При
изначальной
ширине
диапазон
значений был
11200..11770 (550
точек). Узкий
датчик работает
в диапазоне
10940..11370 (430
точек), т.е. -22%



Измерение уровня

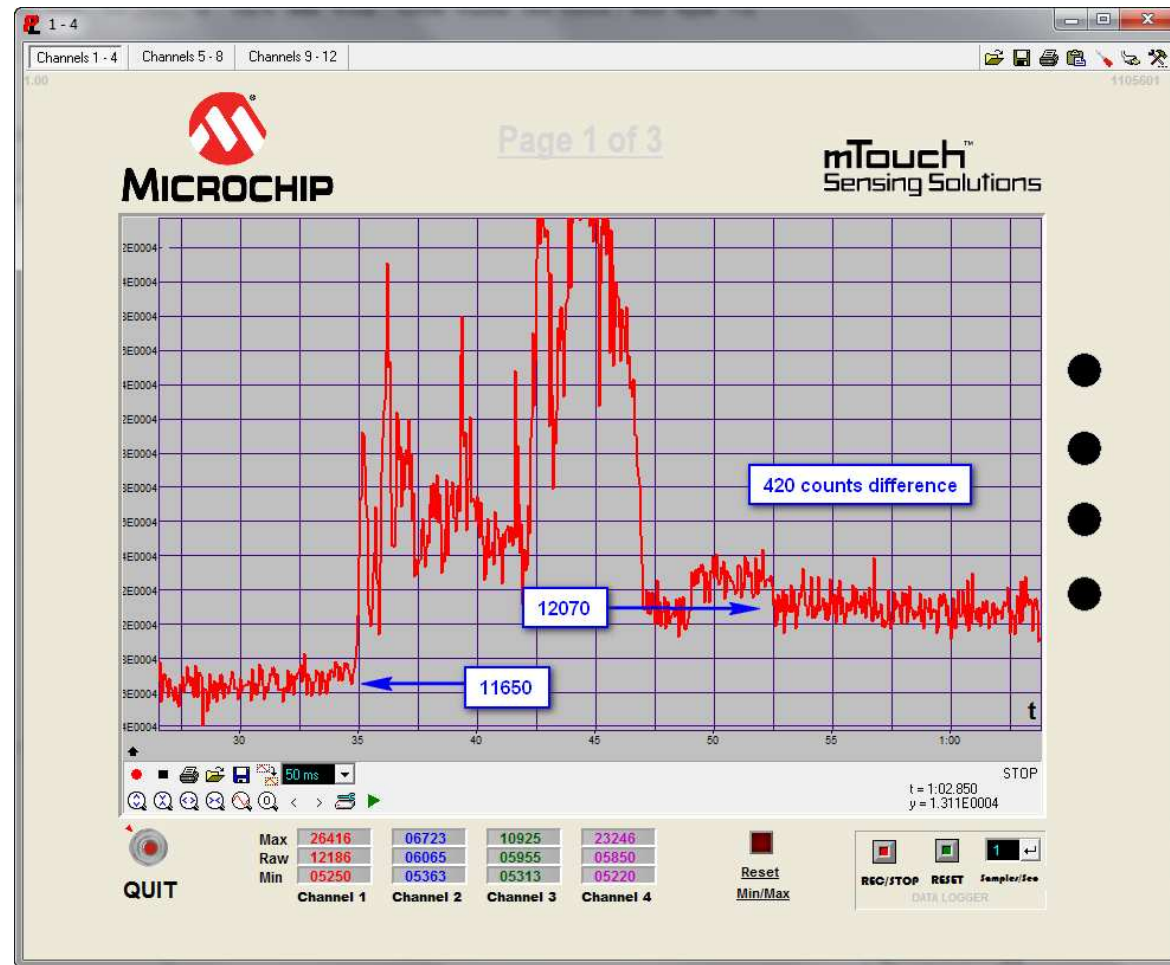
Показания стали более линейными, но времени для их стабилизации требуется много (около 60 с).
Доливка осуществлялась порциями 20%



Измерение уровня

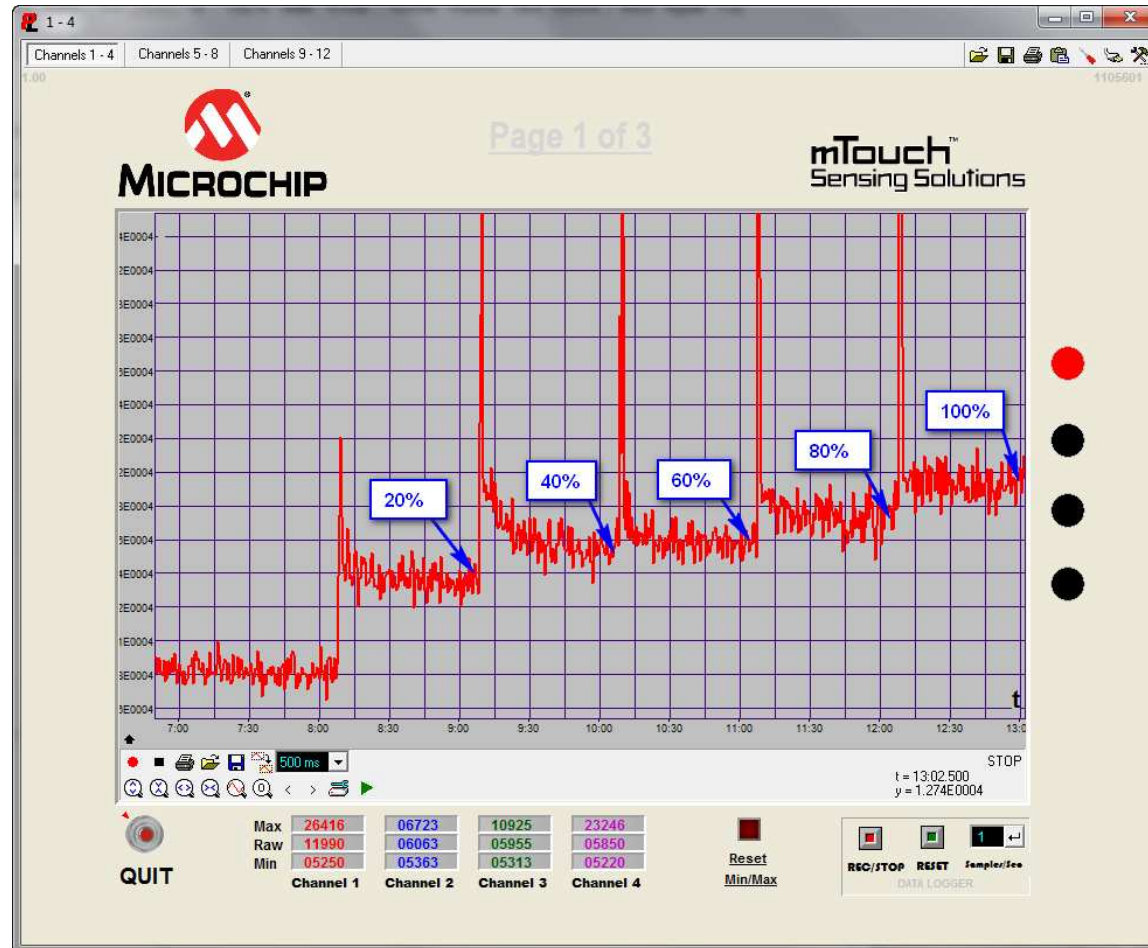
Увеличим вдвое
ширину
сенсоров

При
изначальной
ширине
диапазон
значений был
11200..11770 (550
точек). Широкий
датчик работает
в диапазоне
11650..12070 (420
точек), т.е. -24%



Измерение уровня

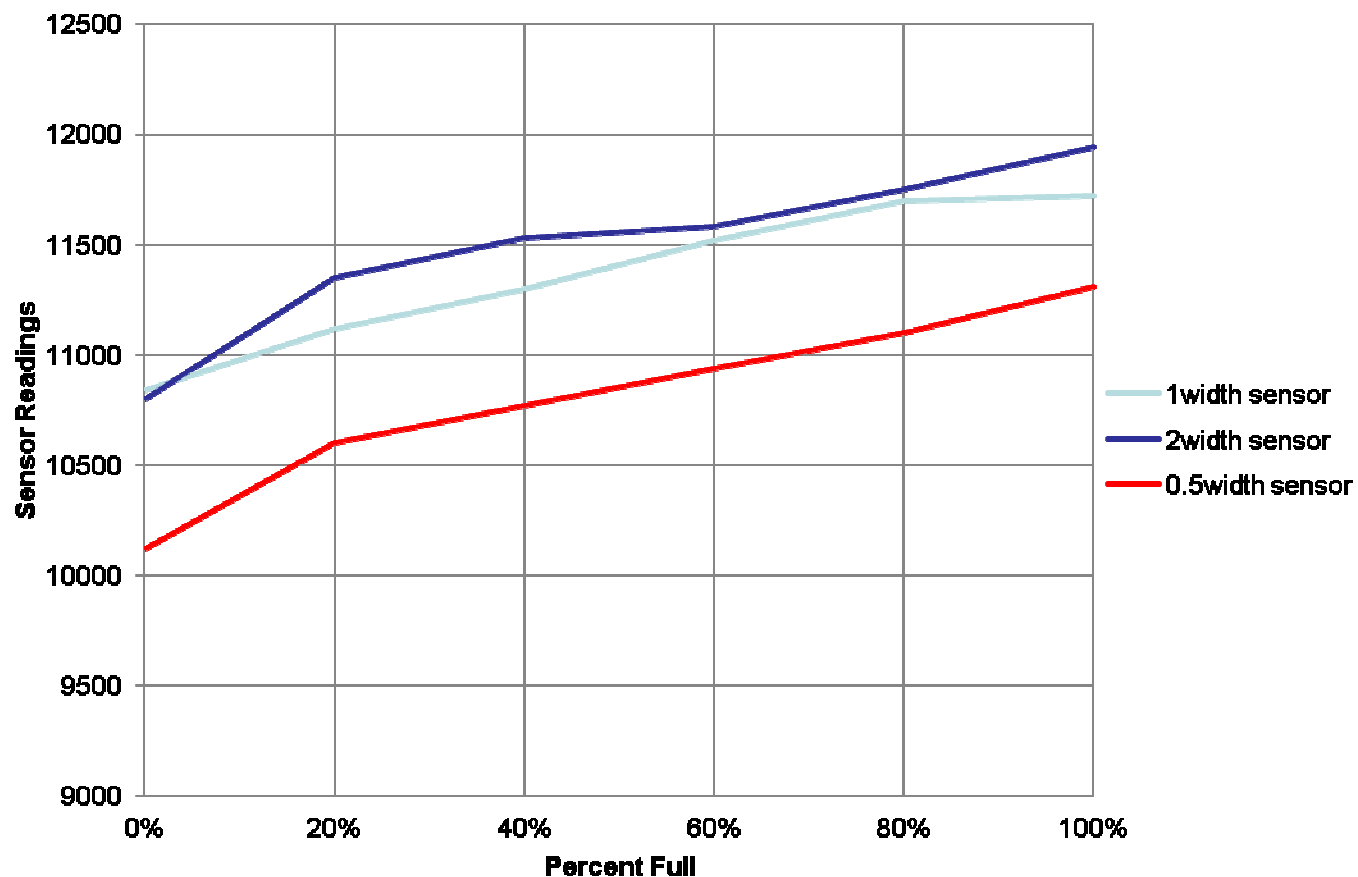
Значения
меняются
нелинейно.
Доливка
осуществлялась
порциями 20%



Измерение уровня

Много шума,
требуется
фильтрация

Glass graduated cylinder - three sensor widths



Измерение уровня

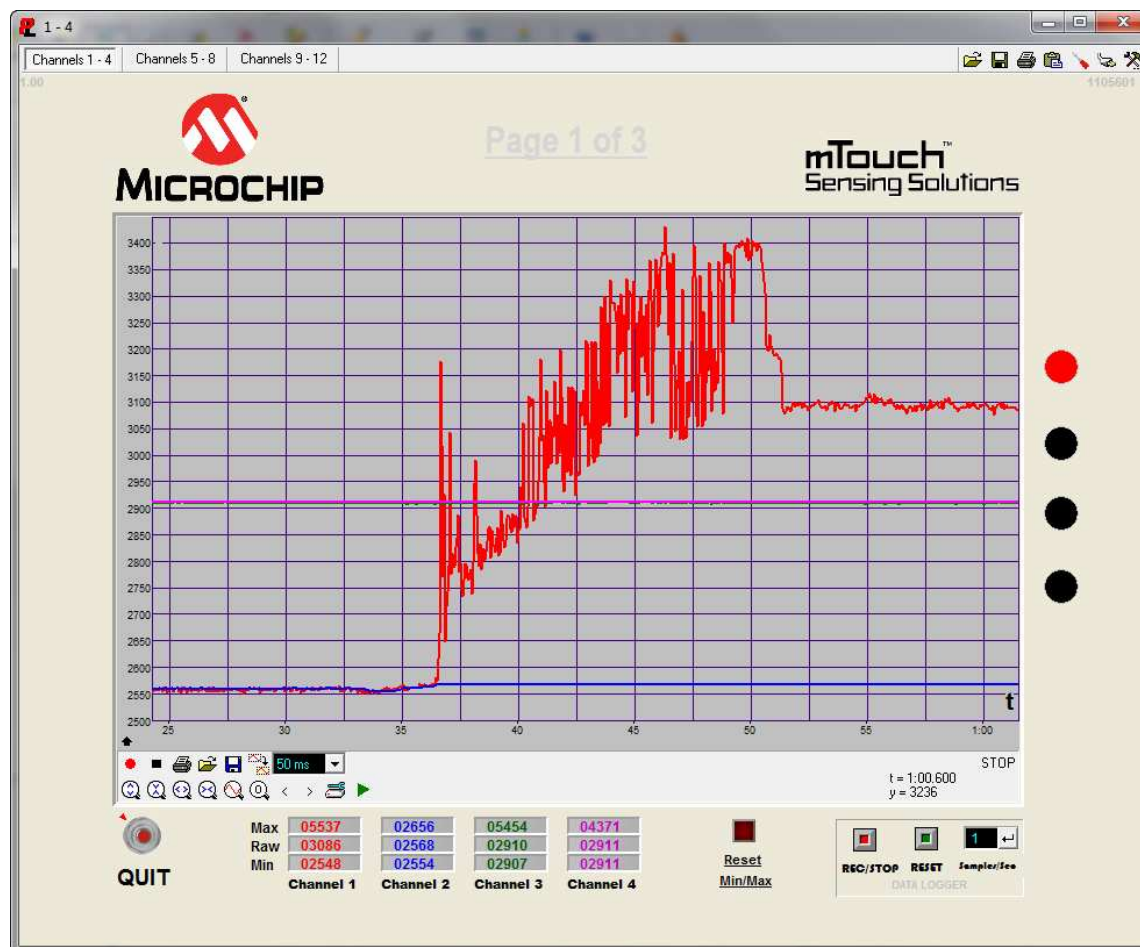
Дополнительный
эксперимент:

Измерение уровня в
большой пластиковой
бутылке



Измерение уровня

Гораздо больше
всплесков
показаний
вплоть до
полного
наполнения
бутылки



Измерение уровня

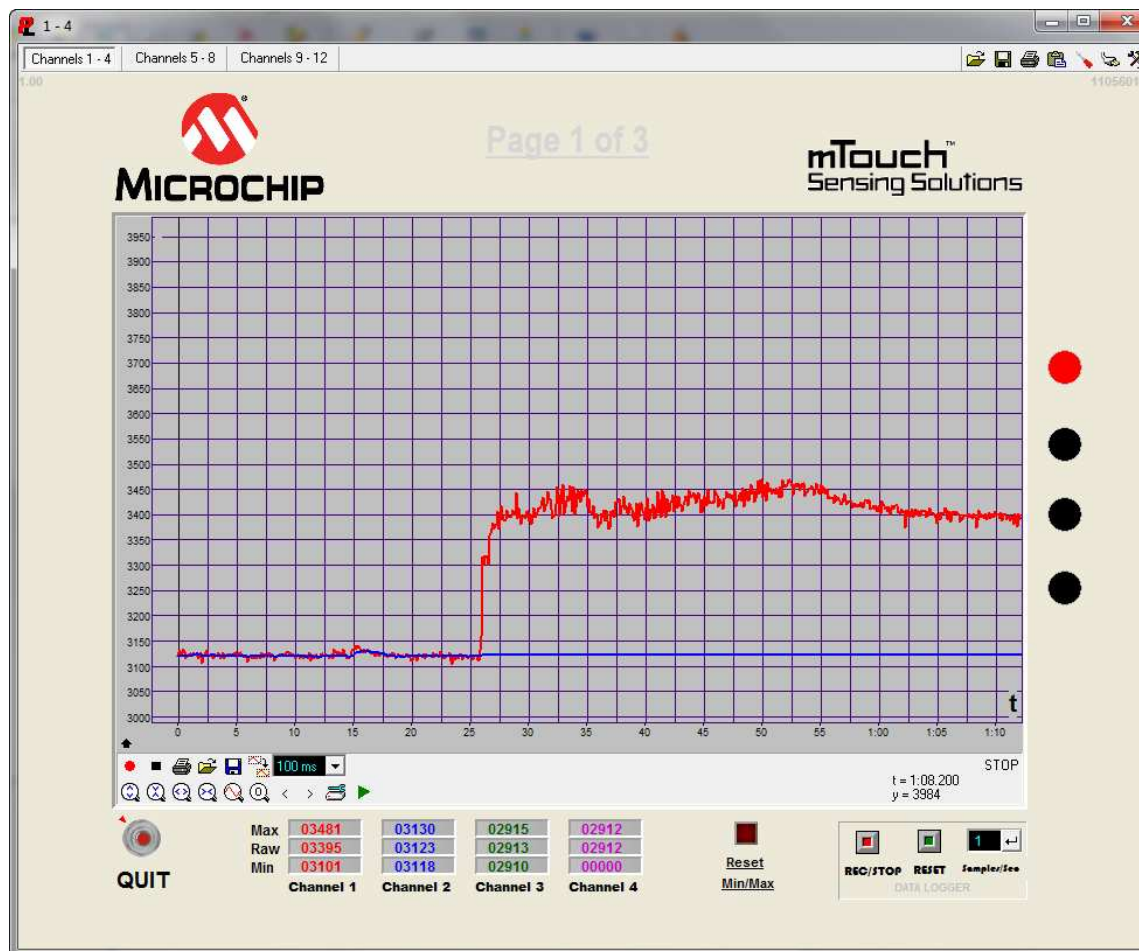
**Дополнительный
эксперимент:**

**Измерение уровня воды и
алкоголя в стеклянной
бутылке**



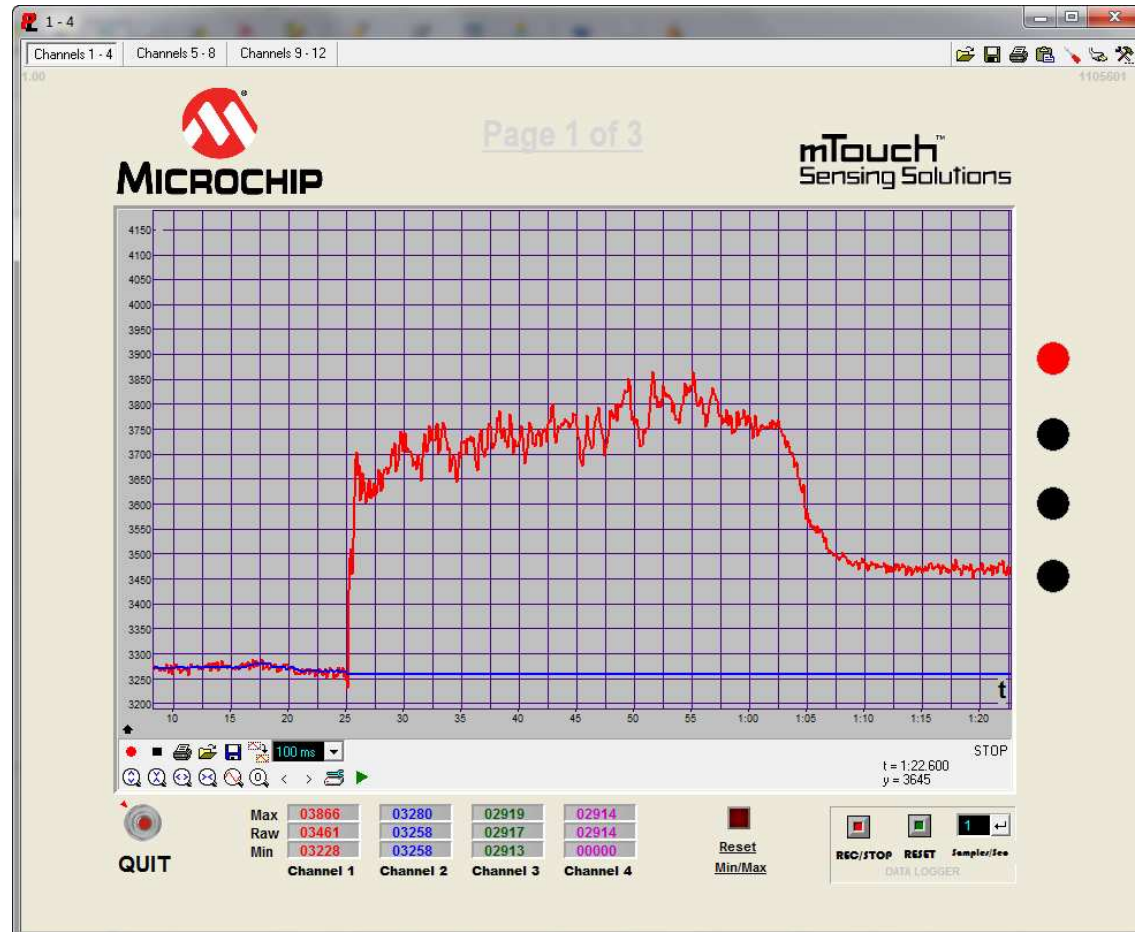
Измерение уровня

При наполнении
алкоголем, идет
сразу большой
выброс
практически до
максимального
значения 3400
точек



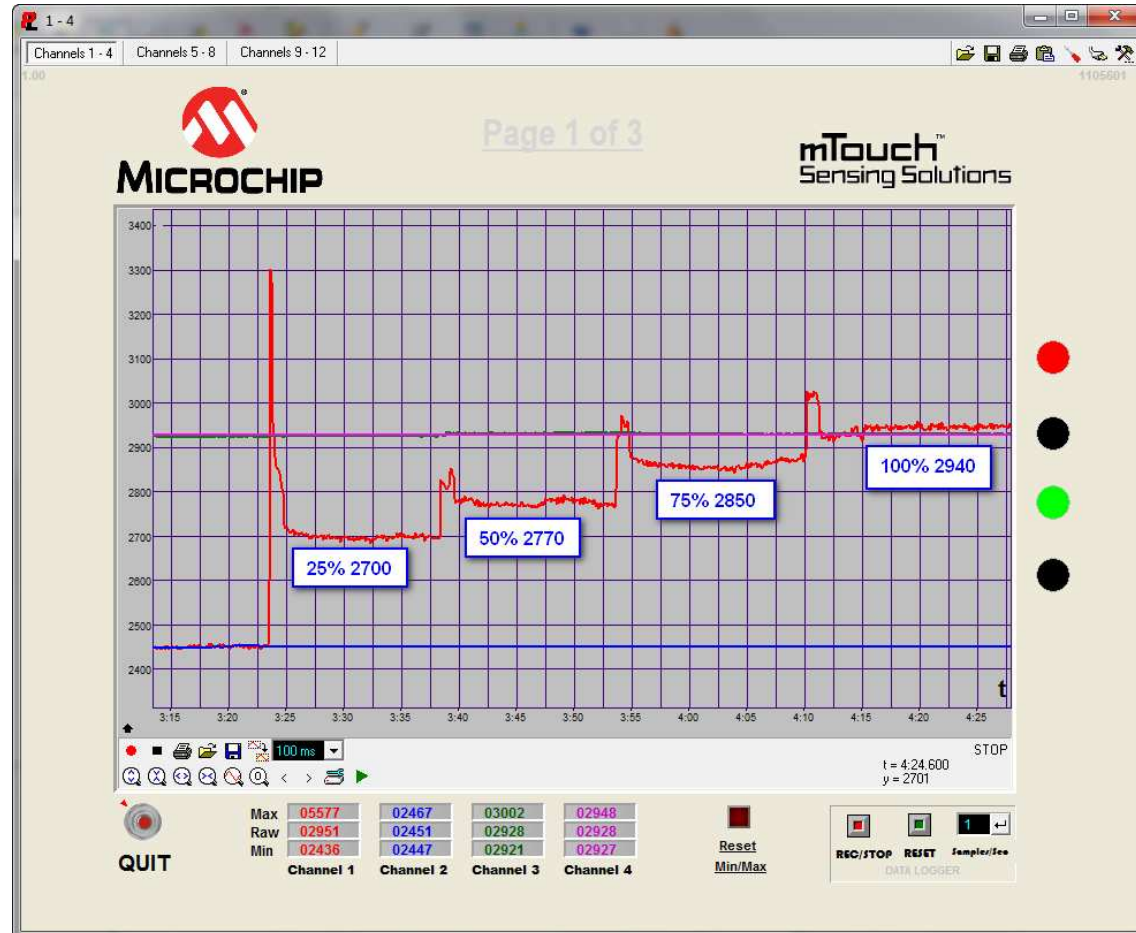
Измерение уровня

При наполнении
водой,
происходит также
большой выброс
в показаниях,
выше
максимального
установившегося
значения



Измерение уровня

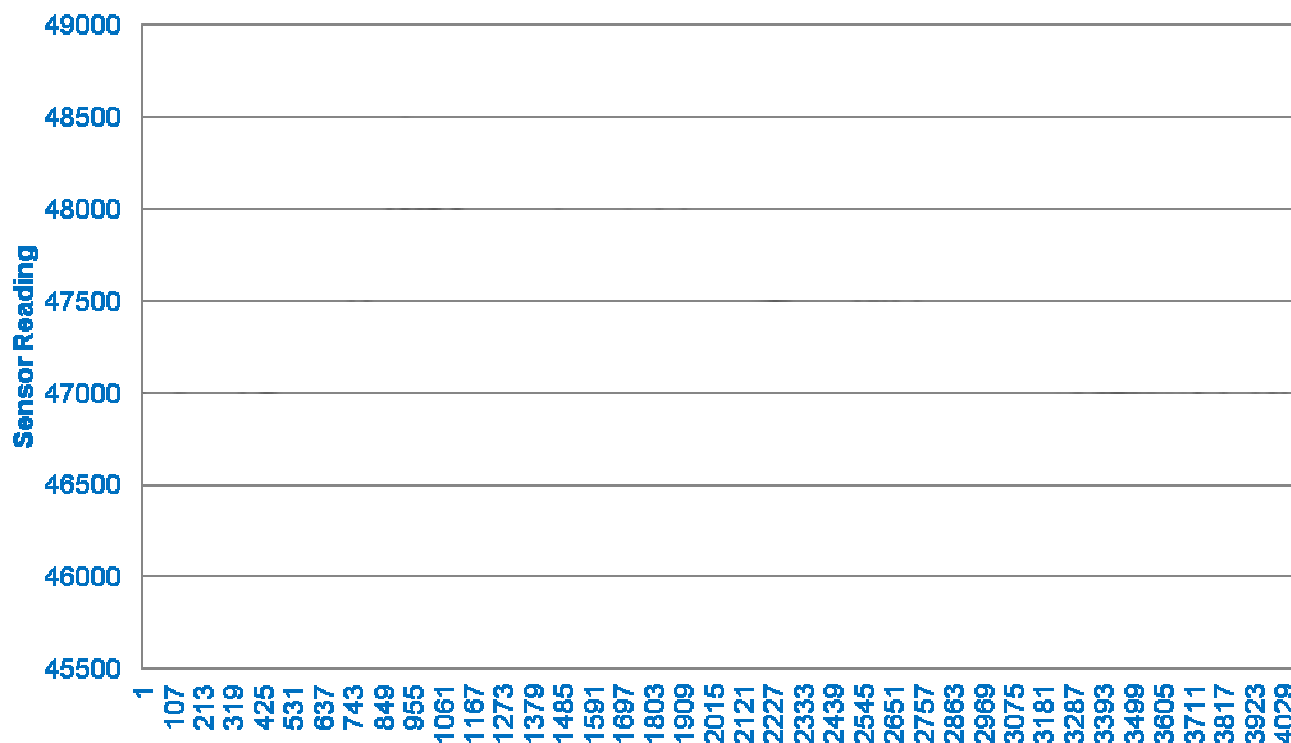
Располагая начало сенсора выше дна бутылки (20%), получают более линейные значения



Измерение уровня

График изменения показаний в диапазоне температур -20..+65С для стеклоомывающей жидкости в пластиковом контейнере. Разница в 2,1%

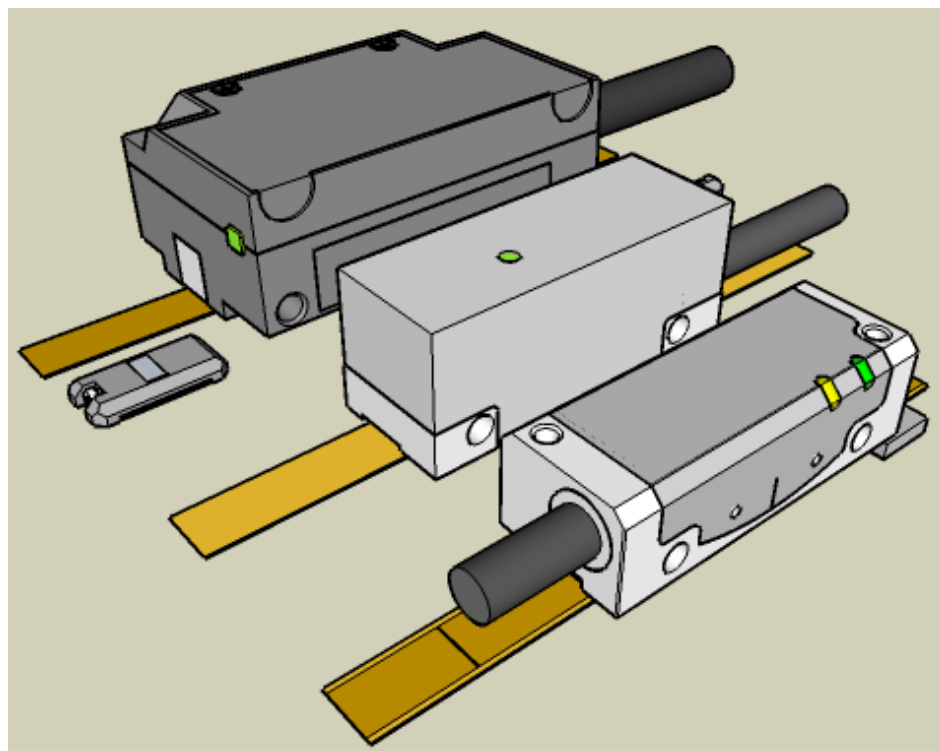
Liquid Level Measurement at 75% full level
-20°C to +65°C



Измерение уровня

- **Итого**
 - **Размер и положение датчика и программная обработка влияет на точность показаний**
 - **Нужно учитывать материал емкости**
 - **Нужно учитывать температуру**
 - **Можно использовать недорогой 8-выводный PIC**

Датчики положения



Датчик положения

- **Важные моменты в разработке датчика положения**
 - **Конструктив датчика**
 - **Разрешение**
 - **Температурный диапазон**
 - **Материал диэлектрика**

Датчик положения

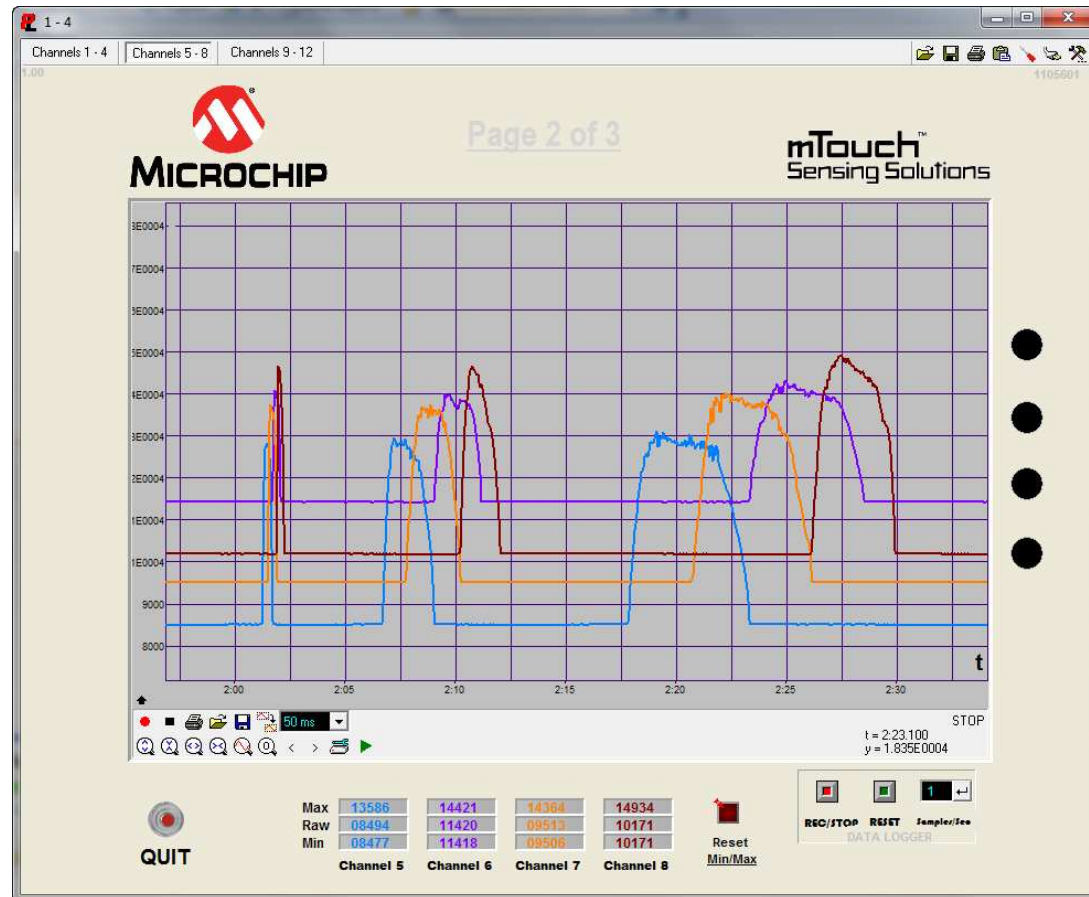
1й эксперимент

8 сенсоров на
расстоянии 25 мм,
площадь каждого 1,6
см²



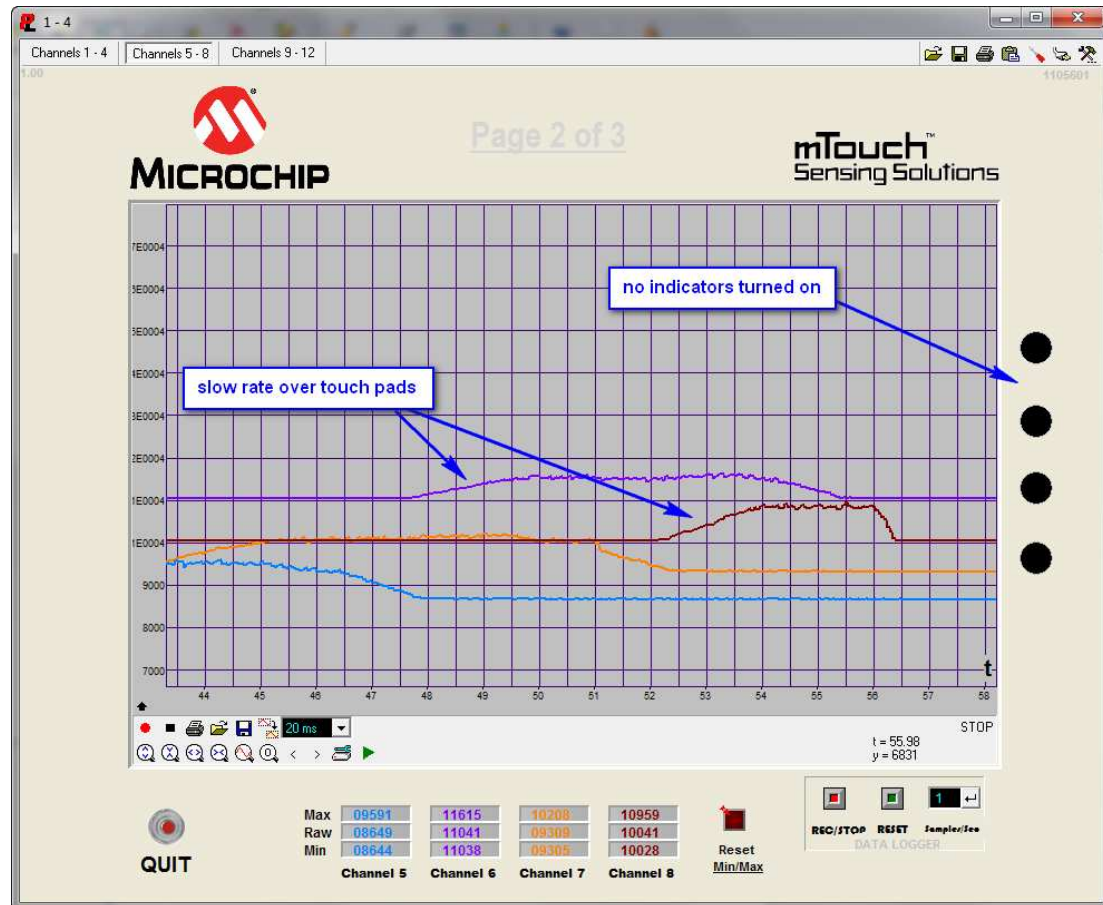
Датчик положения

Пластиковый ползунок
с медью снизу
движется вдоль
сенсоров с разной
скоростью



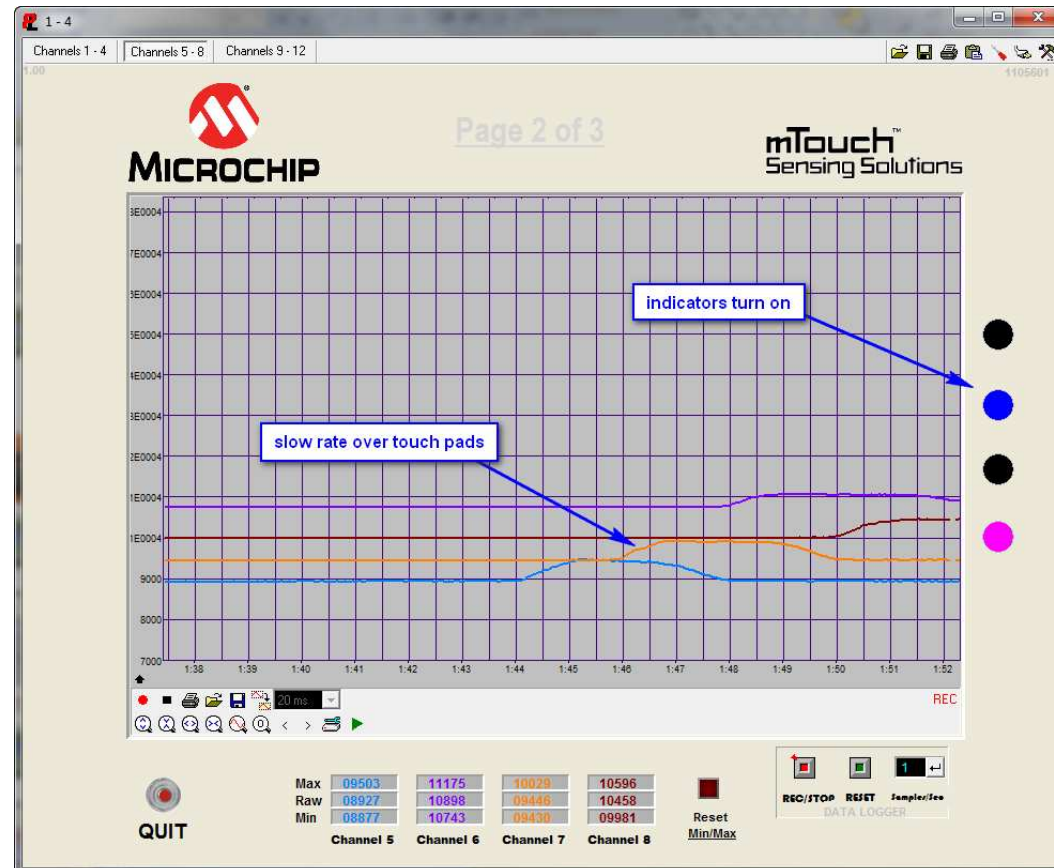
Датчик положения

Пластиковый ползунок толщиной 2,5мм с медью сверху движется вдоль больших сенсоров



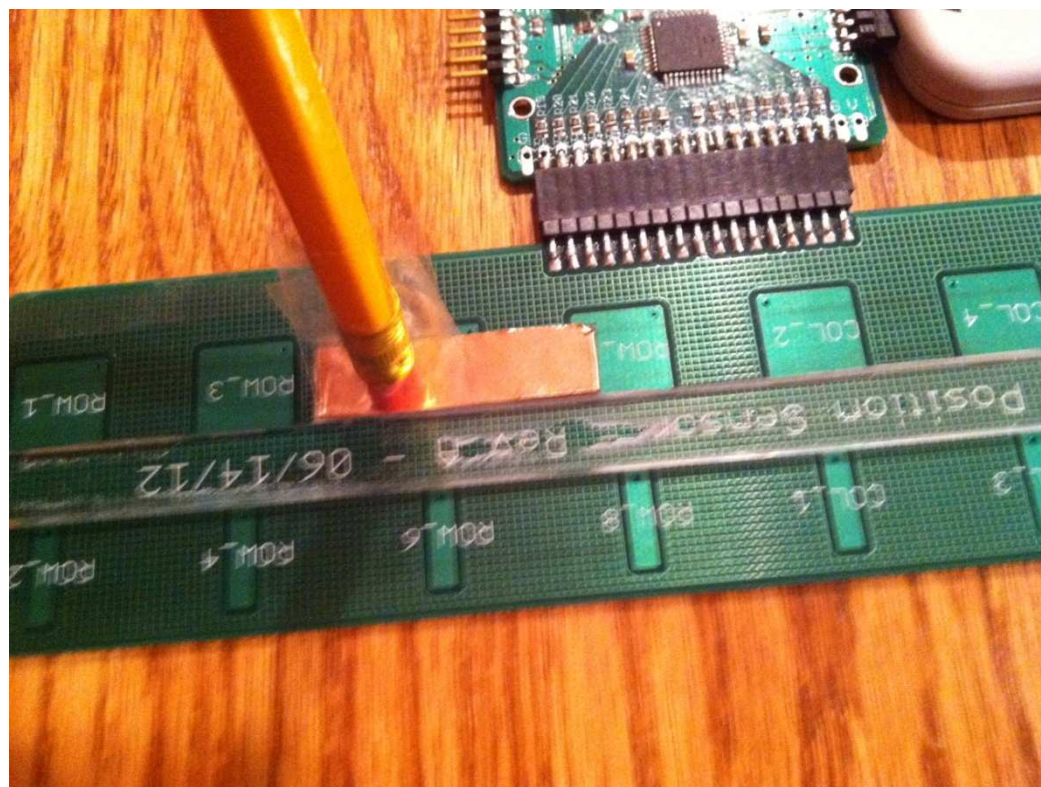
Датчик положения

Детектирование
прохождения
ползунка над
сенсором требует
точной подстройки
уровней
срабатывания



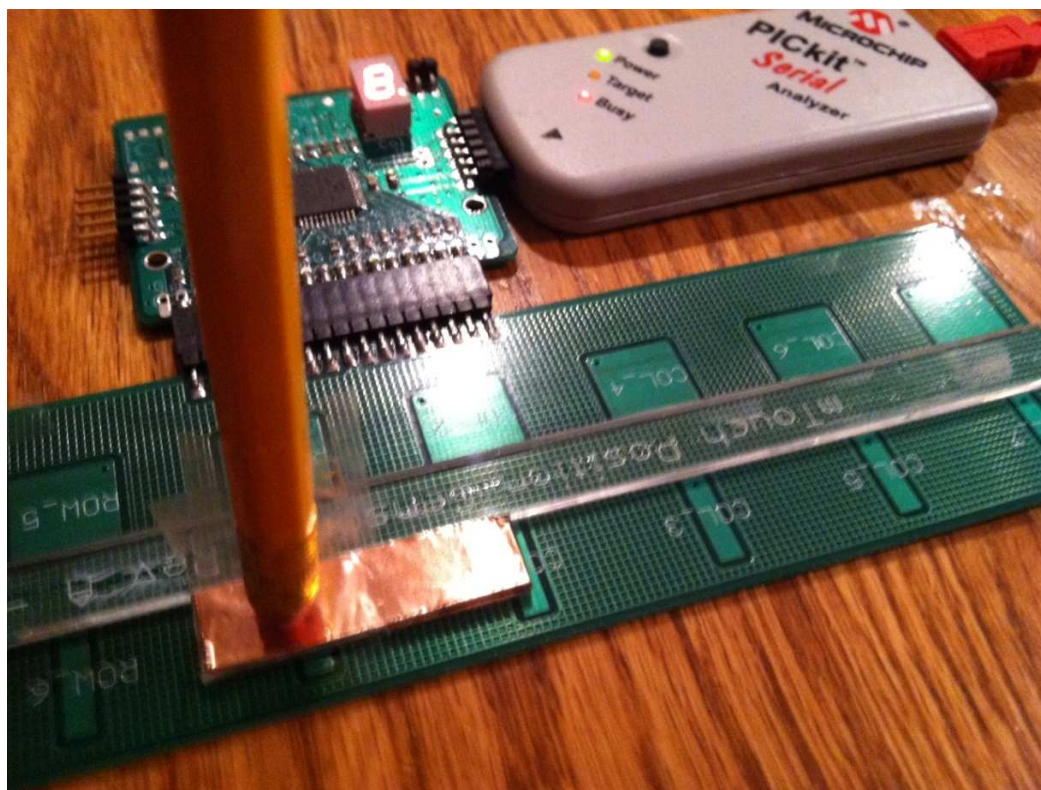
Датчик положения

Срабатывание сенсора по уровню может произойти не в середине ползунка, т.е. есть ошибка определения положения



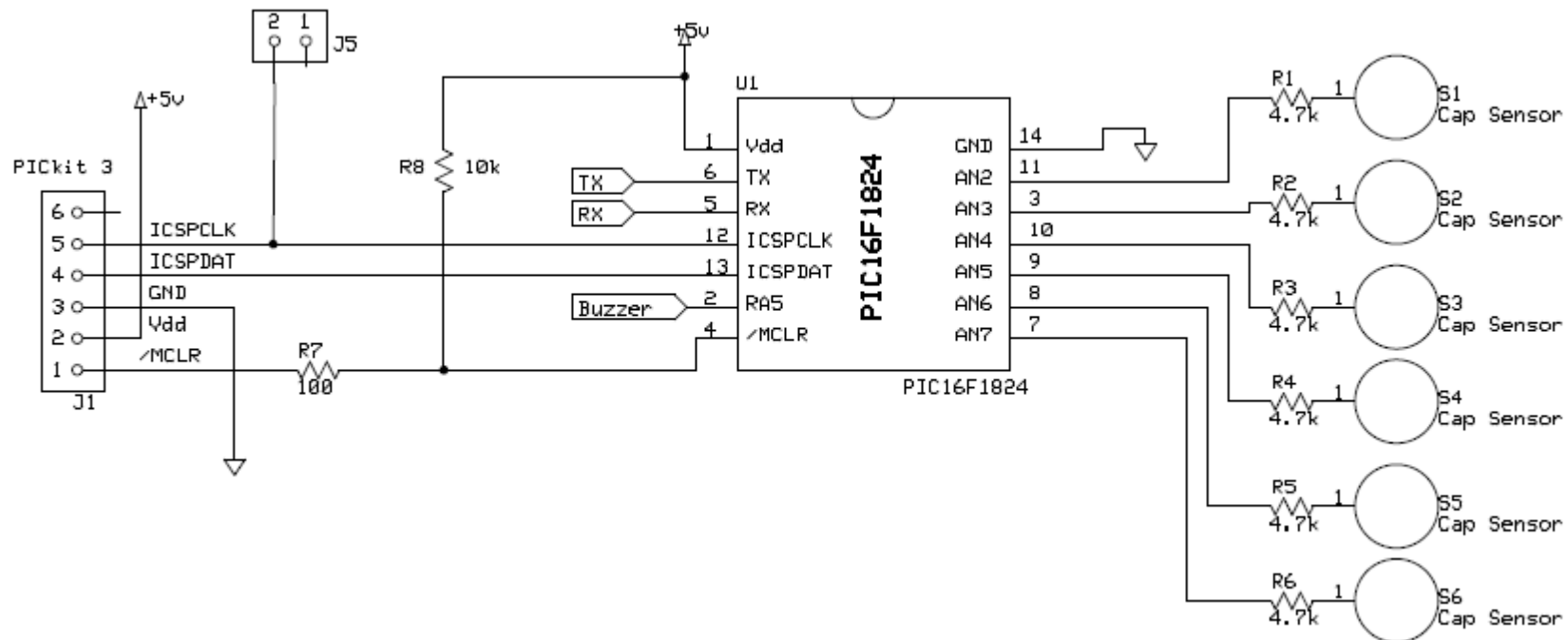
Датчик положения

Тот же самый перевернутый ползунок движется вдоль узких датчиков. В этом случае точность срабатывания выше



Датчик положения

Пример схемы: 6 датчиков положения
= PIC + 6 резисторов + сенсорных площадок



Датчик положения

- **Итого**
 - **Размер и положение сенсоров и программная обработка определяют точность и скорость обработки**
 - **Проводники к маленьким сенсорам должны быть короткими**
 - **Самое дешевое решение**