



*Microchip's 15th Annual*

# MASTERS

Прецизионное измерение  
временных интервалов.

Применение модуля СТМУ для  
задач измерения.



# Цель

- **Вы узнаете:**
  - Все о модуле СТМУ
  - Как использовать модуль СТМУ для точного измерения временных интервалов
  - Как использовать модуль СТМУ для измерения Емкости, Индуктивности и Сопротивления



# План

- 1 Обзор модуля СТМУ
- 1 Точное измерение времени
- 1 Измерение Емкости
- 1 Другие задачи измерения:
  - 1 **Индуктивности**
  - 1 **Температуры**
  - 1 **Влажности**
  - 1 **Временных задержек**





*Microchip's 15th Annual*

**MASTERS**

**Что такое СТМУ?**

**Charge Time Measurement Unit**

**Модуль Измерения Времени  
Заряда**

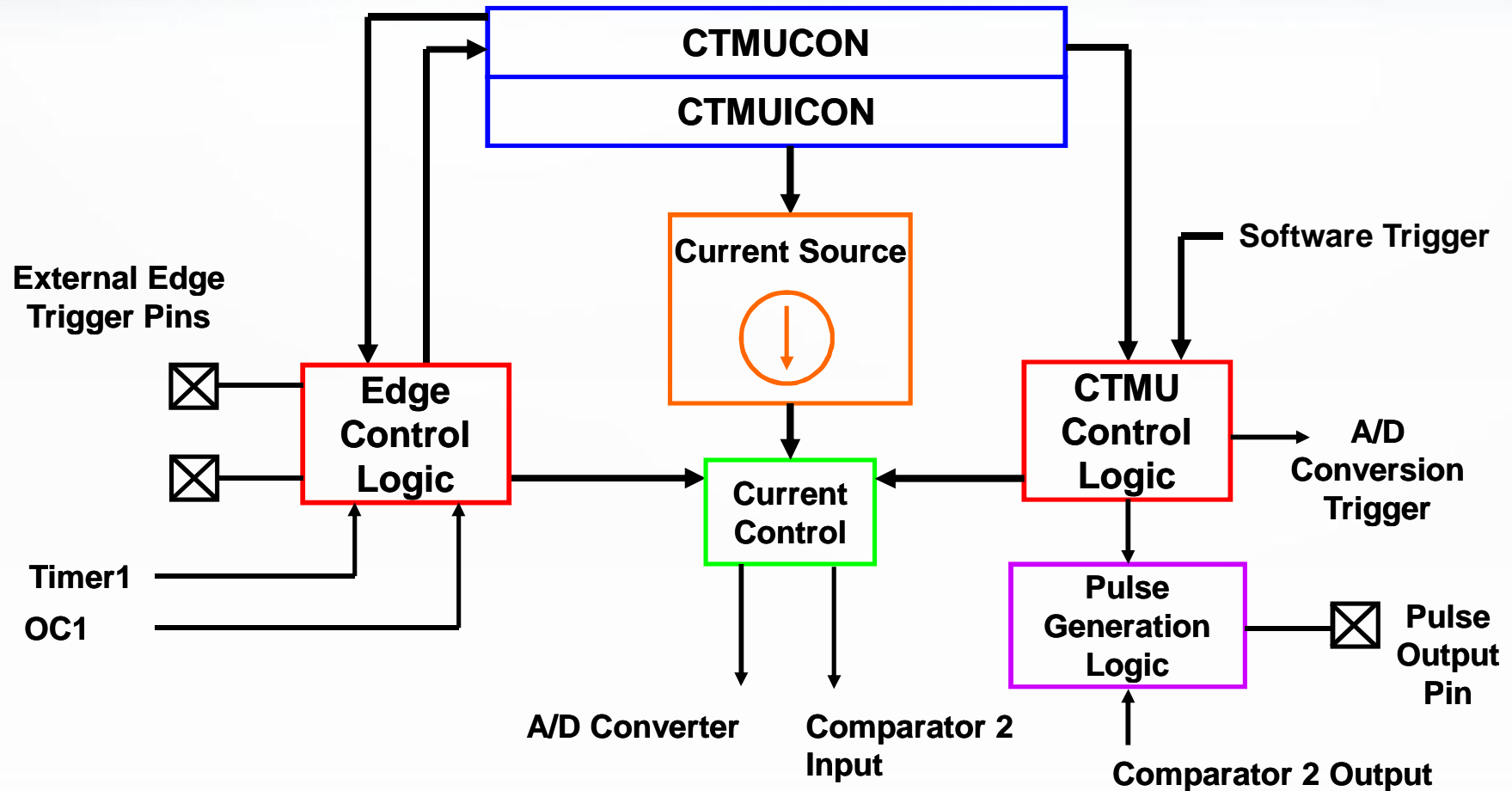


# Что такое СТМУ?

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



# СТМУ. Структурная схема





# Ключевые особенности СТМУ

## 1 Источник постоянного тока

- 1 Диапазоны: 0.55мкА, 5.5мкА, 55мкА и 550мкА
- 1 Подстройка до +/- 62% в каждом диапазоне с шагом 2%

## 1 Запуск и останов по внешним и внутренним событиям

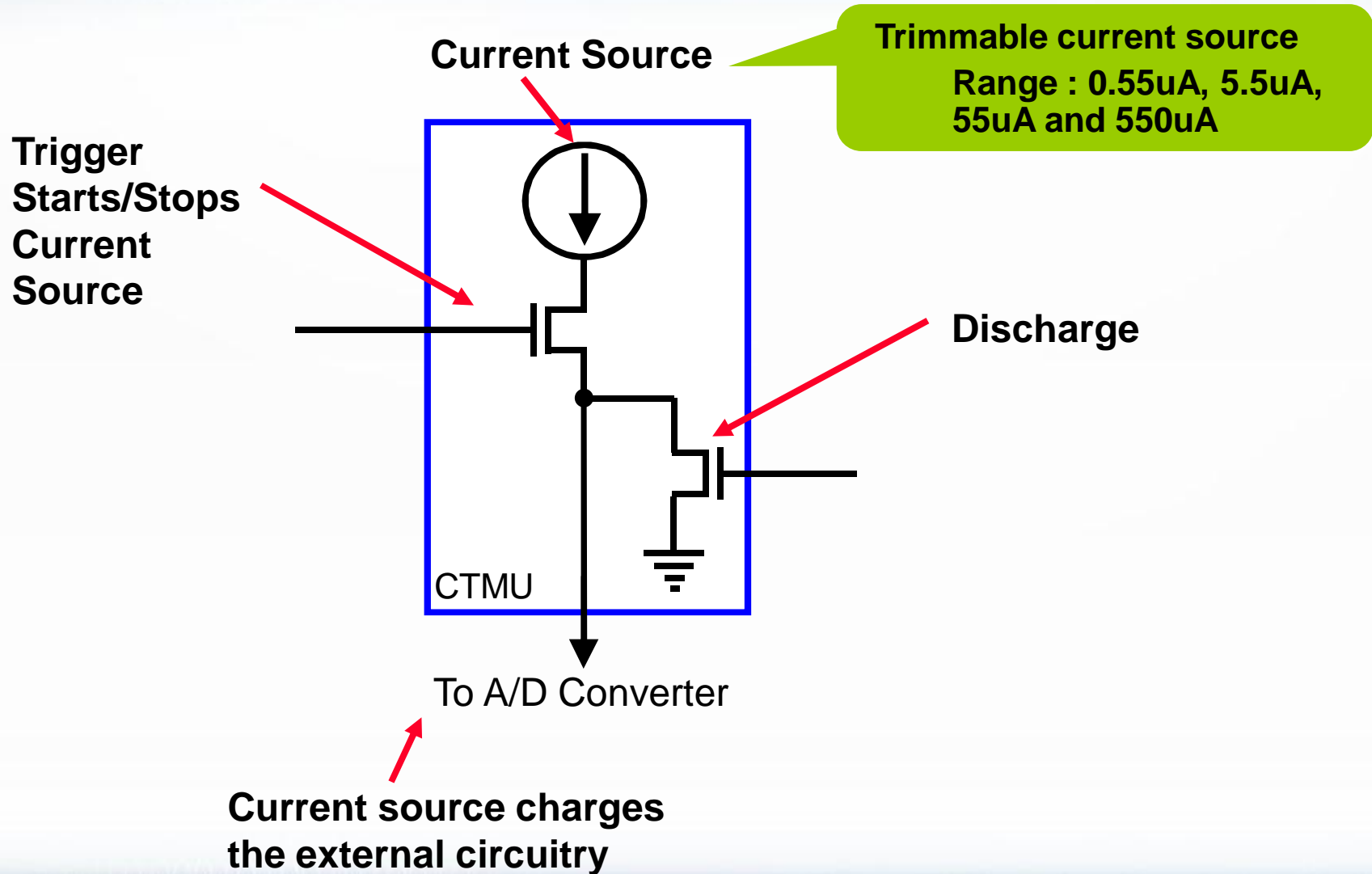
- 1 Любые комбинации срабатывания :Timer1, модуль сравнения, программный триггер и два внешних вывода
- 1 Четыре или более внешних выводов со срабатыванием по фронту/спаду
- 1 Управление полярностью для каждого источника
- 1 Управление по заданной последовательности событий

## 1 Совместная работа с АЦП

- 1 СТМУ может управлять стартом АЦП



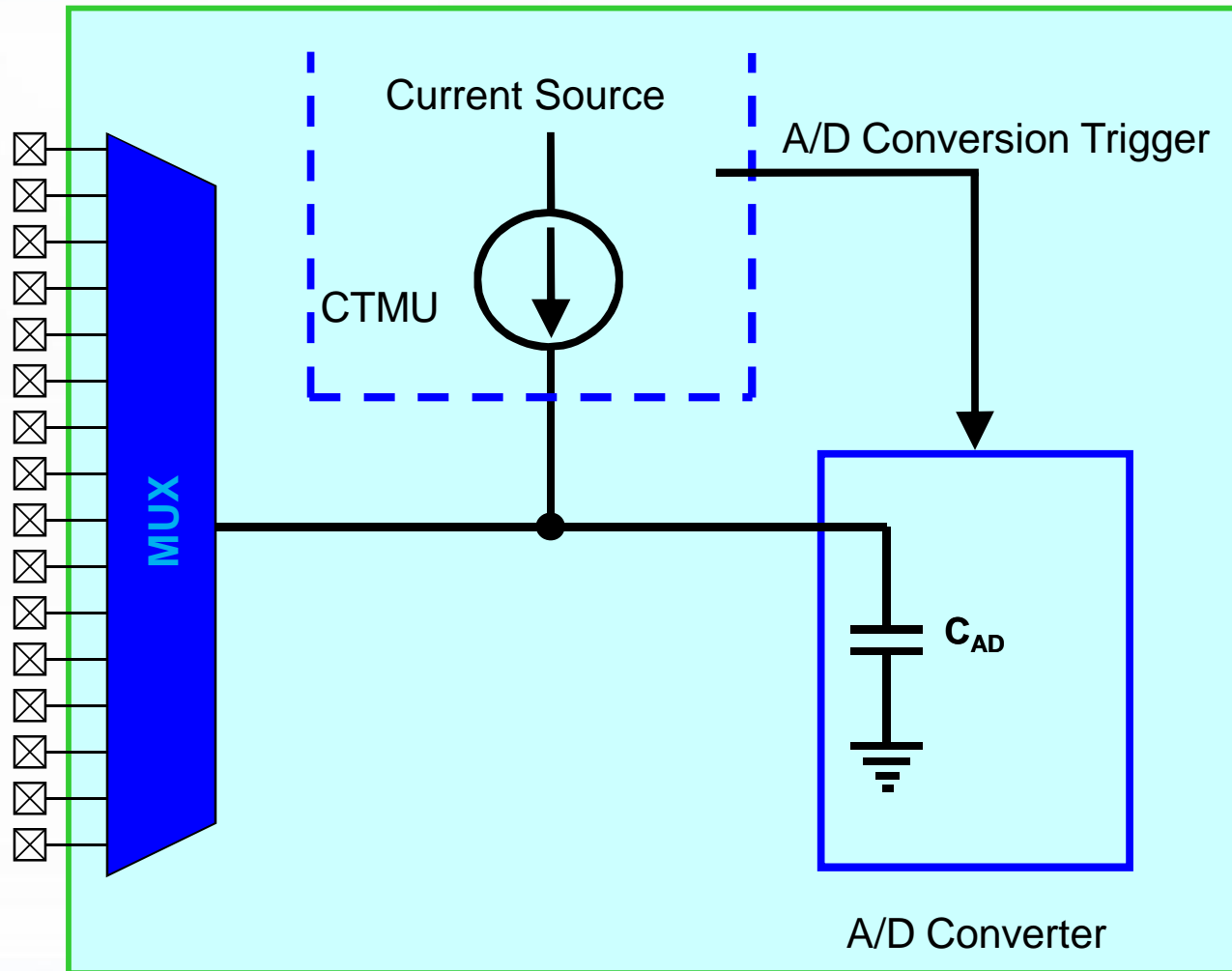
# СТМУ. Источник тока







# СТМУ. Взаимодействие с АЦП





# Применение СТМУ

## 1 Измерение времени

- 1 Измерение длины кабеля
- 1 Измерение времени прохождения сигнала (ультразвук)
  - 1 Скорость потока, расходомеры
  - 1 Расстояние

## 1 Измерение Емкости

- 1 Емкостные клавиатуры (Capacitive Touch)
- 1 Датчики приближения
- 1 Измерение влажности
- 1 Измерение емкости

## 1 Измерение Сопротивления

- 1 Резистивные Датчики

## 1 Измерение Индуктивности

- 1 Скорость потока, расходомеры
- 1 Измерение R, L, C

## 1 Измерение температуры



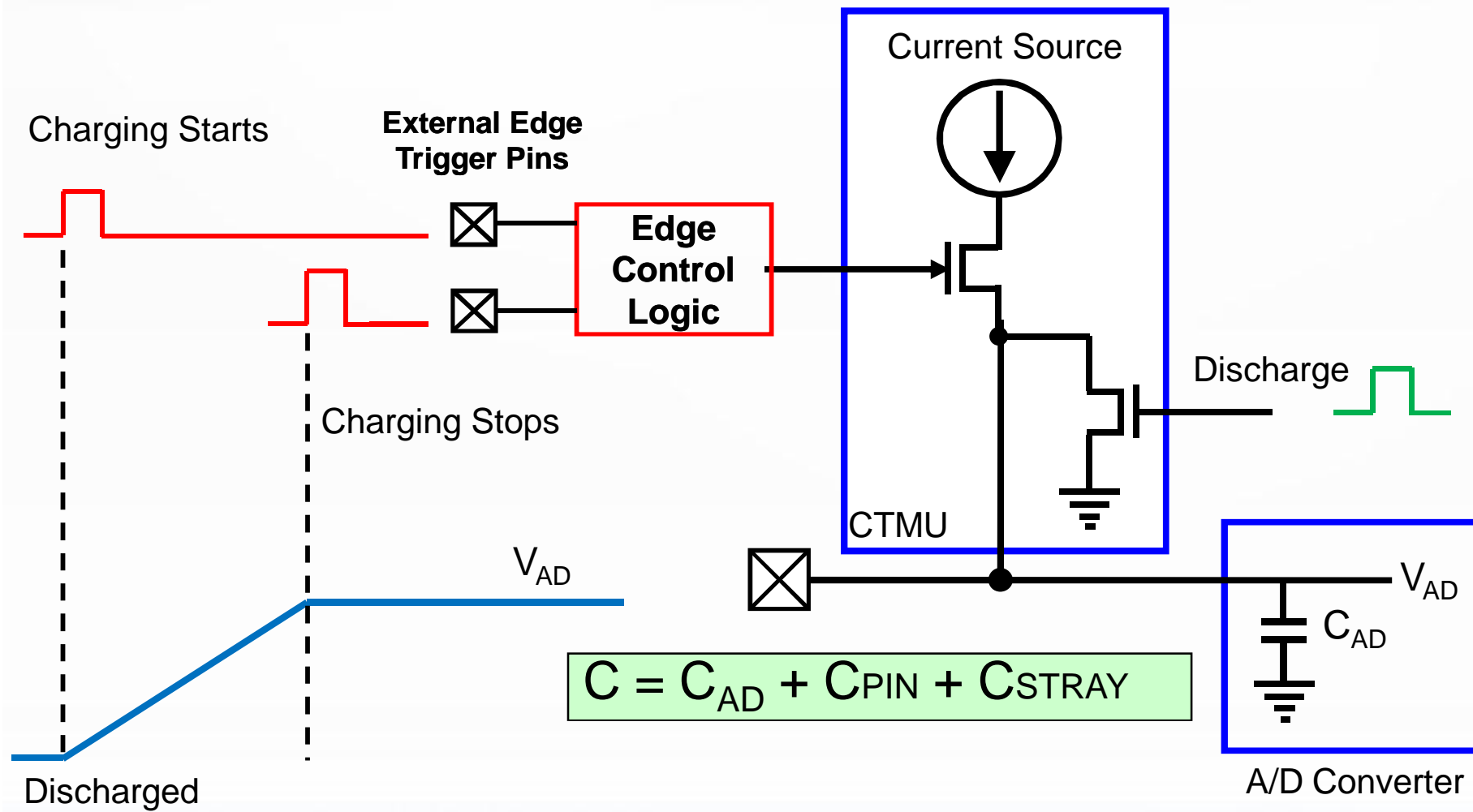
*Microchip's 15th Annual*

**MASTERS**

# Измерение временных интервалов с помощью СТМУ



# Измерение времени с помощью СТМУ







# Измерение времени

- 1 Ток через Емкость описывается выражением:

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

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

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

- 1 После интегрирования:

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

- 1 В основном  $K = 0$

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



# Разрешающая способность

## Пример:

1 При 10-и разр. АЦП (1024 значений)

1 Дано

1  $I = 55 \text{ мкА}$

1  $C = C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY} = 15 \text{ пФ}$

1  $A/D V_{REF} = V_{DD}$

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

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

1 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...

### 1 Уменьшить опорное напряжение для АЦП

1 Внешний источник опорного напряжения 2.5В

$$1 \quad t = (15 \text{ пФ} / 55 \text{ мкА}) * (2.5 / 1024) = 0.666 \text{ нсек}$$

### 1 Применение внутреннего канала СТМУ (нет внешних соединений)

1 Только  $C_{AD}$ , Искключаются  $C_{PIN} + C_{STRAY}$

$$1 \quad t = (4 \text{ пФ} / 55 \text{ мкА}) * (2.5 / 1024) = 0.178 \text{ нсек}$$

### 1 Увеличить ток СТМУ

1 Больше ток – меньше время. ( $t = C / I$ )

$$1 \quad t = (4 \text{ пФ} / 89 \text{ мкА}) * (2.5 / 1024) = 0.109 \text{ нсек}$$

### 1 Увеличить разрядность АЦП

1 Применение 12-bit АЦП (4096 значений)

1 Допустим, что емкость в 2 раза больше – 30 пФ (для вн. АЦП)

$$1 \quad t = (30 \text{ пФ} / 550 \text{ мкА}) * (2.5 \text{ В} / 4096) = 33.29 \text{ псек !!!}$$



# Динамический диапазон СТМУ

## 1 Динамический диапазон измерения ограничен:

- 1 Общей емкостью ( $C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY}$ )
- 1 Зарядным током
- 1 Напряжением питания аналоговых цепей микроконтроллера ( $AV_{DD}/AV_{SS}$ ) и опорным напряжением АЦП

## Пример:

### 1 Примем:

- 1 10-bit A/D (1024 отсчетов)
- 1  $I = 55 \text{ мкА}$
- 1  $C = C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY} = 15 \text{ пФ}$
- 1  $V_{ref} = 2.5\text{В}$

## 1 Тогда динамический диапазон измерения времени

- 1  $(15 \text{ пФ} / 55 \text{ мкА}) * 2.5\text{В} = 682 \text{ нсек}$

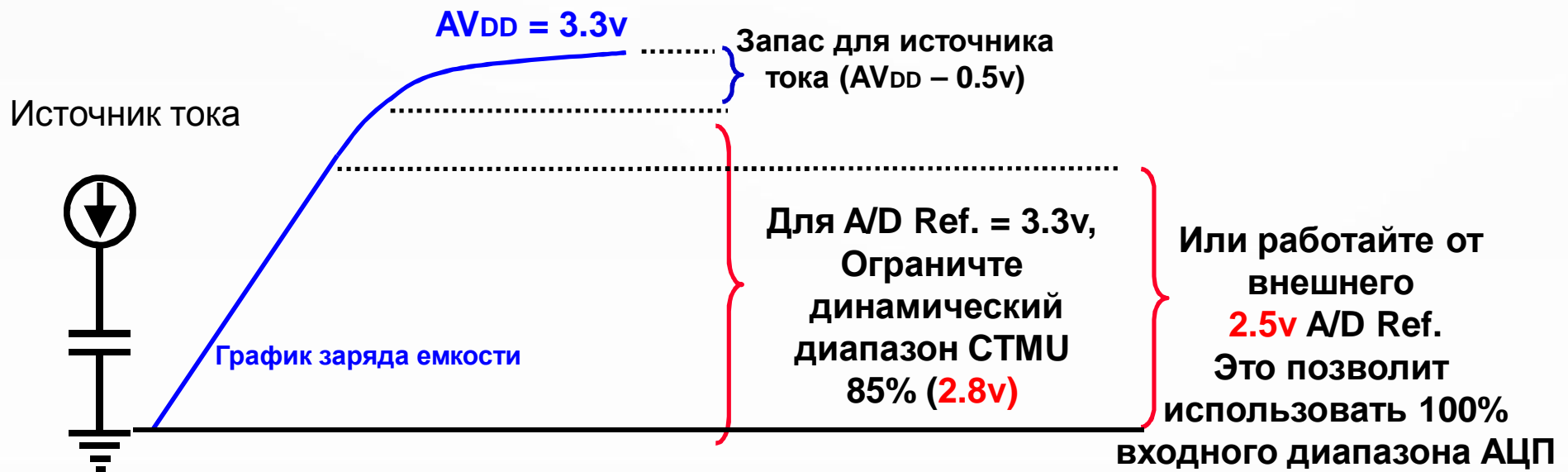
$$t = \frac{C}{I} V$$





# Выбор опорного напряжения АЦП

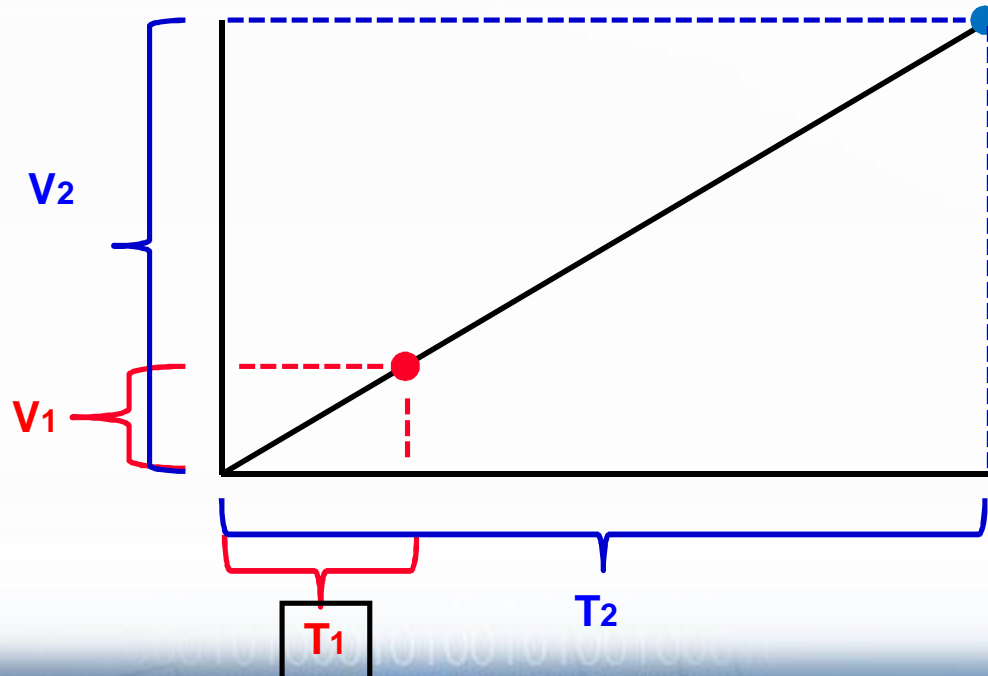
- 1 **СТМУ источник тока требует небольшой запас напряжения чтобы поддерживать постоянный ток, обычно  $AV_{DD} - 0.5v$**





# Калибровка СТМУ

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





# Как измерять большие интервалы времени

1 Возможно ли увеличить диапазон измерения?

1 Конечно! – Вот несколько способов...

1 Увеличить емкость

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

1 Уменьшить ток

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

1 В обоих случаях требуется больше времени для заряда емкости и увеличивается период измерения

1 Оба этих решения уменьшают разрешающую способность

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

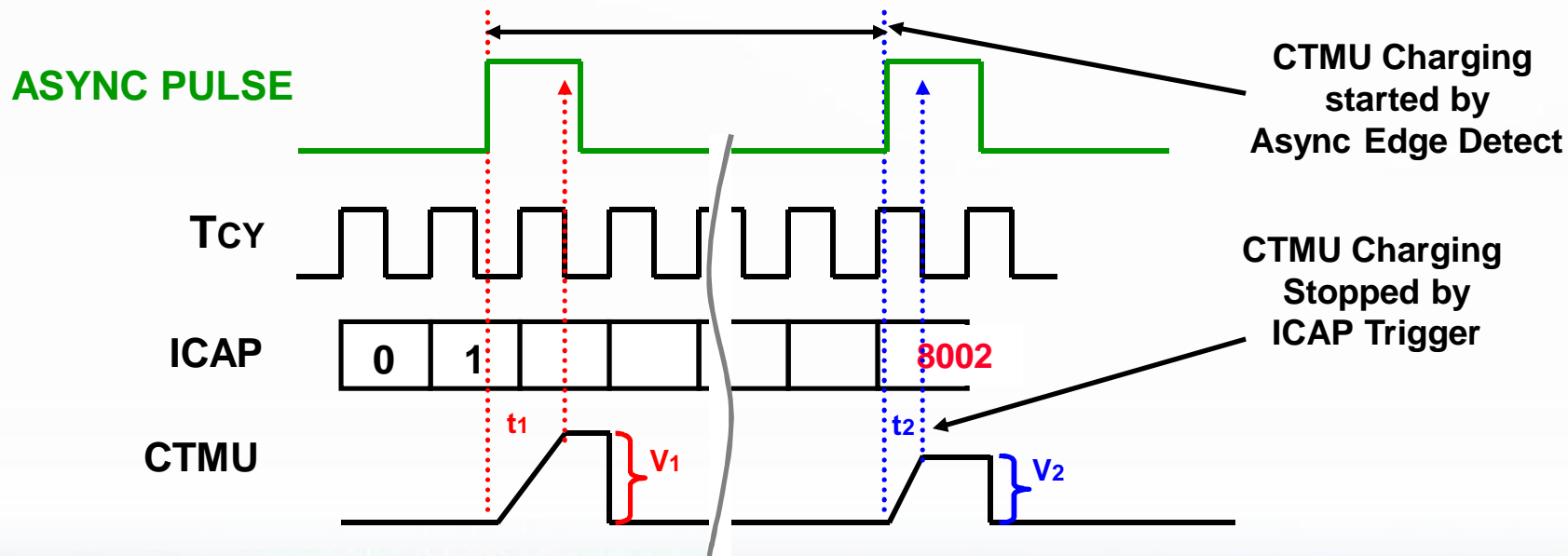
1 Как увеличить динамический диапазон без потери разрешения?

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



# Измерение длительных интервалов

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







# Точность СТМУ

## 1 Точность источника тока СТМУ ~ 1%

- 1 На всех диапазонах , напряжениях питания и температурах

## Пример:

### 1 Допустим

- 1  $I = 55 \mu\text{A}$
- 1  $C = C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY} = 15 \text{ pF}$
- 1  $V_{ref} = 2.5\text{V}$

### 1 Динамический Диапазон

- 1  $t = (C/I) * V = (15 \text{ pF} / 55 \mu\text{A}) * 2.5\text{V} = 682 \text{ nS}$

### 1 Точность

- 1  $\sim 1\% * 682 \text{ ns} = \sim 6.8 \text{ nS}$



# На сколько точны измерения длительных интервалов

## 1 Точность «Грубого» измерения

- 1 Точность зависит от кварца
  - 1 Кварц 100 ppm (0.01% )
  - 1 Точность составляет две точности генератора, т.е. 0.02%
  - 1 Влияние «джиттера» – может быть уменьшено за счет нескольких измерений

## 1 Точность «Точного» измерения

- 1 Ошибка СТМУ после калибровки
  - 1 Пусть диапазон СТМУ 500 нсек
  - 1 Точность СТМУ примерно 1%
  - 1  $1\% * (500 \text{ нсек} / 500 \text{ мксек}) \sim 0.001\%$

## 1 Выводы

- 1 «Грубое» (0.02%) + «Точное» (0.001%) = 0.021%
- 1 Точность в основном определяется точностью кварца



# Измерение времени в задачах:

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



*Microchip's 15th Annual*

**MASTERS**

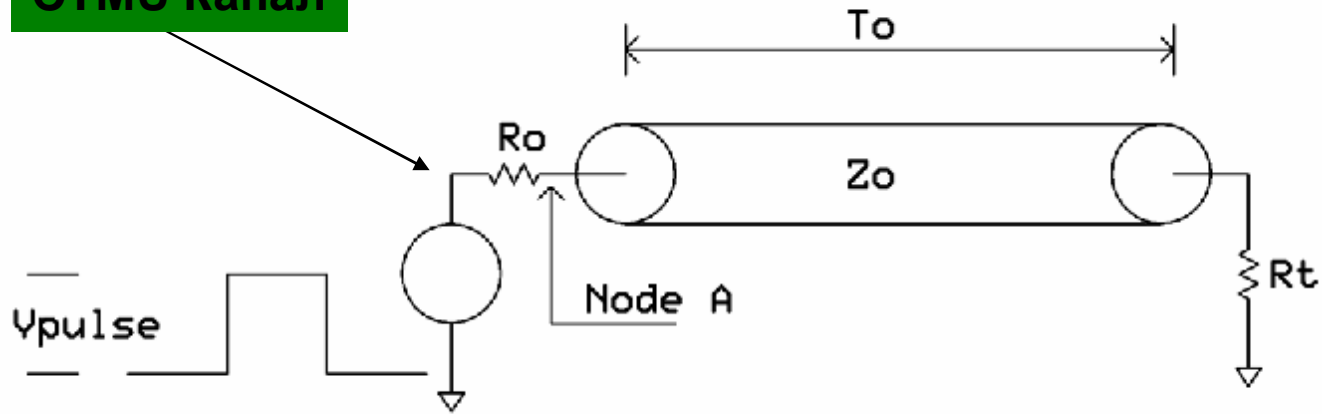
**Измерение Времени Пролета  
Отраженного Сигнала  
Используя СТМУ  
(TDR )**





# TDR – Теория

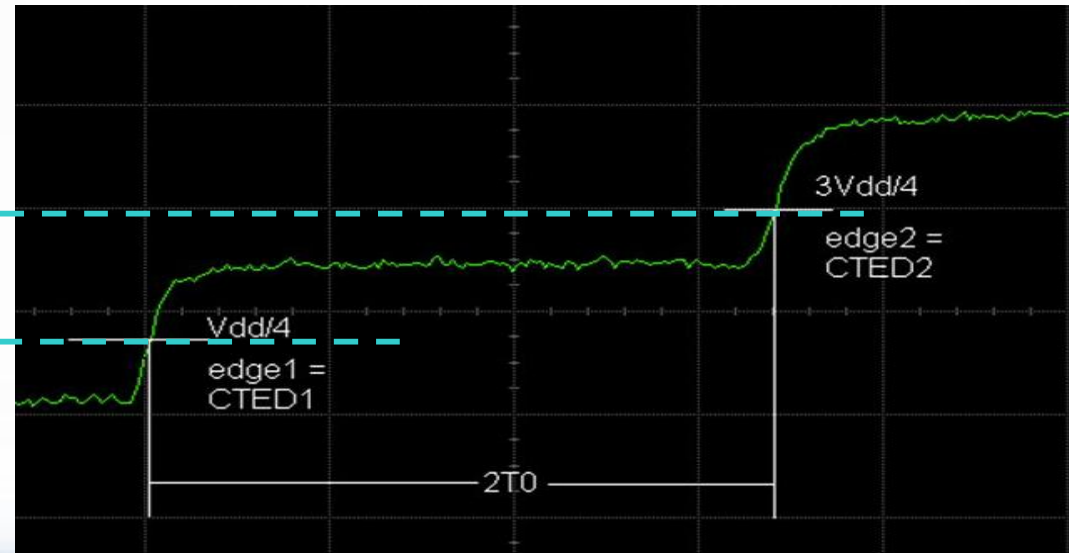
СТМУ Канал



$R_0 = 50 \text{ Ом}$   
 $Z_0 = 50 \text{ Ом}$   
 $R_t = \text{бесконечность Ом}$   
(Разомкнуто)

СТОП

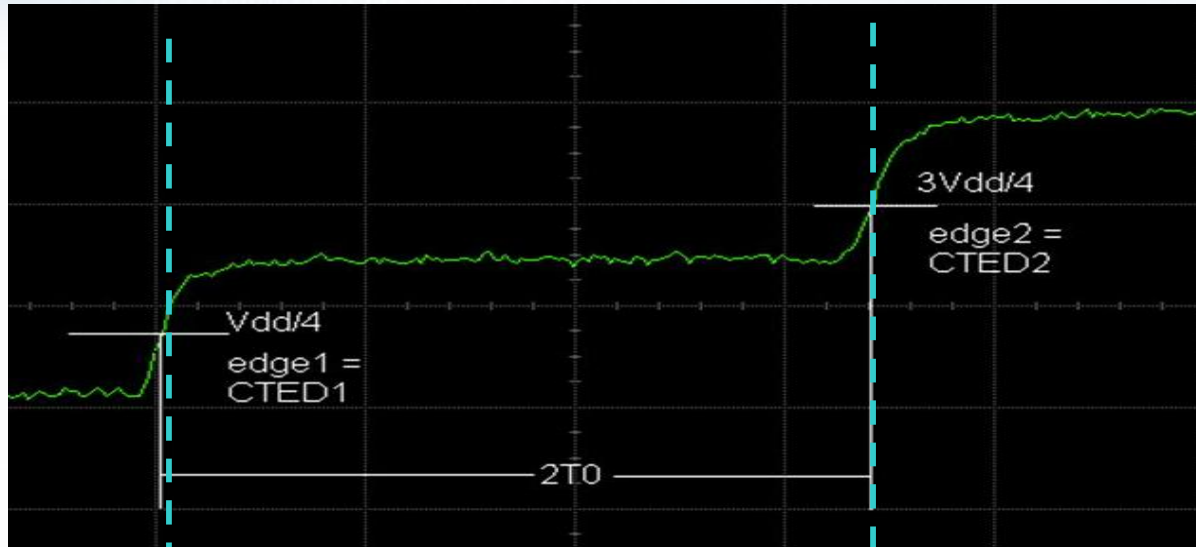
СТАРТ



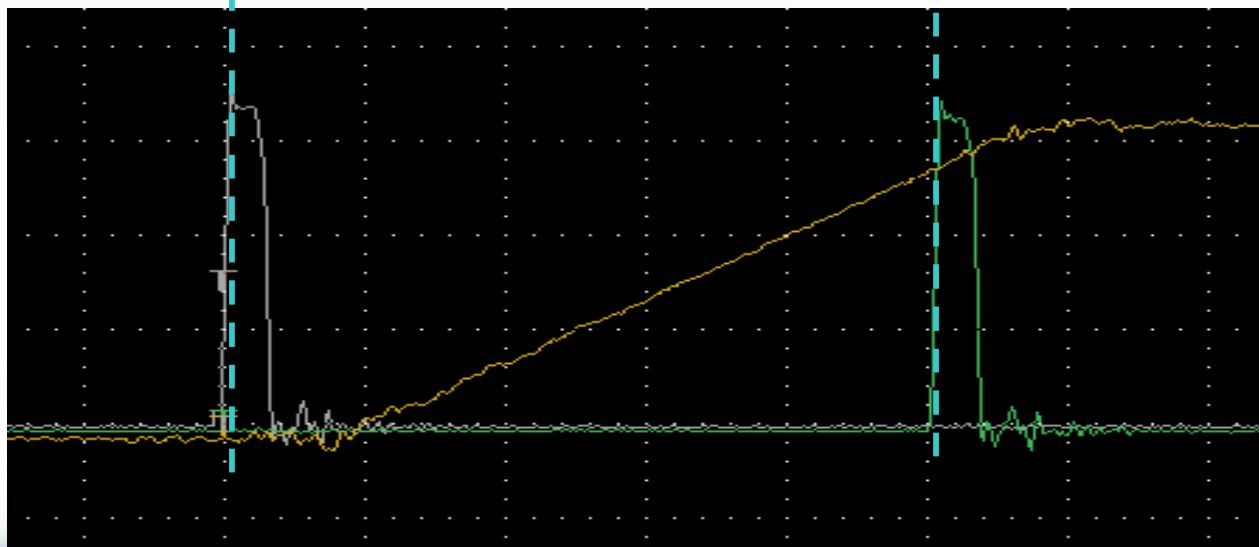




# TDR. Измерения

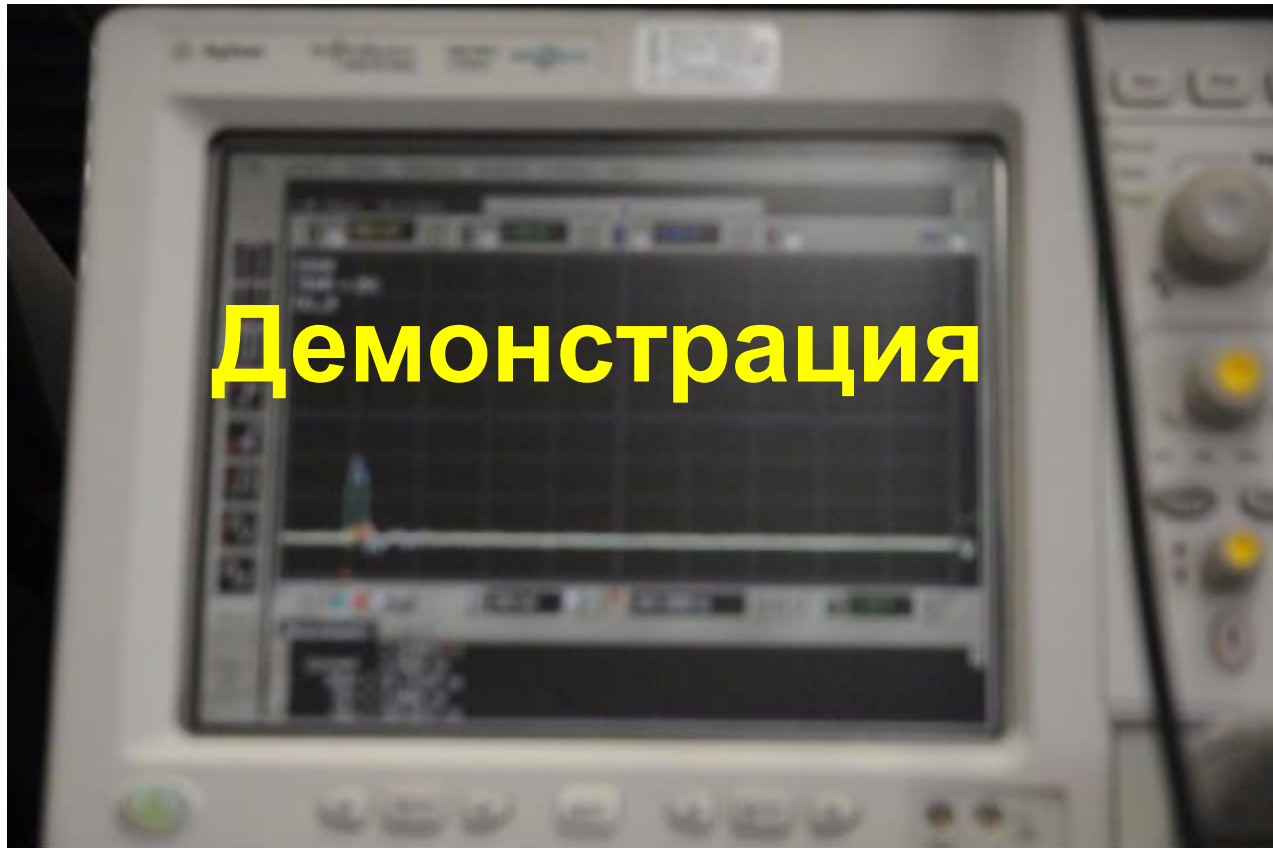


$2t_0$  напрямую  
связано с длиной  
кабеля





# TDR Измерение





*Microchip's 15th Annual*

**MASTERS**

# Ультразвуковой метод измерения расхода жидкости и газа



# Ультразвуковой расходомер

## 1 Методы

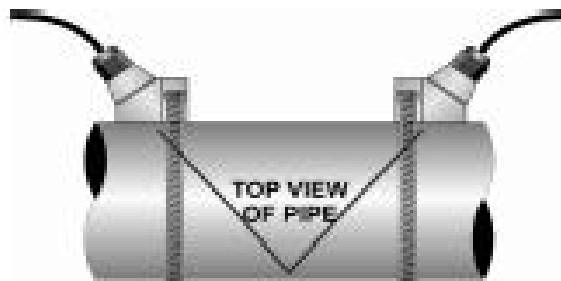
1 Доплер

1 Время прохождения сигнала

## 1 Sensor Configurations



W-Mount



V-Mount



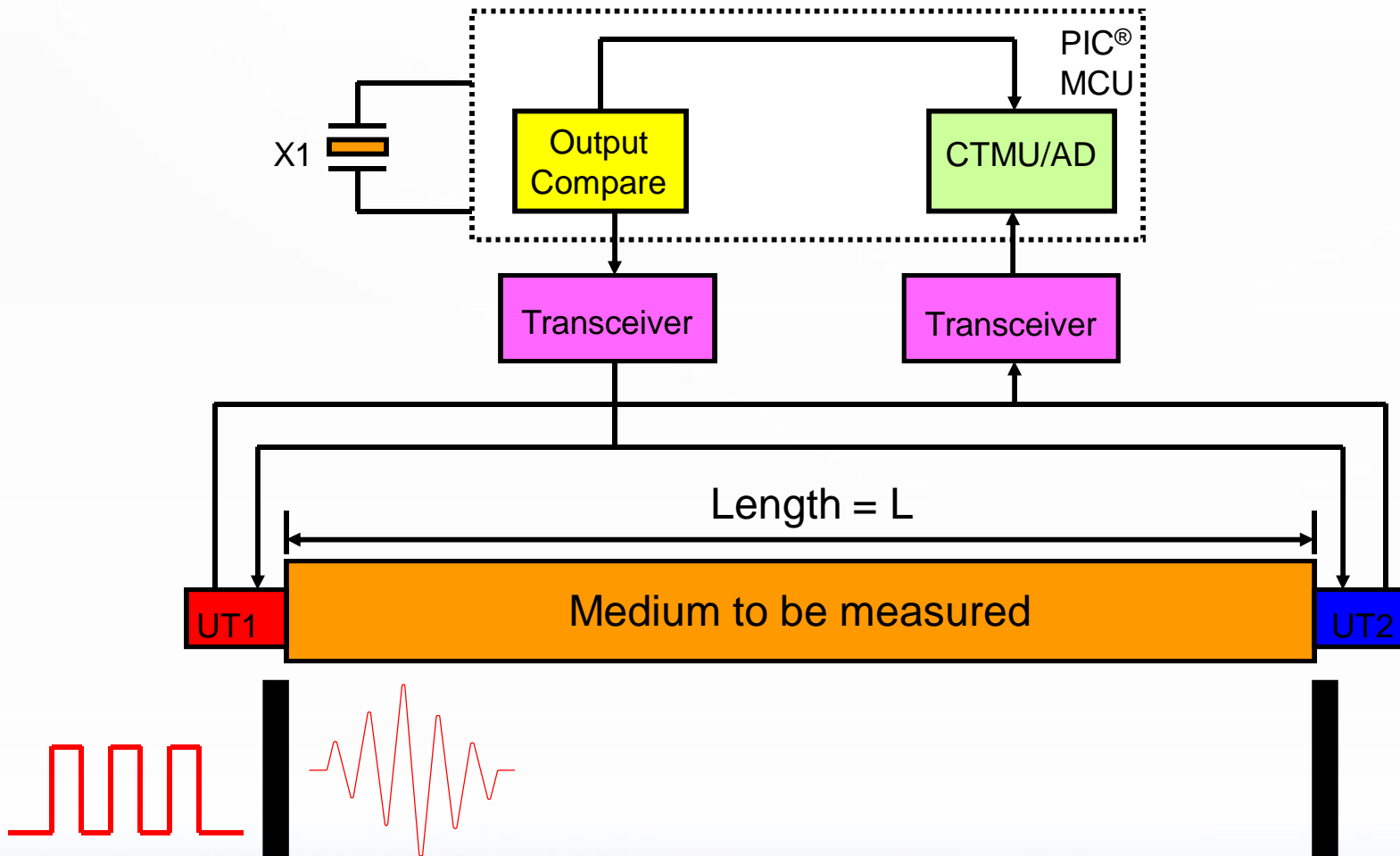
Z-Mount





# УЗ расходомер. Использование СТМУ

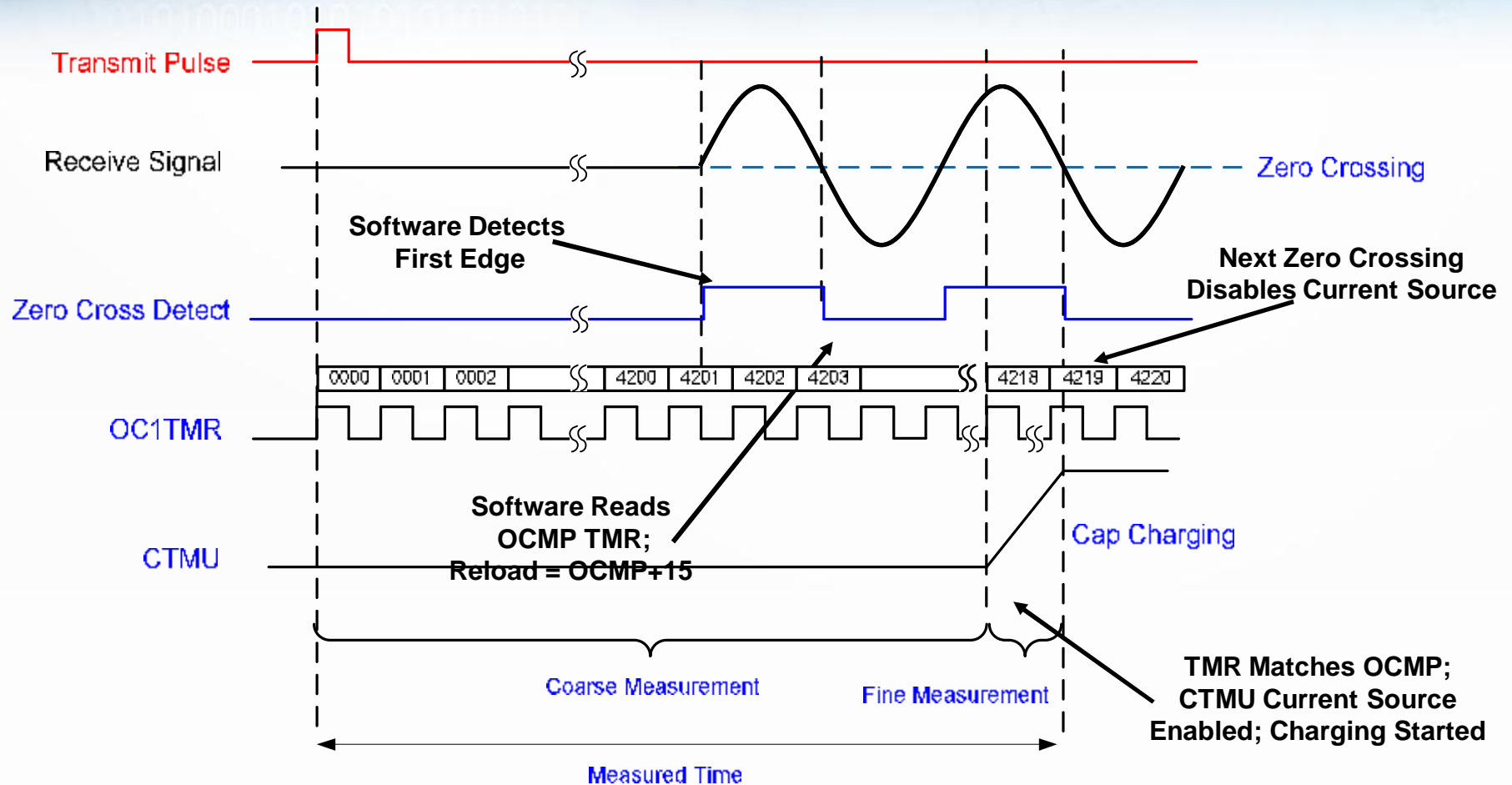
## 1 Структурная схема







# Измерение времени пролета сигнала





# Ультразвуковой расходомер

## 1 Результаты

1 Разрешение по времени 53.67 псек

1 Соответствует разрешению по скорости 1.37 мм/сек.

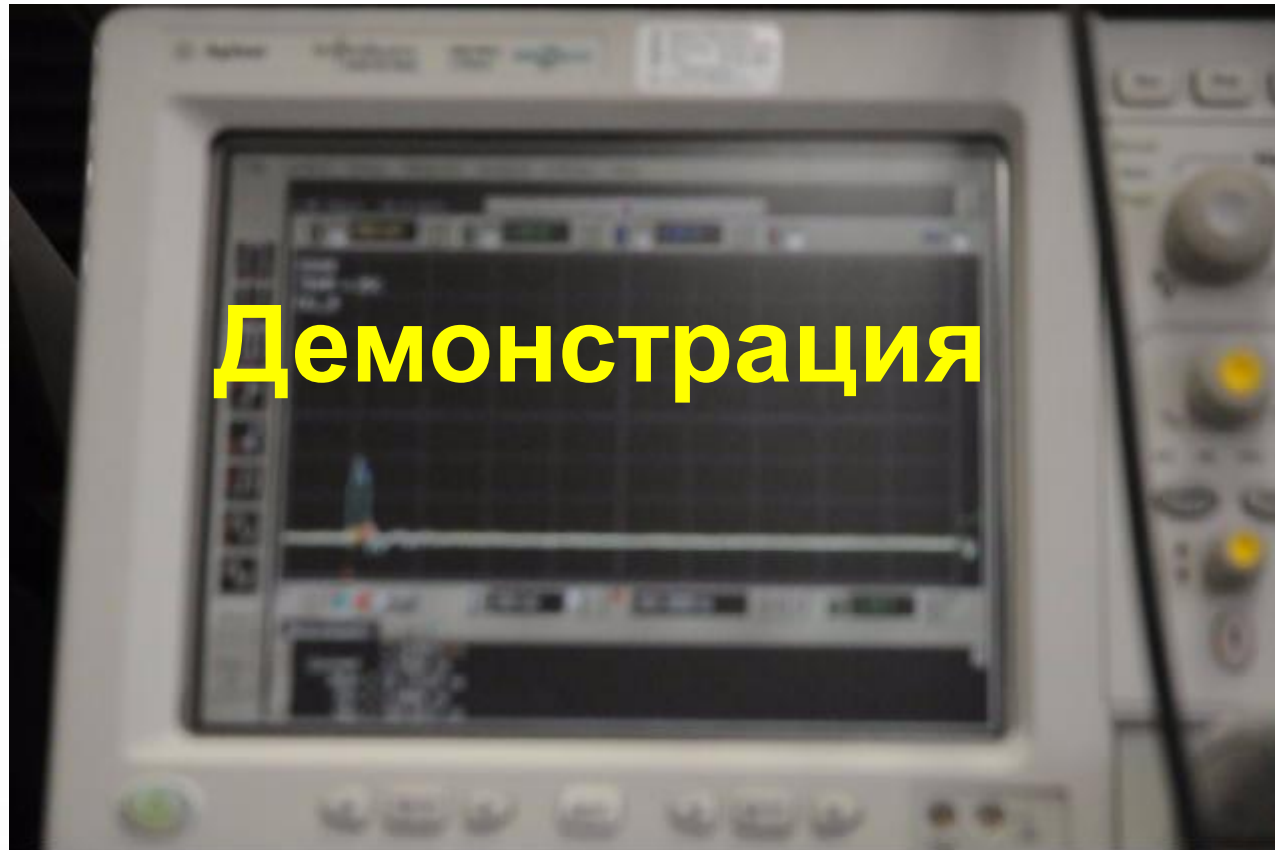
## 1 Диапазон измерений

1 По теории диапазон определяется суммой скорости звука и скорости движения среды где звук распространяется

1 На практике он ограничен максимальной скоростью потока когда поток является ламинарным (что является механическим ограничением)



# Ультразвуковой Расходомер



**Демонстрация**



# СТМУ

## Что может еще СТМУ?

### 1 Измерение емкости

- 1 Абсолютной

- 1 Относительной

### 1 Измерение температуры

### 1 Измерение Индуктивности





*Microchip's 15th Annual*

**MASTERS**

# Измерение емкости с помощью СТМУ





# Измерение емкости с помощью СТМУ

## Типовые задачи

### 1 Относительные измерения

- 1 CapTouch (сенсорные клавиатуры и т.п.)
- 1 Емкостные микрофоны

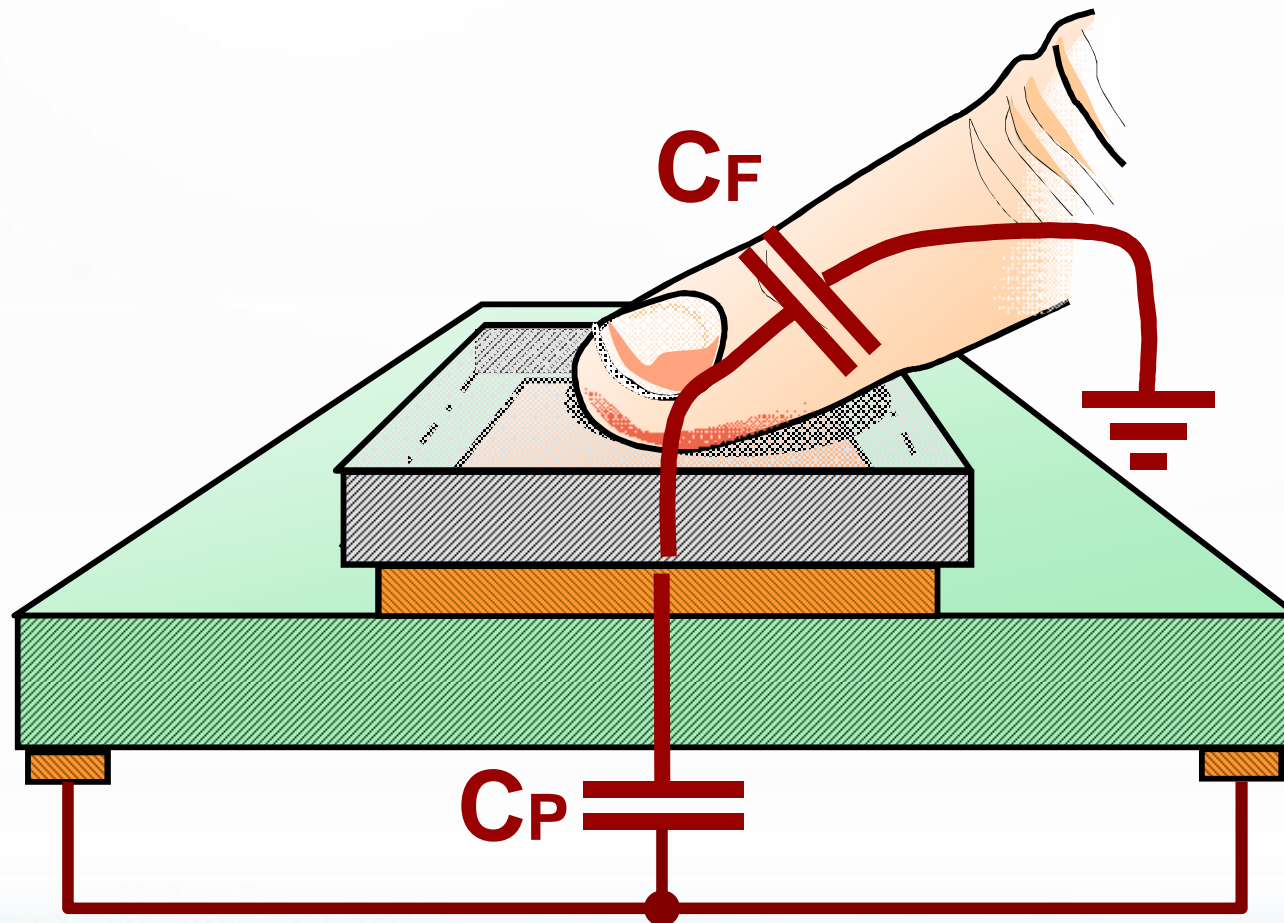
### 1 Абсолютные измерения

- 1 Измерители R-L-C
- 1 Измерение влажности



# CapTouch Как это работает?

Поднесение пальца вносит емкость

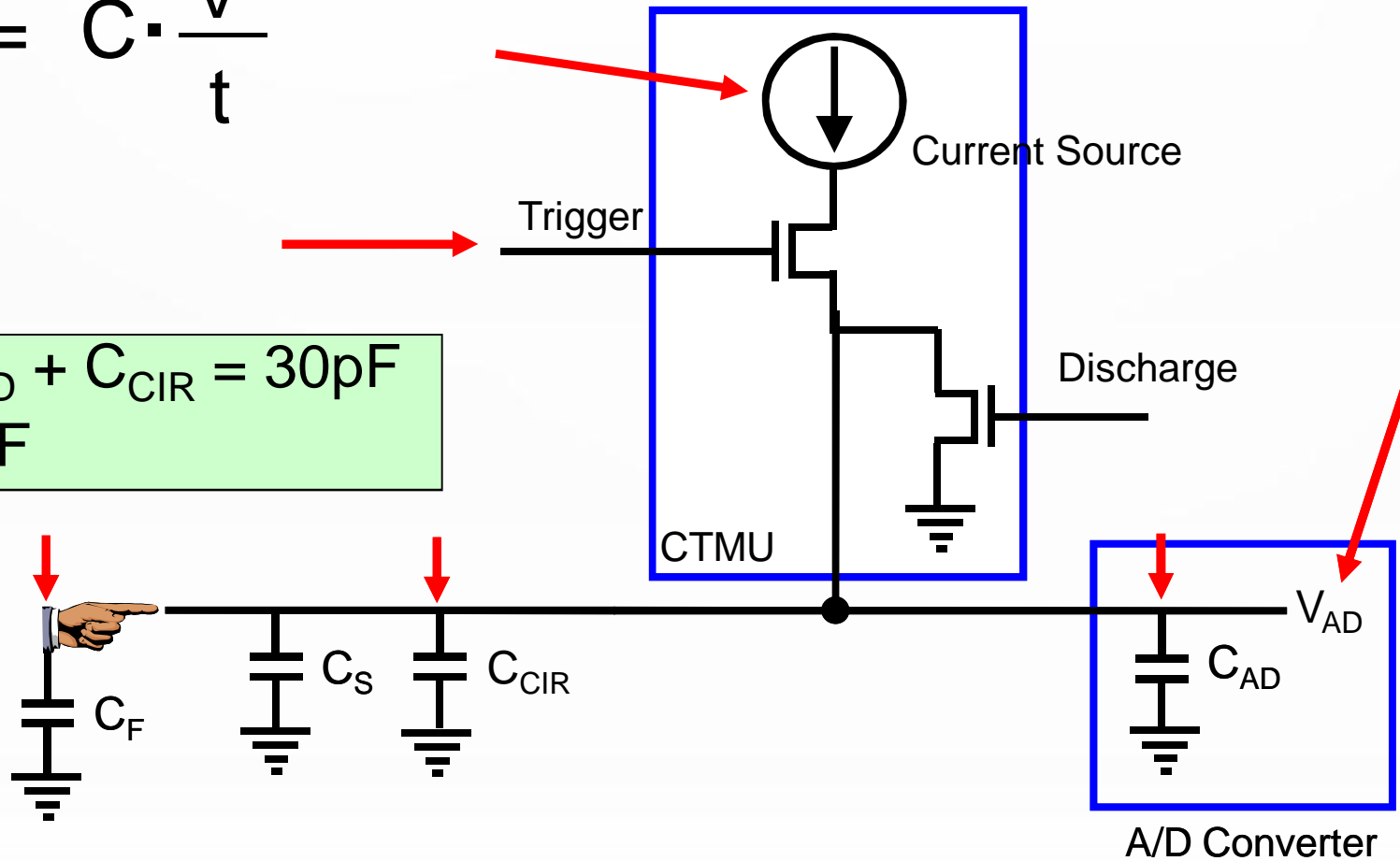




# СТМУ для детектирования касания

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

$C_s = C_{AD} + C_{CIR} = 30\text{pF}$   
 $C_F = 7\text{pF}$





# Измерение емкости

- 1 Ток через конденсатор описывается выражением

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

- 1 Так как  $I$  и  $C$  постоянны:

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

- 1 Значит

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

- 1 Если  $C$  увеличивается, значит  $V$  должно уменьшаться



# Относительное измерение

1 Из предыдущего слайда...

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

1 Для capTouch приложений интересно только изменение **C**, не абсолютное значение

1 Когда ток **I** и время заряда **t** постоянны, нужно определить только напряжение **V** – Это просто!

1 Не нужны точные значения тока **I** и времени **t** для измерения **относительного изменения емкости.**





# Измерение Абсолютной Емкости

1 Из предыдущих слайдов...

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

1 Известно время заряда **t**.

1 Для точного измерения емкости нужно калибровать ток **I**.



# Калибровка СТМУ

## Первый метод

- 1 **C**<sub>system</sub> должна быть известна
- 1 Заряжаем в течении точного интервала времени
- 1 Определяем напряжение
- 1 Вычисляем значение тока **I**



# Калибровка СТМУ

## Второй метод

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



# Измерения Емкости. Разрешающая способность.

## 1 Пусть дано:

1 10-bit АЦП

1  $t = 500$  нсек (известно)

1  $V = 1$ В (измерено)

1  $I = 55$  мкА (известно)

1  $C = (55 \text{ мкА} * 500 \text{ нс}) / 1\text{В} = 27.5$  пФ

1 Разрешение по напряжению  $3.00 / 1024 = 2.93$  мВ

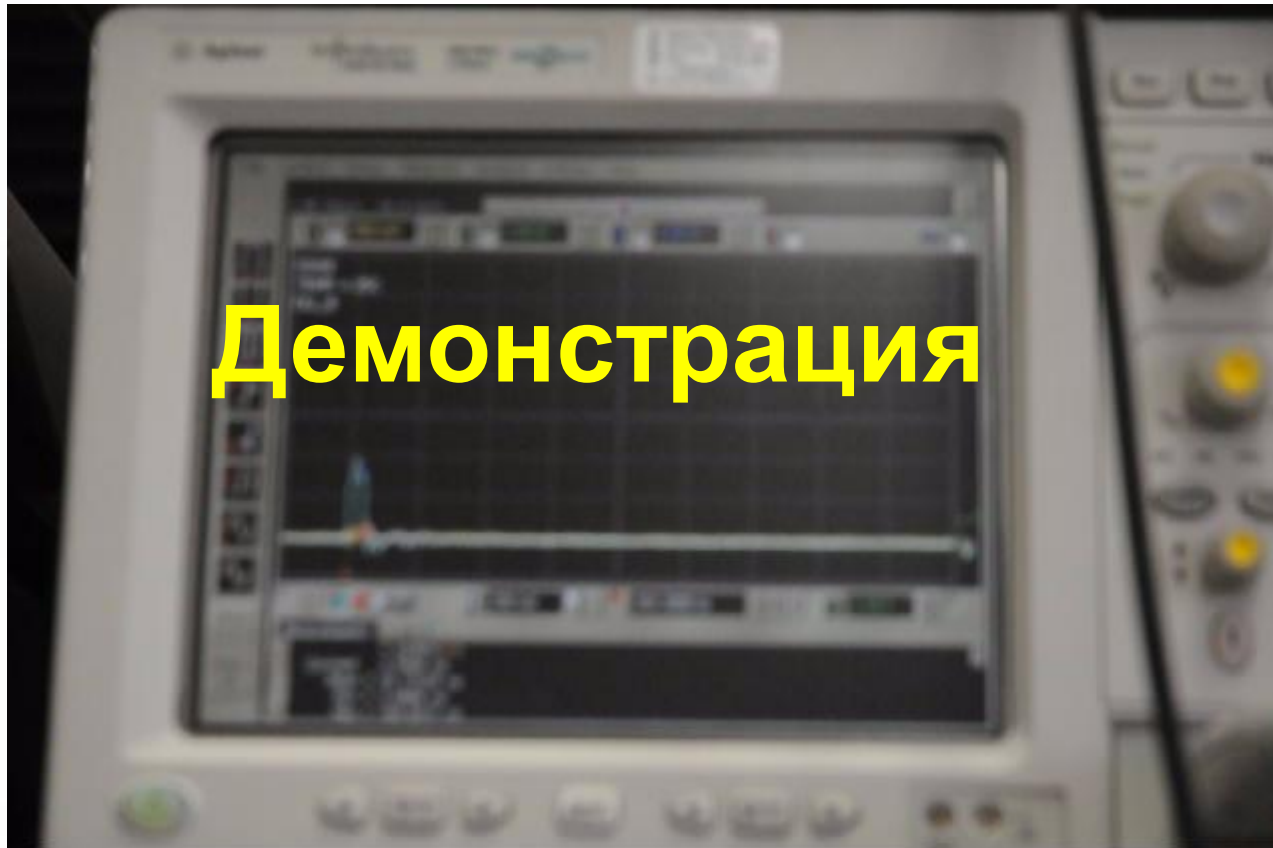
## 1 Тогда 1 квант АЦП

∅  $C = (55 \text{ уа} * 500 \text{ нс}) / 1.00293 = 27.42$  пФ

∅  $\Delta C = (27.5 - 27.4) \text{ пФ} = 0.08$  пФ



# Измерение Влажности с помощью СТМУ (Емкостной Дачик)







*Microchip's 15th Annual*

**MASTERS**

# Измерение Температуры с помощью СТМУ



# Измерение температуры

**Где применяется:**

- 1 Климат контроль в помещениях**
- 1 Контроль температуры в приборах**
- 1 Дешевые медицинские термометры**
- 1 ...**

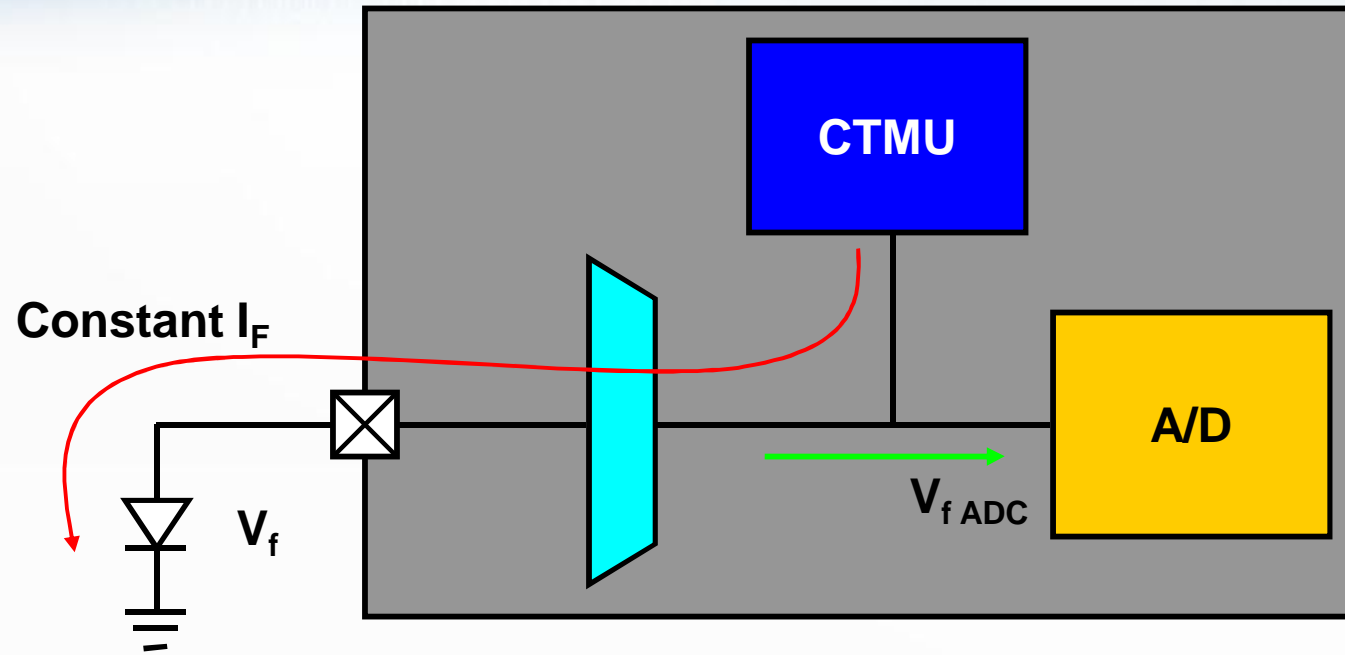


# Измерение температуры

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



# Измерение температуры СТМУ и ДИОД



$$T \propto V_f$$



# Измерение температуры

## Основные вычисления

1  $I = I_0(e^{(qV/kT)} - 1)$  EQ 1

1  $I/I_0 + 1 = e^{(qV/kT)}$  EQ 2

1  $\ln(I/I_0 + 1) = qV/kT$  EQ 3

1  $\ln(I/I_0 + 1) = V$  EQ 4

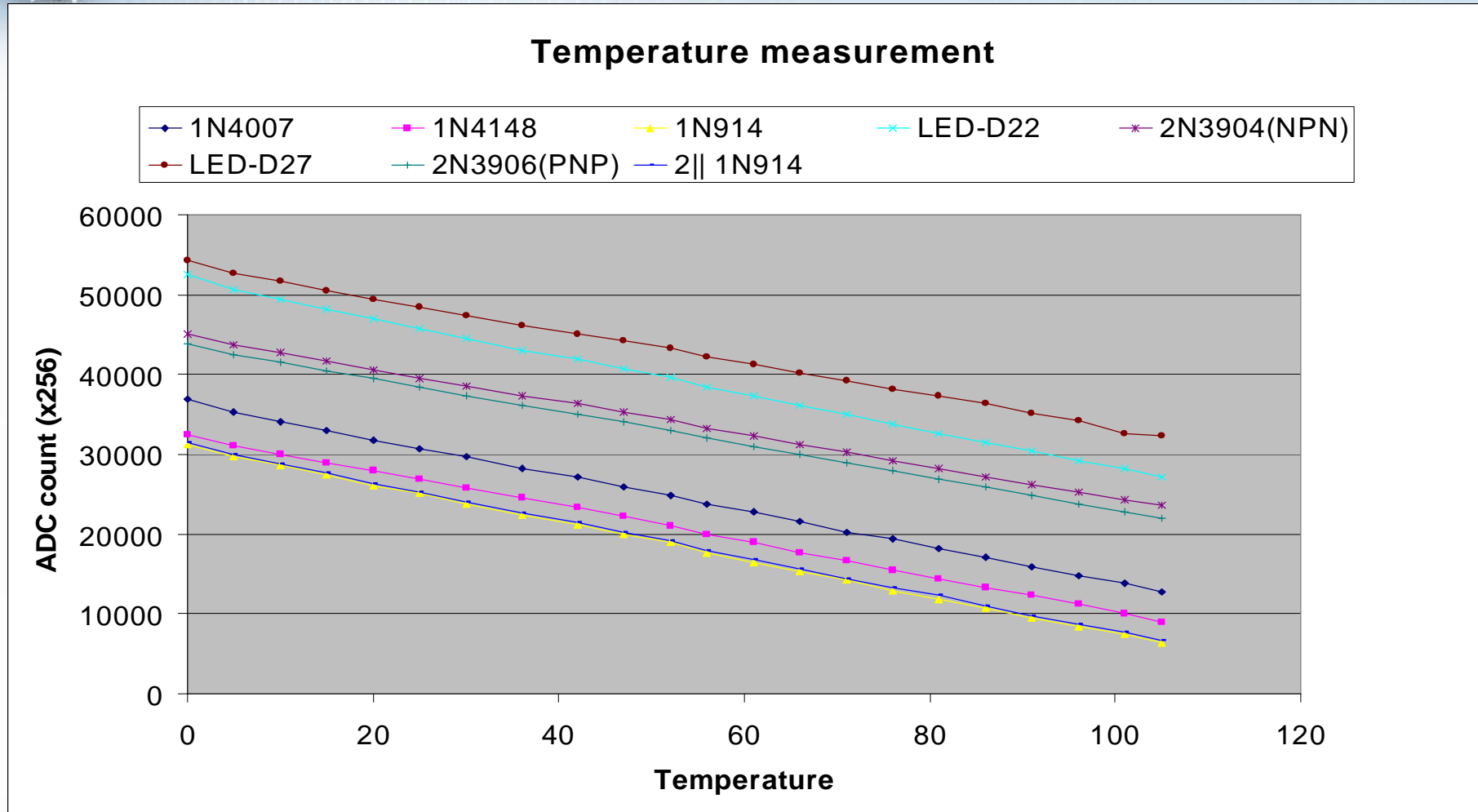
1  $T = qV/kV$  EQ 5

1 Таким образом температура  $T$  пропорциональна напряжению  $V$  на диоде





# Измерение температуры



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



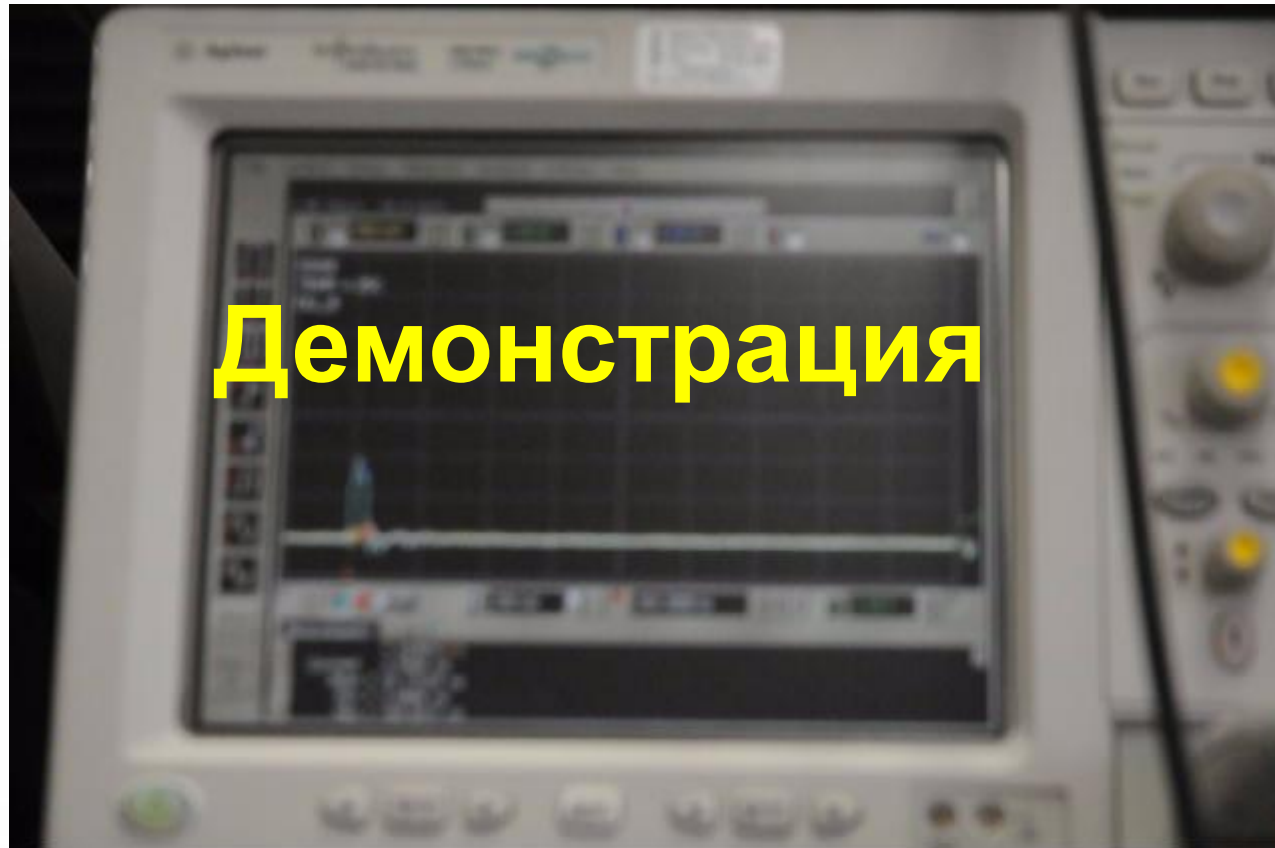
# Измерение температуры

## Калибровка

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



# Измерение температуры





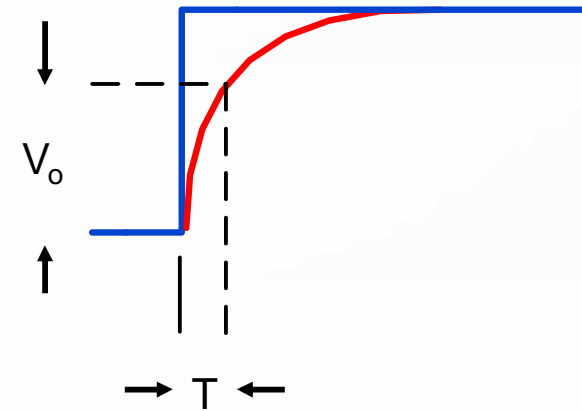
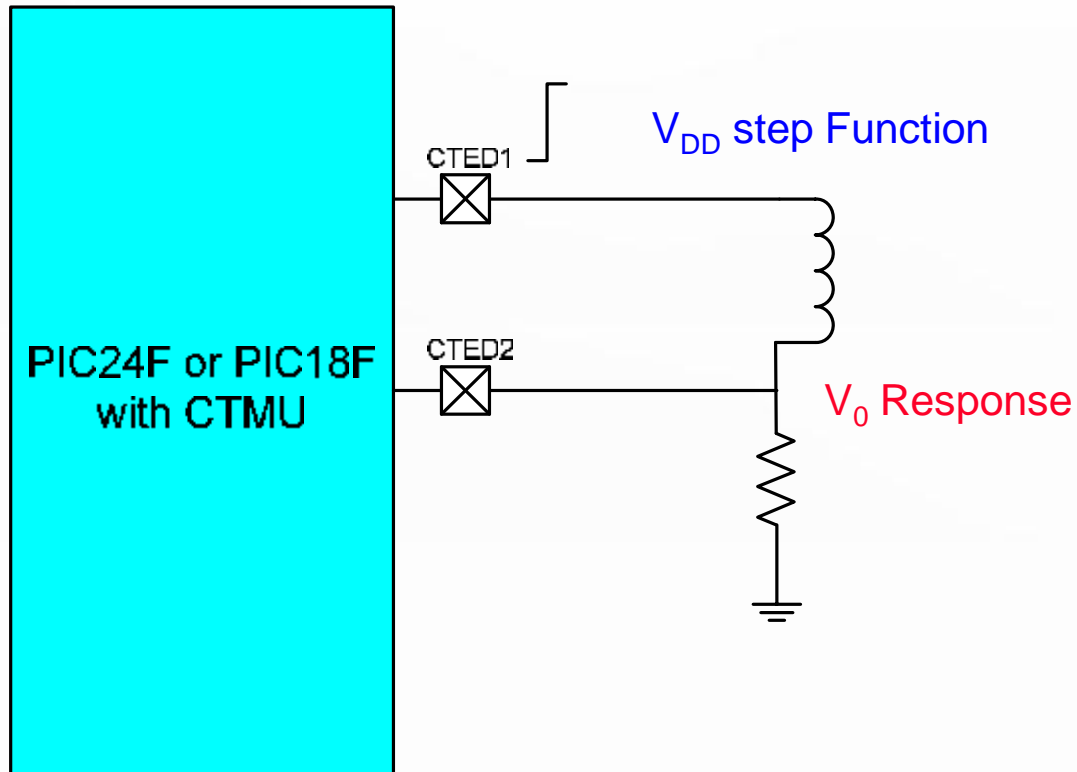
*Microchip's 15th Annual*  
**MASTERS**

# Измерение индуктивности с помощью СТМУ





# Измерение индуктивности







# Измерение ИНДУКТИВНОСТИ

## Основные вычисления

1  $I = V_{DD}/R(1 - e^{(-tR/L)})$  EQ 1

1  $V_0 = V_{DD} (1 - e^{(-tR/L)})$  Where  $V_0 = IR$  EQ 2

1  $1 - V_0/ V_{DD} = e^{(-tR/L)}$  EQ 3

1  $-tR/L = B$  Where  $B = \ln(1 - V_0/ V_{DD})$  EQ 4

1  $L = -tR/B$  EQ 5

1 Таким образом индуктивность прямо пропорциональна времени



# Разрешение Измерения Индуктивности

**Допустим:**

1  $R = 1K$

1  $V_0 = 1V$

1  $V_{DD} = 3V$

1  $t = 500 \text{ nS}$

1  $L = (-1000/-.405)*500 \text{ nS} = 1.233 \text{ mH}$

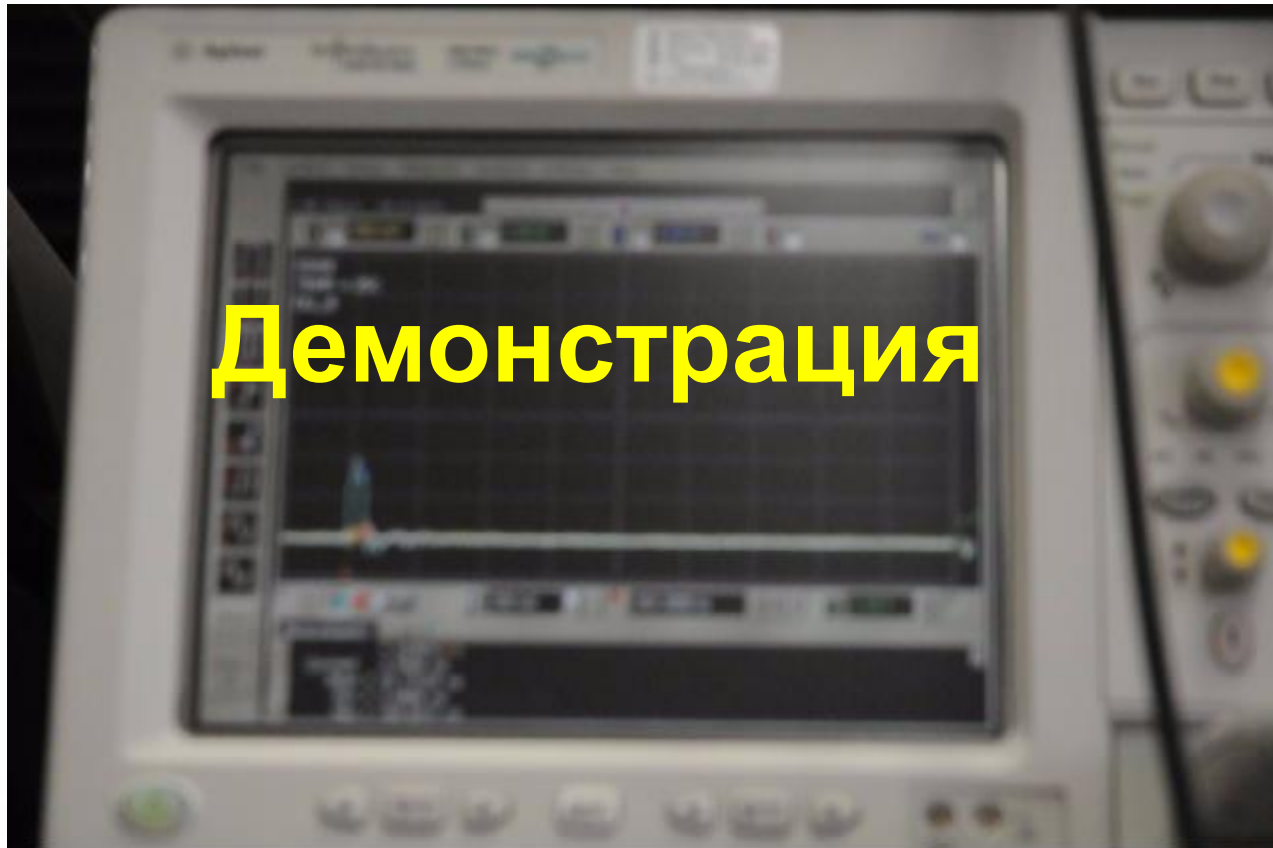
1 Для разрешения по времени  $0.8 \text{ ns}$

1  $L = (-1000/-.405)*500.8 \text{ nS} = 1.235 \text{ mH}$

1 Разрешение  $2 \text{ uH}$



# Измерение индуктивности





*Microchip's 15th Annual*

**MASTERS**

# ШИМ / Задержка импульса с помощью СТМУ



# ШИМ / Задержка

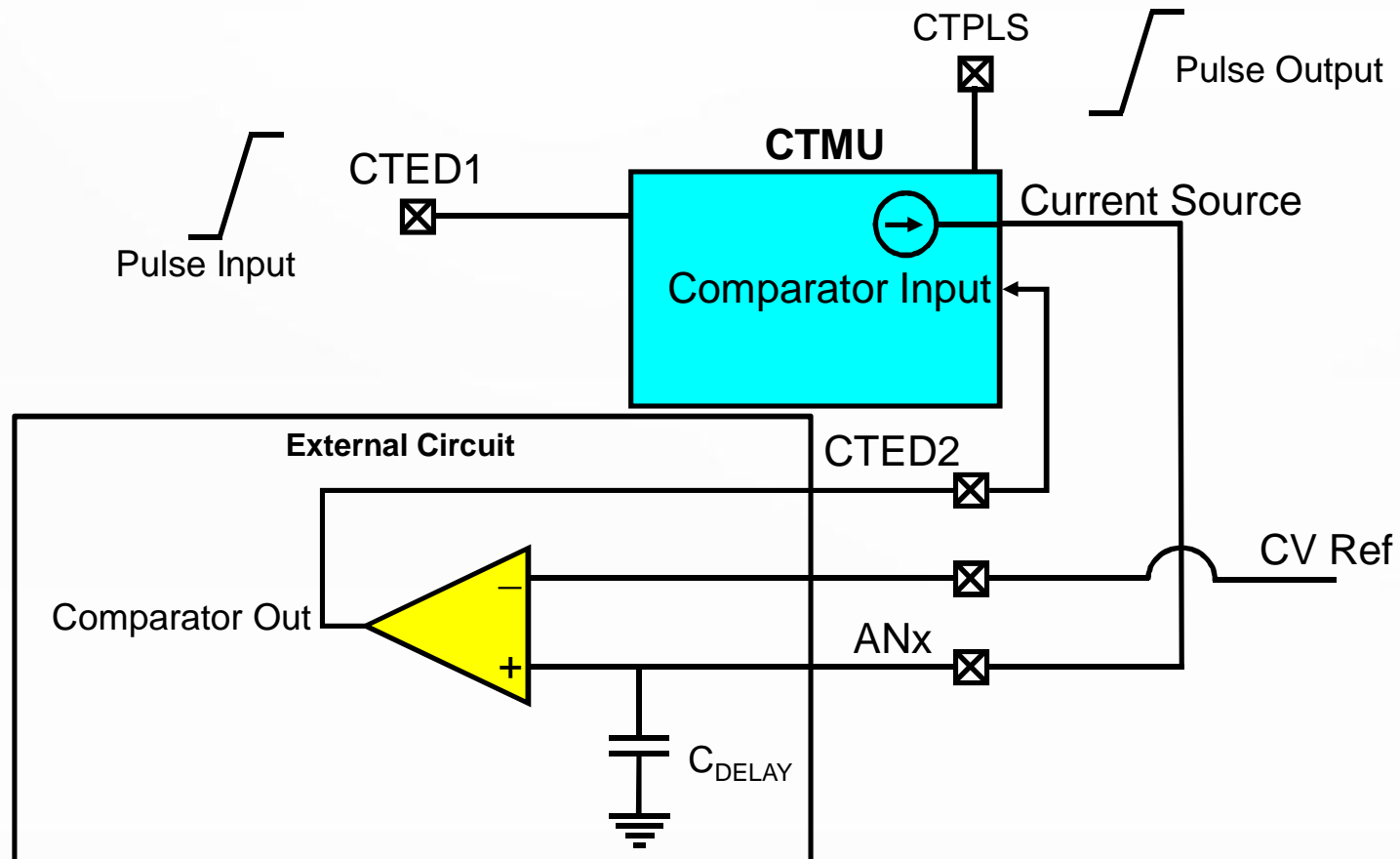
## Типовые задачи

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



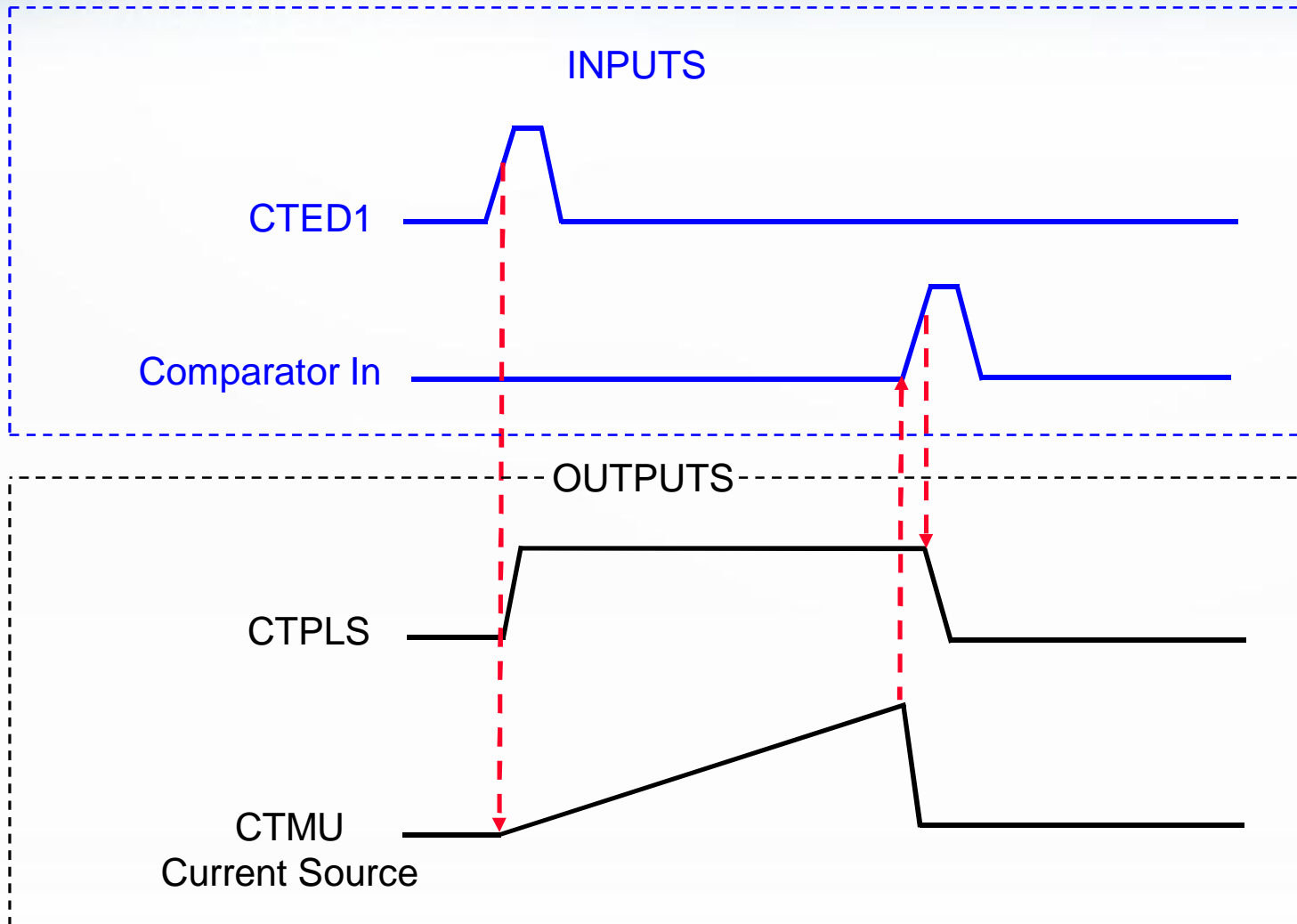


# ШИМ / Задержка конфигурация системы





# ШИМ / Задержка - СТМУ





# СТМУ Итоги

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



# СТМУ Итоги

## 1 Измерение времени

- 1 Используйте CTED1 & CTED2 чтобы включить и выключить СТМУ источник тока
- 1 Время представлено напряжением на АЦП

## 1 Измерение емкости

- 1 Используйте цикл инструкции как эталон времени
- 1 Емкость представлена напряжением на АЦП

## 1 Измерение температуры

- 1 Только один диод необходим
- 1 Температура пропорциональна напряжению

## 1 ШИМ / Задержка Импульса



# Некоторые статьи о CTMU

- 1 *Capacitive Sensors* by Larry K. Baxter  
ISBN 0-7803-5351-X
- 1 **AN1250** *CTMU for Capacitive Touch Applications*
- 1 **AN1317** *Conducted Noise Immunity Techniques for the CTMU*
- 1 **AN1375** *See What You Can Do with the CTMU*
- 1 **TB3016** *Using the PIC MCU CTMU for Temperature Measurement*
- 1 **DS39724** *CTMU Ref Manual*





# Trademarks

**The Microchip name and logo, the Microchip logo, dsPIC, KeeLoq, KeeLoq logo, MPLAB, PIC, PICmicro, PICSTART, PIC<sup>32</sup> logo, rfPIC and UNI/O are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.**

**FilterLab, Hampshire, HI-TECH C, Linear Active Thermistor, MXDEV, MXLAB, SEEVAL and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.**

**Analog-for-the-Digital Age, Application Maestro, CodeGuard, dsPICDEM, dsPICDEM.net, dsPICworks, dsSPEAK, ECAN, ECONOMONITOR, FanSense, HI-TIDE, In-Circuit Serial Programming, ICSP, Mindi, MiWi, MPASM, MPLAB Certified logo, MPLIB, MPLINK, mTouch, Octopus, Omniscient Code Generation, PICC, PICC-18, PICDEM, PICDEM.net, PICTail, REAL ICE, rfLAB, Select Mode, Total Endurance, TSHARC, UniWinDriver, WiperLock and ZENA are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.**

**SQTP is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.**

**All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.**

**© 2011, Microchip Technology Incorporated, All Rights Reserved.**