

# ВЫБОР ОСЦИЛЛОГРАФА С ОПТИМАЛЬНОЙ ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ

Джонни Хэнкок, инженер, компания Agilent Technologies

**Полоса пропускания — характеристика, которую большинство инженеров рассматривает в первую очередь при выборе осциллографа. В этой статье даются некоторые советы по выбору осциллографа с адекватной полосой пропускания для цифровых и аналоговых приложений.**

## ПОЛОСА ПРОПУСКАНИЯ ОСЦИЛЛОГРАФА

Частотная характеристика всех осциллографов подобна характеристике фильтра низких частот: она спадает на высоких частотах, как показано на рисунке 1. Большинство осциллографов с паспортным значением полосы пропускания 1 ГГц и ниже имеют так называемую гауссову характеристику, у которой медленный спад начинается примерно с  $1/3$  граничной частоты по уровню  $-3$  дБ. Осциллографы с паспортным значением полосы пропускания более 1 ГГц, как правило, имеют так называемую максимально плоскую частотную характеристику, приведенную на рисунке 2. Она обычно имеет незначительный спад внутри полосы пропускания и крутой спад вблизи граничной частоты по уровню  $-3$  дБ.

У каждого из этих двух типов частотных характеристик есть свои преимущества и недостатки. Осциллографы с максимально плоской частотной характеристикой меньше ослабляют внутриполосные сигналы, чем осциллографы с гауссовой характеристикой, следовательно, позволяют выполнять более точные измерения внутриполосных сигналов. Зато осциллограф с гауссовой характеристикой меньше ослабляет внеполосные сигналы по сравнению с прибором, имеющим максимально плоскую характеристику, что означает меньшее время нарастания переходной характеристики при той же паспортной полосе пропускания. Однако иногда для того, чтобы соответствовать критерию Найквиста  $f_{\text{MAX}} < f_s$ , имеет смысл сильнее ослабить внеполосные сигналы с целью устранения высокочастотных составляющих, вносящих вклад в возникновение ложных сигналов из-за эффекта наложения спектров [1].

Какова бы ни была частотная характеристика вашего осциллогра-

фа — гауссова, максимально плоская или нечто среднее, полосой пропускания считается наименьшая частота, на которой сигнал ослабляется на 3 дБ. Измерить полосу пропускания и частотную характеристику осциллографа можно при помощи генератора сигналов с функцией качания частоты. Ослабление сигнала на граничной частоте по уровню  $-3$  дБ соответствует примерно 30%-ной погрешности по амплитуде. Таким образом, не стоит ожидать точных измерений на сигналах, значимые частоты которых находятся у верхнего края полосы пропускания осциллографа.

Тесную связь с паспортной полосой пропускания осциллографа имеет паспортное время нарастания переходной характеристики. Для осциллографов с гауссовой характеристикой время нарастания на пороговых уровнях 10 и 90% составляет приблизительно  $0,35/f_{\text{BW}}$ . Для осциллографов с максимально плоской частотной характеристикой оно зависит от крутизны спада характеристики и составляет около  $0,4/f_{\text{BW}}$ . Однако важно помнить, что время нарастания переходной характеристики осциллографа не есть минимальная длительность перепада измеряемого сигнала, при которой осцилло-

граф еще позволяет выполнять точные измерения. Время нарастания переходной характеристики — это минимальная длительность перепада сигнала, которую осциллограф способен был бы воспроизвести, если бы входной сигнал имел бесконечно малую длительность перепада (0 пс). Хотя на практике измерить эту теоретическую характеристику невозможно (сигнал импульсных генераторов имеет конечную длительность перепадов), измерить время нарастания переходной характеристики осциллографа можно, подав на его вход импульс, длительность фронта которого в 3–5 раз короче паспортного времени нарастания переходной характеристики осциллографа.

## ЦИФРОВЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Практическое правило гласит: полоса пропускания осциллографа должна как минимум в 5 раз превышать основную частотную составляющую сигнала в исследуемой системе, т.е.  $f_{\text{BW}} \leq 5f_{\text{clk}}$ . Если осциллограф отвечает этому критерию, он зарегистрирует сигнал вплоть до пятой гармоники с минимальным ослаблением. Эта составляющая чрезвычайно важна для определения общей формы цифровых сигналов. Но если требуется выполнять точные измерения на сигналах с очень короткими фронтами, эта простая формула не годится, т.к. не учитывает более высокочастотные составляющие такого сигнала.

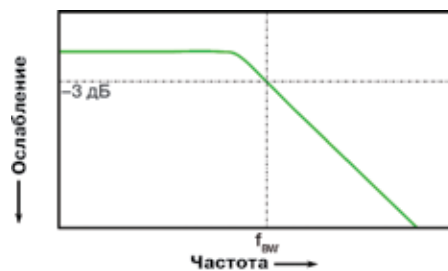


Рис. 1. Пример гауссовой частотной характеристики осциллографа

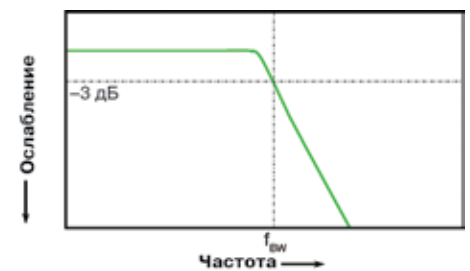


Рис. 2. Пример максимально ровной частотной характеристики осциллографа



# Жонглировать – это просто

Будьте во всеоружии с ручными цифровыми мультиметрами фирмы Agilent



## Ручные цифровые мультиметры Agilent серии U1240A

- двойная шкала с максимальным показанием 10,000
- Истинные среднеквадратичные измерения (RMS) и базовая погрешность по постоянному напряжению 0.09%
- Дополнительные возможности: коэффициент гармоник, счетчик переключений, двухканальное и разностное измерение температуры



Серия U1250A заслужила ряд престижных наград:



Награда EDN за лучшее из 100 изделий 2006 года



Награда за лучшее изделие analogZone 2006 года

Москва, +7 495 797 39 58

[www.agilent.com/find/handheldmm](http://www.agilent.com/find/handheldmm)

Разработчики ручных мультиметров серии U1250, получивших многочисленные престижные награды, представили новую серию мультиметров U1240. Разработанные по принципу «больше возможностей за меньшую стоимость», мультиметры новой серии предлагают широкий набор функциональных возможностей, позволяющих сделать вашу работу качественнее.

Начиная с идентификации причин неисправностей и заканчивая их отладкой, серия U1240 позволяет выполнять эти задачи с высокой точностью, обладая двойным дисплеем с высоким разрешением, а также широким набором уникальных особенностей, таких как коэффициент гармоник, подсчет числа переключений и двухканальное и разностное измерение температуры.

Портативные цифровые мультиметры серии U1240A обладают набором сильных функциональных особенностей – автоматической регистрацией данных, генератором прямоугольных сигналов и счетчиком частоты. Кроме того, они поставляются полностью укомплектованными различными пробниками и программным обеспечением для регистрации данных для того, чтобы пользователь мог начать свою работу быстрее.

Как и с любой другой продукцией Agilent, вы можете быть уверены в качестве вашего портативного мультиметра. Приборы поставляются с сертификатом заводской калибровки и результатами заводских испытаний, а также соответствуют нескольким промышленным стандартам безопасности, гарантирующим, что изделия Agilent будут соответствовать самому важному стандарту – вашему собственному.



Таблица 1. Множители K для расчета требуемой полосы пропускания  $f_{BW}$  осциллографа по требуемой погрешности и типу частотной характеристики

Требуемая точность, %	Гауссова характеристика	Максимально плоская характеристика
20	1,0	1,0
10	1,3	1,2
3	1,9	1,4

Более точный метод определения требуемой полосы пропускания осциллографа — это определение максимальной частотной составляющей цифрового сигнала, которая не равна максимальной частоте тактового сигнала. Максимальная частотная составляющая определяется минимальными длительностями перепадов сигнала в схеме. Таким образом, в качестве первого шага надо определить длительность фронта такого сигнала. Как правило, эту информацию можно почерпнуть из опубликованных технических характеристик компонентов, используемых в вашей схеме.

Затем по простой формуле можно вычислить максимальную с практической точки зрения частотную составляющую. Иногда ее называют «коленной» частотой  $f_{knee}$  [2]. Идеальный сигнал с нулевой длительностью фронта имеет бесконечный спектр, но в частотном спектре реального сигнала имеется точка перегиба или «колени», вследствие чего частотные составляющие выше этой точки  $f_{knee}$

оказываются несущественными для определения формы сигнала. Частота  $f_{knee}$  рассчитывается по следующей формуле:

$$f_{knee} = 0,5/T_R \text{ или } f_{knee} = 0,4/T_R,$$

где  $T_R$  — время нарастания сигнала. Первая формула относится к случаю, когда время нарастания сигнала рассчитывается между пороговыми уровнями 10 и 90%, а вторая — между уровнями 20 и 80%. Не следует путать это время нарастания сигнала с паспортным временем нарастания переходной характеристики осциллографа — здесь речь идет о реальных длительностях фронтов сигналов.

Третий шаг состоит в определении полосы пропускания осциллографа, исходя из требуемой погрешности измерения длительности фронтов:  $f_{BW} = Kf_{knee}$ . В таблице 1 приведены коэффициенты K, соответствующие различным значениям погрешности для осциллографов с гауссовой и максимально плоской частотной характеристикой.

Пример. Пусть необходимо определить требуемую минимальную полосу пропускания осциллографа с гауссовой частотной характеристикой для измерения сигнала с длительностью перепадов (10–90%), равной 500 пс.

При длительности перепадов 500 пс максимальная практическая частотная составляющая  $f_{knee}$  сигнала равна 1 ГГц:

$$f_{knee} = 0,5/500 \text{ пс} = 1 \text{ ГГц.}$$

Если при измерении длительности фронтов допускается погрешность 20%, то для цифровых измерений можно пользоваться осциллографом с полосой пропускания 1 ГГц. Но если, например, допускается погрешность только 3%, то более удачным выбором будет осциллограф с полосой пропускания 2 ГГц.

Теперь выполним ряд измерений на цифровом тактовом сигнале с характеристиками, аналогичными приведенным в этом примере, используя осциллографы с разной полосой пропускания.

### СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ТАКТОВОГО СИГНАЛА

На рисунке 3 показан цифровой сигнал с тактовой частотой 100 МГц и длительностью перепадов 500 пс (10–90%) на экране осциллографа Agilent MSO6014A с полосой пропускания 100 МГц. Как видно из рисунка, осциллограф пропускает основную частоту 100 МГц, представляя тактовый сигнал в виде синусоиды. Таким образом, осциллограф с полосой пропускания 100 МГц может быть хорошим решением для различных 8-разрядных микроконтроллерных схем с тактовыми частотами в диапазоне 10...20 МГц, но для тактового сигнала частотой 100 МГц полосы пропускания 100 МГц явно недостаточно.

Осциллограф с полосой пропускания 500 МГц способен зарегистрировать пятую гармонику этого сигнала (см. рис. 4), что было нашей первой практической рекомендацией. Но

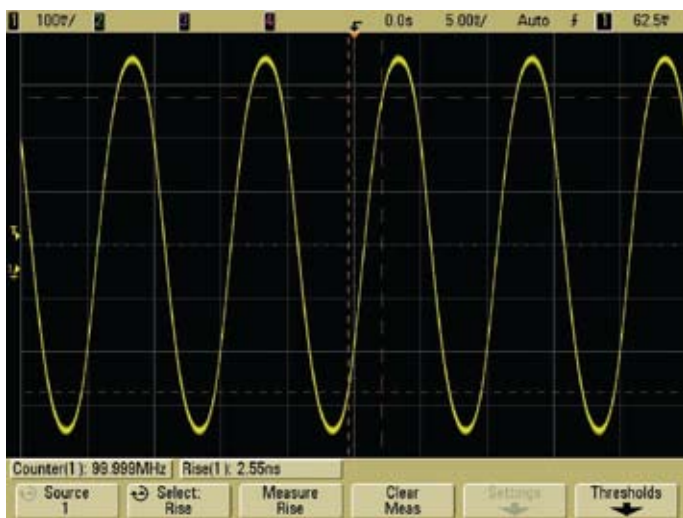


Рис. 3. Сигнал с тактовой частотой 100 МГц, зарегистрированный осциллографом Agilent MSO6014A с полосой пропускания 100 МГц

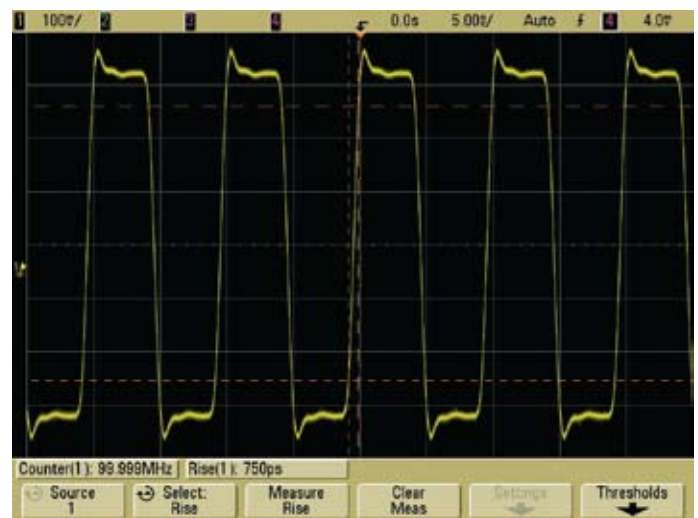


Рис. 4. Сигнал с тактовой частотой 100 МГц, зарегистрированный осциллографом Agilent MSO6054A с полосой пропускания 500 МГц

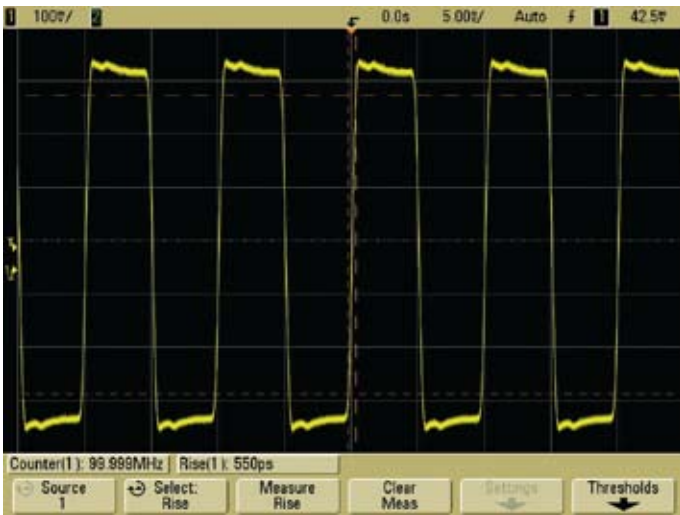


Рис. 5. Сигнал с тактовой частотой 100 МГц, зарегистрированный осциллографом Agilent MSO6104A с полосой пропускания 1 ГГц

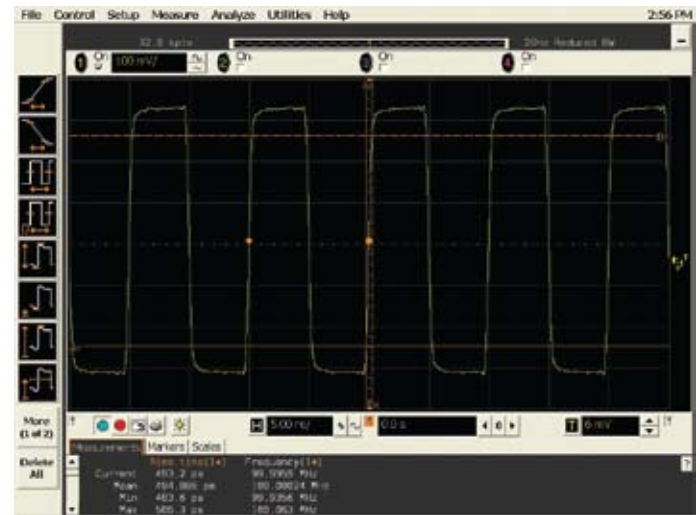


Рис. 6. Сигнал с тактовой частотой 100 МГц, зарегистрированный осциллографом Agilent DSO80204B с полосой пропускания 2 ГГц

при измерении длительности фронта этого сигнала мы получаем 750 пс. В данном случае осциллограф не дает точного значения длительности фронта исследуемого сигнала. Этот результат скорее близок к значению его собственного времени нарастания переходной характеристики (700 пс), а не ко времени нарастания измеряемого сигнала (500 пс). Если важна высокая точность временных измерений, потребуется более широкополосный осциллограф.

Осциллограф с тактовой частотой 1 ГГц дает гораздо более точное представление этого сигнала, как видно из рисунка 5. Измерив длительность фронта с помощью этого осциллографа, мы получаем 550 пс. Погрешность этого измерения состав-

ляет 10%, что может быть вполне удовлетворительным, особенно если имеются ограничения по бюджету. Однако и такой результат в некоторых случаях едва ли может считаться приемлемым. Если необходимо измерить сигнал с длительностью фронта 500 пс с погрешностью < 3%, нам непременно потребуется осциллограф с полосой пропускания 2 ГГц или выше, как было определено ранее в нашем примере.

Имея полосу пропускания 2 ГГц, мы видим точное представление этого сигнала и точно измеренную длительность фронта, равную 495 пс, как показано на рисунке 6.

Некоторые широкополосные осциллографы предоставляют возможность расширять полосу пропуска-

ния. Если в данный момент полосы 2 ГГц достаточно, то можно на первое время приобрести такой осциллограф, а затем при необходимости расширить его полосу пропускания вплоть до 13 ГГц.

### АНАЛОГОВЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Много лет назад большинство производителей осциллографов рекомендовали использовать осциллографы с полосой пропускания, как минимум в 3 раза превышающей максимальную частоту сигнала. Хотя множитель 3 непригоден для цифровых приложений, где исходным параметром является тактовая частота, в аналоговых приложениях этот подход по-прежнему справедлив. Чтобы понять, откуда берется это соотно-

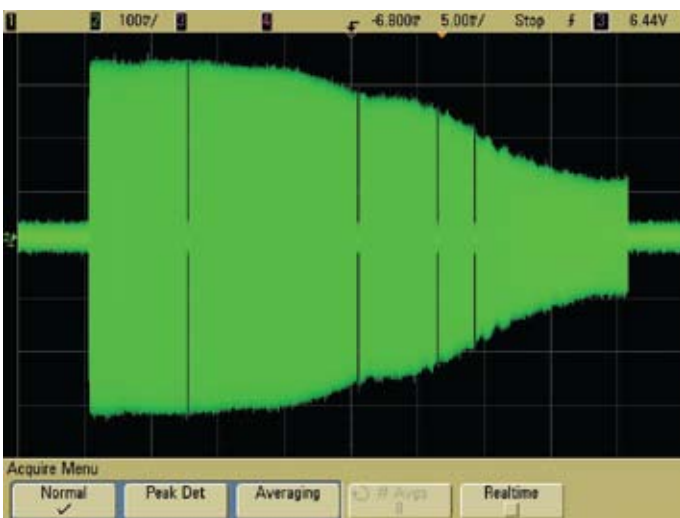


Рис. 7. Результаты измерения сигнала генератора качающейся частоты осциллографом Agilent MSO6104A с полосой пропускания 1 ГГц

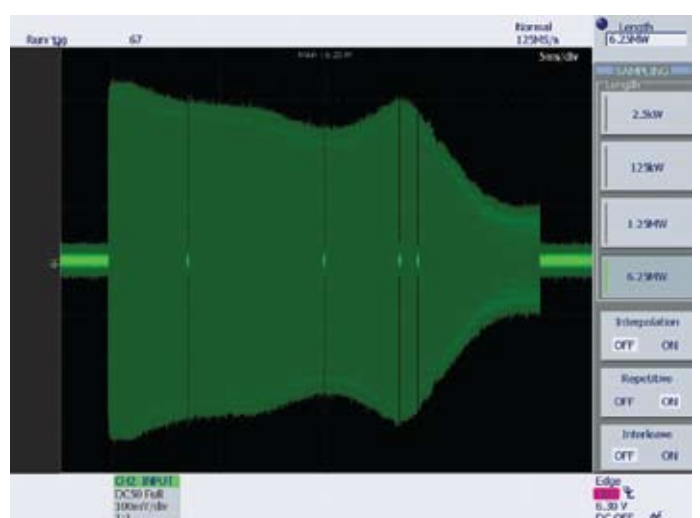


Рис. 8. Результаты измерения сигнала генератора качающейся частоты осциллографом другого производителя с полосой пропускания 1,5 ГГц

шение «3:1», посмотрим на фактическую частотную характеристику осциллографа с полосой пропускания 1 ГГц.

На рисунке 7 показаны результаты измерения сигнала генератора качающей частоты (20 МГц... 2 ГГц) на осциллографе с полосой пропускания 1 ГГц. Как видно из рисунка, на частоте ровно 1 ГГц входной сигнал ослаблен примерно на 1,7 дБ, что с запасом укладывается в ограничение -3 дБ, задающее полосу пропускания осциллографа. Однако для точных измерений на аналоговых сигналах необходимо использовать осциллограф в той части его полосы пропускания, где характеристика имеет малый спад и ослабление сигнала минимально. На частоте, равной приблизительно трети от граничной частоты полосы пропускания 1 ГГц, данный осциллограф практически не дает ослабления (0 дБ). Однако следует иметь в виду, что не все осциллографы имеют такую характеристику.

На рисунке 8 представлены результаты измерения этого же сигнала, полученные на осциллографе другого производителя с полосой пропускания 1,5 ГГц. Здесь мы

имеем пример весьма неравномерной частотной характеристики. Она не является ни гауссовой, ни максимально плоской. У нее много экстремумов, что может привести к серьезному искажению формы как аналоговых, так и цифровых сигналов.

Паспортное значение полосы пропускания осциллографа, которое задается частотой ослабления по уровню -3 дБ, ничего не говорит об ослаблении или усилении сигнала на определенной частоте. Даже на одной пятой полосы пропускания осциллографа сигналы ослабляются приблизительно на 1 дБ (12%). В данном случае следовать практическому правилу (использовать множитель 3) было бы неразумно. При выборе осциллографа рекомендуется выбирать производителя с хорошей репутацией и уделять пристальное внимание частотной характеристике выбираемого осциллографа.

Для цифровых приложений следует подумать о выборе осциллографа с полосой пропускания, как минимум в 5 раз превышающей наивысшую тактовую частоту в исследуемой схеме. Но если стоит задача точного изме-

рения длительности фронтов сигнала, необходимо определить максимальную частотную составляющую сигнала.

Для аналоговых сигналов следует выбирать осциллограф с полосой пропускания, как минимум в 3 раза превышающей наивысшую частотную составляющую сигнала в исследуемой схеме. Но эта практическая рекомендация действует только для аналоговых осциллографов, имеющих относительно малый спад в нижнем диапазоне частот.

Наконец, если вы выбираете осциллограф для сегодняшних нужд, не забывайте о завтрашнем дне. Если ваш бюджет гибок, приобретение, сделанное сегодня с запасом, может сэкономить вам средства в будущем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хэнкок Дж. Частота дискретизации осциллографа и точность измерений // Электронные компоненты, 2007, №№2, 4.

2. Johnson H., Graham M. High-Speed Digital Design, A Handbook of Black Magic. Prentice Hall Inc., New Jersey, 1993.

**ЗАО «НПО СЕРНИЯ»** **SERNIA**

www.sernia.ru

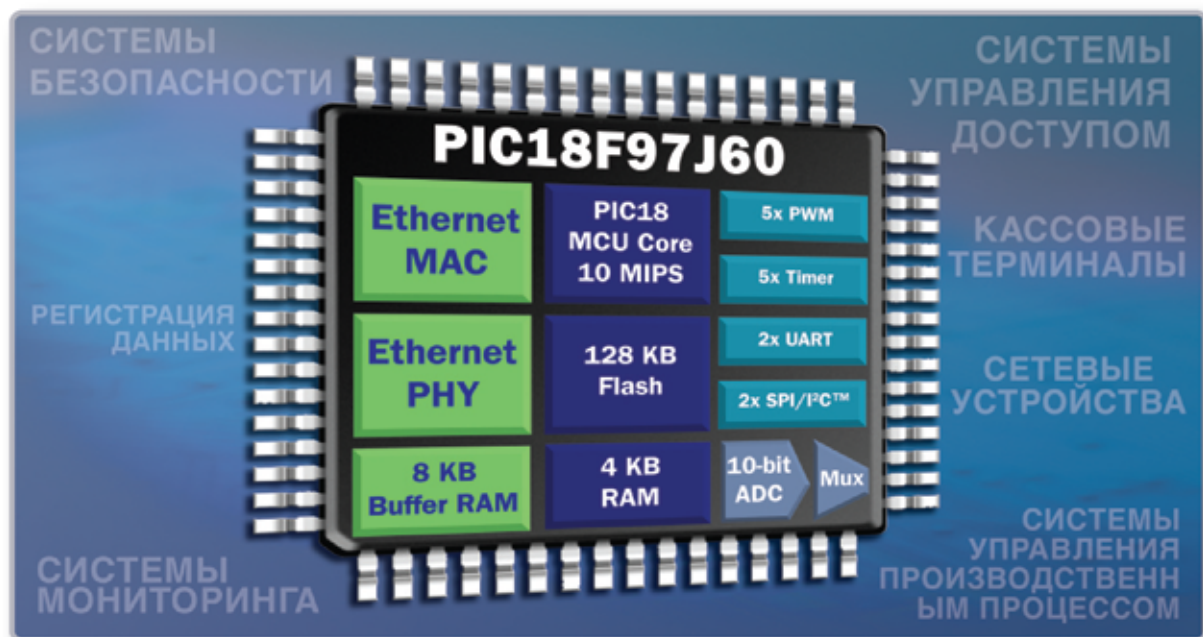
**НА ЛЮБЫХ ЧАСТОТАХ**

ТЕЛ.: (495) 225 40 14,  
www.sernia.ru,  
office@sernia.ru

НИОКР  
РАДИОИЗМЕРЕНИЯ  
СИСТЕМНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ  
САМОЕ СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Logos: MILRESA, A.M. Systems, Inc., ETS-LINDGREN, Taktronic

# Встраиваемые Ethernet решения



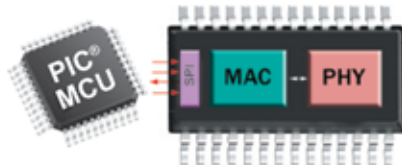
Отслеживайте, управляйте или перепрограммируйте Ваше приложение дистанционно, используя интегрированное семейство Ethernet микроконтроллеров PIC18F97J60 и **имеющееся в свободном доступе** ПО протоколов TCP/IP

## 3 простых шага, которые можно сделать для начала использования МК...

- 1. Ознакомьтесь с Ethernet устройствами компании Microchip за 20 минут.**
  - используйте возможность участия в интернет-семинаре по Ethernet
- 2. Скачайте **имеющееся в свободном доступе** ПО протоколов TCP/IP от компании Microchip**
  - стек протоколов TCP/IP доступен с исходными кодами для гибкости и оптимизации размера кодов.
- 3. Проверьте недорогой Ethernet инструментарий**
  - протестируйте семейство PIC18F97J60 с помощью демоплаты PICDEM.net™ 2 (DM163024)

Device	Pins	Flash (KB)	Features
PIC18F97J60	100	128	10-BaseT Ethernet
PIC18F87J60	80	128	12 KB RAM
PIC18F67J60	64	128	(8 KB dedicated Ethernet)
PIC18F96J65	100	96	5x 16-bit timers
PIC18F86J65	80	96	10-bit ADC, 16 channels analog comparators
PIC18F66J65	64	96	2 UART with LIN protocol
PIC18F96J60	100	64	2 SPI, 2 PC™
PIC18F86J60	80	64	Industrial Temperature -40° to +85°C
PIC18F66J60	64	64	
ENC28J60	28	8K RAM	MAC, PHY, SPI Interface

Или же попробуйте...



...добавьте опцию Ethernet в состав любого приложения с использованием автономного Ethernet контроллера ENC28J60 от Microchip с полной поддержкой ПО для PIC18, PIC24 and dsPIC® DSCs

Посетите сайт [www.microchip.com/ethernet](http://www.microchip.com/ethernet) прямо сейчас!

