

Микросхемы для прецизионного измерения времени

Время — одно из основных физических понятий. Оно прямо или косвенно участвует в представлении многих других параметров, таких, например, как мощность и скорость, поэтому приборы для временных измерений используются в различных областях техники. Порой людям, далеким от технических проблем, трудно даже предположить, что измерение той или иной величины, выявление того или иного факта основано на точном измерении времени. Так, например, в обычных тестерах-мультиметрах измерение емкости часто выполняется как измерение времени заряда конденсатора.

Леонид Вихарев

vleo@atel.ru

Перечислим некоторые области техники, где используется временное измерение как косвенное измерение искомого параметра:

- Приборы измерения расхода жидкостей и газов (расходомеры). Принцип действия основан на вычислении разности времени прохождения ультразвукового сигнала в направлении течения жидкости и против течения. (Эта разность определяет скорость потока, а определив скорость течения жидкости и зная диаметр трубы или канала, можно вычислить объем протекающей жидкости.) Метод применим там, где нежелательно или невозможно использование других способов: при работе с горючими и агрессивными жидкостями, при учете объемов перекачки жидкостей через открытые каналы с известной площадью поперечного сечения и т. п.
- Ультразвуковые дефектоскопы — приборы, предназначенные для обнаружения нарушений в структуре материала, выявления трещин, сколов, пустот, других неоднородностей. Принцип действия этой очень широкой гаммы приборов основан на измерении времени распространения прямого и отраженного сигнала через исследуемый образец и вычислении места, размеров и характера отклонений.
- Приборы, измеряющие плотность материала. Принцип работы основан на том факте, что звуковые колебания имеют разную скорость распространения через материалы разной плотности. В более плотных материалах они распространяются быстрее. Скорости распространения ультразвука для многих базовых сред известны, поэтому отклонения плотности могут быть обнаружены. Существуют также приборы, предназначенные для поиска неоднородностей в глубине почвы, которые могут применяться для поиска и обследования кабелей, труб и других предметов.
- Как разновидность предыдущих приборов и как самостоятельный класс можно упомянуть толщинометры — устройства, позволяющие измерить толщину покрытия, нанесенного на исследуемый образец (например, толщину пленки). В основе

лежит то же явление: в разных материалах — разная скорость распространения ультразвука. Приборы данного типа могут применяться в производстве полупроводников в электронной промышленности, в приборостроении, в научных исследованиях и дефектоскопии.

- Приборы для измерения расстояний (длины, дистанции). Принцип действия основан на измерении времени прохождения излучаемого сигнала от излучателя до объекта и обратно. (Скорость распространения сигнала в данной среде известна.) Приборы могут применяться в самых различных сферах — от военных целей до строительства и геодезии.
- Научно-исследовательские измерительные системы в ядерной физике и физике высоких энергий, предназначенные для экспериментов, основанных на время-пролетной методике.

Сегодня приборами, позволяющими получать разрешение в единицы наносекунд (10^{-9} с) никого, пожалуй, уже не удивишь. Высокая точность измерения времени позволяет получать точные данные о других параметрах исследуемого процесса. А необходимость в таких измерениях есть, и требования к их качеству все возрастают и возрастают.

Как достигается столь высокая точность?

Известно несколько принципиально разных методов измерения времени. Каждый из них имеет свой предел точности, свои достоинства и свои недостатки. Оставим в покое обычные механические часы, поскольку их точность известна каждому современному человеку, и сразу перейдем к электронным приборам.

Существует особая группа приборов, называемых TDC (Time Digital Converter). Иногда встречается сокращение ПВК, означающее «преобразователь “время — код”». Эти устройства выполняют высокоточное измерение времени с представлением результата в цифровом виде.

Простейшим и вместе с тем самым надежным, а потому и самым распространенным способом из-

мерения является численно-импульсный метод. Некоторый схемный узел, например кварцевый генератор, формирует непрерывную череду импульсов, период которых известен. Если в момент начала процесса измерения открыть цепь прохождения сигналов к счетчику, а в момент его завершения закрыть цепь, то на счетчике появится результат, представленный числом импульсов. Остается только умножить это число на длительность одного периода тактового сигнала и получить результат, выраженный в единицах времени. Здесь в принципе все понятно и просто, но вот только современные счетчики, выполненные на интегральных микросхемах малой и средней степени интеграции, не умеют работать на частотах выше 100 МГц. Да и на этой частоте, которая позволяет получить точность в 10 нс, работать совсем не просто! Если применять синхронные счетчики, которые удобны в работе, то достичь 100 МГц не удастся, так как время формирования импульса переноса в многоразрядном (больше 8 разрядов) счетчике может превышать период тактовой частоты. Следовательно, к началу очередного тактового импульса процесс счета еще не будет завершен, вследствие чего будут возможны ошибки счета.

Асинхронные схемы всегда работают быстрее, но здесь возникает другая проблема: когда и как переписать состояние счетчика времени в память, если процесс переноса импульса переполнения через все триггеры счетчика длится больше периода тактовой частоты? Если ожидается только одно событие, только один стоповый сигнал, то это еще не очень сложная ситуация: дождался окончания переходных процессов и переписали счетчик в память. А что делать, если частота появления событий такова, что следующий стоповый сигнал приходит с минимальным временем вслед за предыдущим? (Представим ситуацию, когда к финишу приближаются одновременно множество бегунов, стартовавших одновременно. Каждый результат нужно успеть записать, но времени на это не хватает. Нечто подобное происходит, например, при изучении поведения ядерных частиц. Здесь их число может достигать нескольких тысяч или даже десятков тысяч и большая часть из них приходит к детекторам (к финишу) с минимальным разрывом по времени.)

Можно усложнить прибор и применить комбинированный подход, выполнив часть

схемы на синхронных элементах, а первые несколько разрядов сделать в виде асинхронного счетчика. Скорость счета можно будет немного увеличить, следовательно, точность измерения времени чуть увеличится. Частично вопрос будет решен, но ведь есть еще множество других проблем: рассеиваемая мощность, как правило, растет вместе с частотой и на больших частотах может стать недопустимо большой; по плате могут распространяться высокочастотные помехи и вызывать сбои в соседних элементах схемы, длина проводников в высокочастотных схемах должна быть минимальной, но выполнить это требование бывает довольно трудно. Кроме того, простота метода накладывает ограничения на точность измерения: померить временной интервал можно лишь с точностью до кванта времени, определяемого частотой задающего генератора. Есть еще много проблем, связанных с этим способом измерения, но все-таки, этот метод наиболее прост и наиболее распространен. Заметим лишь напоследок, что точность измерения удастся повысить в 2–3 раза, если использовать чипы PLD, работающие на частотах до 300 МГц (см. описания микросхем фирм Altera, Xilinx, Lalice и др.). Их применение позволит снизить стоимость измерителя, уменьшить уровень шумов, повысить надежность прибора и сократить размеры печатной платы. Но всех проблем все-таки не решит.

Значительно более высокой точности (до нескольких пикосекунд) удастся достичь путем применения промежуточного преобразования. В TDC, выполненных с применением такого метода, время сначала преобразуется в некую аналоговую величину, например в амплитуду напряжения, в ток или заряд конденсатора, а затем эта величина с помощью АЦП преобразуется в цифровой код. Можно, например, напомнить о методе измерения времени, обратном по отношению к способу измерения емкости конденсатора в привычных всем тестерах. Здесь, при неизменных параметрах цепи, используется пропорциональная зависимость: чем больше время зарядки конденсатора, тем больший заряд на нем успеет накопиться. Следовательно, измеряя заряд, можно вычислить временной интервал, в течение которого протекал этот процесс. А иногда более удобен иной прием: с одной постоянной времени конденсатор заряжают, а с другой его разряжают (разряжают более медленно), изме-

ряя время этого процесса. Такими способами удается достичь очень хорошей точности, но расплачиваться за нее приходится сложностью и дороговизной схемы, трудностью ее настройки и калибровки, температурной и иной нестабильностью результатов. Из-за большого мертвого времени (времени, в течение которого TDC не может выполнять новых измерений, так как занят преобразованием, формированием и записью результата или иными действиями), приборы этого вида могут применяться далеко не во всех областях. Есть и другие неприятные свойства, присущие TDC данного типа, но останавливаться на них мы не будем.

Существуют схемы TDC комбинированного типа, совмещающие в себе достоинства двух приведенных методов. Грубое измерение здесь выполняется цифровой схемой, а аналоговые узлы позволяют уточнить моменты начала и окончания временного интервала. Но эти приборы собирают в себе недостатки, свойственные обоим методам — температурную нестабильность, сложность настройки, трудность сопряжения двух шкал и т. д.

Традиционные цифровые методы все же проще и предпочтительнее. Схемы поныне, стабильность результатов выше, повторяемость приборов с одинаковыми параметрами высока, но вот точность... Точность маловата, а повышать частоту счета невозможно.

Известен прием, позволяющий обойтись без сложных и дорогих аналоговых схем и достичь при этом удовлетворительной точности в единицы и даже в доли наносекунды, то есть перейти через ограничение точности в период частоты генератора, присущее численно-импульсному методу.

В дополнение к основному счетчику времени вводится так называемый интерполятор — устройство, позволяющее уточнить результат измерения времени. Принцип действия поясняется на рис. 1.

Импульсы тактовой частоты поступают на вход данных D регистра интерполятора. Эти же сигналы пропускаются через цепочку элементов задержки, с выходов которых они попадают на другие D-входы того же регистра. Таким образом, на них устанавливаются сдвинутые во времени импульсы тактовой частоты, которой тактируется основной счетчик времени. Появление импульса «Стоп» защелкнет данные в регистр. При этом на некоторых выходах будут присутствовать единицы,

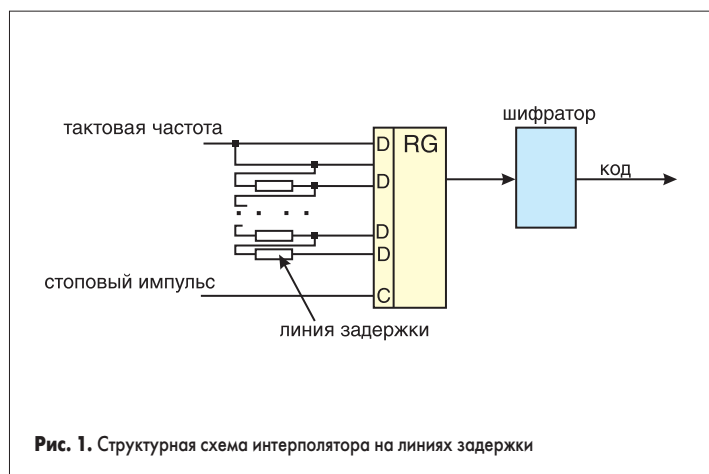


Рис. 1. Структурная схема интерполятора на линиях задержки

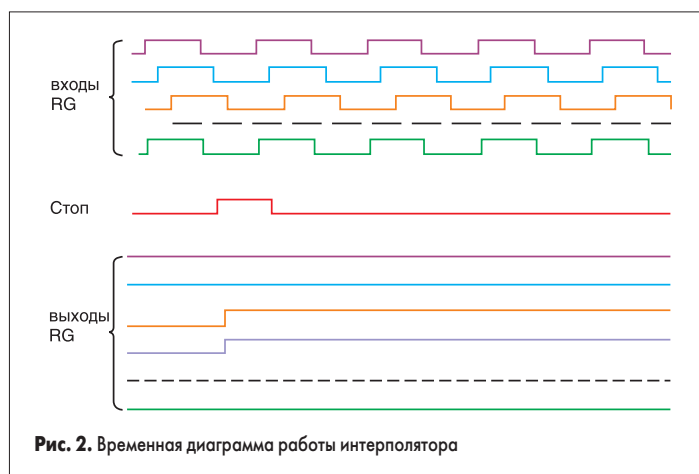


Рис. 2. Временная диаграмма работы интерполятора

а на других — нули. С выходов регистра сигналы поступают на входы шифратора, например SN74ASL148 (приоритетный шифратор). В результате получается нормальный двоичный код, несущий уточняющую информацию о моменте прихода импульса «Стоп». Точность определяется числом элементов задержки и ее длительностью. На какое число интервалов мы раздробим период тактовой частоты, какова будет продолжительность одного интервала, такова и точность.

Способ этот хорошо известен и часто применяется в измерениях, где ошибка не грозит катастрофическими последствиями. А она вполне возможна, так как изготовить точные линии задержки в доли наносекунды — дело трудное. Повторяемость элементов плохая. Но много хуже то, что параметры «плывут» с изменением температуры. Меняется длительность фронтов, изменяются сопротивления и токи, меняются задержки на микросхемах.

Поскольку проблема эта известна давно и поиск решения постоянно продолжался, то неминуемо должен был быть найден какой-то выход. И это произошло.

Вниманию читателя предлагаются два TDC в интегральном исполнении.

Два варианта исполнения, два различных по характеристикам и стоимости вида микросхем одного функционального назначения, имеющие следующие характеристики:

1 F1

- 1.1 Число измерительных каналов (общий старт) 4 или 8
- 1.2 Максимальное разрешение каждого канала (точность измерения), пс . .60 или 120
- 1.3 Возможность многостоповых измерений с минимальным интервалом между стопами в одном канале, нс 20
- 1.4 Минимальный интервал между стопами в разных каналах, нс 0
- 1.5 Измеряемый временной диапазон при нормальном разрешении . .5 нс...7,8 мкс
- 1.6 Измеряемый временной диапазон при высоком разрешении5 нс...3,9 мкс
- 1.7 Максимальное число событий на канал . .7
- 1.8 Диапазон частот генератора, МГц . .1–40
- 1.9 Наличие входа «Запрет» в каждом канале
- 1.10 Возможность программной подстройки разрешения
- 1.11 Программный выбор активного фронта (L-H, H-L) для каждого канала
- 1.12 При правильном выборе скорости считывания данных число «стопов» неограничено
- 1.13 Индустриальный диапазон температур(-40...+85 °C)
- 1.14 Широкий диапазон напряжений питания (2,7–5,5 В)
- 1.15 Конструктивное исполнение . .160 PQFP

2 GPI

- 2.1 Число измерительных каналов (общий старт)1 или 2
- 2.2 Максимальное разрешение каждого канала (точность измерения), пс .125 или 250
- 2.3 Возможность многостоповых измерений с минимальным интервалом между стопами в одном канале, нс 15
- 2.4 Минимальный интервал между стопами в разных каналах, нс 0

- 2.5 Измеряемый временной диапазон при нормальном разрешении . . .3 нс...7,6 мкс
 - 2.6 Измеряемый временной диапазон с предварительным счетчиком (1 канал) 60 нс...200 мс
 - 2.7 Максимальное число событий на канал . .4
 - 2.8 Диапазон частот генератора, МГц . .0,5–35
 - 2.9 Наличие входа «Запрет» в каждом канале
 - 2.10 Возможность программной подстройки разрешения
 - 2.11 Программный выбор активного фронта (L-H, H-L) для каждого канала
 - 2.12 При правильном выборе скорости считывания данных число «стопов» не ограничено
 - 2.13 Возможность перезапуска (рестарт)
 - 2.14 Встроенное АЛУ позволяет калибровать результат и перемножать его с 24-битовым целым
 - 2.15 4 специальных входа для измерения величин R, L или C
 - 2.16 Индустриальный диапазон температур(-40...+85 °C)
 - 2.17 Широкий диапазон напряжений питания(2,7–5,5 В)
 - 2.18 Конструктивное исполнение . . .44-TQFP
- Высокое разрешение микросхем достигается путем ввода в схему интерполятора на линиях задержки, который выполнен в виде матрицы полупроводниковых элементов. Поскольку параметры элементов задержки, несмотря на точную лазерную подгонку, нестабильны и зависят от колебаний температуры и напряжения питания, то вся сложность состояла в стабилизации параметров, во введении в схему специального узла, предназначенного для постоянного контроля их длительности и фазы. Этой цели служит блок фазовой автоподстройки, который контролирует отклонение ширины канала от калиброванного значения. Внешняя схема ФАПЧ требует лишь небольшого количества простейших компонентов.
- Эти микросхемы обладают не только прекрасными характеристиками по временному разрешению, но и имеют несколько других привлекательных особенностей:
- интеграция в одном корпусе дополнительных узлов, упрощающих обработку данных;
 - сравнительно низкое потребление;
 - малые габариты;
 - широкий диапазон питающих напряжений;
 - индустриальный диапазон температур.
- Они универсальны по назначению и поэтому могут применяться не только в приборах и автоматизированных системах управления, ориентированных на промышленные нужды, но и в научных исследованиях в ядерной физике и физике высоких энергий, а также в геодезии, где с помощью лазерных тахеометров измеряются расстояния в несколько километров с точностью в несколько миллиметров. (В каждом заметном населенном пункте есть бюро технической инвентаризации, ведающее архивами по недвижимости. Специалистам этих предприятий приходится делать сотни замеров ежедневно, и портативные тахеометры существенно облегчают им жизнь, позволяя выполнять измерения мгновенно с точностью

до миллиметра. Прибор имеет примерно такие же габариты, как электронный калькулятор, а его средняя цена в России около 550 долл.)

F1 имеет более сложную структуру, чем его аналог GP1. В этой микросхеме предусмотрен дополнительный вход, позволяющий с помощью внешнего ЦАП устанавливать специфичный уровень порога срабатывания триггеров стоповых каналов. Управление режимами работы этого TDC производится посредством записи и чтения 16 регистров (по 16 разрядов). F1 разработан с раздельными напряжениями питания буферов ввода-вывода и внутреннего ядра. Таким приемом можно обеспечить вводы-выводы кристалла постоянным напряжением (5 В), но при этом изменить и стабилизировать напряжение питания ядра.

Большинство из приведенных характеристик понятны и не требуют особых комментариев, однако некоторые из них все-таки требуется расшифровать.

Калибровка

Перед выполнением измерений через калибровочное измерение обязательно производится калибровка каналов. Полученная величина сохраняется в специальном регистре. Она остается стабильной благодаря постоянному контролю температуры и стабилизации напряжения питания ядра, которое регулируется при помощи ФАПЧ.

Возможность калибровки разрешения — полезное свойство, позволяющее корректировать величину дифференциальной нелинейности. Во многих задачах эта величина не имеет решающего значения, но иногда она важна.

Как правило, дифференциальная нелинейность в счетных устройствах связана с периодом тактовой частоты и кратна 2. Это означает, что «узкий» младший бит всегда следует за «широким» или наоборот. Усредняя, комбинируя два младших бита, можно улучшить дифференциальную нелинейность прибора. Получается величина, равная половине сумм двух некалиброванных результатов.

В обеих микросхемах TDC калибровка каналов выполняется посредством подачи соответствующей команды или автоматически при старт-стопных измерениях. В процессе калибровки измеряется величина одного и двух калибрационных тактовых периодов, и полученный результат сохраняется в специальном регистре. После завершения измерения в TDC в полученный результат вносится поправка.

Измерения в режиме с высоким разрешением

Устройство микросхем позволяет комбинировать два канала в пару. Этим путем решающая способность улучшается вдвое. Режим с высоким разрешением устанавливается путем записи данных в регистр выбора режима. Число пригодных для использования каналов сокращается, а разрешающая способность в канале увеличивается. В режиме с высоким разрешением измеряемый временной диапазон сокращается наполовину.

Выполнение измерений на больших диапазонах времени

В таких случаях необходимо вводить в работу встроенный предварительный делитель частоты (предварительный счетчик) для того, чтобы перенести на него выполнение грубого измерения диапазона. С момента активизации измерительного процесса выполняется измерение интервала между импульсом «Старт» и следующим восходящим фронтом калибровочного тактового сигнала (FC1), после чего TDC типа GP1 приступает к подсчету импульсов переполнения предварительного счетчика. Стоповый импульс перезапускает (рестартует) процесс и происходит измерение интервала до следующего калибрационного тактового сигнала (FC2). (Как в первом, так и во втором случае это делается для калибровки узлов микросхемы.) GP1 способен работать с 16-битовым предварительным счетчиком. При этом возможно измерение больших (до 200 мс) интервалов без снижения разрешающей способности TDC (см. рис. 3). Результат вычисляется по формуле

$$\text{time} = \text{period} \times [\text{cc} + (\text{FC1} - \text{FC2}) / (\text{Cal2} - \text{Cal1})]$$

где cc — разрядность предварительного счетчика.

При работе на больших временных интервалах в GP1 используется только один измерительный канал. Максимальный измеряемый интервал определяется исходя из соотношения $T_{\text{ref}} \times \text{SEL_CLK_TDC} \times 216$, причем ($2 \times T_{\text{ref}} < 7,6 \text{ мкс}$).

Подстройка разрешающей способности

Этот режим является очень интересной особенностью. Разрешающая способность TDC задается установкой регистра. Она будет определяться кварцевым генератором, будет стабильна и одинакова для всех каналов, независима от влияния температуры или колебаний напряжения питания. Разрешающая способность прямо пропорциональна значениям регистра и внешней эталонной частоте. **Диапазон регулировки разрешающей способности для F1 может достигать значений от -50 до +10% от нормальной разрешающей способности при питании 5 В и температуре 25 °С. Диапазон регулировки разрешения для GP1 составляет -30... +8%.**

Встроенный блок фазовой автоподстройки контролирует отклонение ширины канала от калиброванного значения и воздействует на схему с целью удержания заданного разрешения.

Измерение R, L и C

Микросхема GP1 имеет дополнительные входы, позволяющие измерять величину R, L и C. Специальный узел способен выполнять эти измерения при использовании всего лишь нескольких дополнительных элементов. Если же контролируемый резистор меняет свой номинал с изменением температуры, то это его

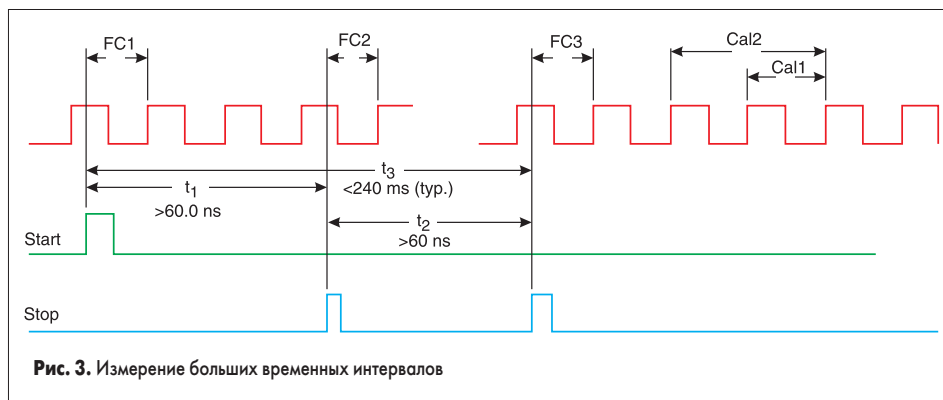


Рис. 3. Измерение больших временных интервалов

свойство может быть использовано для измерения температуры. Подобного рода взаимосвязи могут быть установлены и для других элементов (L и C) и использованы для различных измерений.

Основное и вспомогательное АЛУ в GP1

GP1 имеет два блока АЛУ разного назначения: вспомогательное АЛУ преобразует исходную измерительную единицу в свой собственный формат, в беззнаковое целое, с тем чтобы стали возможны дальнейшие арифметические вычисления. Блок выбора данных подключается к входу этого АЛУ, назначением которого является выбор одной исходной величины из регистра. Вспомогательное АЛУ не нуждается в тактовой частоте.

Основное АЛУ имеет несколько функций: коррекционный сдвиг и вычитание некалиброванной величины; калибровка измеренной величины при помощи калибрующих поправок; перемножение калиброванных величин с 24-битовым целым. Все величины передаются через основное АЛУ. В соответствии с выбранным режимом работы они будут либо просто пропускаться на выход, либо пересчитываться с учетом коррекционной поправки или умножаться с коэффициентом меньшим, чем 2.

Основное АЛУ имеет свой собственный генератор, который работает независимо от внешней тактовой частоты.

Результаты обработки измерений АЛУ помещает на хранение в восьми 16-разрядных регистрах.

Микроконтроллерный интерфейс GP1

Этот TDC имеет 8-битный интерфейс стандартного микроконтроллера. Все данные записываются и считываются при помощи следующих сигналов: WRN, RDN, CSN и ALE. Адресация выполняется при помощи 4-разрядной адресной шины. Архитектура интерфейса реализована по известным принципам: шина данных и шина адреса имеют разные ножки ввода-вывода, которые, при желании, могут быть объединены. Установка «1» на линии ALE устанавливает внутреннюю защелку адреса в «прозрачное» состояние, позволяя, таким образом, принимать адрес непосредственно с шины. Адресная шина однонаправленная, шина данных — двунаправленная.

Микросхемы TDC — товар экзотический, до сей поры практически не встречавшийся на рынке электронных компонентов. Спрос же на приборы, основанные на точных временных измерениях, был, есть и повышается с каждым днем. Применение этих уникальных по характеристикам микросхем — это реальный шанс достичь рекордных точностей, встать на один уровень с самыми известными производителями приборов аналогичного назначения, произвести товар действительно мирового класса.

Возможность измерения больших интервалов времени с рекордной точностью, высокая стабильность результатов, малая потребляемая мощность, а также другие превосходные характеристики, которыми обладают эти микросхемы, позволяют создавать приборы мирового класса, не уступающие по своим качествам лучшим зарубежным аналогам.

Дополнительную техническую информацию по этим микросхемам вы можете получить на сайте компании «Атлас Электроник Групп» [http:// ww.w.atel.ru](http://ww.w.atel.ru).