

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

Д.Е. Беркаев, Е.В. Быков,
В.Р. Козак, С.В. Тарарышкин

ИЗМЕРИТЕЛЬ ВРЕМЕННЫХ
ИНТЕРВАЛОВ

ИЯФ 2011-6

НОВОСИБИРСК
2011

Измеритель временных интервалов

Д.Е. Беркаев, Е.В. Быков, В.Р. Козак, С.В. Тарарышкин

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

В препринте описан измеритель временных интервалов (ИВИ-1211). Блок выполнен в формате евромеханики 3U, имеет CAN-интерфейс и содержит в своем составе микроконтроллер TDC-GP2, который позволяет с разрешением ~ 65 пикосекунд измерять временные интервалы между стартовым и стоповыми импульсами.

1. Введение

В системах управления ускорительно-накопительными комплексами ИЯФ используются устройства, позволяющие измерять времена масштаба единиц/десятков микросекунд между стартовыми и стоповыми импульсами с точностью 10^{-4} . Необходимость в таких измерениях возникает при проверке момента срабатывания импульсных элементов ускорителей – преинфлекторов, инфлекторов, дефлекторов. Для решения этой задачи используются измерители временных интервалов (ИВИ), разработанные в Институте и выполненные в стандарте КАМАК [3]. В последнее время по различным причинам происходит постепенный отказ от модульного стандарта КАМАК и переход на новые, более современные стандарты. В рамках этих работ разработан новый блок ИВИ, выполненный в формате евромеханики 3U на новой, более современной, элементной базе и имеющий в качестве связного интерфейса CAN-интерфейс.

2. Основные характеристики ИВИ1211

Блок имеет два режима работы:

1. Один «старт», два «стопа», минимальный временной интервал между стартовым и стоповым импульсами – 3.5 нс, максимальный временной интервал между стартовым и стоповым импульсами – 1300 нс, разрешение ~65 пикосекунд, максимальная погрешность измерения ~600 пикосекунд.
2. Один «старт», один «стоп», минимальный временной интервал между стартовым и стоповым импульсами – 360 нс, максимальный временной интервал между стартовым и стоповым импульсами – 10900 мкс, разрешение – ~65 пикосекунд, максимальная погрешность измерения – 1100 пикосекунд.

Основные характеристики блока ИВИ1211 определяются микросхемой микроконтроллера **TDC-GP2** производства германской фирмы ACAM [2]. Высокая разрешающая способность в сочетании с большим динамическим диапазоном, а также, высокая температурная стабильность и низкая стоимость производства делает подобный микроконтроллер привлекательным в промышленном использовании.

Микросхема TDC-GP2 обладает следующими характеристиками:

- 2 измерительных канала, с временным разрешением на каждом ~65 пикосекунд
- До 4-стоповых импульсов на канал, с минимальным временем между ближайшими импульсами – 15 наносекунд.
- 2 режима измерений: (№1) с апертурой 3,5 нс – 1,3 мкс и (№2) с апертурой 360 нс – 10,9 мс (эти цифры приведены для случая, когда используется 6 мегагерцовый опорный кварцевый резонатор).
- SPI интерфейс для связи с процессором.

В режиме №1 для измерения временных интервалов используется линия задержки, состоящая из 26224 элементов, стоповые импульсы фиксируют номера задерживающих элементов при прохождении стартового сигнала по линии задержки.

В режиме №2 измерение временного интервала производится суммированием трех времен:

- времени от стартового импульса до начала меандра кварцевого резонатора;
- времени целого количества периодов кварцевого резонатора, укладывающихся в интервал;
- времени от конца меандра кварцевого резонатора до стопового импульса.

Подробно реализация режимов приведена в описании работы микроконтроллера TDC-GP2.

3. Устройство микросхемы TDC-GP2

3.1. Блок схема микроконтроллера TDC-GP2

На рисунке 1 изображена блок схема микроконтроллера TDC-GP2.

Для измерения временных интервалов между импульсами предназначен блок **TDC**. Внутри этого блока для обоих стоповых каналов имеется по шесть регистров, четыре из которых предназначены для хранения предварительных некалиброванных данных и два – для калибровочных значений. Калибровочные значения получаются путем измерения известных временных интервалов. В данном случае это измерение одного и двух периодов опорного генератора.

Для арифметических операций предназначен блок **ALU**, который содержит еще четыре регистра для хранения данных, пересчитанных уже с учетом калибровочных значений.

Управление операциями **ALU** происходит через конфигурационные регистры (**Config Register**). Кроме этого, через конфигурационные регистры задается режим и диапазоны измерения временного интервала.

Связь микроконтроллера TDC-GP2 с внешними устройствами осуществляется через SPI интерфейс.

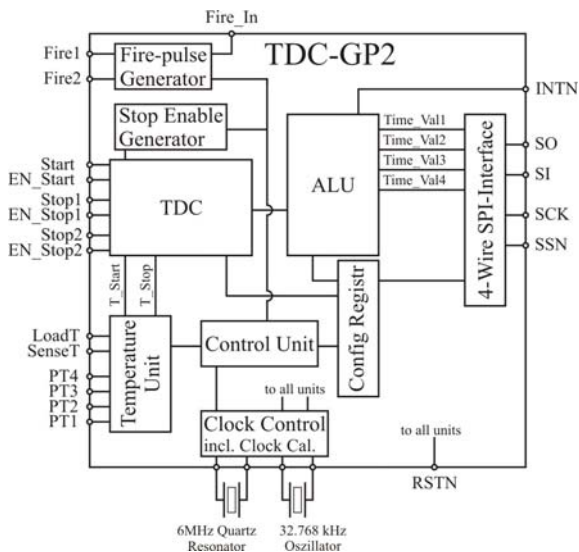


Рис. 1. Блок схема микроконтроллера TDC-GP2.

3.2. Режимы и диапазоны измерений микроконтроллера TDC-GP2

Режим №1

В режиме №1 используется линия задержки, состоящая из 26224 элементов (рис. 2). На каждом элементе сигнал задерживается на $\sim(63 \div 65)$ пикосекунд и, соответственно, максимальное время задержки при прохождении сигнала через все элементы составляет $\sim 1,8$ микросекунды. Стоповые импульсы фиксируют момент прохождения стартового сигнала по линии задержки.

Задержка сигнала на элементах зависит от температуры и питания и может меняться в пределах единиц пикосекунд.

Для того, чтобы исключить влияние температуры и питания на результат, в микроконтроллере заложена возможность калибровки. Калибровка заключается в том, что результат измерения временного интервала делится на калибровочное значение, а калибровочное значение

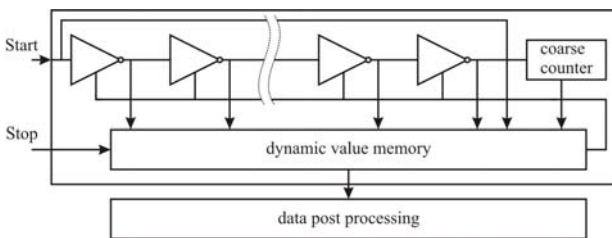


Рис. 2. Элементы задержки сигнала.

получается путем измерения известного временного интервала, в данном случае, периода опорного генератора.

Для повышения точности измерения калибровочного значения делается измерение одного (*Cal1*) и двух (*Cal2*) периодов опорного генератора (Рис. 3), и после измерения берется их разница *Cal2* – *Cal1*. Данный способ позволяет исключить «мертвое» время при старте и стопе измерения калибровочного значения (т.е. старт измерения калибровочного значения может начаться не строго по фронту опорного генератора).

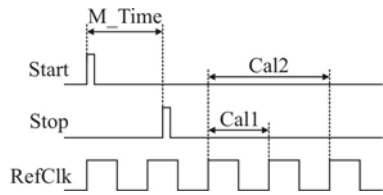


Рис. 3. Измерение в режиме №1.

Сигналом окончания измерения является логический ноль на ножке INTN (Рис. 4). После этого командами через SPI выполняется запуск ALU для вычисления калиброванных значений. ALU вычисляет следующий результат:

$$R = \frac{M_Time}{Cal2 - Cal1} \quad (1)$$

Где *R*, по сути, является количеством периодов опорного генератора *RefClk*, поместившихся во временной интервал *M_Time*. Результаты *R* сохраняются в регистрах ALU, которые можно запросить по SPI интерфейсу микроконтроллера. Для получения итогового времени, нужно результат *R* умножить на период опорного генератора *RefClk* :

$$Time = T_{RefClk} \times R \quad (2)$$

Примечание: микросхема TDC-GP2 имеет внутренний делитель частоты, который может делить частоту внешнего кварца на 1, на 2 и на 4. Коэффициент деления задается через конфигурационные регистры (**Config Register**) (рис. 1). В данном блоке ИВИ для режима №1 этот коэффициент фиксирован и равен 4. Поэтому период *RefClk* в четыре раза больше, чем период кварцевого резонатора. Так как используется 6-мегагерцовый кварцевый резонатор, то *RefClk* равно ~666 нс.

Режим №2

В режиме №2 для измерения временного интервала кроме линии задержки используется еще и 14-разрядный двоичный счетчик. Счетчик отсчитывает кол-во целых периодов *Cc* (Рис. 4) опорного генератора, поместившихся во временном интервале между стартовым и стоповым импульсами. Но таким способом можно измерять интервал с точностью до периода опорного генератора *RefClk*. Поэтому, что бы повысить точность измерения, параллельно ведется измерение с помощью линии задержки, которая измеряет интервалы от стартового импульса до первого переднего

фронта опорного генератора ($Fc1$) и от стопового импульса до первого переднего фронта генератора ($Fc2$).

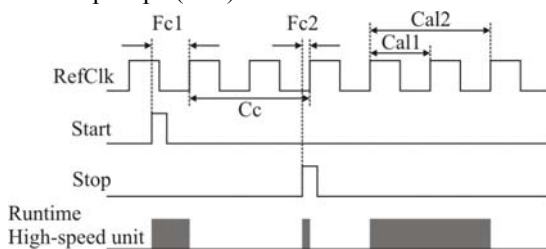


Рис. 4. Измерение в режиме №2.

После измерений временных интервалов ALU выполняет вычисления следующего типа:

$$R = Cc + \frac{Fc1 - Fc2}{Cal2 - Cal1}. \quad (3)$$

Здесь R , также, является количеством периодов опорного генератора $RefClk$, поместившихся во временной интервал от старта до стопа. Соответственно, пересчет в реальное время также выполняется по формуле (2).

4. Описание ИВИ1211

4.1. Блок схема измерителя

При разработке устройства особое внимание было уделено уменьшению стоимости производства и эксплуатации блока, а также увеличению надежности за счет применения новой элементной базы.

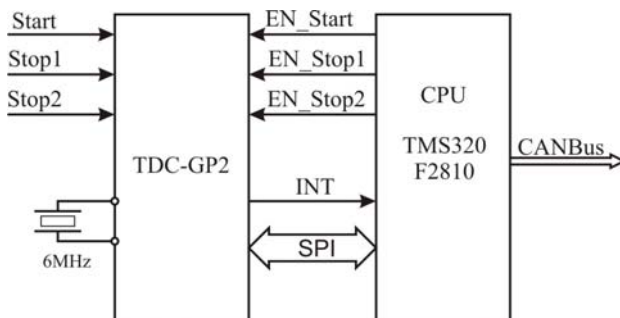


Рис. 5. Блок схема измерителя.

В качестве прибора, удовлетворяющего требованиям на измерение времени между импульсами, был выбран микроконтроллер TDC-GP2

производства германской фирмы ACAM [2]. Описание этой микросхемы приведено выше.

Блок схема измерителя временных интервалов изображена на рисунке 5.

В качестве интеллектуальной части измерителя используется процессор TMS320F2810 фирмы Texas Instruments [1]. Данный процессор, помимо прочего, имеет встроенный SPI интерфейс, который необходим для связи с микроконтроллером TDC-GP2, и CAN интерфейс для связи с управляющим компьютером.

По окончании цикла измерения временных интервалов микроконтроллер выставляет внешний сигнал прерывания INT. По этому сигналу программа процессора в автоматическом режиме забирает данные из памяти микроконтроллера и сохраняет их в памяти процессора. Далее, в зависимости от того какой выбран способ передачи данных, данные либо автоматически переправляются пользователю по CANBus, либо забираются из памяти процессора по запросу со стороны пользователя.

При включении питания программа процессора через SPI интерфейс задает первоначальные установки микроконтроллера (режим измерения, количество разрешенных стоповых импульсов), после этого процессор отправляет сообщение по CANBus со своими атрибутами (свой адрес, тип устройства, версия устройства, версия программы и причина высылки сообщения).

4.2. Описание схемы входных цепей

На рисунках 6 и 7 изображены блок схемы входных цепей для стартового и стопового импульсов соответственно.

Для обеспечения развязки на входных цепях используется импульсный трансформатор ТИМ145В.

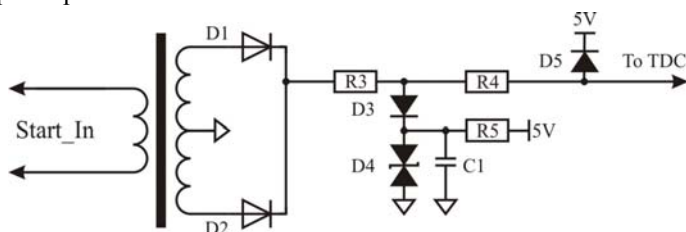


Рис. 6. Блок схема входной цепи для стартового импульса.

Входная цепь для стартового импульса имеет высокоомный вход. Это связано с тем, что старт нескольких ИВИ может осуществляться общим стартовым импульсом. Поэтому пользователь должен позаботиться о том, чтобы обеспечить внешнюю нагрузку 50 Ом.

Стоповый импульс (рис. 7) подается на первичную обмотку трансформатора через делитель сопротивлений (R6...R14). Эти

сопротивления включены по схеме R-2R таким образом, что входной импульс «воспринимает» эту цепочку как нагрузку 50 Ом. С помощью перемычек на этом делителе задается коэффициент понижения амплитуды сигнала, который может принимать значения 1:1, 2:1, 4:1, 8:1 и 16:1.

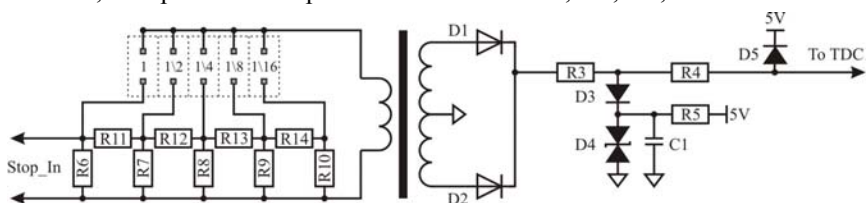


Рис. 7. Блок схема входной цепи для стопового импульса.

На выходе трансформатора, в обеих цепях, используется выпрямитель на двух диодах, который позволяет быть независимым от полярности входного импульса.

Так как импульс после выпрямителя может иметь еще достаточно большое напряжение, то после выпрямителя реализована схема стабилизации напряжения импульса. Стабилитрон D4 дает напряжение стабилизации $\sim 6,5$ вольт и плюс $\sim 0,7 \div 1$ вольт падение напряжения на диоде D3. Таким образом, в узле R3, D3, R4 импульс будет не выше $\sim 7,5 \div 8$ вольт. Дальнейшее понижение амплитуды до $\sim 5,5$ вольт произойдет на диоде D5.

5. Протокол ИВИ1211

Для обеспечения связи по CANbus использовался шлюз **CAN-Ethernet**, разработанный в ИЯФ СО РАН. Подробное описание этого шлюза лежит по адресу: <http://www.inp.nsk.su/~mamkin/>. Там же находится монитор **CanGwMonitor.exe**, с помощью которого осуществлялась отладка протокольной части ИВИ.

Для обмена данными с линией CANBUS применяется стандартный формат (CAN Sprecification 1.2), использующий короткий идентификатор (длина идентификатора 11 бит). В таблице 1 ниже показано распределение битов идентификатора.

Таблица 1. Распределение битов идентификатора.

Биты идентификатора	ID10...ID08	ID07...ID02	ID01...ID00
Поле	Поле 1	Поле 2	Поле 3
Назначение	Приоритет	Адрес	Резерв

Комментарии к адресации:

Поле 1 – поле приоритета.

Код 5 – безадресная посылка (поле 2 игнорируется).

Код 6 – нормальная (адресная посылка).

Код 7 – ответная посылка (ответ на адресную).

Код 0 не допускается, остальные комбинации не используются (зарезервированы под возможные расширения).

Поле 2 – поле физического адреса устройства назначения (его значение устанавливается переключками на плате).

Поле 3 – может быть использовано для адресации внутри устройства или как расширение физического адреса. Пользователь должен посылать эти биты нулевыми. Блок может выдать любую комбинацию этих бит.

Устройство, получая адресный пакет, интерпретирует информацию по ее содержанию. В том случае, если пакет требует ответного пакета информации, она отправляется с идентификатором адресного типа. Безадресные пакеты предназначены для бродкастных или мультикастных команд, должны одновременно приниматься и исполняться всеми устройствами, которым это положено.

При приеме данных устройство интерпретирует их следующим образом: первый байт (байт 0) является командой, остальные байты являются дополнительной информацией.

Ниже приводится список команд (в 16-ричном виде).

00 – установка режима ИВИ.

01 – задать кол-во стоповых импульсов.

02 – задать временной диапазон (только для режима №2).

03 – установление способа передачи данных.

04 – старт единичного измерения.

05 – команда для запроса данных.

FE – запрос статуса.

FF – запрос атрибутов устройства.

Ответ блока на любые команды, кроме команды **FF**, имеет формат пакета из 6 байтов:

Command	Mode	NumSt	Range	Behavior	Error code
---------	------	-------	-------	----------	------------

Command – код команды (8 бит).

00 – задан режим **Mode**.

01 – задано кол-во стоповых импульсов **NumSt**.

02 – задан временной диапазон **Range**.

03 – установлен способ передачи данных (**Behavior**).

04 – было произведено единичное измерение

FE – был запрос статуса.

FF – был запрос атрибутов.

Mode – установленный режим измерителя (8 бит).

01 – режим №1.

02 – режим №2.

NumSt – установленное количество стоповых импульсов.

Данный байт разбит на два поля по 4 бита:

N_St2	N_St1
--------------	--------------

В поле **N_St1** указано количество стоповых импульсов на входе **Stop1** (рис. 5), которые фиксируются измерителем, в поле **N_St2** – количество стоповых импульсов на входе **Stop2**. Для режима №1 возможный диапазон стоповых импульсов для каждого входа лежит в пределах от 0 до 4 включительно, для режима №2 – от 1 до 3 включительно.

Range – временной диапазон.

В данном байте указывается, какой задан временной диапазон в режиме №2 (Таблица 2). В режиме №1 в байте **Mode** всегда возвращается 0.

Таблица 2

Range	Максимальный временной диапазон
0	Только в режиме №1 (1.3 микросекунды)
1	2.7 [ms]
2	5.4 [ms]
4	10.9 [ms]

Behavior – способ передачи данных.

00 – передача данных по запросу.

01 – автоматическая передача данных после команды единичного старта.

02 – автоматическая передача данных после каждого старта .

Error code – получен код ошибки (8 бит).

00 – заданная команда и\или режим существует.

01 – заданной команды не существует.

02 – заданного режима не существует.

03 – превышение лимита стоповых импульсов.

04 – ошибка установки временного диапазона.

05 – для заданного режима измерения не существует такого способа передачи данных.

Reserved – резерв (8 бит).

Данный байт не несет информационной нагрузки, поэтому может быть любым.

Команда FF – запрос атрибутов устройства не требует параметров. В ответ на этот запрос отдается пакет вида:

FF	Device Code	HW version	SW version	Reason
-----------	--------------------	-------------------	-------------------	---------------

Device Code – тип устройства (для ИВИ тип равен 0x1E).

HW version – аппаратная версия устройства.

SW version – версия программного обеспечения.

Reason – причина высылки пакета:

- 0 – после сброса по питанию или произошел рестарт по Watchdog таймеру.
- 2 – в ответ на запрос атрибутов (пакетом FF).
- 3 – в ответ на широковещательный запрос (Есть ли кто живой?).
- 5 – busoff recovery – восстановление после потери связи.

6. Измерение параметров ИВИ

Измерение погрешности ИВИ проводилось следующим образом: с помощью цифрового генератора задавался временной интервал между стартовым и стоповым импульсами, и на каждый временной интервал делалось около 3000 измерений ИВИ, после этого вычислялось среднее значение и максимальный разброс от минимального до максимального значения, Входные сигналы имели 10-вольтовые амплитуды и 5-наносекундные фронты. На рисунке 8 приведен график зависимости погрешности измерения от временного интервала для режима №1. По оси T задано время установленное генератором, а по оси t отклонение при измерении от заданного времени. То есть, ИВИ выдает результат $T+t$. Длина вертикального отрезка определяет величину шума на данном временном интервале. Точка в центре этого отрезка показывает среднее значение.

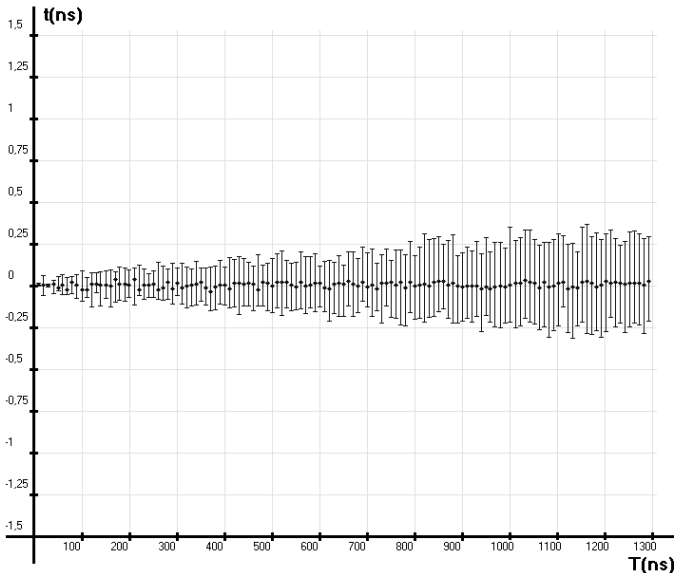


Рис. 8. Погрешность измерения в режиме №1.

Как видно из графика, погрешность меняется в зависимости от временного интервала и при больших временных интервалах, в режиме №1, не превышает 600 пикосекунд.

Были сняты характеристики на обоих стоповых каналах двух измерителей ИВИ. Формы графиков оказались идентичными во всех случаях.

Аналогичные измерения были проделаны, также для режима №2. Так как в этом режиме можно выбрать один из трех диапазонов, то графики приведены для всех трех диапазонов. Соответственно, для диапазона 1 (рис. 10), для диапазона 2 (рис. 11) и для диапазона 3 (рис. 12). На данных рисунках, как и на рисунке 8, длина линий по вертикали обозначает величину шума на заданном временном интервале. По результатам измерения характеристик можно утверждать, что в режиме №2 в диапазоне 1 максимальная погрешность составляет не более ~ 700 пикосекунд, в диапазоне 2 и 3 – не более $\sim 1,1$ наносекунды.

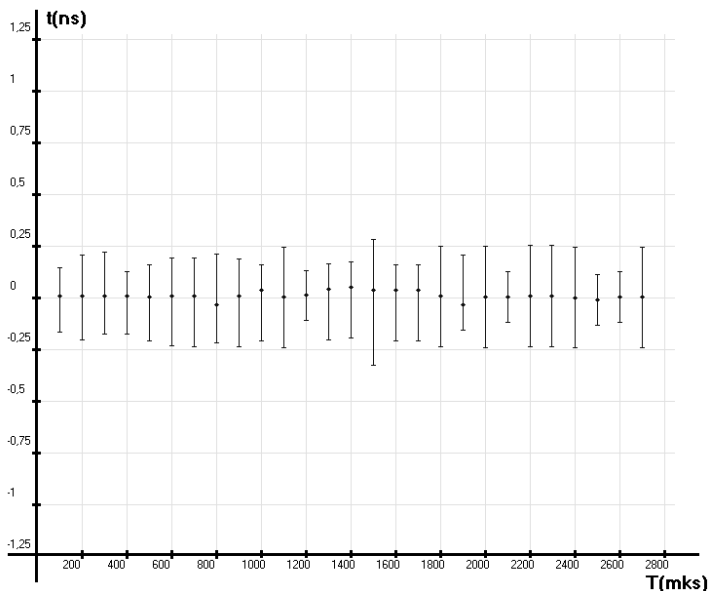


Рис. 10. Погрешность измерения в режиме №2. Диапазон 1.

7. Дополнительные исследования точности

Дополнительные исследования погрешности были проведены для режима №1. Для этого в прошивке процессора были внесены такие изменения, чтобы результаты измерения оставались не откалиброванными. То есть, ИВИ после измерений отправлял отдельно результат *M_Time* (ф.1) и отдельно калибровочные значения *Cal1* и *Cal2*. В этом случае результаты и *M_Time*, и *Cal2-Cal1* представлялись в количестве элементов задержки, через которые успел пройти импульс за временной интервал (рис. 2).

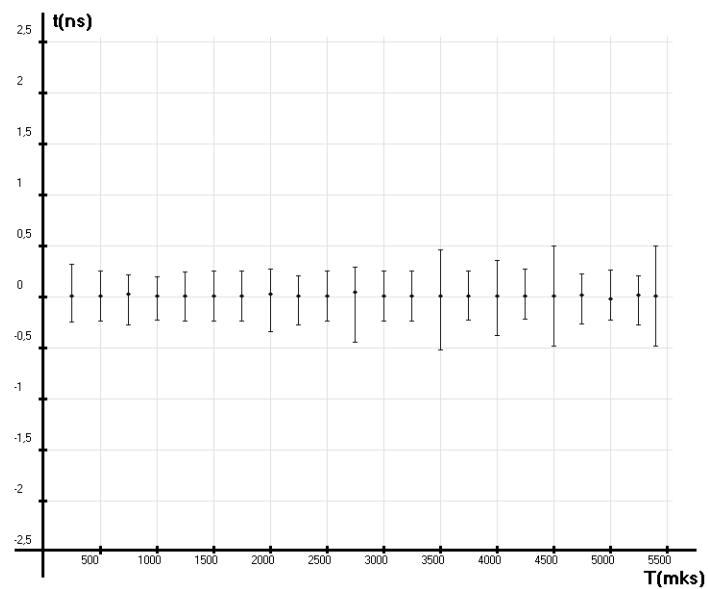


Рис. 11. Погрешность измерения в режиме №2. Диапазон 2.

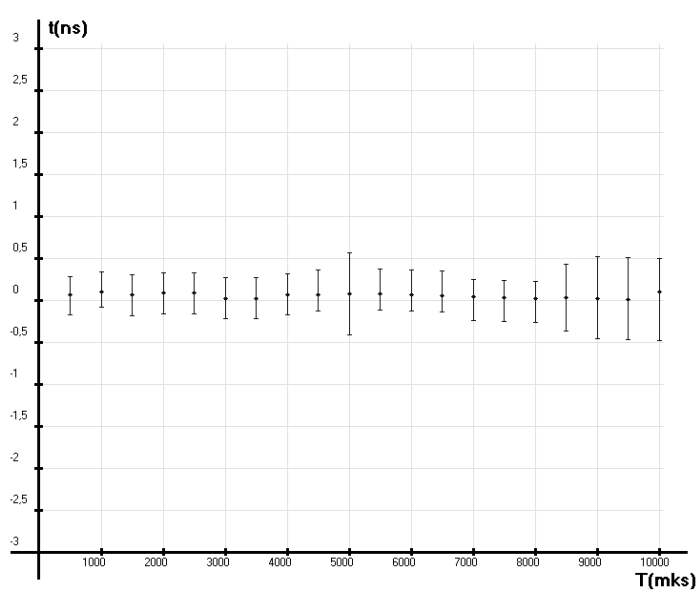


Рис. 12. Погрешность измерения в режиме №2. Диапазон 3.

Наблюдение за данными результатами показало, что наблюдается шум в плюс/-минус один элемент задержки для любого временного интервала и для калибровочного результата *Cal2-Cal1*. То есть, если взять, например, временной интервал в 630 наносекунд и учесть, что на одном элементе сигнал задерживается на ~63 пикосекунды, то *M_Time* получится равным 10000. Но при многократном измерении этого временного интервала, периодически будут появляться такие значения как 9999 и 10001.

На основании этих наблюдений можно сделать простейшие оценки шума для разных временных интервалов. Например, сделаем оценку шума для двух интервалов. Один интервал возьмем равным ~20 наносекунд, другой ~1300 наносекунд. Для первого интервала *M_Time* будет равен $\sim 317 \pm 1$, для второго – $\sim 20635 \pm 1$. Так как период *RefClk* в режиме №1 фиксирован и равен ~666 наносекунд, то *Cal2-Cal1*, будет равен $\sim 10571 \pm 1$. Для определения величины шума достаточно определить два крайних значения, и взять разницу. Для интервала 20 наносекунд $R_{min} = 316/10572 \approx 0,02989$, $R_{max} = 318/10570 \approx 0,03008$, отсюда $\Delta R = 0,00019$. Теперь применим формулу 2 и получим $\Delta Time = 0,00019 * 666 \approx 0,127$ наносекунд. Для интервала 1300 наносекунд $R_{min} = 20634/10572 \approx 1,951759$, $R_{max} = 20636/10570 \approx 1,952317$, отсюда $\Delta R = 0,000558$. $\Delta Time = 0,000558 * 666 \approx 0,372$ наносекунды.

Наблюдения за значениями *M_Time* и *Cal2-Cal1* показали, что эти данные подвержены температурному дрейфу. На малых интервалах (приблизительно до 150 наносекунд) дрейф практически не заметен в результате измерения. На больших интервалах (~1200 ÷ 1300 нс) результат *M_Time* может измениться за счет температурного дрейфа со значения $\sim 20635 \pm 1$ до $\sim 20632 \pm 1$, в то время как результат *Cal2-Cal1* остается неизменным, т.е. $\sim 10571 \pm 1$. Если сделать оценку ошибки при наличии температурного дрейфа, то получим следующие результаты: $R_{min} = 20631/10572 \approx 1,951475$, $R_{max} = 20636/10570 \approx 1,952317$, отсюда $\Delta R = 0,000842$. $\Delta Time = 0,000842 * 666 \approx 0,561$ наносекунд. Таким образом, оценка погрешности (для режима №1) с учетом температурного дрейфа вполне соответствует измеренной погрешности (рис. 8).

4.2. Таблица параметров ИВИ

Общие параметры	
Питание ИВИ	5 вольт
Потребляемая мощность	~2 ватта
Количество стартовых каналов	1
Количество стоповых каналов	2
Амплитуда импульсов на каналах	6 – 100 вольт
Длительность импульса	40 – 500 нс
Параметры для режима №1 (используются стартовый и оба стоповых канала)	
Минимальный временной интервал между стартовым и стоповым импульсами	3,5 нс
Максимальный временной интервал между стартовым и стоповым импульсами	1300 нс
Максимальное число стоповых импульсов на стоповом канале за цикл измерения (все стоповые импульсы должны находится внутри максимального временного интервала т.е. между стартом и последним стопом должно быть не более 1300 нс)	4
Минимальный временной интервал между стоповыми импульсами на одном канале	15 нс
Погрешность измерения интервала	$\leq \pm 0.3$ нс
Параметры для режима №2 (используются стартовый и один стоповый канал)	
Диапазон 1	360 нс – 2,7 мс Погрешность $\leq \pm 0.35$ нс $+0,01\% * T$
Диапазон 2	680 нс – 5,4 мс Погрешность $\leq \pm 0.55$ нс $+0,01\% * T$
Диапазон 3	1350 нс – 10,9 мс Погрешность $\leq \pm 0.55$ нс $+0,01\% * T$
Максимальное число стоповых импульсов на стоповом канале за цикл измерения	3

Список литературы

- [1] SPRS174.pdf (TMS320F2810, TMS320F2811, TMS320F2812 data manual) Texas Instruments, 2001.
- [2] DB_GP2_e.pdf (TDC-GP2 datasheet) ACAM, 2007.
- [3] Нифонтов В.И., Смирнов В.В., Шейнгезихт А.А. Измеритель временных интервалов для спектроскопических измерений. // 1982. - (препринт ИЯФ 82-75). Номер по описи 59.

Д.Е. Беркаев, Е.В. Быков, В.Р. Козак, С.В. Тарарышкин

Измеритель временных интервалов

D.E. Berkaev, E.V. Bykov, V.P. Kozak, S.V. Tararyshkin

Time to Digital Converter

ИЯФ 2011-6

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 23.02. 2011 г.

Сдано в набор 24.02. 2011 г.

Подписано в печать 25.02. 2011 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.

Тираж 95 экз. Бесплатно. Заказ № 6

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11