

УДК 621.398.4

С. А. Новиков, П. В. Тюленев

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ МАЛОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

S. A. Novikov, P. V. Tulenev

ENGINEERING OF FREQUENCY MEASUREMENT MODULE FOR SMALL TELEMETRY SYSTEM

А н н о т а ц и я. Проведен выбор метода измерения частоты, приведено его описание. Описан процесс разработки модуля измерения частоты для выбранной элементной базы. Измерение частоты оборотов имеет большое значение в устройствах, содержащих в своем составе вращательные элементы: колеса, валы, шестерни. Разрабатываемый модуль предназначен для контроля частоты оборотов вала ракетного двигателя – одного из его важнейших параметров.

A b s t r a c t. Performed choose of frequency measurement method and its description. Engineering process of frequency measurement module for chosen circuitry. Measurement speed is of great importance in devices containing in the structure a rotational elements: wheels, shafts, gear wheels. Developed module is designed for monitoring the frequency of rotation of a shaft of a rocket engine, one of its most important parameters.

К л ю ч е в ы е с л о в а: измерение частоты, ПЛИС, частота оборотов, проектирование модулей ПЛИС.

K e y w o r d s: frequency measurement, FPGA, rotary speed, FPGA module design.

Цифровое измерение частоты нашло широкое применение в информационно-измерительных системах и в системах управления, контроля и аварийной защиты различных объектов.

Как правило, подобные системы являются многоканальными, имеют определенный такт опроса каналов, состоят из отдельных модулей измерения параметров и центральной микропроцессорной системы.

К модулям измерения частоты чаще всего предъявляются высокие требования по быстродействию измерения. Кроме того, в этих модулях измерение должно выполняться непрерывно, в широком диапазоне частоты с высокой достоверностью результатов измерения.

Измерение частоты оборотов имеет большое значение в устройствах, содержащих в своем составе вращательные элементы: колеса, валы, шестерни. Разрабатываемый модуль предназначен для контроля частоты оборотов вала ракетного двигателя – одного из его важнейших параметров.

Известно несколько методов измерения частоты, которые могут быть использованы в измерительных модулях [1]. В данной работе применяется комбинированный метод измерения частоты, основанный на одновременном подсчете N_x числа импульсов неизвестной частоты F_x и N_0 числа импульсов известной счетной частоты F_0 за интервал времени $T_{\text{изм}}$. В таком случае частота сигналов вычисляется по формуле

$$F_x = \frac{N_x}{N_0} F_0, \quad (1)$$

где F_x – измеряемая частота; N_x – количество импульсов измеряемой частоты; N_0 – количество импульсов счетной частоты; F_0 – известная счетная частота.

Временные диаграммы процесса измерения показаны на рис. 1.

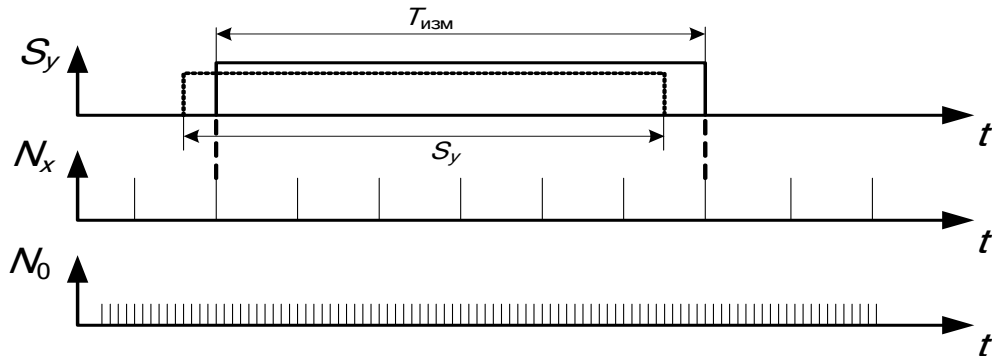


Рис. 1. Временные диаграммы измерения

В данном случае S_y – сигнал разрешения измерения, или «временные ворота». «Временные ворота» S_y асинхронны относительно импульсов N_x , что приводит к значительным погрешностям в ходе измерения. Для устранения таких погрешностей окончательное время измерения $T_{изм}$ формируется из условия синхронизации сигнала разрешения с импульсами измеряемой частоты F_x . При этом длительность времени измерения равна целому количеству периодов измеряемой частоты $T_{изм} = nT_x$.

Так как в нашем случае требуется измерение частоты в широком диапазоне частот, для увеличения скорости измерения длительность «временных ворот» не будет постоянной, а будет автоматически выбираться под текущую измеряемую частоту из заложенных значений $S_y = 1 \text{ мс}, 10 \text{ мс}, 100 \text{ мс}, 1 \text{ с}$.

Известная счетная частота постоянна и выбирается равной $F_0 = 8 \text{ МГц}$.

Погрешность измерения частоты F_x определяется погрешностью дискретности измерения интервала $T_{изм}$. Определим погрешность измерения для предельного случая с параметрами: $F_x = 25 \text{ кГц}$, $T_{изм} = 1 \text{ мс}$. В таком случае

$$T_0 = \frac{1}{F_0} = \frac{1}{8 \cdot 10^6} = 0,125 \cdot 10^{-6} \text{ с}, \quad (2)$$

где T_0 – период следования импульсов счетной частоты;

$$n = \frac{T_{изм}}{T_0} = \frac{10^{-3}}{0,125 \cdot 10^{-6}} = 8 \cdot 10^3, \quad (3)$$

где n – количество импульсов счетной частоты; $T_{изм}$ – длительность времени измерения.

Погрешность измерения найдется по формуле

$$\delta = \frac{1}{n} = \frac{1}{8000} = 0,000125 = 0,0125 \%, \quad (4)$$

что не превышает допустимую.

Несложно представить, что максимальная длительность сигнала $T_{изм}$ равна

$$T_{изм} \approx 2S_{y_{\max}} \approx 2 \text{ с}. \quad (5)$$

Структурная схема устройства, реализующего описанный выше алгоритм, представлена на рис. 2.

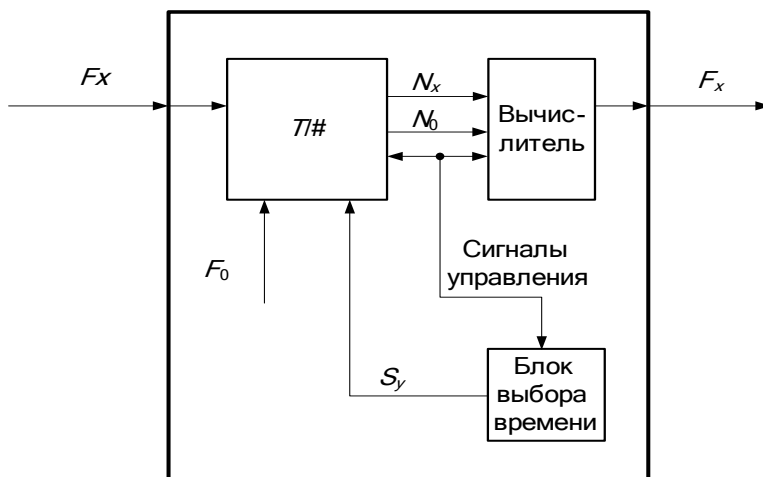


Рис. 2. Структурная схема модуля счета частоты

Импульсы неизвестной частоты F_x и счетной частоты F_0 поступают на блок преобразования количества импульсов в код. Этот блок подсчитывает количество импульсов измеряемой и счетной частот, а также формирует сигналы управления на вычислитель и блок выбора времени. Коды N_x и N_0 затем подаются на вычислитель, который выдает результат измерения, равный входной частоте. Блок выбора времени измерения подает на блок преобразования сигнал разрешения измерения S_y , длительность которого выбирается по сигналу управления, зависящему от частоты следования импульсов F_x .

Модуль счета спроектирован с помощью программного пакета LiberoSoCv10.0 на семействе ПЛИС SmartFusion, физически реализован на ПЛИС фирмы ActelA2F500. Данная логическая интегральная схема была выбрана, потому что она имеет достаточное количество вентилей для реализации многоканального счетчика, поддерживает несколько внутренних тактовых частот и содержит в своей структуре 32-разрядный микроконтроллер.

Модуль счета, спроектированный в программе Libero, написан с помощью языка HDL [2] и выглядит следующим образом:

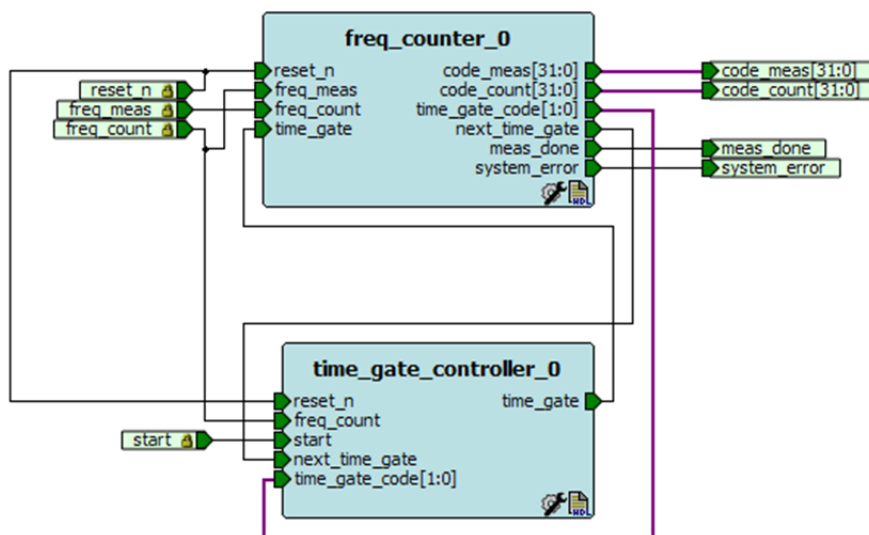


Рис. 3. Модуль счета частоты

Здесь `freq_counter_0` – непосредственно счетчик импульсов, который подсчитывает количество импульсов измеряемой и счетной частот, производит анализ результатов измерения с последующей генерацией управляющих сигналов, а также выдачу результатов измерения на вычислитель. `time_gate_controller_0` – блок управления «временными воротами» – выдает на блок счета сигнал разрешения измерения и управляет длительностью этого сигнала. В качестве вычислителя выступает микропроцессорная подсистема (MicrocontrollerSubSystem – MSS), имею-

щаяся в архитектуре ПЛИС. Кроме того, она осуществляет запуск процесса измерения, генерацию счетной частоты и передачу результатов измерения во внешнюю среду.

Алгоритм работы всего модуля счета основан на методе измерения частоты, описанном выше, и представлен на рис. 4.

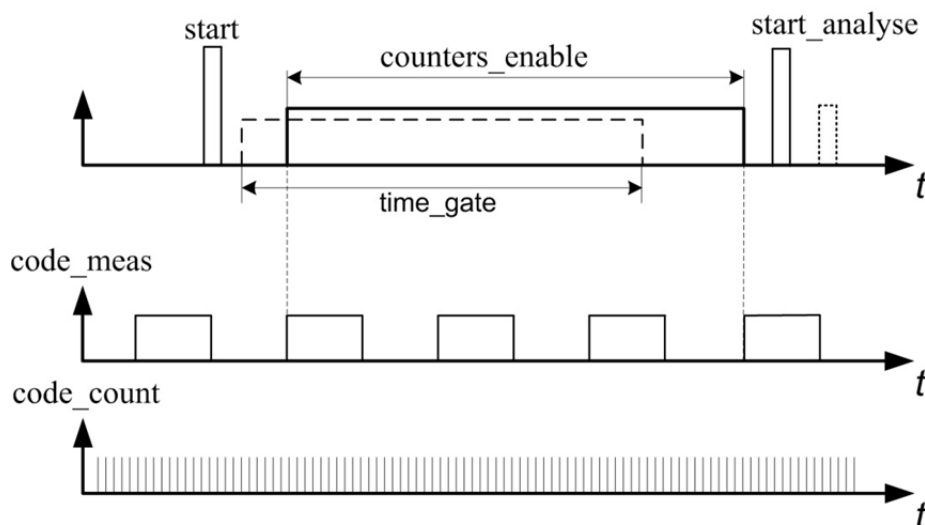


Рис. 4. Временные диаграммы работы

В качестве тактовой частоты выступает известная счетная частота freq_count . В нашем случае она равна 8 МГц. Процесс измерения запускается посредством подачи сигнала start на блок $\text{time_gate_controller}$ с микропроцессорной системы. Этот блок анализирует двоичный код длительности временных ворот на входе time_gate_code [1:0] и генерирует сигнал разрешения измерения time_gate , длительность которого пропорциональна этому коду (по умолчанию длительность 1ms). По этому сигналу блок freq_counter ждет первый импульс измеряемой частоты freq_meas , по фронту которого запускается внутренний сигнал разрешения счета counters_enable . Этот сигнал держится все время действия сигнала временных ворот time_gate и после среза этого сигнала продлевается до следующего фронта импульса измеряемой частоты. Таким образом, за время действия сигнала counters_enable «умещается» целое количество периодов измеряемой частоты.

По фронту сигнала counters_enable запускаются два счетчика, и происходит подсчет количества импульсов измеряемой и счетной частот. Результат счета записывается в два 32-разрядных регистра: $\text{code_meas}[31:0]$ и $\text{code_count}[31:0]$. Разрядность этих регистров посчитана из условия количества импульсов счетной частоты freq_count за максимальную длительность сигнала counters_enable , вычисленную по формуле (5). В этом случае количество импульсов счетной частоты будет равно

$$N_{\text{count}} \approx 2 \frac{1}{\text{freq_count}} \approx 16\,000\,000, \quad (6)$$

что соответствует 32-разрядному коду.

По завершении счета (по срезу сигнала counters_enable) запускается внутренний сигнал start_analyse , по фронту которого начинается анализ результатов счета.

В процессе анализа блок счета в первую очередь оценивает количество импульсов измеряемой частоты. Если оно достаточно для расчетов, то на микроконтроллерную подсистему формируется сигнал meas_done , свидетельствующий об успешном завершении счета.

Если количество импульсов недостаточное (например, не «уместился» даже один период), то код длительности временных ворот увеличивается на 1, выдается сигнал next_time_gate , по которому блок управления временными воротами выдает новый сигнал разрешения измерения увеличенной длительности. Также по этому сигналу происходит сброс всех регистров и флагов, используемых в процессе счета.

Измерение повторяется снова и снова с увеличивающейся длительностью «временных ворот» до появления сигнала meas_done .

В случае, если даже при максимальной длительности «временных ворот» на счетчик не поступило ни одного импульса измеряемой частоты, в процессе анализа блок счета диагностирует это как ошибку измерения и выдает об этом соответствующий сигнал `system_error`.

Микроконтроллерная подсистема по приему сигнала `meas_done` считывает коды количества импульсов `code_meas[31:0]` и `code_count[31:0]`, производит подсчет частоты по формуле (1) и выдает результат во внешнюю среду. В случае ошибки измерения подсистема сигнализирует об этом пользователю. И в том, и в другом случае после приема результатов происходит запуск следующего цикла измерения по новому сигналу `start`.

В процессе работы может возникнуть ситуация, когда длительность импульсов измеряемой частоты превышает временные ворота. В таком случае может не запуститься сигнал `counters_enable`, хотя импульсы поступают на модуль счета. Тогда не запустится анализ измерения, и весь модуль прекратит счет. Для устранения этого было введено еще одно условие запуска анализа: в случае, если во время среза `time_gate` сигнал `counters_enable` равен нулю (т.е. не был запущен вообще), сигнал `start_analyse` запускается по заднему фронту `time_gate`.

Также может возникнуть ситуация, при которой сигнал `counters_enable` запущен, но импульсы измеряемой частоты перестали поступать на модуль во время действия сигнала `time_gate` (например, при обрыве линии). В таком случае по окончании `time_gate` в отсутствие импульсов `freq_meas` сигнал `counters_enable` будет длиться бесконечно долго, и процесс измерения не остановится. Для устранения такой ошибки по окончании сигнала `time_gate` запускается таймер на 500 ms (рассчитан на $\text{freq_meas} = 2 \text{ Гц}$). Если за это время сигнал `counters_enable` не завершится, то по окончании таймера он обнулится принудительно.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанный модуль счета частоты позволяет измерить входную частоту от 2 Гц до 800 кГц (верхняя частота ограничена счетной частотой `freq_count`). Экспериментально были подтверждены высокие точность и быстродействие в малой системе телеметрии как при стыковке с датчиком частоты оборотов, так и при стыковке с эталонным генератором частоты. Разработанный модуль может быть использован для других проектов, где требуется постоянное измерение частоты с высокой точностью.

Список литературы

1. Мурашко, Н. А. Новый метод широкодиапазонного измерения частоты / Н. А. Мурашко, О. А. Мурашко // Датчики и системы. – 2010. – № 12. – С. 56–62.
2. Стемпковский, А. Л. Основы логического синтеза средствами САПР Synopsys с использованием Verilog HDL : учеб. пособие / А. Л. Стемпковский, М. Ю. Семенов. – М. : МИЭТ, 2005. – 140 с.

Новиков Сергей Александрович
инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: niifi@sura.ru

Novikov Sergey Aleksandrovich
electronic engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements

Тюленев Петр Васильевич
ведущий инженер-программист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: niifi@sura.ru

Tulenev Petr Vasil'evich
leadprogramming engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements

УДК 621.398.4

Новиков, С. А.

Разработка модуля измерения частоты для малой системы телеметрии / С. А. Новиков, П. В. Тюленев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 4 (6). – С. 37–41.