

Цифровые методы время-частотных измерений

Сергей Зайцев (Самарская обл.)

В статье описываются методы измерения временных интервалов и частоты: последовательного счёта, задержанных совпадений и грубо-точный (нониусный).

Одним из способов измерения неизвестной величины является её количественное определение при помощи эталонных мер. Точность таких измерений зависит от точности эталонов. В настоящее время измерения времени и частоты являются наиболее точными, т.к. эталоны этих физических величин могут быть определены с наивысшей точностью. Для повышения точности измерений некоторые физические величины предварительно преобразуют в сигналы, пропорциональные времени или частоте, которые затем определяют цифровыми методами.

На рисунке 1 показана функциональная схема цифрового измерения, которая применяется для измерения физической величины x при помощи тактового генератора со стандартной длительностью импульсов. Процесс измерений состоит из четырёх этапов:

- физическая величина x при помощи соответствующего датчика преобразуется в электрический сигнал V ;
- величина V преобразуется в одиночный импульс или серию периоди-

ческих импульсов, длительность t_x которых пропорциональна значению сигнала V ;

- интервал времени t_x при помощи счётчика импульсов преобразуется в двоичное число;
- информация в двоичном коде переводится в десятичный код и отображается на дисплее.

Счётчик подсчитывает количество импульсов, поступающих с тактового генератора, в течение времени t_x . В момент окончания интервала t_x в счётчике будет записано число N , соответствующее числу импульсов, прошедших через временной селектор:

$$N = t_x / t_0. \quad (1)$$

Таким образом, число подсчитанных импульсов будет пропорционально времени t_x и, следовательно, физической величине на входе измерителя.

Измерение интервалов времени цифровыми методами имеет следующие особенности:

- временной интервал может задаваться не только периодическими, но и непериодическими или однократными сигналами;
- временной интервал может определяться длительностью импульса на определённом уровне амплитуды, интервалом между двумя импульсами на неодинаковых для обоих импульсов уровнях амплитуд, интервалом между различными уровнями амплитуды одного и того же импульса и т.д.;
- во многих случаях временной интервал может задаваться импульсными сигналами, снимаемыми с различных выходов и независимыми во времени.

Измерители интервалов времени имеют два одинаковых входных формирующих устройства, одно из которых формирует импульс начала измеряемого интервала (стартовый импульс), а второе – импульс конца измеряемого интервала (стоповый импульс). Оба устройства имеют регулируемые уровни формирования, что позволяет измерять временные интервалы при различных амплитудах входных сигналов. Если формирующие устройства не имеют регулируемых уровней, то они пригодны лишь для проведения измерений в ограниченном числе случаев и часто с невысокой точностью.

Следует отметить, что измерители интервалов времени не позволяют достичь требуемой точности измерений (для однократных измерений) при сравнительно низком быстродействии пересчётной схемы, однако измерители периодов могут использовать умножение периодов с целью обеспечения необходимой точности.

Отмеченные особенности измерителей интервалов времени существенно отличают их от измерителей периодов в электронно-счётных частотомерах и выделяют их в особый класс измерительных приборов.

Ниже рассматриваются наиболее распространённые цифровые методы измерения интервалов времени.

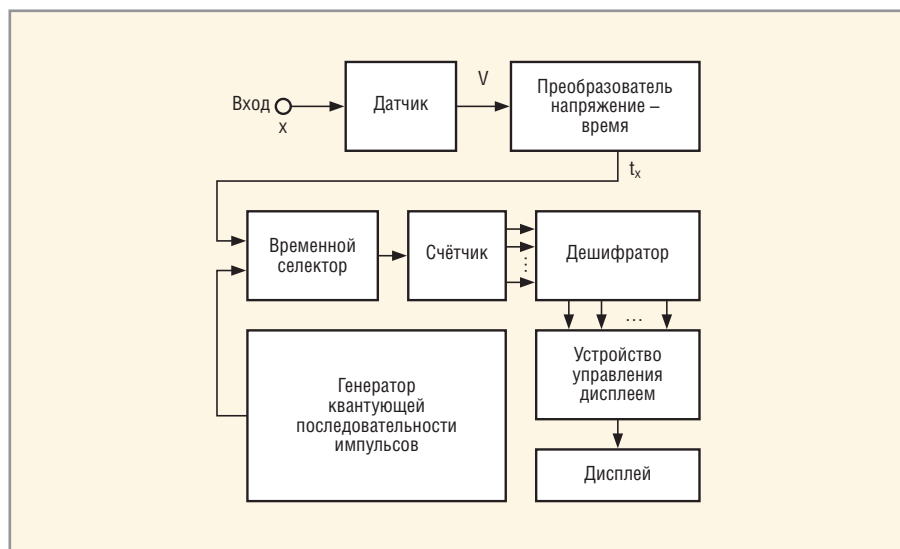


Рис. 1. Функциональная схема цифрового измерения физической величины

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СЧЁТА

Сущность метода последовательного счёта состоит в представлении измеряемого интервала t_x в виде последовательности некоторого количества импульсов, следующих друг за другом через одинаковые эталонные промежутки времени.

По количеству импульсов последовательности, называемой квантующей, судят о длительности измеряемого интервала. Количество импульсов квантующей последовательности является цифровым кодом интервала t_x . Устройство, реализующее этот метод, называют преобразователем последовательного счёта.

На рисунке 2 приведена общая функциональная схема преобразователя. На временной селектор, управляемый прямоугольным импульсом, длительность которого равна измеряемому интервалу t_x , поступают импульсы с генератора квантующей последовательности. При наличии управляющего импульса через селектор проходят импульсы квантующей последовательности, которые затем регистрируются счётчиком.

Для измеряемого интервала t_x можно записать (см. рис. 3):

$$t_x = Nt_0 + \Delta t_1 - \Delta t_2, \quad (2)$$

где Δt_1 и Δt_2 – неопределённости в расположении начала и конца преобразуемого временного интервала t_x относительно квантующей последовательности t_0 .

Относительная погрешность однократного измерения (преобразования интервала) равна:

$$\delta_x = \pm \delta_0 \pm 1/N, \quad (3)$$

где δ_0 – относительная погрешность периода квантующей последовательности, N – количество импульсов, зарегистрированных счётчиком. Соответственно, абсолютная погрешность выразится в виде:

$$\Delta t_x = \pm \delta_0 N t_0 \pm t_0. \quad (4)$$

Величины Δt_1 и Δt_2 являются составляющими абсолютной погрешности.

При независимости величин Δt_1 и Δt_2 и равномерной плотности распределения их значений в пределах t_0 плотность распределения суммарной погрешности подчиняется закону Симпсона.

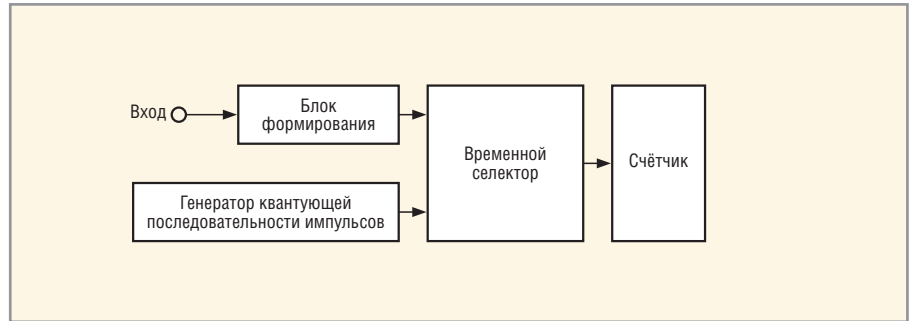


Рис. 2. Функциональная схема преобразователя последовательного счёта

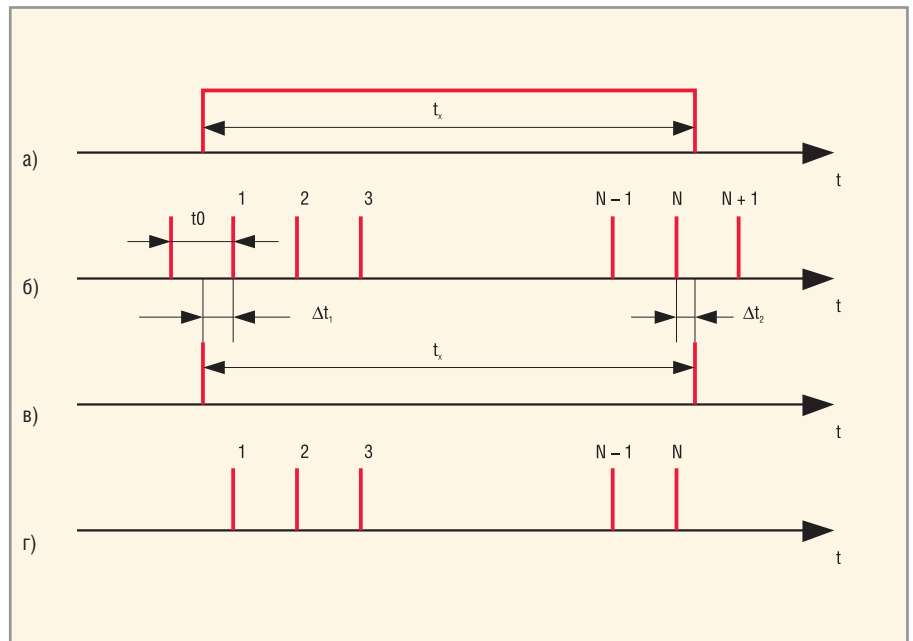


Рис. 3. Временная диаграмма метода последовательного счёта

а – управляющий импульс; б – импульсы квантующей последовательности; в – импульсы, определяющие начало и конец измеряемого интервала; г – импульсы на выходе селектора

Математическое ожидание величины для однократного измерения:

$$[i]t_x = Nt_0. \quad (5)$$

Дисперсия суммарной погрешности:

$$D\Delta t_x = t_0^2 / \sqrt{6}, \quad (6)$$

и среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_x = t_0 / \sqrt{6}. \quad (7)$$

Из приведённых соотношений для погрешности преобразователя последовательного счёта видно, что её уменьшение для однократного измерения возможно при уменьшении δ_0 и t_0 . Уменьшение δ_0 связано с повышением стабильности частоты кварцевых генераторов. В настоящее время величина δ_0 может быть сведена к $10^{-8} \dots 10^{-9}$ за неделю.

Уменьшение величины t_0 связано с увеличением быстродействия пере-

счётных схем и других узлов. Достигнутое в настоящее время быстродействие пересчётных схем ограничивает t_0 значением 10^{-9} с.

Практически уменьшение погрешности преобразователей последовательного счёта возможно двумя путями. Первый из них – увеличение быстродействия пересчётных схем и соответствующее уменьшение t_0 . Другой путь связан с использованием различных методов учёта промежутков Δt_1 и Δt_2 [1–3].

МЕТОД ЗАДЕРЖАННЫХ СОВПАДЕНИЙ

Этот метод известен в нескольких вариантах. На рисунке 3 приведена функциональная схема одного из них. Для простоты схема соответствует случаю, когда измеряемый интервал задаётся двумя импульсами. В рассматриваемом варианте метод задержанных совпадений используется для учёта участка Δt_2 преобразо-

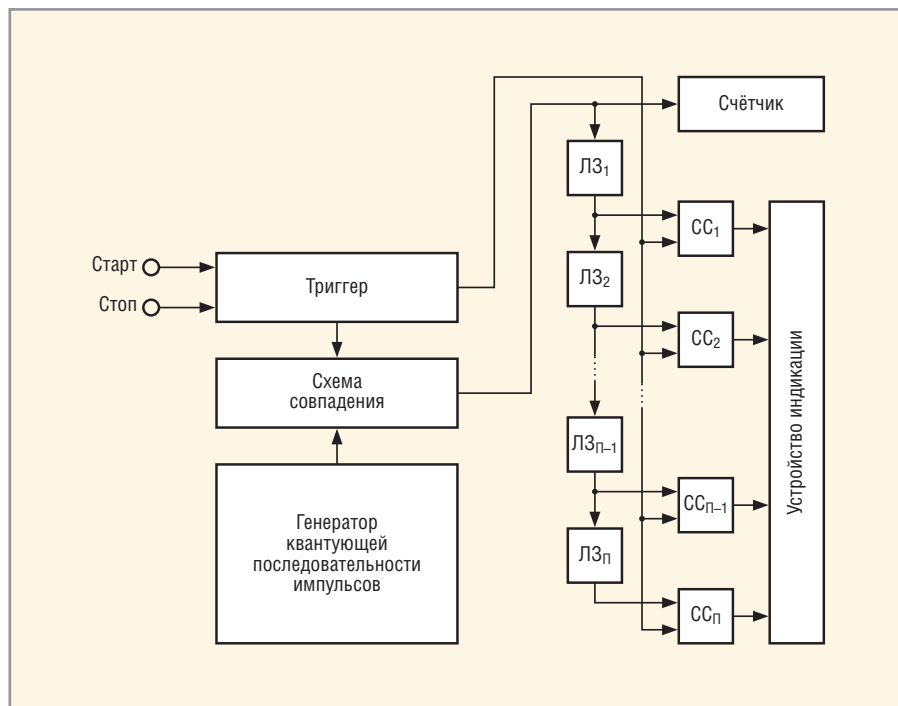


Рис. 4. Функциональная схема преобразователя задержанных совпадений

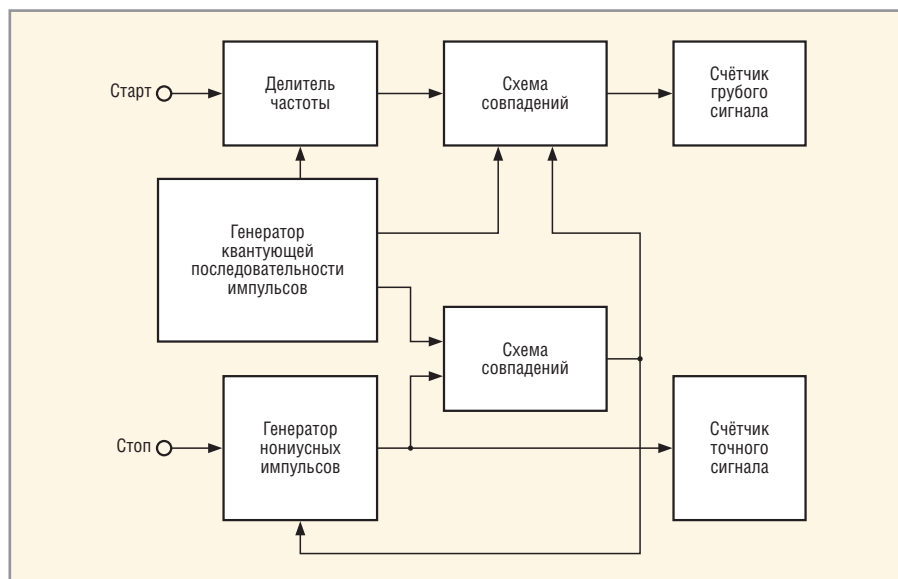


Рис. 5. Функциональная схема измерителя временных интервалов нониусным методом

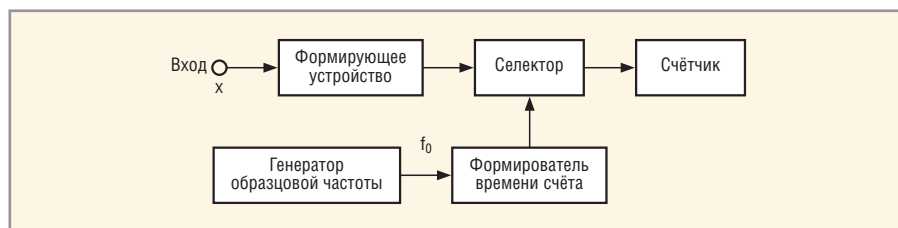


Рис. 6. Структурная схема измерения частоты электронно-счётным методом

вателя последовательного счёта (см. рис. 4).

Учёт интервала Δt_1 можно осуществить также с помощью метода задержанных совпадений, но для этого известны и специальные методы, например, метод старт-стопного деления. В данном случае предполагается синхронизация импульсов квантующей

последовательности стартовым импульсом ($\Delta t_1 = 0$).

Схема, показанная на рисунке 4, работает следующим образом. Импульсы от генератора квантующей последовательности через схему совпадения СС, управляемую триггером, поступают одновременно на счётчик и секционированную линию задержки ЛЗ1,

ЛЗ2, ..., ЛЗn с временем задержки каждой секции t_0/n . Отвод от каждой секции ЛЗ присоединён к одному из входов схем совпадений СС1, СС2, ..., ССn. Вторые входы схем совпадений соединены с одним из плеч триггера.

При поступлении стартового импульса открывается схема совпадения, и счётчик регистрирует импульсы с его выхода. При этом схемы совпадений закрыты низким потенциалом, снимаемым с триггера. В момент стопового импульса прекращается счёт импульсов, поступающих со схемы совпадения. Перепад напряжения триггера открывает схемы совпадений. Если стоповый импульс приходит в момент времени, когда последний импульс совпадений находится в m -й секции линии задержки, то импульсы появятся на выходах схем от СС m до ССn. Импульсы совпадения поступают далее на устройство дешифрирования и индикации.

Таким образом, рассмотренная схема позволяет уменьшить абсолютную погрешность преобразователя последовательного счёта и свести её к значению t_0/n . Величина n зависит от таких факторов, как длительность перепадов напряжения триггера, длительность импульсов на выходе схемы совпадения, ширина полосы пропускания линии задержки, разрешающее время схем совпадений и др.

Нониусный метод

Нониусный (грубо-точный) метод нашёл широкое применение в технике измерения интервалов времени как в качестве средства уменьшения погрешности преобразователей последовательного счёта, так и в виде самостоятельного метода построения некоторых измерительных устройств.

Нониусные измерители временных интервалов позволяют уменьшить погрешности начала Δt_1 и конца Δt_2 счёта. Однако в большинстве приборов счётные импульсы синхронизированы с началом временного интервала, поэтому уменьшается лишь погрешность конца счёта.

На рисунке 5 приведена функциональная схема измерителя интервалов времени с нониусным методом уменьшения погрешности Δt_2 и с синхронизацией стартового импульса ($\Delta t_1 = 0$). Схема работает следующим образом. Импульсы с генератора квантующей последовательности поступают на входы схем совпадения и на вход делителя частоты. Делитель частоты формирует

импульсы, синхронные с квантующей последовательностью и служащие для запуска исследуемых устройств. Одновременно импульсы делителя открывают схему совпадения, выходные импульсы которой регистрируются счётчиком грубого отсчёта.

Генератор нониусных импульсов запускается стоповым импульсом. Генерируемые им импульсы с периодом $t_n = (n - 1)/n$, где n – целое число, поступают на другой вход схемы совпадения и одновременно регистрируются счётчиком точного отсчёта. Через некоторый промежуток времени, зависящий от длительности $(t_0 - \Delta t_2)$ (см. рис. 3), происходит совпадение импульсов квантующей и нониусной последовательностей, и схема совпадения блокирует генератор нониусных импульсов. Очевидно, что количество импульсов, зарегистрированных счётчиком, пропорционально длительности интервала $(t_0 - \Delta t_2)$.

Измеренный интервал t_x можно выразить в виде:

$$t_x = (N - N_n)t_0 + N_n \Delta t_n, \quad (8)$$

где N – показания счётчика грубого отсчёта; N_n – показания счётчика точного отсчёта; Δt_n – шаг нониуса, равный t_0/n .

Нониусный метод позволяет свести абсолютную погрешность измерений к величине t_0/n . При этом n может достигать достаточно больших значений (несколько десятков и даже сотен), что и обуславливает широкое распространение метода.

Использование нониусного метода при больших значениях n предъявляет к узлам схемы ряд требований, наиболее существенными из которых являются:

- высокая стабильность частоты нониусной последовательности;
- высокая стабильность параметров импульсов обеих последовательностей;
- высокая разрешающая способность схем совпадений.

Существенным недостатком нониусного метода является неудобство отсчёта результатов измерений по нескольким таблом с последующими вычислениями. Абсолютная погрешность нониусного метода может быть сведена к 10^{-9} с.

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ

Частота сигнала определяется количеством периодов за одну секунду. Из-

Таблица 1. Зависимость относительной погрешности частоты опорных генераторов от интервалов времени

Вид нестабильности	Относительная погрешность частоты опорных генераторов за интервалы времени							
	1 с	10 с	10 мин	1 ч	1 сут	1 мес	6 мес	1 год
Долговременная	–	–	–	–	10^{-8}	$1,5 \times 10^{-7}$	2×10^{-7}	5×10^{-7}
Кратковременная	10^{-10}	10^{-10}	$1,5 \times 10^{-9}$	3×10^{-9}	–	–	–	–

Таблица 2. Зависимость погрешности измерения частоты от времени измерения

Время измерения	Погрешность измерения частоты									
	0,1 Гц	1 Гц	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	100 МГц
10^{-3} с	10^4	10^3	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
10^{-2} с	10^3	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
10^{-1} с	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
1 с	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
10 с	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}

мерив число периодов в интервале 1 с, можно определить частоту сигнала. При помощи образцовой частоты формируется временной интервал известной длительности Δt , который заполняют импульсами, следующими с неизвестной частотой f_x . Подсчёт числа импульсов, попадающих в интервал Δt , производится по формуле:

$$n = \Delta t f_x, \quad (9)$$

Результаты подсчёта числа импульсов, попавших во временной интервал Δt , фиксируются при помощи счётчика. Обычно время Δt выбирают равным $10m$, где m – целое число, принимающее значения от 2 до 3. Поэтому показания электронно-счётного частотомера численно совпадают со значениями измеряемой частоты.

На рисунке 6 приведена структурная схема измерения частоты электронно-счётным методом. Сигнал измеряемой частоты поступает на формирующее устройство, преобразующее электромагнитные колебания в последовательность импульсов, частота которых равна частоте входного сигнала. С выхода формирующего устройства импульсы поступают на временной селектор. Сигнал образцовой частоты поступает на схему формирования, которая открывает селектор на время Δt , равное периоду следования импульсов образцовой частоты.

Погрешность при измерении частоты определяется выражением:

$$\delta_x = \delta_0 + \delta_1 + \delta_2 + 1/f_x t, \quad (10)$$

где δ_0 – погрешность установки частоты опорного генератора при выпуске из производства или после коррек-

ровки частоты по окончании очередной поверки; δ_1 – погрешность, вызванная долговременной нестабильностью частоты опорного генератора; δ_2 – погрешность, вызванная кратковременной нестабильностью частоты опорного генератора на интервале времени счёта; $1/f_x t$ – погрешность, связанная с нецелочисленностью периодов измеряемого сигнала f_x и сигнала формирования времени счёта t .

Погрешность δ_x зависит от погрешности образцовой меры частоты, по которой устанавливалось значение частоты опорного генератора при выпуске из производства или в ходе очередной поверки, и конструктивного исполнения корректора частоты.

Погрешности δ_1 и δ_2 зависят от интервалов времени. Значения этих погрешностей для различных интервалов времени приведены в таблице 1 [4].

Погрешность $1/f_x t$ зависит от измеряемой частоты и времени измерения (см. таблицу 2) [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным преимуществом время-частотных измерений является их высокая точность. В настоящее время разработаны цифровые приборы с функцией самотестирования, которые довольно миниатюрны и сравнительно недороги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворяшин Б.В., Кузнецов Л.И. Радиотехнические измерения. Советское радио, 1978.
2. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. Техносфера, 2006.
3. Гитис Э.И., Пискулов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи. Энергоиздат, 1981.
4. Измерения в электронике: Справочник под ред. В.А. Кузнецова. Энергоатомиздат, 1987.

