

УДК 53.083.5

Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков

Статистическое исследование измерения частоты методом совпадения

Представлена математическая модель процесса измерения частоты методом совпадения, на основе которой показано влияние скважности импульсов, уровня заданной относительной максимальной методической погрешности дискретности на время измерения. Статистическое моделирование выполнялось при условиях того, что измеряемые частоты меньше образцовой частоты, процесс измерения частоты начинается с нулевой фазы между импульсами образцовой и измеряемой частот. Проведено сравнение по быстродействию измерения частоты методом прямого счета (за целое число измеряемых периодов [1–3]) и методом совпадения. Используется понятие выигрыша по быстродействию [8], который определяется как отношение времени измерения частоты методом прямого счета ко времени измерения частоты методом совпадения. Приведены результаты моделирования, из которых следует, что измерение частоты методом совпадения может быть использовано в широком диапазоне частот. Диапазон частот, в котором наблюдается выигрыш по быстродействию при измерении частоты методом совпадения по сравнению с методом прямого счета, увеличивается с уменьшением относительной максимальной методической погрешности дискретности. Выигрыш по быстродействию при измерении частоты методом совпадения растет с увеличением измеряемой частоты и с уменьшением относительной максимальной методической погрешности дискретности. Также в [8] показано, что существуют оптимальные значения скважности, при которых достигается наибольший выигрыш по быстродействию при измерении частоты методом совпадения по сравнению с методом прямого счета. Оптимальные значения скважности зависят от уровня заданной относительной максимальной методической погрешности дискретности и диапазона измеряемых частот.

Ключевые слова: статистическое моделирование, модель измерения частоты, время измерения частоты, цифровые частотомеры, выигрыш по быстродействию, метод совпадения, скважность, погрешность дискретности.

Во многих областях техники требуется выполнять измерение частоты, например в электро-, радиотехнике и измерительных системах и многих других областях. Одним из первых методов измерения частоты цифровыми частотомерами был метод прямого счета, который заключается в том, что подсчитывают число периодов образцовой частоты в течение заранее заданного целого числа периодов измеряемой частоты [1–3]. При этом возникает абсолютная методическая погрешность, максимальное значение модуля которой равно длительности периода образцовой частоты. Для уменьшения абсолютной методической погрешности дискретности измерения частоты применяются различные способы, например, запуск генератора образцовой частоты в момент начала измерительного интервала времени, однократная либо многократная растяжка интервала времени, который определяется разницей в положении импульсов образцовой частоты с измерительным интервалом, нониусный метод, метод задержанных совпадений и др. [2, 3]. Однако применение подобных способов увеличивает длительность процесса измерения частоты, а также требует выполнения дополнительных аналоговых частей схемы с прецизионными элементами.

Одними из первых работ, в которых использовался метод совпадения при измерении частоты в цифровых частотомерах, были [4–6]. Отмечено, что абсолютная максимальная методическая погрешность дискретности, возникающая при измерении частоты методом совпадения, снижена до длительности импульсов, которые формируются в течение периодов образцовой и измеряемой частот, а их длительность выбирается исходя из заданной абсолютной погрешности измерения. Показано, что метод совпадения эффективен при проведении сличения частот [6, 7], применяющийся при проверке высокостабильных генераторов частоты. Однако не рассмотрена работа метода совпадения в широком диапазоне частот. В настоящее время измерение частоты методом совпадения не

нашло широкого распространения в практике, так как данный метод недостаточно изучен и не оценены его преимущества по сравнению с методом прямого счета.

Постановка задачи. Целями настоящей статьи являются исследование путем статистического моделирования, возможности использования метода совпадения в широком диапазоне частот, определение влияния конструктивных параметров (скважность импульсов, уровень заданной относительной максимальной методической погрешности дискретности) на время измерения частоты методом совпадения и сравнение его со временем измерения методом прямого счета.

На рис. 1 приведены временные диаграммы, характеризующие измерения частоты методом совпадения и методом прямого счета. А именно, на оси времени 1 располагаются импульсы с нулевой длительностью, которые формируются с периодом измеряемой частоты. На оси времени 2 располагаются импульсы с заданной длительностью, которые формируются с периодом образцовой частоты. Строго говоря, в действительности невозможно сформировать импульсы нулевой длительности. Данное допущение используется только для простоты понимания, на самом деле суммарная длительность импульсов образцовой и измеряемой частоты задается равной τ_0 .

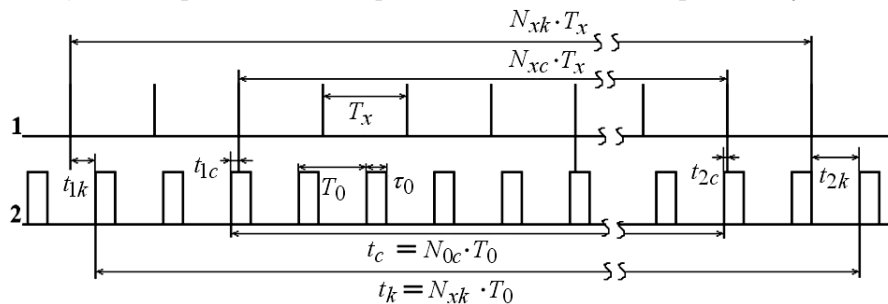


Рис. 1. Временные диаграммы процесса измерения частоты

Приняты следующие обозначения: T_0 – длительность периодов образцовой частоты; $F_0 = 1/T_0$ – образцовая частота; T_x – длительность периодов измеряемой частоты; $F_x = 1/T_x$ – измеряемая частота; N_{0k} – число подсчитанных периодов образцовой частоты за время измерения частоты методом прямого счета; N_{xk} – число периодов измеряемой частоты, заданное перед началом процесса измерения частоты методом прямого счета; t_k – время измерения частоты методом прямого счета; t_{1k} и t_{2k} – абсолютные погрешности дискретизации; τ_0 – длительность импульсов образцовой частоты; η – скважность образцовых импульсов ($\eta = \tau_0/T_0$); N_{0c} – число подсчитанных периодов образцовой частоты за время измерения частоты методом совпадения; N_{xc} – число подсчитанных периодов измеряемой частоты за время измерения частоты методом совпадения; t_c – время измерения частоты методом совпадения; t_{1c} и t_{2c} – абсолютные погрешности дискретизации.

На рис. 1 показаны абсолютные погрешности дискретизации t_{1k} и t_{2k} , которые возникают при измерении частоты методом прямого счета вследствие того, что начало и конец интервала времени, который формируется из целого числа периодов T_x , не совпадает с началом и концом интервала t_k . Максимальное абсолютное значение погрешности дискретизации по модулю не превышает длительности периода образцовой частоты [1]:

$$\max\{t_{1k} - t_{2k}\} \rightarrow T_0. \tag{1}$$

Уравнение преобразования метода прямого счета задается выражением [2]

$$N_{xk} \cdot T_x = N_{0k} \cdot T_0 + t_{1k} - t_{2k}. \tag{2}$$

Учитывая (1) из (2), можно получить [2]

$$F_{xk} = \frac{N_{xk}}{N_{0k} \cdot T_0 \cdot (1 \pm \frac{1}{N_{0k}})} \approx \frac{N_{xk}}{N_{0k} \cdot T_0} \cdot (1 \mp \frac{1}{N_{0k}}). \tag{3}$$

Модуль относительной максимальной методической погрешности дискретности (ММП) измерения частоты методом прямого счета имеет вид [2]

$$\gamma_k = 1/N_{0k}. \tag{4}$$

Время измерения частоты (t_k) методом прямого счета определяется исходя из заданного уровня ММП [2]:

$$t_k = T_0 / \gamma_k. \quad (5)$$

Суть измерения частоты методом совпадения состоит в том, что формируют импульсы измеряемой и образцовой частоты с заданной длительностью, подсчитывают периоды измеряемой и образцовой частоты за интервал времени между моментами совпадения импульсов измеряемой и образцовой частот [8].

На рис. 1 показаны абсолютные погрешности дискретизации t_{1c} и t_{2c} , которые возникают при измерении частоты методом совпадения вследствие того, что начало и конец интервала времени, который формируется из целого числа периодов T_x , совпадает с начальным и конечным импульсом интервала t_c , при этом импульсы образцовой частоты имеют заданную длительность (τ_0). Максимальное абсолютное значение погрешности дискретизации по модулю не превышает длительности образцовых импульсов [4]:

$$\max(|t_{1c} - t_{2c}|) \rightarrow \tau_0. \quad (6)$$

Уравнения преобразования измерения частоты методом совпадения [5]:

$$N_{xc} \cdot T_x = N_{0c} \cdot T_0 + t_{1c} - t_{2c}. \quad (7)$$

Учитывая (6) из (7), можно получить [8]

$$F_{xc} = \frac{N_{xc}}{N_{0c} \cdot T_0 \cdot (1 \pm \frac{\eta}{N_{0c}})} \approx \frac{N_{xc}}{N_{0c} \cdot T_0} \cdot (1 \mp \frac{\eta}{N_{0c}}). \quad (8)$$

Из (8) модуль относительной максимальной методической погрешности дискретности измерения частоты методом совпадения [8]

$$\gamma_c = \eta / N_{0c}. \quad (9)$$

Теоретическое время измерения частоты (t'_c) методом совпадения определяется исходя из заданного уровня ММП и имеет вид [8]

$$t'_c = \eta \cdot T_0 / \gamma_c. \quad (10)$$

Для сравнения метода совпадения и метода прямого счета используется понятие выигрыша по быстродействию [8]. Выигрыш по быстродействию (W_t) определяется как отношение времени измерения частоты методом прямого счета ко времени измерения частоты методом совпадения при одинаковом заданном уровне ММП. Теоретический выигрыш по быстродействию, учитывая (5) и (10), принимает вид

$$W_t = \frac{t_k}{t'_c} = \frac{T_0 \cdot \gamma_c}{\gamma_k \cdot \eta \cdot T_0} = \frac{1}{\eta}. \quad (11)$$

Статистическое моделирование процесса измерения частоты. Проведено сравнение времени измерения частоты методом прямого счета с методом совпадения путем статистического моделирования. Выбрано, что для измерения частоты методом прямого счета и методом совпадения образцовая частота равна единице, т.е. при статистическом моделировании рассматривались частоты, нормированные к образцовой частоте путем деления их на F_0 . Это позволяет переносить результаты моделирования относительных частот на реальную частоту путем умножения относительных частот на значение F_0 . В статье исследованы измеряемые частоты в диапазоне от 10^{-7} до 10^0 . Осуществлена выборка случайных чисел с равномерным распределением по интервалам группировки, которые формируются по логарифмической шкале ($10^{-7}-10^{-6}$, $10^{-6}-10^{-5}$, ..., $10^{-1}-10^0$). В каждом интервале группировки по 10000 точек, т.е. общее количество выборки составляет 70000. В модели принимается, что импульсы измеряемой частоты имеют нулевую скважность, а импульсы образцовой частоты имеют скважность η .

Процесс измерения частоты моделируется следующим образом. Задаются пара конструктивных параметров (скважность, ММП) и значение измеряемой относительной частоты. Процесс измерения начинается с нулевой фазы между импульсами образцовой и измеряемой частот, т.е. процесс измерения начинается с совпадения импульсов образцовой и измеряемой частот. Подсчитывают число периодов образцовой и измеряемой частот от момента начала измерения до каждого последующего

момента совпадения импульсов образцовой и измеряемой частот. В моменты совпадения импульсов вычисляется ММП в соответствии с (9), если вычисленное значение ММП меньше заданного уровня ММП, то измерение заканчивается, вычисляются значение измеряемой частоты и время измерения частоты. Далее таким образом производят измерения на всей выборке частот. Затем один из конструктивных параметров изменяется, производится следующая серия измерения частот методом совпадения на всей выборке частот. Таким образом, перебираются все заданные комбинации конструктивных параметров. Время измерения частоты (t_k) методом прямого счета вычисляется в соответствии с (5) для каждой заданной ММП. Затем вычисляется выигрыш по быстрдействию метода совпадения по сравнению с методом прямого счета [8]:

$$W_m = t_k / t_{mc}, \tag{12}$$

где W_m – выигрыш по быстрдействию метода совпадения, полученный по результатам моделирования; t_{mc} – время измерения частоты методом совпадения, полученное при моделировании. Время, полученное при моделировании, больше, чем вычисленное по (10), вследствие того, что после достижения необходимого количества образцовых периодов для завершения процесса измерения частоты необходимо, чтобы произошло очередное совпадение импульсов образцовой и измеряемой частот, при котором вычисленное значение ММП будет меньше заданного уровня ММП. Поэтому выигрыш, вычисленный по (12), т.е. полученный путем статистического моделирования, меньше вычисленного по (11) – теоретического выигрыша по быстрдействию ($W_m < W_t$).

Принятые значения конструктивных параметров:

- скважность (η) импульсов образцовой частоты: 0,75; 0,5; 0,25; 0,1; 0,075; 0,05; 0,025; 0,01; 0,0075; 0,005; 0,0025; 0,001; 0,00075; 0,0005; 0,00025; 0,0001.
- ММП ($\gamma = \gamma_c = \gamma_k$) измерения частоты: 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001%.

На рис. 2–5 приведены некоторые результаты моделирования, в виде поверхностей, характеризующих выигрыш по быстрдействию метода совпадения по сравнению с методом прямого счета при заданных уровнях ММП (0,1; 0,01; 0,001; 0,0001%). Из представленных результатов моделирования следует, что метод совпадения может работать в широком диапазоне частот. Например, при заданном уровне относительной максимальной методической погрешности дискретности (ММП) 0,01% выигрыш по быстрдействию, превышающий единицу, находится в диапазоне относительных измеряемых частот от $3 \cdot 10^{-4}$ до 10^0 ; при ММП 0,001% – от $3 \cdot 10^{-5}$ до 10^0 ; при ММП 0,0001% – от $3 \cdot 10^{-6}$ до 10^0 . Напомним, что для получения абсолютных частот, необходимо относительные частоты умножить на значение образцовой частоты, например 1 МГц.

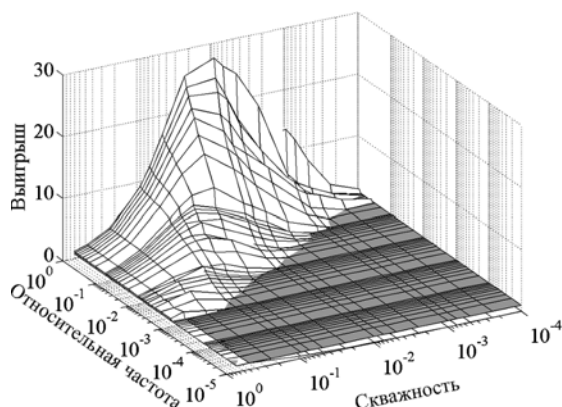


Рис. 2. ММП 0,1%

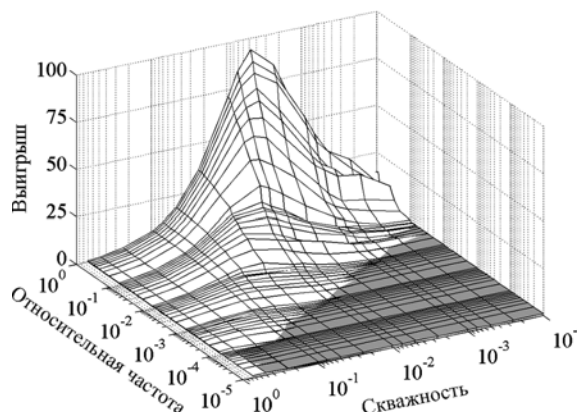
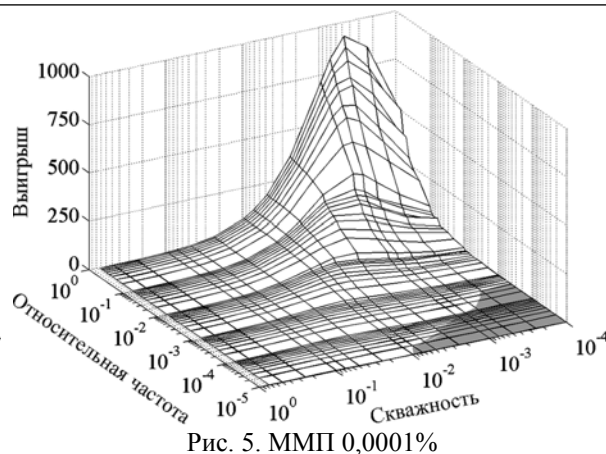
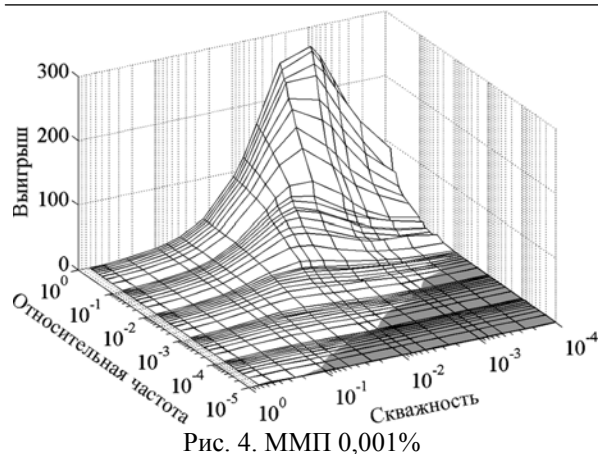


Рис. 3. ММП 0,01%

Анализ результатов моделирования показал, что с уменьшением заданного уровня ММП выигрыш по быстрдействию растет. На относительных частотах, близких к единице, наблюдается наибольший выигрыш по быстрдействию. Например, при заданном уровне ММП 0,1% и скважности 2,5% выигрыш составляет более 25 раз; при ММП 0,01% и скважности 0,5% – более 90 раз; при ММП 0,001% и скважности 0,1% – более 250 раз; при ММП 0,0001% и скважности 0,05% – более 900 раз.



В [8] проведен анализ влияния скажности импульсов на время измерения частоты методом совпадения. Результаты моделирования показали, что выигрыш по быстродействию измерения частоты методом совпадения по сравнению с методом прямого счета зависит от скажности образцовых импульсов. Например, при заданном уровне ММП 0,01% на относительных частотах, близких к единице, выигрыш по быстродействию при скажности 2,5% – более 35 раз; при скажности 0,5% – более 90 раз; при скажности 0,1% – более 49 раз; при скажности 0,05% – более 29 раз.

Заключение. По результатам моделирования сделаны следующие выводы. Измерение частоты методом совпадения может быть использовано в широком диапазоне частот.

Диапазон частот, в котором наблюдается выигрыш по быстродействию при измерении частоты методом совпадения по сравнению с методом прямого счета, увеличивается с уменьшением относительной максимальной методической погрешности дискретности.

Выигрыш по быстродействию при измерении частоты методом совпадения растет с увеличением измеряемой частоты и с уменьшением относительной максимальной методической погрешности дискретности.

Выигрыш по быстродействию при измерении частоты методом совпадения по сравнению с методом прямого счета зависит от скажности образцовых импульсов. Показано, что существуют оптимальные значения скажности, при которых достигается наибольший выигрыш по быстродействию при измерении частоты методом совпадения по сравнению с методом прямого счета. Оптимальные значения скажности зависят от уровня заданной относительной максимальной методической погрешности дискретности и диапазона измеримых частот.

Литература

1. Ермолов Р.С. Цифровые частотомеры. – Л.: Энергия, 1973. – 152 с.
2. Цифровые измерительные приборы / Под ред. В.М. Шляндина. – М.: Энергия, 1972. – 400 с.
3. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые). – К.: Вища шк., 1986. – 504 с.
4. Тырса В.Е. Снижение погрешностей преобразования аналоговых величин в кодированный временной интервал // Измерительная техника. – 1975. – №3. – С. 26–27.
5. Дюшняшев В.В. О погрешности измерения частоты на принципе совпадения импульсов / В.В. Дюшняшев, В.Е. Тырса // Измерительная техника. – 1981. – №4. – С. 42–44.
6. Зеня А.Д. Анализ погрешностей сличения частот по методу совпадения импульсов / А.Д. Зеня, В.Е. Тырса // Измерительная техника. – 1983. – №7. – С. 49–51.
7. А. с. 482693 СССР, МКИ G01R23/10, H03D13/00. Способ сличения частот / В.В. Дюшняшев, В.Е. Тырса. (СССР) – № 1882014/26–9; заявл. 29.01.73; опубл. 30.08.75. – Бюл. № 32. – 4 с.
8. Лаптев Д.В. Влияние скажности импульсов на быстродействие метода совпадения при измерении частоты // Ползуновский вестник. – 2013. – №2. – С. 162–165.

Лаптев Дмитрий Владимирович

Ассистент каф. защиты информации Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)

Тел.: 8 (383) 346-08-53

Эл. почта: dimanka217@yandex.ru

Пасынков Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор каф. защиты информации НГТУ

Тел.: 8 (383) 346-08-53

Эл. почта: pasinkovnstu@mail.ru

Laptev D.V., Pasyнков Y.A.

Statistical research of the measuring the frequency by coincidence method

The research represents the dependence of time frequency measurement by the coincidence method on a mathematical model of duty cycle and level of preset discrete maximum methodical relative peak error. Statistical modeling was carried out under the conditions that the measured frequency is less than reference frequency, frequency measurement process starts with zero phase between pulses reference and measured frequencies. We performed the comparison of the incremental method for speed measurement frequency (measured in an integer number of periods measured frequency [1–3]), and the measurement of frequency by coincidence method. We used the concept of «gain in performance» [8], which is defined as the ratio time of the frequency measurement by the incremental method to time of the frequency measurement by the coincidence method. According to the results of modeling there are the following conclusions. Measure frequency by coincidence method can be used over a wide frequency range. The frequency range in which there is «gain in performance», coincidence method for frequency measuring compared to the incremental method, increases with decreasing preset level of the discrete maximum methodical relative peak error. «Gain in performance» coincidence method for measuring the frequency increases with the increase of the measured frequency and decreasing preset level of the discrete methodical relative peak error. «Gain in performance» coincidence method for frequency measuring compared with the classical method depends on the duty cycle. As in [8] that there are optimum values of duty cycle, which achieves the highest «gain in performance» coincidence method for frequency measuring, compared to the incremental method. The optimal values depend on the duty cycle of a preset level of the discrete methodical relative peak error and measurable frequency range.

Keywords: statistical modeling, model of frequency measurement, measurement frequency, digital frequency meters, gain in performance, coincidence method, duty cycle, discrete methodical relative peak error.
