

В. Ю. Трофимов, Л. Е. Шахмейстер

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО ДАТЧИКА

V. Yu. Trofimov, L. E. Shakhmeyster

ERROR ARISING WHEN THE TRANSFORMATION COEFFICIENT OF THE DIFFERENTIAL FREQUENCY SENSOR IS MEASURED

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Целью работы является измерения коэффициента преобразования дифференциального частотного датчика с помощью двух возможных методов и анализ полученных погрешностей связанных с использованием этих методов. *Материалы и методы.* Измерение коэффициента преобразования дифференциального частотного датчика целесообразно осуществлять либо измерением разностной частоты каналов датчика с дополнительным измерением задержки поступления импульсов со 2-го канала относительно импульсов с 1-го канала датчика в начале и конце периода измерения разностной частоты, либо измерением частот каждого канала по отдельности. *Результаты.* Вариант измерения разностной частоты без учета задержек имеет погрешность дискретности определения коэффициента преобразования, примерно в 20 раз больше погрешности других вариантов. Погрешность определения коэффициента преобразования, обусловленная дискретностью измерений, при измерении разностной частоты с учетом измерения задержек равна аналогичной погрешности при измерении частот каждого канала датчика. *Выводы.* Погрешности измерения коэффициента преобразования датчика при использовании рассмотренных методов практически одинаковы.

A b s t r a c t. *Background.* The aim is the conversion coefficient of the differential frequency sensor using two possible methods and the analysis of the obtained errors associated with the use of these methods. *Materials and methods.* Measurement of the transformation coefficient of the differential frequency sensor either both the differential frequency of sensor's channels and the second channel impulses delay in comparison with the first channel impulses are measured at the beginning and at the end of differential frequency measured period or each channel's frequency is measured separately. *Results.* The measurement of the difference frequency without delay has an error of discreteness determination of the conversion factor is about 20 times larger than the error of other options. The accuracy of determining the conversion factor due to the discreteness of the measurements, the measurement of the difference frequency, given measurements of the delays equals that of the error in the measurement frequency of each sensor channel. *Conclusions.* Errors arising when the transformation coefficient of the differential frequency sensor is measured with both methods differ a little.

К л ю ч е в ы е с л о в а: частотные датчики, погрешности при определении коэффициента преобразования, обработка сигналов датчиков.

К е у w o r d s: frequency sensors, errors the transformation coefficient of the differential frequency, sensor signals processing.

1. Определение коэффициента преобразования

В измерительной технике широкое применение нашли дифференциальные частотные датчики различных физических величин. Эти датчики имеют два канала, разность частот сигналов которых соответствует информации об измеряемом параметре [1–4].

Выходным сигналом датчика, определяющим значение измеряемого параметра, является частота $F_{\text{вых}}$:

$$F_{\text{вых}} = F_{\text{и}} - F_0, \quad (1)$$

где $F_0 = f_{10} - f_{20}$ – начальная разностная частота сигналов датчика, соответствующая нулевому или начальному значению измеряемой датчиком физической величины; f_{10} , f_{20} – выходные частоты сигналов 1-го и 2-го каналов датчика соответственно, для нулевого или начального значения измеряемой физической величины; $F_{\text{и}} = f_1 - f_2$ – разностная частота сигналов каналов датчика при измерении датчиком физической величины; f_1 , f_2 – выходные частоты сигналов 1-го и 2-го каналов датчика соответственно при измерении физической величины.

С учетом входящих в выражение (1) величин

$$F_{\text{вых}} = (f_1 - f_2) - (f_{10} - f_{20}). \quad (2)$$

Коэффициент преобразования K_{pr} датчика определяется как

$$K_{pr} = \frac{F_{\text{вых}}}{P}, \quad (3)$$

где $F_{\text{вых}}$ – значение выходного сигнала датчика, соответствующее значению измеряемой им физической величины, равному P .

При определении коэффициента преобразования датчика первоначально определяется значение $F_0 = f_{10} - f_{20}$ при воздействии на датчик физической величины, принимаемой за нулевое или начальное значение, затем на датчик воздействует физическая величина P , имеющая эталонное значение, определяется значение $F_{\text{и}} = f_1 - f_2$, по формуле (1) вычисляется $F_{\text{вых}}$, после чего осуществляется вычисление значения K_{pr} по формуле (3).

В работе [5] определены с точностью до плотностей распределения временные интервалы между опросами одного и того же периферийного устройства и опросами различных устройств на основе модели формирования транзакций в цифровых контроллерах как результата блужданий по состояниям полумарковского процесса, каждое из которых моделирует интерпретацию соответствующего оператора управляющего алгоритма. Однако вопросы точности измерения временных интервалов и частот, необходимых при измерении коэффициента преобразования частотных датчиков, для различных вариантов измерения не определены.

Возможны два варианта реализации выражений для выходной частоты датчика.

По варианту 1 осуществляется измерение разностных частот сигналов датчика $F_{\text{и}}$, F_0 с последующим их вычитанием в соответствии с выражением (1).

По варианту 2 осуществляются измерения частот f_{10} , f_{20} , f_1 , f_2 сигналов, а затем осуществляется вычитание частот в соответствии с выражением (2).

Рассмотрим основные составляющие погрешности определения коэффициента преобразования для указанных вариантов измерения.

2. Составляющие погрешности определения коэффициента преобразования

Относительная погрешность $\delta_{K_{pr}}$ определения коэффициента преобразования K_{pr} датчика равна относительной погрешности $\delta_{F_{\text{вых}}}$ определения его выходного сигнала $F_{\text{вых}}$. Это следует из выражения (3):

$$\delta_{K_{pr}} = \delta_{F_{\text{вых}}}.$$

Погрешность определения коэффициента преобразования имеет две основные составляющие: одна из них обусловлена дискретностью преобразования временных интервалов, периодов и частот в цифровое значение, а вторая обусловлена нестабильностью используемого при измерениях задающего генератора.

3. Составляющая погрешности, обусловленная дискретностью преобразований

3.1. Погрешность при измерении разностной частоты

При измерении разностной частоты датчика погрешность определяется параметрами используемой схемы вычитания частот.

Существуют самые разнообразные схемы вычитания частот [6, 7].

При использовании схемы вычитания частот, например на D -триггере, дискретность формирования выходных импульсов схемы вычитания определяется периодом сигналов одного из каналов датчика.

Формирование импульсов схемы вычитания проиллюстрировано циклограммой сигналов (рис. 1).

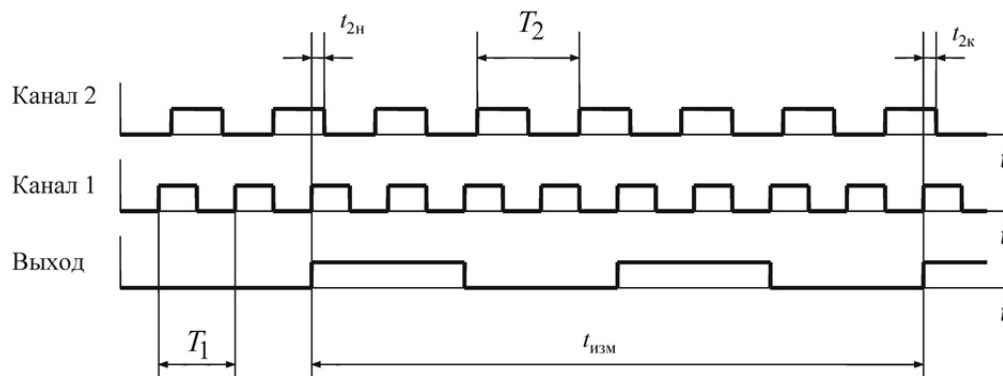


Рис. 1. Циклограмма сигналов схемы вычитания

Можно показать, что разностная частота F при использовании схемы вычитания на D -триггере равна

$$F = \frac{N - (t_{2н} - t_{2к})f_2}{t_{изм}}, \quad (4)$$

где N – число импульсов разностной частоты, поступающих за время измерения $t_{изм}$; $t_{2н}, t_{2к}$ – задержки начала и конца поступления импульсов канала 2 относительно импульсов канала 1.

Если не учитывать задержки $t_{2н}, t_{2к}$, то возникает относительная погрешность $\delta_{K_{пр}}(F_{и}, F_0)$ определения коэффициента преобразования $K_{пр}$, с учетом вероятностных законов распределения составляющих [8] равная

$$\delta_{K_{пр}}(F_{и}, F_0) = \delta l_{F_{вых}} = \frac{1}{F_{вых} N} \left(\frac{F_{и}^2}{f_1} S_{21} - \frac{F_0^2}{f_{10}} S_{22} \right), \quad (5)$$

где S_{21}, S_{22} – лежащие в диапазоне ± 1 разности двух случайных величин, распределенных по закону равномерной плотности в диапазоне от 0 до 1, при измерении разностных частот $F_{и}, F_0$ соответственно.

В выражении (5) учтено, что максимальные значения задержек определяются разностью периодов $T_2 = \frac{1}{f_2}$ и $T_1 = \frac{1}{f_1}$ сигналов второго и первого каналов датчика, $(t_{2к}, t_{2н})_{\max} = T_2 - T_1$,

а отношения $\frac{t_{2к}}{T_2 - T_1}, \frac{t_{2н}}{T_2 - T_1}$ – случайные величины, изменяющиеся в диапазоне (0, 1) и распределенные по закону равномерной плотности.

Предельные значения составляющей относительной погрешности определения $K_{пр}$, обусловленные пренебрежением задержек поступления импульсов 2-го канала датчика, равны

$$\delta l_{F_{вых\ пред}} = \delta_{K_{пр}}(F_{и}, F_0)_{пред} = \pm \frac{1}{F_{вых} N} \left(\frac{F_{и}^2}{f_1} + \frac{F_0^2}{f_{10}} \right). \quad (6)$$

Рассмотрим погрешности измерения разностной частоты при учете задержек $t_{2н}, t_{2к}$.

Каждая из указанных задержек измеряется с погрешностью, обусловленной дискретностью h , и состоит из составляющих, определяемых началом и концом измерения задержек.

Из выражения (4) относительная погрешность $\delta_{K_{пр}}(t_{2н} - t_{2к})$ определения $K_{пр}$, обусловленная погрешностью дискретности измерения $t_{2н}, t_{2к}$, равна

$$\delta_{K_{пр}}(t_{2н} - t_{2к}) = \frac{h}{NF_{вых}} (F_{и} S_{21} f_2 - F_0 S_{22} f_{20}). \quad (7)$$

Предельные значения указанной погрешности равны

$$\delta_{K_{пр\ пред}}(t_{2н} - t_{2к}) = \pm \frac{h}{NF_{вых}} (F_{и} f_2 + F_0 f_{20}). \quad (8)$$

Разумеется, осуществлять измерение задержек $t_{2н}, t_{2к}$ можно лишь при $h \ll T_2 - T_1$.

Составляющая относительной погрешности $\delta_{K_{пр}}(t_{изм})$, обусловленная дискретностью h измерения значения $t_{изм}$, определится выражением

$$\delta_{K_{пр}}(t_{изм}) = \frac{h}{NF_{вых}} (F_{и}^2 S_{21} + F_0^2 S_{22}). \quad (9)$$

Предельные значения этой составляющей равны

$$\delta_{K_{пр\ пред}}(t_{изм}) = \pm \frac{h}{NF_{вых}} (F_{и}^2 + F_0^2). \quad (10)$$

3.2. Погрешность при измерении частот сигналов каждого канала датчика

При измерении частот каждого канала составляющая погрешности $\delta_{K_{пр}}(f)$ определения $K_{пр}$, обусловленная дискретностью h измерения частот каналов, равна

$$\delta_{K_{пр}}(f) = \frac{h}{NF_{вых}} (f_1^2 S_{21} + f_2^2 S_{22} + f_{10}^2 S_{23} + f_{20}^2 S_{24}), \quad (11)$$

где $S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}$ – лежащие в диапазоне ± 1 разности двух случайных величин, распределенных по закону равномерной плотности в диапазоне от 0 до 1, при измерении частот f_1, f_2, f_{10}, f_{20} соответственно.

Ее предельное значение равно

$$\delta_{K_{пр\ пред}}(f) = \pm \frac{h}{NF_{вых}} (f_1^2 + f_2^2 + f_{10}^2 + f_{20}^2). \quad (12)$$

4. Составляющая погрешности, обусловленная нестабильностью частоты генератора

В общем виде определение частоты F какого-либо сигнала осуществляется измерением времени $t_{изм}$ поступления N импульсов этой частоты.

Составляющая погрешности $\delta_F(f_r)$ измерения частоты F , обусловленная отклонением δ_{f_r} от номинального значения частоты генератора f_r , используемого для измерения временного интервала $t_{изм}$, определяется выражением

$$\delta_F(f_r) = \delta_{f_r}.$$

Разделим отклонение δ_{f_r} на две составляющие:

$$\delta_{f_r} = \delta 1_{f_r} + \delta 2_{f_r},$$

где $\delta 1_{f_r}$ – отклонение частоты генератора от номинального значения при первом измерении; $\delta 2_{f_r}$ – кратковременная нестабильность частоты генератора в процессе измерений относительно его частоты при первом измерении.

С учетом этого относительная погрешность $\delta_{K_{np}}(f_r)$, обусловленная нестабильностью используемого генератора при измерении разностных частот каналов датчика, равна

$$\delta_{K_{np}}(f_r) = \delta 1_{f_r} + \frac{F_{и}}{F_{вых}} \delta 2_{f_r}. \quad (13)$$

Аналогичные выражения запишем для варианта измерения частот (периодов) отдельно каждого канала датчика, учитывая, что измерения первого и второго каналов осуществляются одновременно:

$$\delta_{K_{np}}(f_r) = \frac{f_1}{F_{вых}}(\delta 1_{f_r} + \delta 2_{f_r}) - \frac{f_2}{F_{вых}}(\delta 1_{f_r} + \delta 2_{f_r}) - \frac{f_{10}}{F_{вых}}\delta 1_{f_r} + \frac{f_{20}}{F_{вых}}\delta 1_{f_r},$$

$$\delta_{K_{np}}(f_r) = \delta 1_{f_r} + \frac{F_{и}}{F_{вых}}\delta 2_{f_r}.$$

Получили выражение, совпадающее с выражением (13).

Исходя из этого, можно заключить, что влияние нестабильности генератора, с помощью которого осуществляется измерение частот, при измерении разностной частоты и частоты каждого канала одинаково.

5. Пример параметров датчика

Возьмем следующие параметры датчика: $f_{10} = 16\,000$ Гц, $f_{20} = 15\,200$ Гц, $f_1 = 16\,050$ Гц, $f_2 = 15\,150$ Гц, $h = 0,2$ мкс, $\delta_{f_{r1}} = \pm 10^{-5}$, $\delta_{f_{r2}} = \pm 10^{-6}$, $N = 1000$ – при измерении разностной частоты.

Находим $F_u = 900$ Гц, $F_0 = 800$ Гц, $F_{вых} = 100$ Гц. При измерении разностной частоты $N = 1000$, $t_{изм} = \frac{N}{F_0} = \frac{1000}{800} = 1,25$ с.

При измерении частот каждого канала время измерения берется тем же.

Результаты расчета, проведенные по формулам (5)–(13) с использованием метода Монте-Карло [9] и пакета Matlab [10] для 20 000 опытов, приведены в табл. 1 и на рис. 2–4.

Таблица 1

Погрешность измерения коэффициента преобразования

Параметр		Вариант измерения		
		Разностная частота без учета задержек	Разностная частота с учетом задержек	Частоты каждого канала
Погрешность дискретности, %	min	–0,048	–0,002	–0,0019
	max	0,048	0,002	0,0019
	Среднеквадратическое отклонение, σ	0,0128	0,0005	0,0005
Предельная погрешность дискретности, $\pm$		0,091	0,0053	0,0053
Нестабильность генератора, $\pm$, %	долговременная	0,001		
	кратковременная	0,0009		
	суммарная	0,0019		

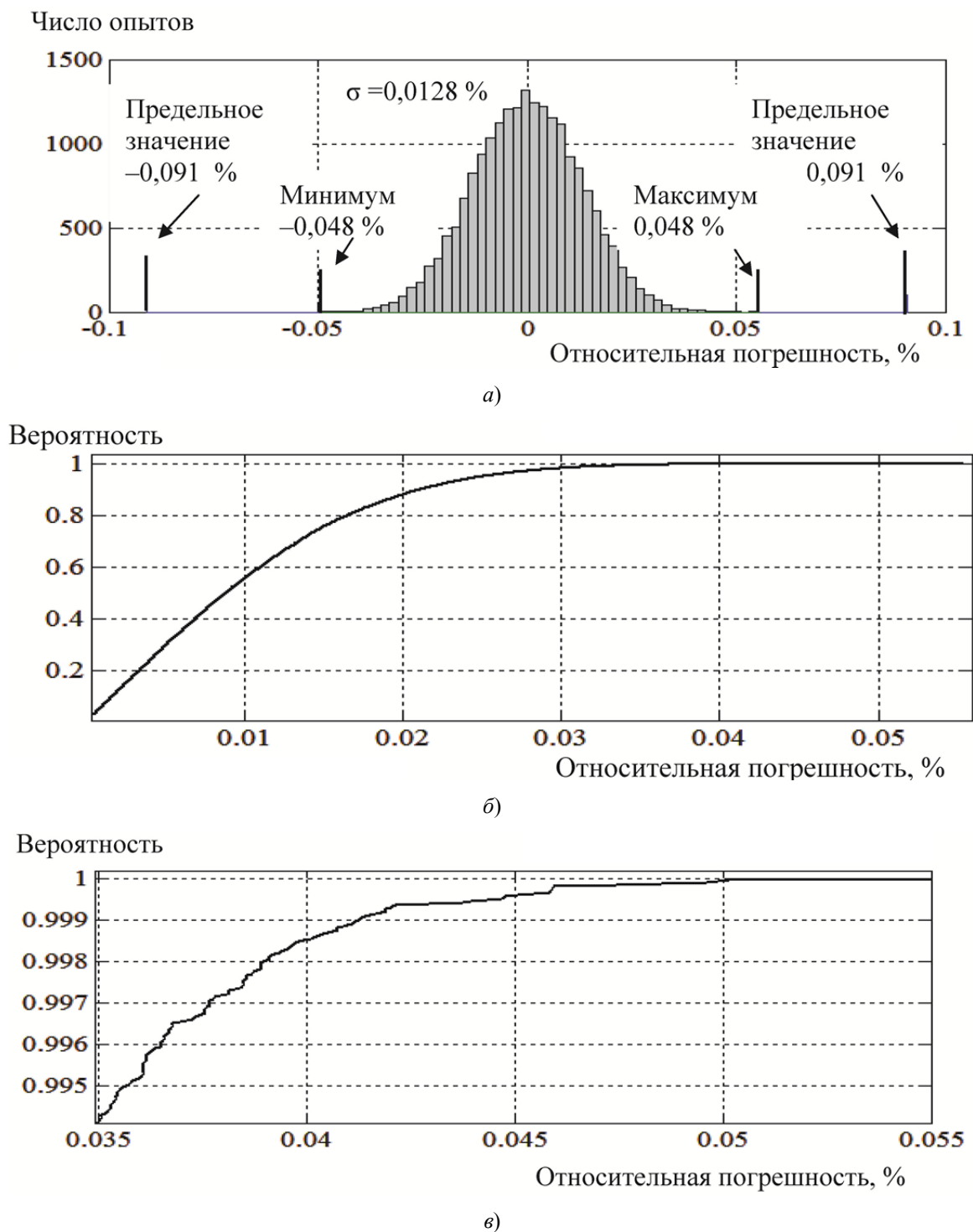
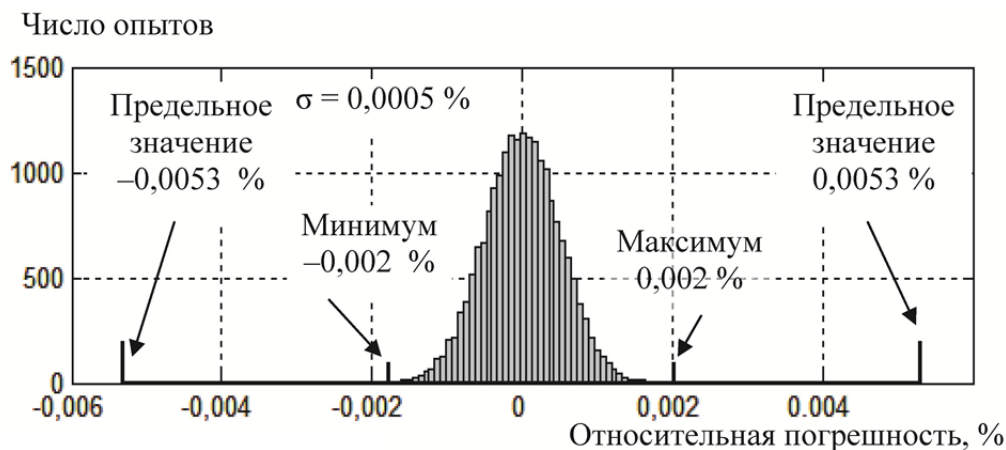


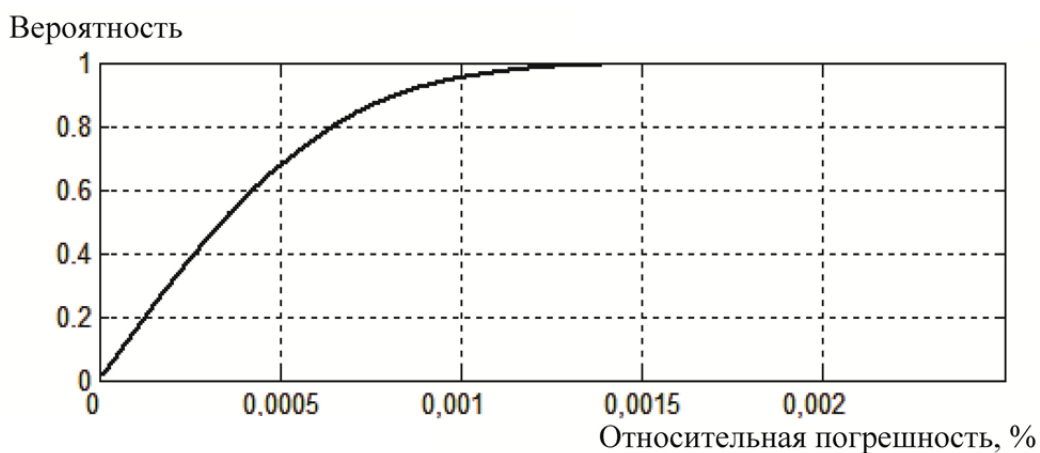
Рис. 2. Составляющая относительной погрешности измерения коэффициента преобразования при измерении разностной частоты и отсутствии учета задержек формирования импульсов второго канала датчика:
 а – гистограмма распределения погрешности при 20 000 опытах; б – распределение погрешности;
 в – распределение погрешности для малых вероятностей

Из данных табл. 1 и рис. 2–4 следует:

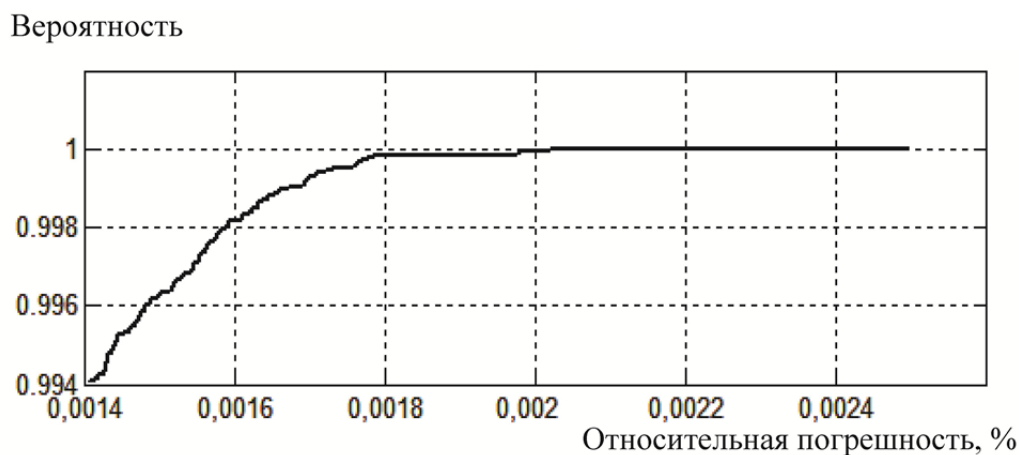
- 1) вариант измерения разностной частоты без учета задержек имеет погрешность дискретности определения коэффициента преобразования, примерно в 20 раз больше погрешности других вариантов;
- 2) погрешность определения коэффициента преобразования, обусловленная дискретностью измерений, при измерении разностной частоты с учетом измерения задержек равна аналогичной погрешности при измерении частот каждого канала датчика.



а)



б)



в)

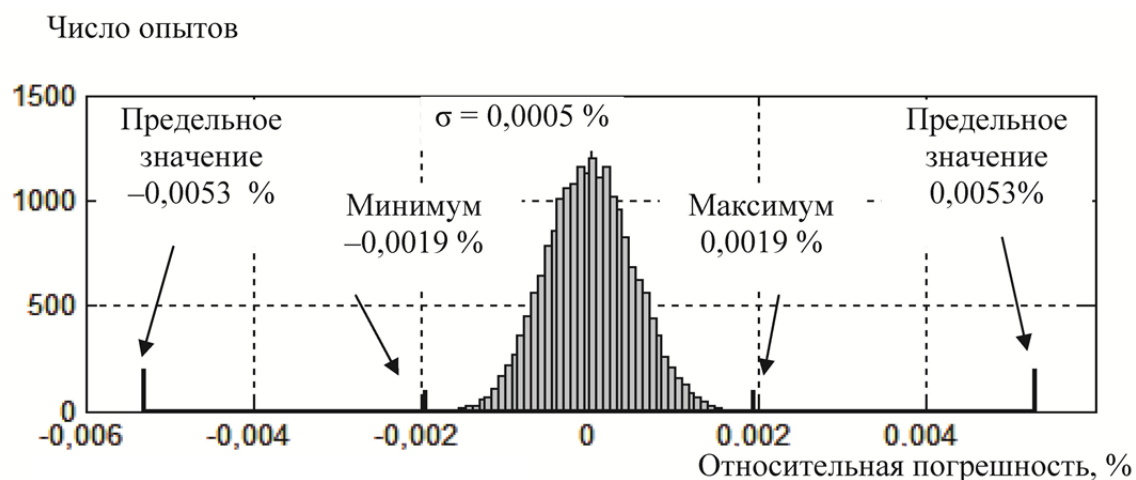
Рис. 3. Составляющая относительной погрешности измерения коэффициента преобразования при измерении разностной частоты и учете задержек формирования импульсов второго канала датчика:
 а – гистограмма распределения погрешности при 20 000 опытах; б – распределение погрешности;
 в – распределение погрешности для малых вероятностей

Примерное равенство погрешностей утверждения 2 может быть показано и аналитическим сравнением выражений (7) и (11).

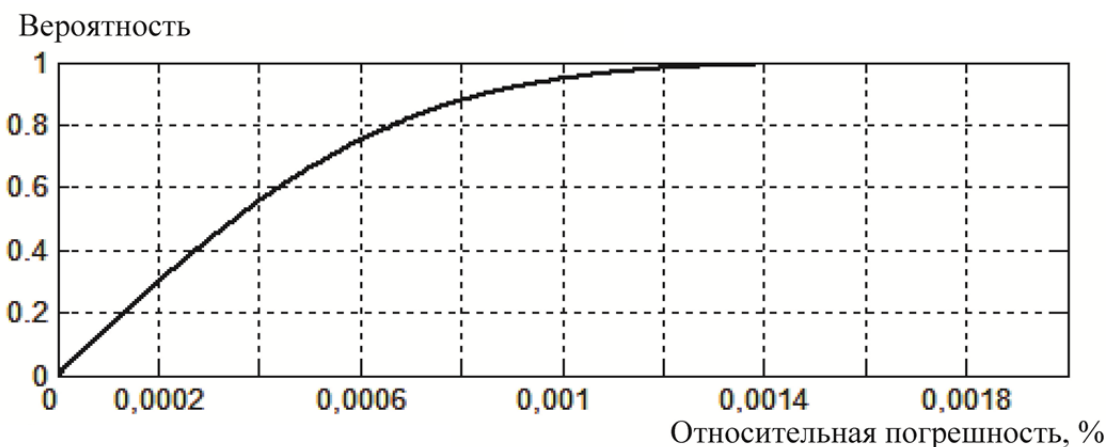
Подытоживая проведенные анализ, можно сделать следующие выводы:

1. Измерение коэффициента преобразования дифференциального частотного датчика целесообразно осуществлять либо измерением разностной частоты каналов датчика с допол-

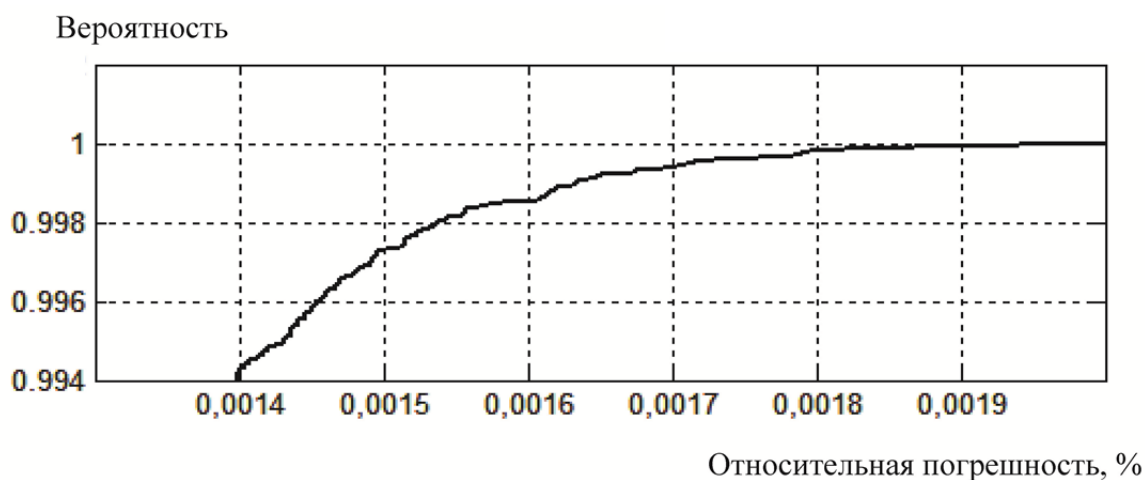
нительным измерением задержки поступления импульсов 2-го канала относительно импульсов 1-го канала в начале и конце измерения разностной частоты, либо измерением частот каждого канала.



а)



б)



в)

Рис. 4. Составляющая относительной погрешности измерения коэффициента преобразования при измерении частот каждого канала:

а – гистограмма распределения погрешности при 20 000 опытах;

б – распределение погрешности; в – распределение погрешности для малых вероятностей

2. В приведенном примере в вариантах, указанных в п. 1 выводов, предельная погрешность дискретности при времени измерения около 1,25 с равна $\pm 0,0053$ %, максимальная – $\pm 0,002$ %, среднеквадратическое отклонение 0,0005 %.

3. Учет вероятностных законов распределения составляющих погрешности дискретности дает значение погрешности определения коэффициента преобразования примерно в 2,5 раза меньше предельных значений.

4. Составляющая погрешности определения коэффициента преобразования, обусловленная долговременной и кратковременной нестабильностью генератора во всех вариантах измерения одинакова и в приведенном примере равна $\pm 0,0019$ %.

Список литературы

1. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
2. Патент RU 2377575 С2 Российская Федерация. Частотный микромеханический акселерометр / Крестьянинов А. А., Смирнов Г. Г. – № 2007133247/28 ; заявл. 04.09.2007 ; опубл. 27.12.2009.
3. Аппаратно-программное интегрирование сигналов дифференциального частотного датчика / Л. Е. Шахмейстер, В. Ю. Трофимов, С. М. Манин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 2 (4). – С. 10–16.
4. Трофимов, В. Ю. Предварительная обработка сигналов пьезокварцевых датчиков / В. Ю. Трофимов, Л. Е. Шахмейстер // Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения : сб. тр. Междунар. молодежной конф., г. Анапа, 23–27 сентября 2013 г. – Ростов н/Д : Изд-во Южного федерального университета, 2013. – С. 137–139.
5. Ларкин, Е. В. Определение временных интервалов в алгоритмах управления / Е. В. Ларкин, А. Н. Ивутин // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 5.
6. Шахмейстер, Л. Е. Цифро-частотные и времяимпульсные преобразователи информации / Л. Е. Шахмейстер. – М. : Книжный дом университета, 2011. – 252 с.
7. Данчеев, В. П. Цифро-частотные вычислительные устройства / В. П. Данчеев. – М. : Энергия, 1976. – 176 с.
8. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – 6-е изд. стер. – М. : Высшая школа, 1999. – 576 с.
9. Ермаков, С. М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике / С. М. Ермаков. – СПб., 2009. – 192 с.
10. Иглин, С. П. Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB / С. П. Иглин. – Харьков, Украина : Изд-во НТУ «ХПИ», 2006. – 612 с.

Трофимов Вадим Юрьевич

кандидат технических наук,
начальник отделения 2,
Научно-производственное объединение «Поиск»
(Россия, Ленинградская область,
Мурино, ул. Лесная, 3)
E-mail: Trovadjj@ya.ru

Trofimov Vadim Yur'evich

candidate of technical sciences,
head of department 2,
Scientific and Production Association «Poisk»
(3 Lesnaya street, Myrino, Leningrad region, Russia)

Шахмейстер Леонид Ефимович

доктор технических наук,
заместитель генерального директора по НИОКР,
Научно-производственное объединение «Поиск»
(Россия, Ленинградская область,
Мурино, ул. Лесная, 3)
E-mail: lsh43@mail.ru

Shakhmeyster Leonid Efimovich

doctor of technical sciences, deputy director general
for research and development,
Scientific and Production Association «Poisk»
(3 Lesnaya street, Myrino, Leningrad region, Russia)

УДК 681.2.088

Трофимов, В. Ю.

Погрешность определения коэффициента преобразования дифференциального частотного датчика / В. Ю. Трофимов, Л. Е. Шахмейстер // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 42–50.