

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В. В. Макаров. Анализ помехоустойчивости интеллектуального преобразователя «частота-код» 3

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

С. В. Двойнишников, Д. В. Куликов, В. Г. Меледин. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы 15

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В. М. Шахпаронов, А. Г. Пархомов, О. В. Карагюз. Спектральный анализ температуры радиопередатчиков малого космического аппарата «Университетский» 28

В. А. Сергеев, В. В. Юдин. Измерение тепловых параметров полупроводниковых изделий с применением амплитудно-импульсной модуляции греющей мощности 37

CONTENTS

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

V. V. Makarov. The noise immunity investigation of intellectual «frequency-code» converter 3

LINEAR AND UNULAR MEASUREMENTS

S. V. Dvoynishnikov, D. V. Kulikov, V. G. Meledin. Optoelectronic method of surface profile contactless reconstruction for complex form 3D objects 15

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

V. M. Shakhparonov, A. G. Pakhomov, O. V. Karagioz. Spectral analysis of microsatellite «Universitetsky» radio transmitters temperature 28

V. A. Sergeev, V. V. Yudin. Measurement of semiconductor products heat parameters using the heating power amplitude-pulse modulation 37

Редколлегия журнала «Измерительная техника»

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-21573 от 15.07.2005

Адрес редакции: 105062 Москва, Лялин пер., 6; тел. 917-27-76;

e-mail: izmt@gostinfo.ru; www.gostinfo.ru

Адрес для переписки: 123995 Москва, Гранатный пер., 4.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», редакция журнала «Измерительная техника»

Редактор И. Л. Грачева

Технический редактор Г. А. Теребинкина

Корректор В. Е. Несмерова

Компьютерная верстка М. С. Матвеевой

Сдано в набор 24.03.2010. Подписано в печать 15.04.2010. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. п. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,70. Тир. 430 экз. Зак. 292.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.

Набрано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» на ПЭВМ

Филиал ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» – тип. «Московский печатник»,

105062 Москва, Лялин пер., 6.

© Измерительная техника, 2010

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

621.317.72

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «ЧАСТОТА-КОД»

В. В. МАКАРОВ

Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет), Москва, Россия, e-mail: Makarov.vv@yandex.ru

Исследовано влияние помех на достоверность результатов преобразований интеллектуального преобразователя «частота-код». Предложен алгоритм обнаружения и коррекции сбоев в его преобразованиях.

Ключевые слова: помеха нормального вида, сбой, вероятность, экстраполяция.

The influence of noise upon conversion results reliability for intellectual «frequency-code» converter is investigated. The conversion faults identification and correction algorithm is proposed.

Key words: normal-mode noise, fault, probability, extrapolation.

Преобразователи «частота-код» широко применяются в системах автоматизированного управления и информационно-измерительных системах для преобразования частоты импульсной последовательности, поступающей с выхода частотных датчиков физических величин, в двоичные коды. В [1] было предложено использовать с этой целью интеллектуальный преобразователь «частота-код» (ИПЧК), который обладает широким рабочим диапазоном преобразуемых частот $\left[\hat{f}_x, \hat{f}_x \right] = [10 \text{ Гц}; 32 \text{ МГц}]$, выполняет 14-разрядное преобразование с частотой 250 с^{-1} в большей части рабочего диапазона (при $f_x \geq 500 \text{ Гц}$). Его интеллектуальные функции включают адаптацию к преобразуемой частоте, самодиагностику и автокалибровку.

Метрология № 4, 2010

3

Ниже дан анализ помехоустойчивости ИПЧК. Исследовано влияние помех нормального вида (ПНВ), искажающих преобразуемый входной частотный сигнал, на достоверность результатов диагностики и преобразований этого устройства.

На рис. 1, а приведена упрощенная структурная схема ИПЧК, на которой показаны его входные блоки: электронный трехпозиционный ключ K и триггер Шмидта $ТШ$, статическая характеристика преобразования последнего представлена на рис. 1, б.

В рабочем режиме преобразования с входа «1» ключа K на вход $ТШ$ поступает аддитивная смесь полезного частотного сигнала $u(t)$ и ПНВ $n(t)$. При диагностике с входа «0» ключа на вход $ТШ$ подается диагностический сигнал $g(t)$, а при калибровке на его вход с входа «2» ключа – калибровочный сигнал $k(t)$. При этом можно использовать как внутренние, так и внешние по отношению к ИПЧК источники диагностического и калибровочного сигналов. Результаты преобразования, диагностики и калибровки передаются с выхода ИПЧК в центральную ЭВМ (ЦЭВМ).

Частотный сигнал $u(t)$ полагаем положительным, близким по форме к прямоугольным импульсам типа меандра с амплитудой U_m , следующим с частотой $f_x \in [\hat{f}_x, \hat{f}_x]$. Длительность передних и задних фронтов $\tau_\phi \leq \alpha T_x$, где $\alpha \ll 1$ – доля фронтов по отношению к периоду следования импульсов T_x .

Рассматриваем ПНВ как стационарный центрированный флуктуационный случайный процесс типа белого шума. С учетом ограничения

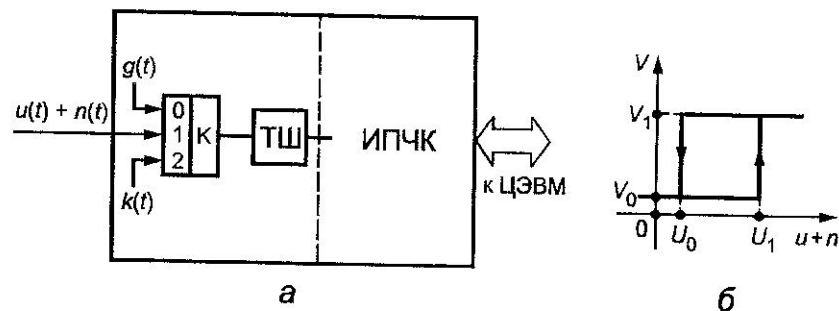


Рис. 1. Упрощенная структурная схема ИПЧК (а) и статическая характеристика преобразования триггера Шмидта (б)

сверху частотой $3\hat{f}_x$ полосы пропускания блоков ИПЧК помеху $n(t)$ полагаем «розовым» шумом в полосе частот $[0, 3\hat{f}_x]$ с нормированной автокорреляционной функцией

$$r_n(\tau) = \frac{Ra \sin(a\tau)}{\pi a\tau},$$

где $a = 6\pi \hat{f}_x$.

Максимальный интервал корреляции помехи

$$\hat{\tau}_{к.и} = \pi/a = \left(6\hat{f}_x\right)^{-1}. \quad (1)$$

Аддитивная смесь $u(t) + n(t)$ проходит через ключ K на вход $ТШ$, который имеет характеристику преобразования с нижним U_0 и верхним U_1 порогами срабатывания (см. рис. 1). Считаем, что выполняются необходимые соотношения

$$U_0 > 0; \quad U_1 \gg U_0; \quad U_1 - U_0 \gg \sigma_n; \quad U_m > U_1,$$

где σ_n – среднее квадратическое значение (СКЗ) помехи.

Возможны две ситуации возникновения сбояв в работе ИПЧК под воздействием ПНВ [1]:

1. В отсутствие частотного сигнала начальная адаптация или рабочий режим преобразований;
2. В присутствии частотного сигнала текущие преобразования частоты в код.

Под сбоем понимаем внезапное превышение допустимого значения погрешности преобразования под влиянием помехи, после которого значение погрешности преобразования может вновь стать допустимым.

Ситуация 1. В режимах начальной адаптации или в рабочем частотный сигнал может отсутствовать вследствие выхода из строя датчика, или линии его связи с ИПЧК, или электронного ключа. С целью обнаружения этого проводится периодическая диагностика ИПЧК [1].

Если частотный сигнал не поступил на вход $ТШ$, то отсутствует заполняемый счетными импульсами временной интервал (строб напряжения) на входе процессора внешних событий (ПВС) микроконтроллера, входящего в состав ИПЧК, за время текущего преобразования

$T_{пр}$. В рабочем режиме время преобразований не превышает значение $2/\hat{f}_x$; в режиме начальной адаптации при коэффициенте деления частоты $m_n = 4$ время преобразования $T_{пр} = 8/\hat{f}_x$ [1]. Из дальнейшего анализа следует, что вероятность сбоев больше в случае текущего преобразования. Поэтому в дальнейшем принимаем

$$T_{пр} = 2/\hat{f}_x. \quad (2)$$

Для упрощения анализа заменяем помеху $n(t)$ последовательностью некоррелированных между собой дискретных отсчетов, следующих с временным шагом, равным максимальному интервалу корреляции $\hat{\tau}_{к.л}$. Тогда число отсчетов за время преобразования с учетом (1) и (2) определяется как

$$N = \left[T_{пр} / \hat{\tau}_{к.л} \right] \approx 12 \hat{f}_x / \check{f}_x, \quad (3)$$

где $[\cdot]$ – операция взятия целой части.

Потребуем, чтобы в отсутствие частотного сигнала $u(t)$ за время преобразования $T_{пр}$ отсчеты помехи ПНВ не превышали верхний порог срабатывания ТШ. Тогда вероятность работы ИПЧК без сбоев (правильной работы)

$$P_{б.сб} = (P(n < U_1))^N.$$

Для получения малых вероятностей сбоев необходимо выполнение соотношения $z = U_1/\sigma_n \geq 5$. Тогда с помощью приближенного выражения интеграла вероятностей в случае $0,4N \exp(-0,5z^2)/z \ll 1$ получим [2]:

$$P_{б.сб} \approx (1 - 0,4 \exp(-0,5z^2)/z)^N \approx 1 - 0,4N \exp(-0,5z^2)/z.$$

С учетом (3) вероятность сбоев в работе ИПЧК при отсутствии частотного сигнала приближенно равна

$$P_{сб.0} = 1 - P_{б.сб} \approx \frac{0,4N \exp(-0,5z^2)}{z} = 4,8 \frac{\hat{f}_x}{\check{f}_x} \frac{\exp(-0,5z^2)}{z}. \quad (4)$$

Ситуация 2. В присутствии частотного сигнала сбои могут возникнуть в трех случаях: во время впадин между импульсами; на вершинах импульсов; за время фронтов импульсов.

Число отсчетов ПНВ во время впадин между импульсами $u(t)$ за время преобразования $T_{пр}$ составит $N \approx 0,5T_{пр}/\hat{\tau}_{к.л}$.

Максимальное число отсчетов за наибольшее время преобразования (2) с учетом выражения (1)

$$N \approx 6 \hat{f}_x / \check{f}_x. \quad (5)$$

В случае $z \geq 5$ аналогично (4) получаем приближенное выражение для вероятности сбоев во впадинах между импульсами

$$P_{сб.вл} \approx 2,4 \frac{\hat{f}_x}{\check{f}_x} \frac{\exp(-0,5z^2)}{z}. \quad (6)$$

Максимальное число отсчетов входного сигнала $u(t) + n(t)$ во время существования вершин импульсов за время $T_{пр}$ также выражается формулой (5). При выполнении соотношения $t = (U_m - U_0)/\sigma_n \geq 5$ в данном случае приближенная вероятность описывается аналогично (6) и имеет вид

$$P_{сб.верш} \approx 2,4 \frac{\hat{f}_x}{\check{f}_x} \frac{\exp(-0,5t^2)}{t}. \quad (7)$$

Возникновение сбоя за время прохождения переднего фронта импульса $u(t)$ в интервале $[U_0, U_1]$ между порогами срабатывания ТШ показано на рис. 2. В момент времени t_i отсчет полезного сигнала $u(t) = x$; отсчет суммарного сигнала $x + n(t_i)$ превышает порог срабатывания U_1 . В дискретный момент времени t_{i+1} полезный сигнал почти не меняется, и отсчет суммарного сигнала, приближенно равного $x + n(t_{i+1})$, расположен ниже порога срабатывания U_0 . В результате на выходе триггера возникает ложный импульс, вызывающий сбой в работе ИПЧК. При этом вероятность единичного сбоя

$$P_{сб} \approx P(n(t_i) \geq U_1 - x) P(n(t_{i+1}) < U_0 - x).$$

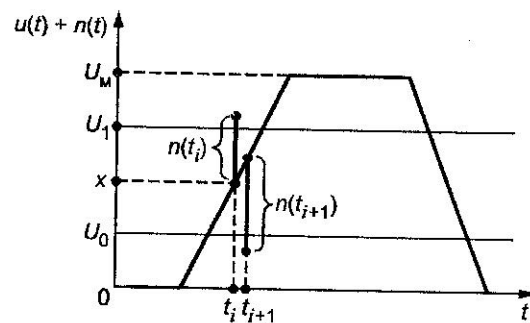


Рис. 2. Влияние помехи на возникновение сбоя за время нарастания фронта импульса

Для уменьшения малых вероятностей сбоя необходимо, чтобы выполнялись условия $(U_1 - x)/\sigma_n \geq 5$, $(x - U_0)/\sigma_n \geq 5$. Тогда с использованием приближенного интеграла вероятностей [2]:

$$P_{сб}(t) \approx 0,16 \exp(-0,5(t^2 + (s-t)^2)) / t(s-t),$$

где $s = (U_1 - U_0)/\sigma_n$.

Покажем, что вероятность $P_{сб}(t)$ достигает максимального значения при $t = 0,5s$. Для упрощения анализа используем далее оценку сверху вероятности единичного сбоя

$$P_{сб} \leq P_{сб}(t)_{t=0,5s} \approx 0,64 \exp(-0,25s^2) / s^2.$$

Число фронтов за время преобразования $N_\phi = 2[T_{пр}/T_x]$; число отсчетов на фронтах при пересечении суммарным сигналом $u(t) + n(t)$ области $[U_0, U_1]$

$$N_{о.ф} = [N_\phi \tau_\phi (U_1 - U_0) / U_m \tau_{кл}].$$

С учетом $\tau_\phi = \alpha T_x$ и формул (1), (2) максимальное суммарное число отсчетов на всех фронтах за максимальное время преобразования

$$N = \left[\frac{24 \hat{f}_x \alpha (U_1 - U_0)}{\check{f}_x U_m} \right].$$

Приближенная вероятность правильной работы ИПЧК при отсутствии единичных сбоев

$$P_{6.сб} \approx (1 - P_{сб})^N.$$

После преобразований, аналогичных проведенным выше, приближенная вероятность сбоев за время фронтов импульса

$$P_{сб.ф} \approx 15,4 \frac{\hat{f}_x \alpha \sigma_n \exp(-0,25s^2)}{\check{f}_x U_m s}. \quad (8)$$

С учетом (6) – (8) найдем оценку сверху суммарной вероятности сбоев ИПЧК в присутствии частотного сигнала под воздействием ПНВ в виде

$$P_{сб1} = P_{сб.вт} + P_{сб.в} + P_{сб.ф} = 2,4 \hat{f}_x / \check{f}_x \times \times [\exp(-0,5z^2)/z + \exp(-0,5t^2)/t + 6,4 \alpha \sigma_n \exp(-0,25s^2)/(U_m s)]. \quad (9)$$

При выполнении соотношений $U_0 \leq 0,1 U_1$, $U_m \geq 1,5 U_1$ вторым слагаемым в квадратных скобках в правой части (9) можно пренебречь.

Рассмотрим характеристики частотных сигналов ИПЧК: $[\check{f}_x, \hat{f}_x] = [10 \text{ Гц}; 32 \text{ МГц}]$, $\alpha \leq 0,5 \%$. Выберем амплитуду импульсов $U_m = 1 \text{ В}$; СКЗ помехи $\sigma_n = 10 \text{ В}$; пороги срабатывания триггера $U_1 = 0,2 \text{ В}$, $U_0 = 0,02 \text{ В}$. Рассчитанные по (4), (9) вероятности сбоев ИПЧК в отсутствие и присутствии частотного сигнала, соответственно $P_{сб0} \approx 1,1 \cdot 10^{-81}$ и $P_{сб1} \approx 9 \cdot 10^{-34}$, пренебрежимо малы.

Учтем следующие обстоятельства:

возможность отклонений от прямоугольной формы импульсов и увеличение коэффициента α ;

желательность снижения напряжения питания частотных датчиков для уменьшения их энергопотребления и амплитуды импульсов U_m ; возможные увеличения мощности помехи из-за ухудшения шумового фона датчика или ИПЧК.

Из анализа выражений (4), (9) следует, что с ростом коэффициента α вероятность сбоев $P_{сб1}$ линейно возрастает. Так, при $\alpha = 0,5 \%$ она увеличивается в 10 раз. С уменьшением амплитуды импульсов U_m не-

обходимо выбирать новые значения порогов срабатывания триггера, при этом $P_{сб0}$ и $P_{сб1}$ нелинейно увеличиваются. Если $\alpha = 0,5\%$, $U_m = 0,2$ В, $U_1 = 0,1$ В, $U_0 = 0,02$ В, то они существенно возрастают: $P_{сб0} \approx 3 \cdot 10^{-16}$, $P_{сб1} \approx 1,74 \cdot 10^{-4}$.

С увеличением СКЗ помехи наблюдается нелинейный рост вероятностей сбоев, которые могут принимать критические для работы ИПЧК значения. В случае $U_m = 0,5$ В, $U_1 = 0,2$ В, $U_0 = 0,02$ В, $\alpha = 0,5\%$ при $\sigma_n = 25$ мВ имеем $P_{сб0} \approx 3 \cdot 10^{-16}$, $P_{сб1} \approx 4 \cdot 10^{-3}$.

Достоверность результатов преобразований и диагностики в ИПЧК можно повысить не только выбором параметров устройства и преобразуемого сигнала, но и с помощью алгоритмических методов. Проанализируем возможности применения известного метода обнаружения и коррекции сбоев в ИПЧК, который заключается в следующем [3, 4].

Перед выполнением нового преобразования прогнозируется его результат; определяется апертура – область допустимых отклонений преобразованного значения, предсказанного при отсутствии сбоев; проверяется, входит ли новое значение в апертуру. Если да, то делается вывод об отсутствии сбоя и результат преобразования принимается. В противном случае делается заключение о возникновении сбоя и проводится коррекция: полученное значение отвергается и заменяется предсказанным. Далее снова выполняются прогнозирование на один шаг, построение апертуры и проверка нового результата преобразования на принадлежность апертуре. При появлении n следующих друг за другом сбоев процесс останавливается и принимается решение о нецелесообразности дальнейших преобразований.

Рассмотрим прогнозирование значений случайного стационарного гауссова частотного сигнала $f(t)$ на j шагов с периодом преобразования $T_{пр}$, $j = \overline{1, 3}$. Считаем известными дисперсию σ_f^2 и нормированную автокорреляционную функцию $r_f(\tau)$ сигнала $f(t)$. При ступенчатой экстраполяции и отсутствии сбоев дисперсия случайных отклонений $\Delta f = f - f_n$ действительных значений f от предсказанных f_n в конце периода преобразования [2]:

$$\sigma^2(\Delta f, T_{пр}) = 2\sigma_f^2 \{1 - r_f(T_{пр})\}.$$

Обычно справедливо $\beta T_{пр} \ll 1$, где $\beta = \dot{r}_f(0)$ – производная функции $r_f(\tau)$ при $\tau = 0$. Тогда $\sigma^2(\Delta f, T_{пр}) \approx 4\sigma_f^2 \beta T_{пр}$.

Нижнюю f_n и верхнюю f_v границы апертур в случае прогнозирования на $j = \overline{1, 3}$ шага вычисляем с доверительной вероятностью 0,997 по выражению

$$f_{в.н} = f_n \pm 3\sigma_f \sqrt{2j\beta T_{пр}} = f_n \pm \kappa_{ej} \sigma_f, \quad (10)$$

где $\kappa_{ej} = \sqrt{2j\beta T_{пр}}$ – коэффициент границ апертур при ступенчатой экстраполяции.

При линейной экстраполяции и отсутствии сбоев дисперсия случайных отклонений в конце периода преобразования [2]:

$$\sigma^2(\Delta f, T_{пр}) = 2\sigma_f^2 \{3 - 4r_f(T_{пр}) + r_f(2T_{пр})\},$$

а нижняя и верхняя границы апертур при $j = \overline{1, 3}$ и доверительной вероятности 0,997

$$f_{в.н} = f_n \pm 3 \cdot 2\sigma_f \sqrt{j\beta T_{пр}} = f_n \pm \kappa_{лj} \sigma_f, \quad (11)$$

где $\kappa_{лj} = 6\sqrt{j\beta T_{пр}}$ – коэффициент границ апертур при линейной экстраполяции.

Число сбоев за время преобразования равно нулю или целому числу, не превышающему число отсчетов N_0 . Если за время преобразования сбой отсутствовал, его результат полагается правильным и учитывается в массиве. В противном случае результат преобразования признается неправильным и корректируется.

Рассмотрим алгоритм обнаружения и коррекции сбоев при условии, что только один неправильный результат преобразования, соседствующий с предшествующим и последующим правильными результатами преобразований, может быть скорректирован, т. е. заменен его предсказанным значением. Если один за другим появились два неправильных результата преобразования, то коррекция отсутствует и преобразования прекращаются. Они могут быть возобновлены после «тайм-аута», равного длительности нескольких преобразований.

Варианты работы ИПЧК на начальном этапе преобразований приведены в таблице, где f_i – i -й числовой результат преобразования; С, ОС – сбой и его отсутствие. Появление сбоев в двух соседних преобразованиях приводит к останову ИПЧК, а при появлении только одного сбоя преобразования продолжают.

№ варианта	Результаты преобразований				Дальнейшие действия
	f_1	f_2	f_3	f_4	
1	Любое значение	ОС	ОС	ОС	Продолжение преобразований
2		ОС	С	ОС	
3		ОС	ОС	С	
4		С	ОС	ОС	
5		С	ОС	С	
6		ОС	С	С	
7		С	С	—	Останов

Структурная схема алгоритма представлена на рис. 3. Рассмотрим его работу. С появлением первого результата преобразования f_1 выполняется прогнозирование с помощью ступенчатой экстраполяции: $f_n = f_1$, устанавливаются границы апертур f_b, f_n . Левая ветвь схемы определяет работу алгоритма при появлении сбоя во втором преобразовании. В этом случае f_n не изменяется: $f_n = f_1$, но ширина апертury увеличивается благодаря использованию коэффициента κ_{c2} вместо коэффициента κ_{c1} . В случае появления сбоя и в третьем преобразовании в ИПЧК формируется сообщение для ЦЭВМ о невозможности дальнейших преобразований, и работа прекращается, а при появлении правильного результата f_3 осуществляется переход на правую ветвь схемы.

В дальнейшем прогнозирование выполняется с помощью линейной экстраполяции. После каждого сбоя ширина апертury увеличивается с использованием коэффициента $\kappa_{л2}$; в случае отсутствия сбоя она уменьшается благодаря применению коэффициента $\kappa_{л1}$.

Оценим эффективность работы алгоритма. Учтем, что появления сбоев в соседних преобразованиях – события независимые. Тогда вероятность останова работы ИПЧК из-за невозможности выполнения дальнейших преобразований $P_{ост} = (P_{сб1})^2$.

Вероятность останова преобразований при $\sigma_n = 25$ мВ (см. приведенный выше пример)

$$P_{ост} = (4 \cdot 10^{-3})^2 \approx 1,6 \cdot 10^{-5}.$$

Следует учитывать также повторный запуск ИПЧК после окончания упомянутого ранее «тайм-аута» в преобразованиях. На основании

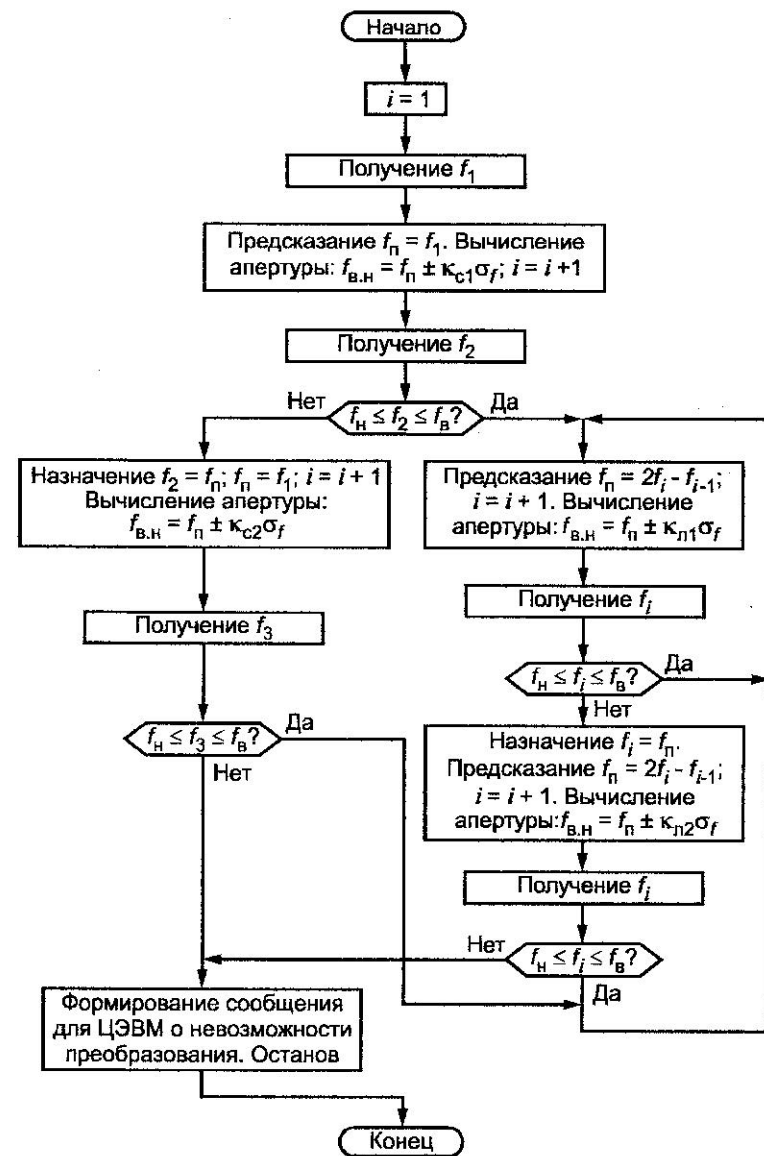


Рис. 3. Структурная схема алгоритма обнаружения и коррекции сбоев

результатов исследования делается вывод о возможности долговременной безошибочной работы ИПЧК в условиях появления относительно редких одиночных сбоев.

Таким образом, получены оценки сверху вероятностей сбоев в работе ИПЧК, что позволяет рационально выбирать параметры преобразователя и улучшать энергетические характеристики частотных датчиков физических величин, используемых совместно с ИПЧК. Показана целесообразность применения алгоритма обнаружения и коррекции единичных сбоев и оценена его эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров В. В., Алексашкин А. А. Интеллектуальный преобразователь «частота-код» // Метрология. 2009. № 2. С. 21.
2. Кавалеров Г. И., Мандельштам С. М. Введение в информационную теорию измерений. М.: Энергия, 1974.
3. Новоселов О. Н., Фомин А. Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. М.: Машиностроение, 1980.
4. Шайн И. Л., Черногуз Н. Г. // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 1985. № 2. С. 8.

Дата принятия 15.03.2010 г.

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

С. В. ДВОЙНИШНИКОВ, Д. В. КУЛИКОВ, В. Г. МЕЛЕДИН

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, Россия, e-mail: dv.s@mail.ru

Рассмотрен оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы с использованием структурированного освещения, фазовой триангуляции и устойчивого метода расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом. Приведены аналитическая и экспериментальная (полученная при помощи разработанной измерительной системы) оценки погрешности измерения профиля поверхности предложенным методом.

Ключевые слова: оптоэлектронный метод, бесконтактное восстановление, фазовая триангуляция, устойчивый метод расшифровки интерферограмм, трехмерные объекты.

The optoelectronic method of surface profile contactless reconstruction for 3D complex form objects, with use of structured light, phase triangulation and steady method of interferogram decoding with step-by-step shift, is considered. The analytical and experimental estimation of the surface profile measurement error, by made offered method, is given. The created measuring system implementing optoelectronic method of contactless reconstruction of surface profile of three-dimensional objects with complex form is described.

Key words: optoelectronic method, contactless reconstruction, phase triangulation, steady method of interferogram decoding, 3D objects.

Доля измерений линейных размеров и перемещений в промышленности на сегодняшний день составляет 85 – 95 % измерений всех контролируемых параметров [1]. Полученные результаты широко используют при физическом моделировании и в промышленных технологиях, связанных с необходимостью копирования и масштабиро-