

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ФАЗОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Богаевский А. Б., Борисенко А. Н., Борисенко Е. А., Ивченкова Е. Ю.

Предложена структурная схема цифрового устройства для измерений сдвига фаз между импульсными последовательностями. Технические возможности устройства позволяют измерять фазовые запаздывания между импульсами последовательностей, которые имеют частоты следования F и $0,5F$. На основе методов теории информации и теории погрешности исследованы метрологические характеристики предложенного фазометра и установлено, что он удовлетворяет требованиям компьютерной системы по точности измерений. С целью уточнения метрологических характеристик предложенного фазометра выполнена статистическая обработка экспериментальных данных. На основе информационного подхода получено энтропийное значение погрешности измерений сдвига фаз предложенным устройством. Установлено совпадение результатов теоретических исследований и экспериментальных данных.

Запропоновано структурну схему цифрового пристрою для вимірювань зсуву фаз між імпульсними послідовностями. Технічні можливості пристрою дозволяють вимірювати фазові запізнення між імпульсними послідовностями, які мають частоти проходження F та $0,5F$. На основі методів теорії інформації та теорії похибок досліджено метрологічні характеристики запропонованого фазометру та встановлено, що він задовольняє вимогам комп'ютерної системи за похибкою вимірювань. З метою уточнення метрологічних характеристик запропонованого фазометра виконано статистичну обробку дослідних даних. На основі інформаційного підходу отримано ентропійне значення похибки вимірювань зсуву фаз запропонованим пристроєм. Встановлено збіг результатів теоретичних досліджень та дослідних даних.

A block diagram of a digital device for measuring the phase lag between pulse sequences is proposed. The technical properties of the device allow measuring phase delays between pulse sequences that have repetition rates of F and $0.5F$. Based on the methods of information theory and error theory, the metrological characteristics of the proposed phase meter have been explored and it is established that it meets the requirements of a computer system for measuring accuracy. To refine the metrological characteristics of the proposed phase meter, statistical processing of the experimental data was performed. On the basis of the information approach, the entropy value of the measurement error of the phase shift by the proposed device is obtained. The results of theoretical studies and experimental data coincide.

Богаевский А. Б.

д-р техн. наук, проф. ХНАДУ

Борисенко А. Н.

д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»

Борисенко Е. А.

канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

4borisea@gmail.com

Ивченкова Е. Ю.

канд. экон. наук, доц. каф. ИСПР ДГМА

ХНАДУ – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков.

НТУ «ХПИ» Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.436.001: 621.314.12

Богаевский А. Б., Борисенко А. Н., Борисенко Е. А., Ивченкова Е. Ю.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ФАЗОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Повышение экономической эффективности технологических процессов в машиностроительном производстве Украины связано с широким использованием компьютерных систем. Применение известных аппаратных средств имеет цель сократить время обработки детали и получить заданную шероховатость ее обработанной поверхности [1]. Входные и выходные сигналы системы обработки детали, а также ее аппаратные средства подвержены действию помех. Помехи каналов обработки информации формируют полосу нечувствительности вокруг номинальной характеристики программного движения станка, что оказывает существенное влияние на его экономические показатели. Разработка новых методов контроля программных движений станка на основе применения аппаратных средств для измерений фазовых запаздываний позволит повысить помехозащищенность каналов обработки информации, что и определяет актуальность данной научно-прикладной задачи.

Разработка аппаратных средств для измерений фазовых запаздываний с заданными метрологическими характеристиками.

Построение на основе средств микропроцессорной техники устройства для измерений фазовых запаздываний и анализ его метрологических характеристик.

Предлагается структурная схема (рис. 1) измерителя сдвига фаз φ между импульсными последовательностями одной частоты следования (первый режим работы), а также между соответствующими импульсами последовательностей, имеющих частоты следования F и $0,5F$ (второй режим работы). Принцип работы устройства аналогичен цифровому фазометру с интегрированием, который описан в работе [2].

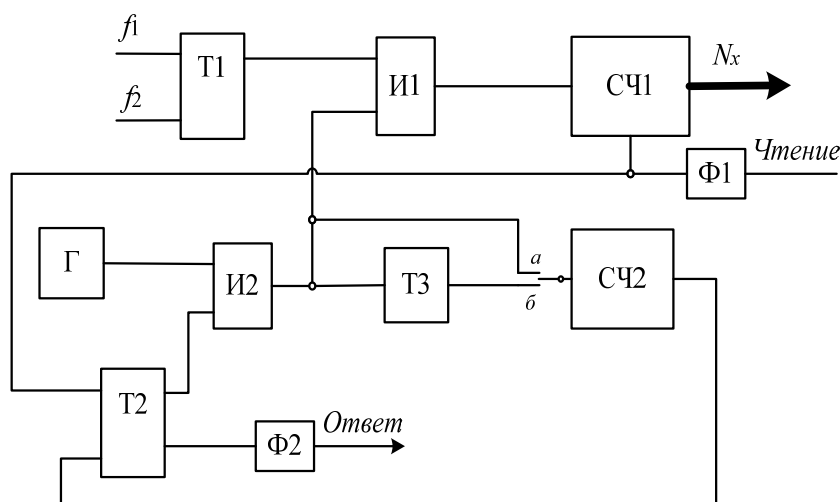


Рис. 1. Структурная схема фазометра

При работе фазометра в первом режиме переключатель установлен в положение «а» и квантующие импульсы следуют с частотой f_k . Измеренное значение сдвига фаз в этом случае равно:

$$\varphi = 360 M_1 M^{-1}, \quad (1)$$

где M_1, M – соответственно объемы СЧ1 и СЧ2. Частота f_k выбирается такой, чтобы выполнилось условие $t_3 \gg F - 1$. Такой случай работы цифрового фазометра подробно рассмотрен в работе [2], согласно которой суммарная среднеквадратичная погрешность измерения сдвига фаз:

$$\sigma = \frac{360}{\sqrt{6}} \sqrt{\frac{F}{f_k^2 t_3} + \frac{1}{30F^2 t_3^2}}. \quad (2)$$

Первое слагаемое под знаком радикала в выражении (2) обусловлено погрешностью квантования временного сдвига между импульсными последовательностями и представляет собой высокочастотную составляющую погрешности фазометра, а второе – погрешностью дискретизации, вызванной некрatностью t_3 и периода указанных последовательностей (низкочастотная составляющая погрешности). Учитывая, что $t_3 = Mf_k^{-1}$, последнее выражение приведем к виду:

$$\sigma = 60\sqrt{6}(F / f_k M + f_k^2 / 30F^2 M^2)^{0.5}. \quad (3)$$

Из полученного соотношения видно, что существенным резервом повышения точности фазометра является повышение объема СЧ2, однако в большинстве практических случаев это неприемлемо в связи с усложнением устройства. Более целесообразна минимизация σ за счет рационального выбора f_k , от которой высоко- и низкочастотная составляющие зависят по-разному. Продифференцировав (3) по f_k и приравняв производную нулю, после соответствующих математических операций найдем:

$$f_{ko} = F\sqrt[3]{15M}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим минимальное значение среднеквадратичной погрешности фазометра:

$$\sigma_{\min} = 180 / \sqrt{M\sqrt[3]{15M}}. \quad (5)$$

Результаты расчета по формулам (4) и (5) согласуются с результатами, полученными в работе [3, 4]. Так, например, при $f_k = 10^6$ Гц, $F = 5000$ Гц, $t_3 = 1$ с, $M = 10^6$, $\sigma_{\min} = 0,0174^0$; при $f_k = 10^7$ Гц, $F = 2 \cdot 10^4$ Гц, $t_3 = 1$ с, $M = 10^6$, $\sigma_{\min} = 0,0025^0$; при $f_k = 10^7$ Гц, $F = 10^4$ Гц, $t_3 = 10$ с, $M = 10^8$, $\sigma_{\min} = 0,00055^0$, что достаточно близко к значениям функции $\sigma(f_k, t_3, F)$ в точках минимума, представленной в работе [3, 4] графически.

Во втором режиме работы фазометра, когда частота f_1 следования импульсов вдвое ниже частоты f_2 , переключатель устанавливается в положение «б». В соответствии с этим частоты следования прямоугольных импульсов составляют $0,5F$ и F . Цикл измерения в этом случае длится в течение:

$$t_3 = 2Mf_k^{-1}.$$

После подстановки последней формулы в выражение (3) с учетом изложенного получим:

$$\sigma = 60\sqrt{6} \sqrt{\frac{F}{4f_k M} + \frac{f_k^2}{30F^2 M^2}}. \quad (6)$$

Из сравнения выражений (2) и (6) видно, что в последнем случае высокочастотная составляющая погрешности в четыре раза ниже. Обусловлено это тем, что преобразование в код интервала времени, соответствующего измеряемому φ , осуществляется импульсами той же частоты квантования f_K , время измерения увеличивается вдвое, а процесс измерения происходит в течение такого же числа периодов следования импульсов, что и в первом случае. Если бы измерение φ между импульсными последовательностями с частотами 0,5F производилось устройством в первом режиме работы, то высокочастотная составляющая погрешности уменьшилась бы вдвое, а низкочастотная – увеличилась бы в четыре раза, что видно из формулы (2). При этом σ могла бы как уменьшаться, так и увеличиваться. В этом заключается основное отличие описываемого измерителя, работающего во втором режиме, от цифровых фазометров [3, 4], в которых одна и та же частота f_K используется для заполнения фазовых интервалов и задания времени измерения. Отметим, что при работе устройства во втором режиме φ определяется по той же формуле (2), благодаря сохранению числа фазовых интервалов за время измерения и частоты квантования. В этом случае тоже существует f_{ko} , при которой $\sigma = \sigma_{\min}$. После дифференцирования соотношения (6) по f_K и соответствующих преобразований получим:

$$f_{ko} = \sqrt[3]{\frac{15M}{4}}. \quad (7)$$

Подстановка (6) в (7) дает:

$$\sigma_{\min} = 90\sqrt[3]{2} / \sqrt{M\sqrt[3]{15M}}. \quad (8)$$

Следовательно, f_{ko} и σ_{\min} для первого и второго режимов работы фазометра различны. При сравнении (5) и (8) видно, что в последнем случае суммарная среднеквадратичная погрешность почти вдвое ниже. Это позволяет сделать вывод, что одним из путей повышения точности цифрового интегрирующего фазометра при увеличении периода входных импульсов является такое же увеличение времени измерения при постоянстве частоты квантования фазовых интервалов.

Погрешность измерений сдвига фаз между импульсными последовательностями находит свое проявление в нестабильности выходного кода предложенного устройства. Для уточнения его метрологических характеристик выполнена статистическая обработка экспериментальных данных. На рис. 2 представлена гистограмма разброса выходного кода. Объем выборки составил 127 измерений. Основные статистические параметры распределения погрешности следующие:

$$\bar{X} = 0, \quad \sigma = 0.0185, \quad A = 0, \quad E = -0.4577.$$

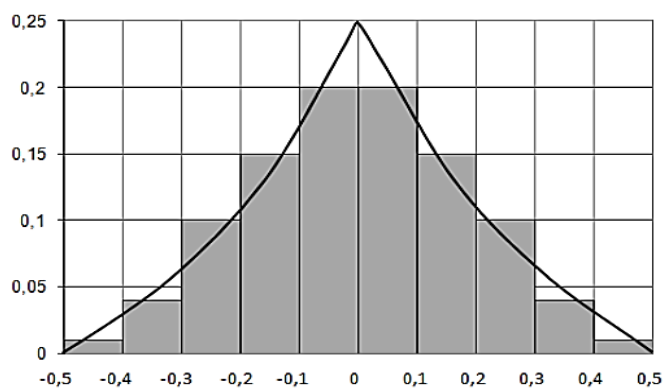


Рис. 2. Гистограмма разброса выходного кода фазометра

Гистограмма разброса выходного кода фазометра после выполнения процедуры сглаживания описана экспоненциальным законом распределения, который по виду достаточно близкий к треугольному. Вероятность проявления выдвинутой гипотезы по критерию согласия Колмогорова составляет 0.915 при $\lambda = 0.548$. Уравнение сглаженной кривой разброса выходного кода исследуемого фазометра, после применения программы *Stat graft*, имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \quad \text{при } x \in (-0.05, 0.05).$$

Воспользуемся информационным подходом при определении погрешности проведенных измерений. Для полученного закона распределения погрешности фазометра имеем:

$$\ln f(x) = -\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}.$$

Отсюда, энтропия погрешности предложенного фазометра:

$$H\left(\frac{x}{x_n}\right) = - \int_{-0.05}^{0.05} \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \left(-\ln 2\sigma + \frac{|x|}{\sigma}\right) dx = \ln \left(2\sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}}\right).$$

Следовательно, энтропийный интервал неопределенности фазометра составил:

$$\Delta = \sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.018466.$$

Такая погрешность фазометра удовлетворяет требованиям компьютерной системы к его метрологическим характеристикам.

ВЫВОДЫ

Предложена структурная схема цифрового фазометра с интегрированием, который подключен к компьютерной системе. На основе методов теории информации и теории погрешности, в частности информационного подхода, исследованы его метрологические характеристики. Установлено, что предложенный фазометр удовлетворяет требованиям компьютерной системы по точности измерений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еникеев А. Ф. *Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования* / А. Ф. Еникеев. – Краматорск : ДГМА, 2001. – 160 с.
2. Борисенко А. Н. *Анализ характеристик сдвига фаз между импульсными последовательностями* / А. Н. Борисенко, В. П. Самсонов, А. Ф. Еникеев // *Техническая электродинамика*. – К. : 1986. – № 1. – С. 92–94.
3. *Цифровые методы измерения сдвига фаз* / [Гл. ред. С. Д. Кондорф]. – Н. : Наука, 1979. – 288 с.
4. Борисенко А. Н. *Определение оптимальной частоты квантующих импульсов цифрового интегрирующего фазометра по минимуму среднеквадратической ошибки* / А. М. Борисенко, О. В. Сосіна // *Український метрологічний журнал*. – Х., 2012. – № 2. – С. 50–55.