

УДК 621.436.001: 621.314.12

**Борисенко А. Н., Борисенко Е. А., Шевченко Н. Ю.****ПОВЫШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЯ ФАЗОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ТАКТОВОЙ ЧАСТОТЫ**

Повышение экономической эффективности технологических процессов в машиностроительном производстве Украины связано с широким использованием компьютерных систем. Их применение имеет цель сократить время обработки детали и получить заданную шероховатость ее обработанной поверхности [1]. Входные и выходные сигналы системы, 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 на основе применения аппаратных средств для измерений фазовых запаздываний позволит повысить помехозащищенность каналов обработки информации, что и определяет актуальность данной научно-прикладной задачи.

Цель работы – разработка аппаратных средств для измерений фазовых запаздываний с улучшенными метрологическими характеристиками при переменной частоте входных сигналов; построение на основе средств микропроцессорной техники устройства для измерений фазовых запаздываний; анализ метрологических характеристик и оптимизация его тактовой частоты.

Авторами предложено устройство для измерения фазового запаздывания (рис. 1), принцип действия которого аналогичен фазометру [2].

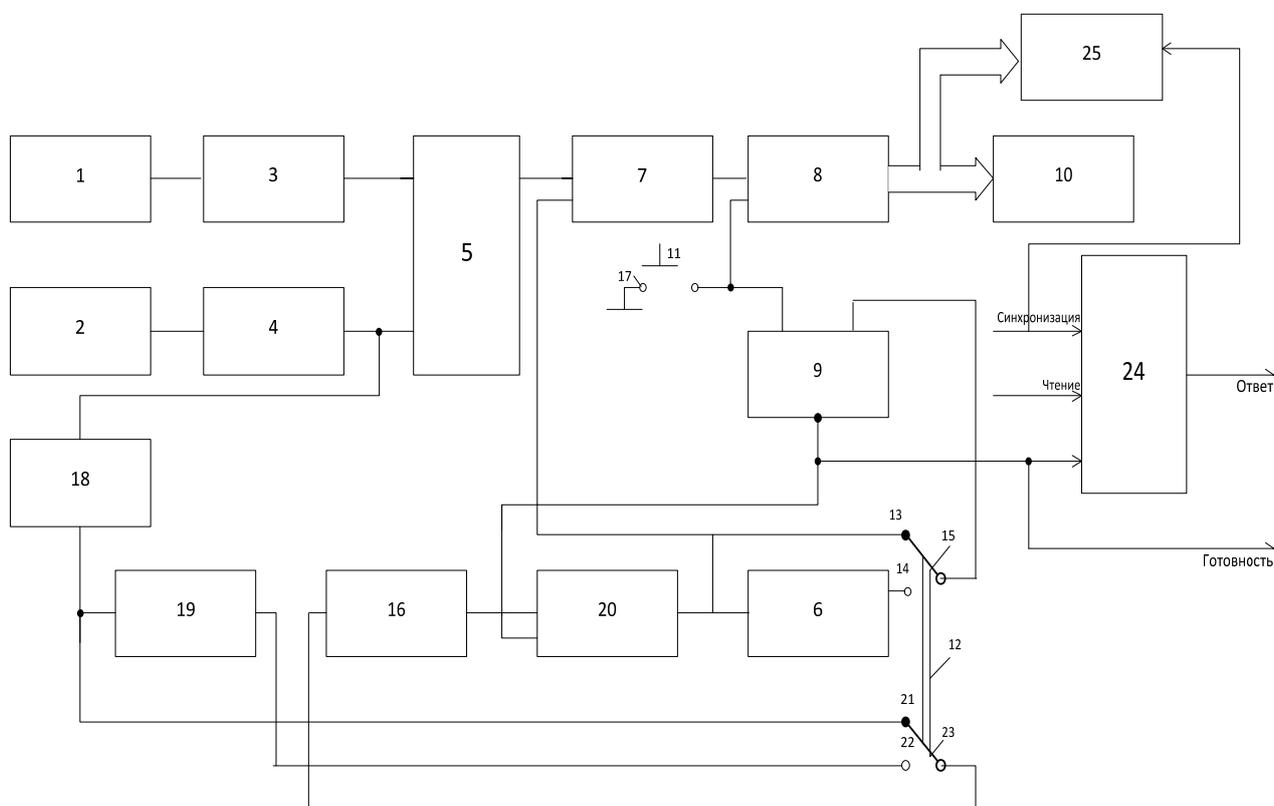


Рис. 1. Устройство для измерения фазового запаздывания

Устройство содержит первичный датчик (1) первого импульсного сигнала и первичный датчик (2) второго импульсного сигнала, первый (3) и второй (4) формирователи импульсов, первый (5) и второй (6) триггеры, первую схему (7) совпадения, первый (8) и второй (9) регистры, блок индикации (10), кнопку сброса (11) и переключатель (12), включающий первый (13) и второй (14) неподвижные контакты и один подвижный контакт (15). Датчик (1) последовательно соединен с первым формирователем импульсов (3) и единичным входом первого триггера (5), датчик (2) последовательно соединен со вторым (4) формирователем импульсов и нулевым входом первого триггера (5), выход которого присоединен к первому входу первой схемы (7) совпадения, последовательно связанной с первым регистром (8), выходы которого подключены к входам блока индикации (10). Вторым входом первой схемы (7) совпадения присоединен к первому неподвижному контакту (13) переключателя (12) и счетному входу второго триггера (6), подключенного к выходу управляемого генератора (16) прямоугольных импульсов. Вторым входом первого регистра (8) присоединен к установочному входу второго регистра (9), вторым входом которого связан с подвижным контактом (15) переключателя (12), вторым неподвижным контактом (14) которого соединен с выходом второго триггера (6), а кнопка (11) сброса подключена между установочными входами первого (8) и второго (9) регистров и нулевой шиной (17) источника питания (не показан).

Устройство снабжено фильтром (18) низкой частоты, делителем (19) напряжения, второй схемой (20) совпадения и третьей схемой совпадения (24), а переключатель (12) – дополнительной секцией, включающей в себя третий (21) и четвертый (22) неподвижные и второй подвижный (23) контакты. Вход фильтра (18) низкой частоты подключен к выходу второго формирователя (4) импульсов, а выход – к входу делителя (19) напряжения и третьему неподвижному контакту (21) переключателя (12), вторым подвижным контактом (23) которого подключен к входу управляемого генератора (16) прямоугольных импульсов, выход которого связан с первым входом второй схемы (20) совпадения, присоединенной своим вторым входом к инверсному выходу второго регистра (9), а выходом – к счетному входу второго триггера (6). При этом коэффициент передачи делителя (19) напряжения выбирается опытным путем, а произведение коэффициента передачи фильтра (18) низкой частоты на коэффициент передачи управляемого генератора (16) импульсов равно  $(15N)^{1/3}$ , где  $N$  – емкость второго регистра (9).

Блоки 24 (третья схема совпадения) и 25 (третий буферный регистр) предназначены для организации обмена данными с центральным процессором.

Рассмотрим случай измерения фазового запаздывания между двумя импульсными последовательностями одной частоты следования, когда переключатель (12) установлен в первое (верхнее по схеме) положение.

При работе технологического оборудования датчик (1) вырабатывает электрический импульс, который преобразуется с помощью первого формирователя (3) импульсов в прямоугольный импульс нормированной амплитуды (например, равной уровню логической единицы) и длительности, равной продолжительности импульса датчика (1). При этом передний фронт выходного импульса формирователя (3) совпадает с моментом начала импульса датчика (1), а задний фронт импульса этого формирователя совпадает с моментом окончания сигнала датчика (1). Под действием переднего фронта выходного импульса второго формирователя (4) импульсов первый триггер (5) устанавливается в единичное состояние, вследствие чего его выходной сигнал, равный, например, уровню логической единицы, поступает на первый вход первой схемы (7) совпадения.

Спустя некоторое время датчик (2) вырабатывает электрический импульс второй импульсной последовательности, частота которой совпадает с частотой выходных импульсов датчика (1). С помощью второго формирователя (4) импульсов сигнал датчика (2) преобразуется в прямоугольный импульс нормированной амплитуды и длительности, причем передний фронт этого импульса формируется в момент начала сигнала датчика (2).

При действии переднего фронта выходного импульса второго формирователя (4) первый триггер (5) переходит в нулевое состояние и единичный сигнал на первом входе первой схемы (7) совпадения исчезает. Так как выходной импульс первого триггера (5) начинается в момент начала импульса первой последовательности и заканчивается в момент появления импульса второй импульсной последовательности, то его длительность соответствует измеряемому фазовому запаздыванию.

В описываемом режиме измерения частоты входных импульсных последовательностей совпадают, благодаря чему единичный импульс на выходе первого триггера (5) имеет ту же частоту, что и выходные импульсные последовательности. Импульсы второго формирователя (4) поступают на вход фильтра (18) низкой частоты, который формирует постоянное (по знаку) напряжение, пропорциональное частоте следования указанных импульсов. Это напряжение поступает через замкнутые второй подвижный (23) и третий неподвижный (21) контакты дополнительной секции переключателя (12) на вход управляемого генератора (16) прямоугольных импульсов. Последний генерирует импульсы с частотой следования  $F_3$ , пропорциональной напряжению на его входе. Поскольку произведение коэффициента передачи фильтра (18) низкой частоты на коэффициент передачи управляемого генератора (16) импульсов равно  $(15N)^{1/3}$ , то:

$$F_3 = F\sqrt[3]{15N},$$

где  $F$  – частота следования выходных импульсов второго формирователя (4) импульсов.

Импульсы управляемого генератора (16) поступают на первый вход второй схемы (20) совпадения, которая пропускает импульсы на связанные с ее выходом элементы только в том случае, когда на ее втором входе действует единичный сигнал.

Цикл измерения фазового запаздывания между импульсными последовательностями начинается с момента нажатия кнопки (11) сброса, в результате которого первый (8) и второй (9) регистры устанавливаются в нулевое состояние. При этом на табло блока (10) индикации высвечиваются нули, а с инверсного выхода второго регистра (9) поступает единичный сигнал на второй вход второй схемы (20) совпадения. Последняя отпирается, и на второй вход первой схемы (7) совпадения, на счетный вход второго триггера (6) и на вход второго регистра (9) поступают импульсы, вырабатываемые генератором (16) и имеющие частоту  $f_3 = F\sqrt[3]{15N}$ . На вход первого регистра (8) импульсы поступают только тогда, когда первая схема (7) совпадения открыта, т. е. при наличии на выходе первого триггера (5) единичного импульса. Цикл измерения продолжается до тех пор, пока в регистры идет запись кодов. Как только во второй регистр (9) записывается заранее известное число  $N$ , равное емкости этого регистра, на его инверсном выходе вместо единичного сигнала устанавливается нулевой сигнал, в результате чего вторая схема (20) совпадения закрывается и поступление импульсов на входы регистров прекращается. От момента нажатия кнопки (11) до момента записи числа  $N$  во второй регистр (9) в первый регистр (8) записывается число  $N_1$ , значение которого в десятичной системе счисления высвечивается на табло блока (10) индикации. За промежуток времени  $t_3$ , в течение которого происходит запись указанных чисел, на устройство подается количество периодов входных последовательностей, равное  $m = t_3 F$ . При этом числа  $N_1$  и  $N$  можно представить выражениями (без учета погрешностей квантования) вида:

$$N_1 = m \cdot t_u \cdot f_3 ; N = m \cdot f_3 \cdot F^{-1},$$

где  $t_u$  – длительность выходного импульса первого триггера (5), а отношение указанных чисел запишем следующим образом:

$$\frac{N}{N_1} = \frac{m \cdot t_u \cdot f_3 \cdot F}{m \cdot f_3} = \frac{t_u \cdot \omega}{2\pi} = \frac{\theta}{2\pi},$$

где  $\omega$  – круговая частота входных импульсных последовательностей;

$\theta$  – измеряемое фазовое запаздывание между импульсными последовательностями.

Из последнего выражения получают формулу для вычисления искомого фазового запаздывания (предполагая, что преобразования интервалов времени в коды происходят без погрешности):

$$\theta = \frac{2\pi \cdot N_1}{N} \quad \text{или} \quad \theta = \frac{360N_1}{N}.$$

Задавая  $N = 360 \cdot 10^K$  и выбирая любые величины  $K$ , угол фазового запаздывания получают из показаний блока (10) индикации путем переноса запятой на  $K$  знаков влево.

Минимальная величина среднеквадратичной погрешности фазового запаздывания в предложенном устройстве может быть выражена следующей зависимостью:

$$\sigma_{\min} = \frac{360}{\sqrt{6}} \sqrt{\frac{F}{N \cdot F^3 \sqrt{15N}} + \frac{F^2 \sqrt[3]{(15N)^2}}{30F^2 \cdot N^2}} = \frac{180}{\sqrt{N^3 \sqrt{15N}}}.$$

Поскольку тактовая частота квантующих импульсов соответствует периоду входных импульсных последовательностей, между которыми определяется фазовое запаздывание, то минимальная среднеквадратическая погрешность не зависит от вышеуказанного периода, а значит и от частоты входных импульсных последовательностей. Для повторения цикла измерения необходимо снова нажать кнопку (11) сброса.

Рассмотрим работу устройства при измерении фазового запаздывания между двумя импульсными последовательностями, частоты которых отличаются вдвое.

В этом случае переключатель (12) переводится во второе (нижнее по схеме) положение. В этом случае импульсы поступают на единичный вход первого триггера (5) с частотой, равной  $0,5F$ . Частота следования импульсов на нулевой вход первого триггера (5) совпадает с частотой второй входной импульсной последовательности и остается равной  $F$ . В связи с этим на выходе указанного триггера каждые два периода второй импульсной последовательности появляется один прямоугольный импульс, длительность которого соответствует измеряемому фазовому запаздыванию.

Цикл измерения начинается с нажатия кнопки (11) сброса, в результате которого оба регистра (8) и (9) сбрасываются и на цифровом табло блока (10) индикации высвечиваются нули. После сброса второго регистра (9) на его инверсном выходе устанавливается единичный сигнал, отпирающий вторую схему (20) совпадения. Поскольку переключатель (12) переведен во второе положение, то на вход второго регистра (9) поступают импульсы с выхода второго триггера (6), а на вход управляемого генератора (16) поступает сигнал с выхода делителя (19) напряжения. Так как фильтр (18) низкой частоты, делитель (19) напряжения и управляемый генератор (16) прямоугольных импульсов в этом случае соединены последовательно, то частота  $f_3$  на выходе генератора (16) и частота  $F$  на выходе второго формирователя (4) импульсов связаны соотношением:

$$f_3 = F \sqrt{\frac{15N}{4}}.$$

Поскольку на вход второго регистра (9) импульсы поступают с выхода второго триггера (6), то частота импульсов записи в этом регистре вдвое ниже частоты импульсов на входе первого регистра (8). При записи во второй регистр (9) заранее известного числа  $N$ , равного емкости этого регистра, на его инверсном выходе устанавливается нулевой сигнал, запирающий вторую схему (20) совпадения. В результате этого поступление импульсов на входы регистров (8) и (9) и вместе с ним процесс измерения прекращаются. За время записи в первый регистр (8) записывается число  $N_1$ , значение которого в десятичной системе счисления индицируется блоком (10) индикации. Поскольку в рассматриваемом случае запись во второй регистр (9) происходит частотой  $0,5f_3$ , то время записи равно:

$$t_3 = \frac{N}{0,5f_3} = \frac{2N}{f_3},$$

а количество периодов второй входной импульсной последовательности:

$$m = t_3 \cdot F = \frac{2N \cdot F}{f_3}. \quad (1)$$

Число, записанное в этом случае в первый регистр (8), определяется выражением (без учета погрешности квантования):

$$N_1 = \frac{1}{2} m \cdot t_u \cdot f_3$$

(множитель  $1/2$  поставлен потому, что на выходе первого триггера (5) один импульс вырабатывается за два периода второй импульсной последовательности). После подстановки выражения (формула 1) в последнее соотношение получают:

$$N_1 = N \cdot F \cdot t_u = \frac{N \cdot t_u}{T} = \frac{N \cdot t_u \cdot \omega}{T \cdot \omega} = \frac{N \cdot t_u \cdot \omega}{2\pi}.$$

При этом фазовое запаздывание в радианах можно представить следующим образом:

$$\theta = \frac{2\pi \cdot N_1}{N}$$

или в градусах

$$\theta = \frac{360N_1}{N}.$$

Последние два выражения определяют математическое ожидание фазового запаздывания. Истинное значение фазового запаздывания несколько отличается от математического ожидания вследствие наличия погрешности преобразования интервала времени в числа.

Минимальная величина среднеквадратичной погрешности фазового запаздывания между импульсными последовательностями может быть выражена согласно [3] следующей зависимостью:

$$\sigma_{\min} = \frac{360}{\sqrt{6}} \cdot \frac{F}{4N \cdot F \cdot \sqrt[3]{\frac{15N}{4}}} + \frac{F^2 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{15N}{4}\right)^2}}{30F^2 \cdot N^2} = \frac{90}{\sqrt{N \cdot \sqrt[3]{\frac{15N}{4}}}}.$$

Из последнего выражения следует, что минимальное значение погрешности фазового запаздывания не зависит от периода следования входных импульсных последовательностей.

Таким образом, предложенное устройство по сравнению с рассмотренными в [4] техническими средствами обладает более высокой точностью измерения фазового запаздывания, поскольку оно обеспечивает минимально возможную погрешность определения этого запаздывания независимо от того, изменяются или не изменяются частоты входных импульсных последовательностей.

Для уточнения метрологических характеристик предложенного устройства выполнена статистическая обработка экспериментальных данных. На рис. 2 представлена гистограмма разброса выходного кода устройства. Объем выборки составил 151 измерение. Основные статистические параметры следующие:

$$\bar{X} = 2.0 \cdot 10^{-4}, \sigma = 0.014248, A = 0.0536, E = -0.449.$$

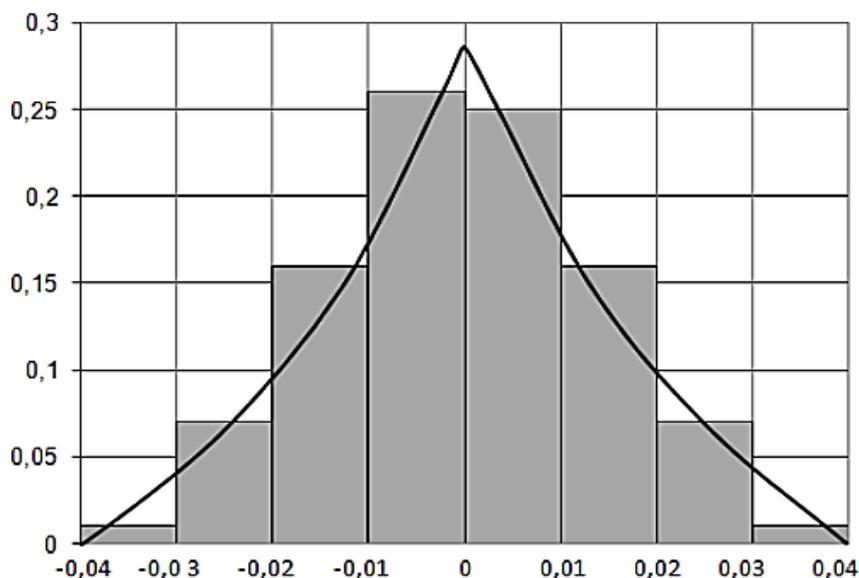


Рис. 2. Гистограмма разброса выходного кода фазометра

Гистограмма разброса выходного кода после выполнения процедуры сглаживания описана экспоненциальным законом распределения, который по виду достаточно близкий к треугольному. Вероятность проявления выдвинутой гипотезы по критерию согласия Колмогорова составляет 0.891 при  $\lambda = 0.419$ . Уравнение сглаженной кривой разброса выходного кода, после применения программы *Stat graft*, имеет следующий вид:

$$f(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \quad \text{при } x \in (-0.04, 0.04).$$

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

$$\ln f_8(x) = -\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}.$$

Отсюда энтропия погрешности предложенного устройства примет вид:

$$H\left(\frac{x}{x_n}\right) = - \int_{-0.04}^{0.04} \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \left(-\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}\right) dx = \ln \left(2\sigma \cdot e^{\frac{\mu_1}{\sigma}}\right).$$

Следовательно, энтропийный интервал неопределенности фазометра имеет вид:

$$\Delta = \sigma \cdot e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.01465.$$

Такая величина энтропийного интервала неопределенности преобразований мгновенной скорости в позиционный код допустима при подобных измерениях.

## 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. : №1. – 1986. – С. 92–94.
3. *Определение оптимальной частоты квантующих импульсов цифрового интегрирующего фазометра по минимуму среднеквадратической ошибки* / А. М. Борисенко, О. В. Сосина // *Український метрологічний журнал*. – Харків, 2012. – № 2. – С. 50–55.
4. *Анализ погрешности интегрирующего измерительного преобразователя фазового запаздывания* [Электронный ресурс] / А. Б. Богаевский, А. Н. Борисенко, Е. А. Борисенко, О. Ю. Ивченкова // *Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 2(23Е). – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/%E2%84%962\(23%D0%95\)\\_2017/article/13.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(23%D0%95)_2017/article/13.pdf).

Статья поступила в редакцию 20.04.2018 г.