

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИНКРЕМЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, ОСНОВАННЫХ НА РАСТРОВЫХ СТРУКТУРАХ

С. В. МЕДНИКОВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ, А. С. ВАСИЛЬЕВ, А. В. ПРОКОФЬЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: mednikov\_sv@corp.ifmo.ru*

Рассмотрено влияние температуры на погрешность инкрементных оптико-электронных преобразователей линейных перемещений, основанных на растровых структурах. Описаны основные принципы функционирования оптико-электронных преобразователей линейных перемещений. Проведенный анализ составляющих дополнительной погрешности от воздействия колебаний температуры окружающей среды, показал, что наибольшее влияние оказывают изменения линейных размеров растровых структур, обусловленные линейным расширением материала растров. Приведены результаты экспериментальных исследований погрешности преобразователя ЛИР-14, вызванной изменениями температуры окружающей среды, и дана оценка степени влияния составляющих погрешности, обусловленной этим явлением.

**Ключевые слова:** преобразователь линейных перемещений инкрементный, растры штриховые, метод растровой модуляции, принцип интерполяции сигналов

**Введение.** В инкрементных оптико-электронных преобразователях линейных перемещений (ОЭПЛП), выпускаемых фирмами „DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH“ и „Balluff“ (Германия), „RENISHAW“ (Англия), „GIVI MISURE“ (Италия), ОАО „СКБ ИС“ (Россия), используется растровое сопряжение, что позволяет при помощи преобразования оптических сигналов в оптико-электронном тракте с высокой точностью измерять линейное перемещение [1—7]. В таких устройствах информативные сигналы постоянно претерпевают преобразования, связанные с обработкой: сначала выполняется преобразование оптических сигналов, модулированных растровым сопряжением, в электрические, а затем их фильтрация, интерполяция и представление в форме, удобной для выделения информации о величине и направлении перемещения.

Изменяющиеся параметры окружающей среды, особенно температура, воздействуют на процессы преобразования сигналов, вызывая дополнительную погрешность.

Целью статьи является теоретическое и экспериментальное исследование дополнительной погрешности инкрементных ОЭПЛП, вызванной изменением температуры окружающей среды.

**Основные принципы построения и функционирования ОЭПЛП.** В основе действия ОЭПЛП лежит принцип растровой модуляции оптического излучения, использующий обтюрационное сопряжение двух растров [1—3] (рис. 1): кодирующей структуры (КС), которая перемещается вдоль контролируемого направления  $x$ , и неподвижной анализирующей структуры (АС) от источника оптического излучения, находящегося в фокальной плоскости оптической системы (ОС), параллельный пучок падает на сопряжение двух растров, расположенных с одинаковым шагом  $w$ . Поскольку наименьшую погрешность ОЭПЛП обеспечивает четырехфазная схема растрового сопряжения [1, 6], то после АС располагают фотоприемники ФП<sub>1</sub>—ФП<sub>4</sub>. Каждый фотоприемник смещен друг относительно друга на четверть шага растра

( $w/4$ ), поэтому электрические сигналы  $U_1, U_2, U_3, U_4$  (рис. 2) на каждом фотоприемнике при перемещениях КС на  $x$  будут сдвинуты по фазе  $\varphi$  на  $\pi/2$  относительно друг друга. Для формирования каждого квадратурного сигнала  $U_I, U_{II}$  фотоприемники включают попарно через один, т.е. ФП<sub>1</sub> с ФП<sub>3</sub> и ФП<sub>2</sub> с ФП<sub>4</sub>. Знак фазового сдвига между квадратурными сигналами  $U_I$  и  $U_{II}$  характеризует направление измеряемого перемещения. Если фазовая диаграмма исходных измерительных сигналов идеальна, т.е. векторы  $U_1, U_2, U_3, U_4$  строго квадратурны и имеют одинаковую амплитуду, то  $\varphi$  пропорционален  $x$  и изменяется от 0 до  $2\pi$  при изменении  $x$  от 0 до величины  $x = w$ :

$$\varphi = \frac{2\pi}{w} x. \quad (1)$$

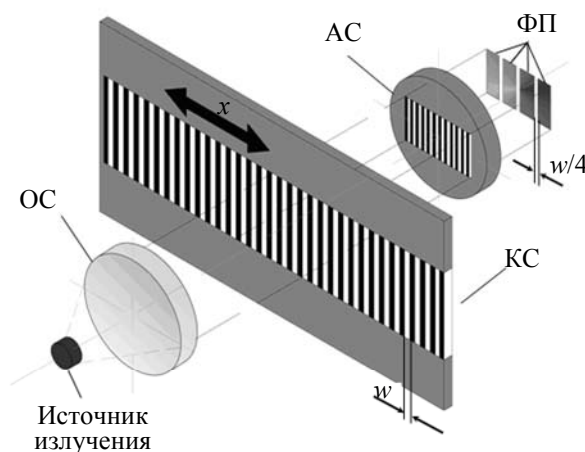


Рис. 1

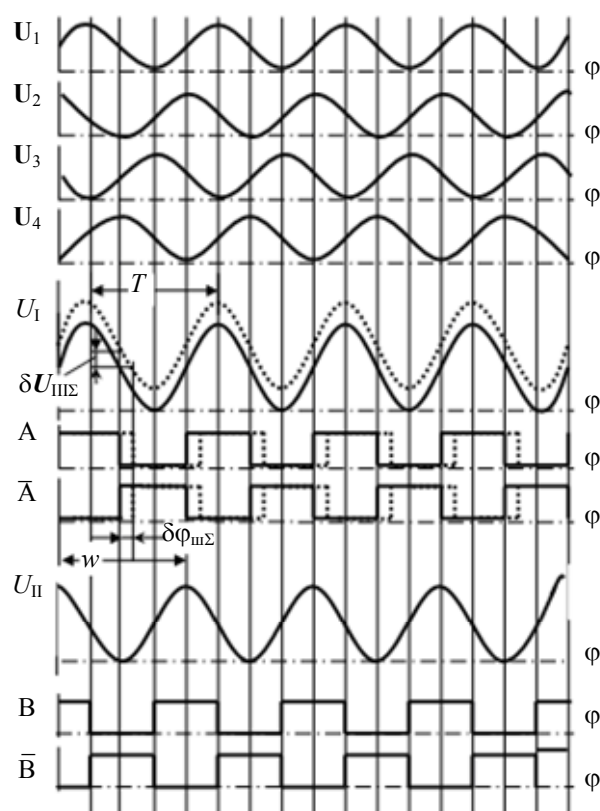


Рис. 2

Синусоидальные сигналы в ОЭПЛП преобразуются с помощью, например, триггеров, в прямоугольные  $A, B, \bar{A}, \bar{B}$ . В результате измеряемое перемещение  $x$  представляется после-

довательностью прямоугольных импульсов, причем каждый импульс соответствует перемещению КС на один шаг  $w$ . С целью повышения точности и разрешающей способности ОЭПЛП используют электронные интерполяторы [6] при определении дробной части  $\varphi$ .

На практике амплитуды и другие параметры информативных сигналов несколько различаются, и строгая коррекция этих вредных воздействий возможна лишь при фиксированных условиях эксплуатации [1, 6].

**Анализ составляющих дополнительной погрешности ОЭПЛП от воздействия температуры.** Колебания температуры окружающей среды оказывают воздействие на элементы ОЭПЛП и приводят к изменению фазового сдвига суммарного сигнала  $\delta\varphi$ . Поскольку счетные импульсы, определяющие количественно величину перемещения, связаны с фазой информативного сигнала, возникает дополнительная погрешность их положения (дополнительная составляющая погрешности измерения).

Например, при относительном изменении амплитуды сигнала  $\delta U_1$  в одном из каналов дополнительная погрешность будет определяться выражением [1, 3]:

$$\delta\varphi = \frac{1}{2\pi} \left[ \arctg \frac{(2 + \delta U_1)m \sin \varphi + \delta U_1}{2m \cos \varphi} - \varphi \right],$$

где  $m$  — глубина модуляции оптического излучения в канале.

При малых отклонениях  $\Delta U_1$  от номинала  $U_1$  относительную фазовую погрешность  $\delta\varphi$  можно определить, используя приближенное соотношение:

$$\delta\varphi = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial U_1} \delta U_1 = \frac{1}{4\pi m} \left[ \cos \varphi + \frac{m}{2} \sin 2\varphi \right] \delta U_1. \quad (2)$$

На рис. 3 показаны зависимости относительной величины  $\delta\varphi$  от  $\varphi$  для возможных значений  $\delta U_1$  от  $-0,05$  до  $+0,05$  В при глубине модуляции  $m = 0,5$ . Видно, что погрешность имеет периодический характер, ее значение определяется глубиной модуляции излучения, а период — текущим значением фазового сдвига.

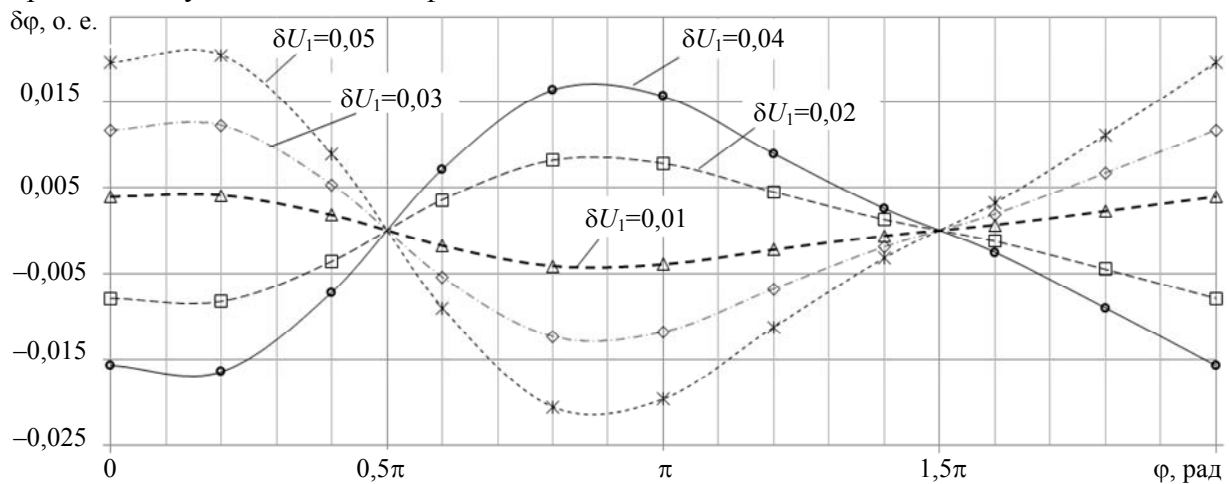


Рис. 3

При инженерных расчетах составляющих погрешности ОЭПЛП  $\delta x_i$  из выражения (2) можно найти максимальные значения  $\delta\varphi_{i \max}$  и  $\varphi_{i \max}$ . Используя выбранный шаг раstra  $w$ , можно определить максимальные проектные значения составляющих погрешности:

$$\delta x_{i \max} = w \delta\varphi_{i \max} \frac{\varphi_{i \max}}{2\pi}. \quad (3)$$

Проанализировав влияние температуры на процесс преобразования информации, можно выделить две группы основных составляющих дополнительной погрешности:

— погрешности, обусловленные изменениями взаимного пространственного положения элементов ОЭПЛП;

— погрешности, обусловленные изменениями параметров и характеристик элементов ОЭПЛП.

Погрешности, обусловленные изменениями взаимного пространственного положения элементов ОЭПЛП, вызванными колебаниями температуры, во многом определяются выбором материалов конструкции элементов ОЭПЛП. Основными из них являются погрешности  $\delta x_{КС}$  и  $\delta x_{АС}$ , вызванные изменением линейных размеров КС и АС соответственно.

Погрешность  $\delta x_{КС}$  изменения линейных размеров КС под влиянием температуры обусловлена линейным расширением материала КС:

$$\delta x_{КС} = \alpha_{КС} L_{КС} \Delta T, \quad (4)$$

где  $\alpha_{КС}$  — коэффициент линейного расширения материала КС;  $L_{КС}$  — длина шкалы, определяемая диапазоном измерения и длиной КС;  $\Delta T$  — диапазон изменения температур.

Для ОЭПЛП ЛИР-14 при  $L_{КС} = 25$  мм,  $\Delta T = 20$  °С,  $\alpha_{КС} = 5 \cdot 10^{-7}$  К<sup>-1</sup> погрешность в диапазоне измерения будет достигать  $\delta x_{КС} = 0,25$  мкм.

КС наносится на стекло и закрепляется неподвижно на корпусе ОЭПЛП, что в конечном итоге и вызывает смещение АС относительно КС при изменениях температур.

Погрешность  $\delta x_{АС}$ , вызванная изменением линейных размеров АС, определяется следующим выражением:

$$\delta x_{АС} = \alpha_{АС} L_{АС} \Delta T, \quad (5)$$

где  $\alpha_{АС}$  — коэффициент линейного расширения материала АС;  $L_{АС}$  — линейный размер АС, определяемый шагом ФП.

Для ЛИР-14  $L_{АС} = 10$  мм,  $\Delta T = 20$  °С,  $\alpha_{АС} = 5 \cdot 10^{-7}$  К<sup>-1</sup>, и погрешность будет составлять  $\delta x_{АС} = 0,1$  мкм.

К основным частным погрешностям, обусловленным изменениями параметров и характеристик элементов ОЭПЛП вследствие колебаний температуры, следует отнести погрешности, вызванные изменениями излучательной способности источника оптического излучения  $\delta x_{ИИ}$ , интегральной чувствительности фотоприемника  $\delta x_{ФП}$ , уровня теплового шума фотоприемника  $\delta x_{ш}$ , параметров электронной схемы интерполятора  $\delta x_{и}$ .

В современных ОЭПЛП в качестве источников оптического излучения используют полупроводниковые излучающие диоды (ПИД), которые обладают высоким КПД, малыми габаритами и удобством подключения к источнику питания [2]. Однако их светоизлучательные характеристики зависят от температуры окружающей среды [8].

Поскольку выходное напряжение, генерируемое ФП, в общем случае зависит от величины потока оптического излучения  $\Phi_{не}$ , прошедшего через КС и АС, и величины шума [3], то выходное напряжение, снимаемое с ФП, будет определяться выражением:

$$U(\Phi_{не}) = S_{ФП} \Phi_{не} R_{н} + I_{шн} R_{н}, \quad (6)$$

где  $S_{ФП}$  — токовая чувствительность ФП,  $R_{н}$  — сопротивление нагрузки,  $I_{шн}$  — шумовая составляющая приемника излучения.

Прошедший на ФП поток оптического излучения  $\Phi_{не}$  зависит от многих параметров [9]:

$$\Phi_{не} = \tau_{КС-АС} \frac{K_{ПИД} P_e}{d^2 \sin^2(\theta/2)} \left( \frac{D_{ист}}{-2f_1} \right)^2 A_2, \quad (7)$$

где  $\tau_{КС-АС}$  — коэффициент пропускания оптического излучения обтюрационным сопряжением [1—3],  $D_{ист}$  — диаметр диафрагмы, ограничивающей излучающую поверхность источника;  $A_2$  — площадь фотоприемника, на которую падает излучение;  $f_1$  — фокусное расстояние

оптической системы источника излучения;  $K_{\text{ПВД}}$  — коррекционный множитель излучения ПВД;  $P_e$  — мощность излучения ПВД;  $\theta$  — угол излучения для  $P_e=0,5$ ,  $d$  — диаметр излучающей площадки ПВД.

Изменение излучательной способности ПВД  $\Delta P_e(T)/P_e$  в одном из каналов обусловит с учетом (6) и (7) относительное изменение амплитуды информативного сигнала  $\delta U_{1\text{ ИИ}}$ :

$$\delta U_{1\text{ ИИ}} = \Delta U_1 / U_1 = S_{\text{ФП}} R_{\text{н}} \tau_{\text{КС-АС}} \frac{K_{\text{ПВД}} \Delta P_e(T) / P_e \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-2f_1} \right)^2}{d^2 \sin^2(\theta/2)} A_2. \quad (8)$$

Тогда, используя выражения (8) и (2), погрешность от изменений излучательной способности ПВД  $\delta x_{\text{ИИ}}$  можно вычислить:

$$\delta x_{\text{ИИ max}} = w \delta \varphi_{\text{ИИ max}} \frac{\varphi_{\text{ИИ max}}}{2\pi}. \quad (9)$$

Изменение излучательной способности в современных ПВД, вызванное колебанием температуры на 20 °С, может достигать 5 % [8], тогда погрешность  $\delta x_{\text{ИИ max}}$  ОЭПЛП типа ЛИР, имеющего несколько источников излучения, составит не более 0,22 мкм (поэтому для повышения точности следует использовать один источник оптического излучения).

Изменение интегральной чувствительности  $S_{\text{ФП}}$  одного ФП, как и излучательной способности ПВД, обусловит изменение  $\delta U_{1\text{ ФП}}$  одного из электрических сигналов  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ , или  $U_4$ :

$$\delta U_{1\text{ ФП}} = \Delta U_1 / U_1 = (\delta S_{\text{ФП}} / S_{\text{ФП}}) R_{\text{н}} \tau_{\text{КС-АС}} \frac{K_{\text{ПВД}} P_e}{d^2 \sin^2(\theta/2)} \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-2f_1} \right)^2 A_2. \quad (10)$$

Аналогично предшествующему случаю, используя выражения (10) и (2), погрешность, вызванную изменением чувствительности,  $\delta x_{\text{ФП}}$  можно вычислить

$$\delta x_{\text{ФП max}} = w \delta \varphi_{\text{ФП max}} \frac{\varphi_{\text{ФП max}}}{2\pi}. \quad (11)$$

Изменение интегральной чувствительности в современных кремниевых ФП, вызванное колебаниями температуры на 20 °С, может достигать 4 % [8], тогда расчетное значение  $\delta x_{\text{ФП max}} \leq 0,19$  мкм.

Если вернуться к алгоритмам вычисления перемещений, то, например, в канале  $A-\bar{A}$  (см. рис. 2) с пары фотоприемников при перемещении КС снимаются два противофазных электрических сигнала  $U_1$  и  $U_2$ . Очевидно, что случайные шумы в фотоприемнике вызовут флуктуации напряжения  $U_1$ . Это явление вызовет в работе ОЭПЛП случайную составляющую временной погрешности формирования сигналов  $A$  и  $\bar{A}$ , выражающуюся во флуктуации фазы сигнала в каналах на величину  $\delta \varphi_{\Sigma}$  (см. рис. 2).

Напряжение  $U_1$  определяется величиной потока оптического излучения, попадающего на фотоприемник, а флуктуация шума  $\delta U_{\Sigma}$  — характеристиками фотоприемника и схемой включения.

Для фотодиодов напряжение шума  $U_{1\text{ ш}}$  на нагрузочном сопротивлении  $R_{\text{н}}$  будет [8]:

$$U_{1\text{ ш}} = 2eI + 4kT(R_{\text{н}}^{-1} + R_{\text{б}}^{-1}) + 8kTS_{\text{ФП}}I, \quad (12)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $R_{\text{б}}$  — сопротивление базы фотодиода;  $I$  — величина тока, протекающего через фотодиод;  $T$  — температура среды.

Тогда с учетом (6), (7) и (12) в одном канале относительная величина флуктуации напряжения  $\delta U_{1\text{ ш}}$  будет:

$$\delta U_{1\text{ ш}} = \left[ 4kT(R_{\text{н}}^{-1} + R_{\text{б}}^{-1}) + 2eI + 8kTS_{\text{ФП}}I \right] / \left[ S_{\text{ФП}} R_{\text{н}} \tau_{\text{КС-АС}} \frac{K_{\text{ПВД}} P_e}{d^2 \sin^2(\theta/2)} \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-2f_1} \right)^2 A_2 \right]. \quad (13)$$

Используя выражения (13) и (2), погрешность, обусловленную изменением напряжения шумов фотоприемника,  $\delta x_{ш \max}$  можно определить выражением:

$$\delta x_{ш \max} = w \delta \varphi_{ш \Sigma \max} \frac{\varphi_{ш \Sigma \max}}{2\pi}. \quad (14)$$

В типовых ОЭПЛП отношение сигнал/шум превышает несколько сотен [3], при расчетном значении  $\delta x_{ш \max}$  вследствие изменения температуры, например на 20 °С, погрешность для фотодиодов типа ФД 11К [8] составляет 0,3 мкм.

Погрешности, обусловленные воздействием электрических цепей, связаны с отклонением от идеальных значений фактической величины различных параметров (сопротивлений, емкостей, индуктивностей) вследствие изменений температуры.

Инженерная методика расчета фазосдвигающей цепочки интерполятора допускает равенство амплитуд значений выходных сигналов системы результирующих сигналов при строгой квадратурности последних. Это условие удобно анализировать с учетом зависимости погрешности фазового сдвига  $\pm \delta \varphi_{\max}$  от коэффициента температурной стабильности  $K_T$  резисторов  $R_1/R_2$  интерполятора [6]. Поскольку величина  $K_T$  незначительна, выражение удобно записать в виде:

$$\delta \varphi_{\max} \cong \arctg \left[ (R_1 / R_2) \pm 2K_T \Delta T \right]. \quad (15)$$

Разброс значений параметров резисторов, вызванный колебаниями температуры, носит случайный характер и для погрешности, вносимой интерполятором  $\delta x_{и}$  в контролируемых ОЭПЛП, с учетом (1) и (15) можно записать:

$$\delta x_{и \max} = \frac{w \arctg \left[ (R_1 / R_2) \pm 2K_T \Delta T \right]}{2\pi}. \quad (16)$$

Для высокостабильных сопротивлений  $K_T = 0,003 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  [14] и схемы интерполятора с коэффициентом интерполяции, равном 20 [6],  $\delta x_{и \max} = 0,02 \text{ мкм}$ .

Если значение температуры неизвестно, а известны лишь пределы ее изменения, то дополнительную погрешность  $\delta x_T$ , обусловленную указанными факторами, предлагается рассматривать как случайную величину, тогда с учетом четырех информативных каналов [6, 11]:

$$\delta x_T = \sqrt{\delta x_{КС}^2 + \delta x_{АС}^2 + 4\delta x_{ИИ}^2 + 4\delta x_{ПОИ}^2 + 4\delta x_{ш}^2 + \delta x_{И}^2}. \quad (17)$$

Расчет с учетом рассмотренных составляющих погрешности показал, что для ЛИР-14 при  $\Delta T = 20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$  возможно  $\delta x_T = 1,18 \text{ мкм}$ . В этом случае видно, что наибольшее влияние на дополнительную погрешность оказывает погрешность от линейного расширения АС и КС.

Учитывая множество факторов возникновения погрешности, вызванной воздействием температуры на систему измерительных сигналов, следует сделать вывод, что погрешность зависит от конкретной конструкции, поэтому наряду с теоретическими исследованиями актуально и проведение экспериментов, позволяющих подтвердить предлагаемую методику расчетов.

**Экспериментальные исследования ОЭПЛП модели ЛИР-14.** Для экспериментальных исследований зависимость погрешности ОЭПЛП от температуры на кафедре оптико-электронных приборов Университета ИТМО на стабильном основании оптического стола фирмы „Standa“ был сформирован стенд, в котором в качестве эталонного средства измерений используется лазерный интерферометр (рис. 4) модели XD-1 фирмы API, с диапазоном измеряемых расстояний до 25 метров с погрешностью 0,5 мкм.

Перемещения отражателя лазерного интерферометра задаются при помощи моторизованной подвижки модели 8MT160-200 фирмы „Standa“, обеспечивающей минимальное

перемещение в 2,5 мкм при величине перемещения до 200 мм. Шток исследуемого ОЭПЛП упирается в каретку моторизованной подвижки.

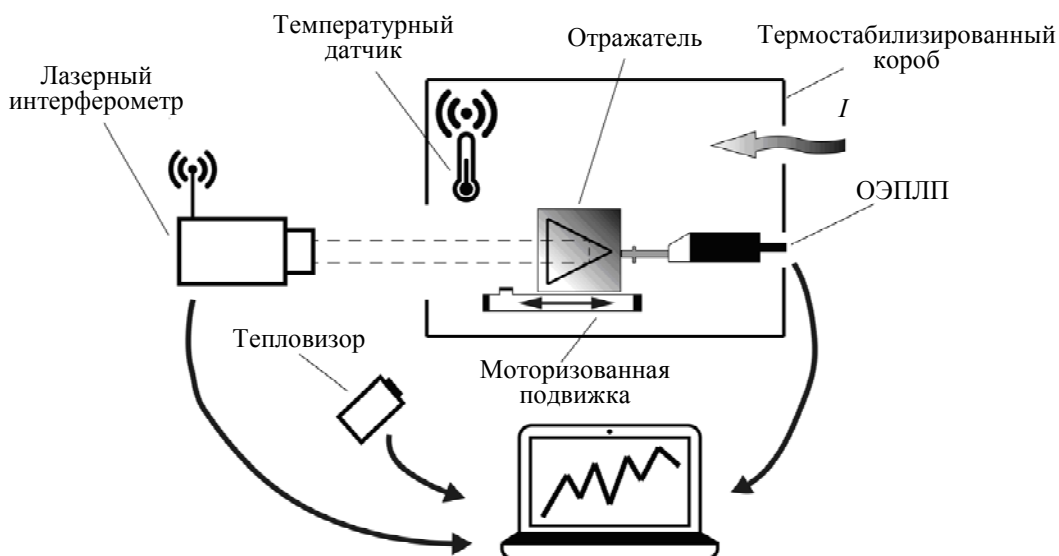


Рис. 4

Температура в термостабилизированном коробе с испытываемым ОЭПЛП контролируется датчиком температуры, а также тепловизором модели A615 фирмы FLIR, регистрирующим температуры в диапазоне от  $-40$  до  $+150$  °C с погрешностью  $\pm 2$  °C.

Эксперименты проводились с типовым инкрементным ОЭПЛП модели ЛИР-14 (ОАО „СКБ ИС“, Санкт-Петербург, Россия). Модель ЛИР-14 содержит (рис. 5)\*:

- шток 1 с запрессованным на нем ограничителем 2, перемещающимся в подшипнике качения, наружная обойма 3 которого запрессована в корпусе 4;
- КС 5 в оправе, жестко связанной через ограничитель со штоком 1;
- узел считывания в составе АС 6, платы светодиодов 7 и платы фотоприемников 8, смонтированных на оправе 9, связанный с корпусом 4 через штифт 10, что позволяет создавать наклон индикаторной пластины относительно шкалы для обеспечения параллельности штрихов их растров.

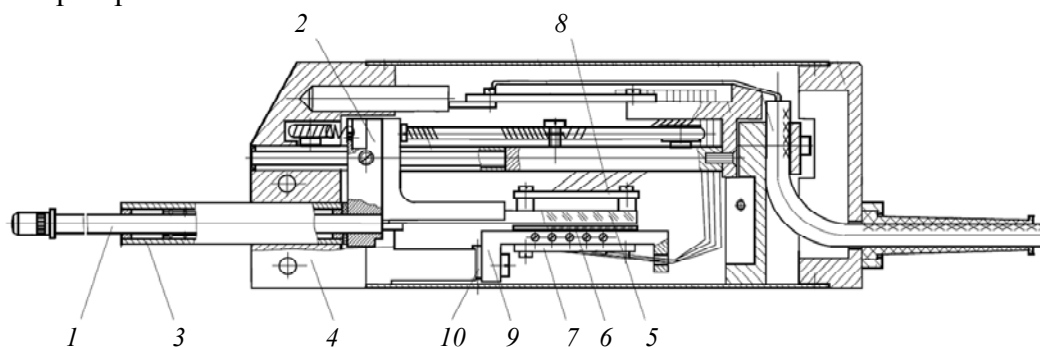


Рис. 5

Шток, ограничитель и КС образуют подвижный модуль, способный совершать поступательные перемещения относительно АС в пределах хода штока.

При температуре 23 (нормальная температура), 28 и 35 °C в соответствии с известной методикой\*\* с помощью подвижки в пределах 10 мм с шагом 0,1 мм измерялись перемещения штока ОЭПЛП.

\* ОАО „СКБ ИС“ „Преобразователи линейных перемещений. Модели ЛИР-7, ЛИР-8, ЛИР-9, ЛИР-10. Технические условия ЛИР-7.000.000 ТУ“. Май, 2007.

\*\* ГОСТ 26242-90. Системы числового программного управления. Преобразователи перемещений. Общие технические условия. М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам.

Полученные результаты обрабатывались по стандартной методике с расчетом усредненного по  $N$  сериям измерений значения  $x$  и систематической погрешности преобразователя  $\delta x_T$ . Плотность распределения величин  $x$  и  $\delta x$ , определенная по критерию Пирсона, подчиняется (по результатам проверки) закону Гаусса.

Как видно (рис. 6, а) из зависимостей систематической составляющей дополнительной погрешности  $\delta x_T$  от величины смещения  $x$  для диапазонов изменения температуры ОЭПЛП 5 и 12 °С относительно нормальной, величина  $\delta x_T$  сильно зависит от температуры в конце диапазона измерений, при этом максимальные значения систематической погрешности при увеличении температуры на 12 °С достигают 1,1 мкм при СКО измерений  $\sigma x_T = 0,6$  мкм (рис. 6, б).

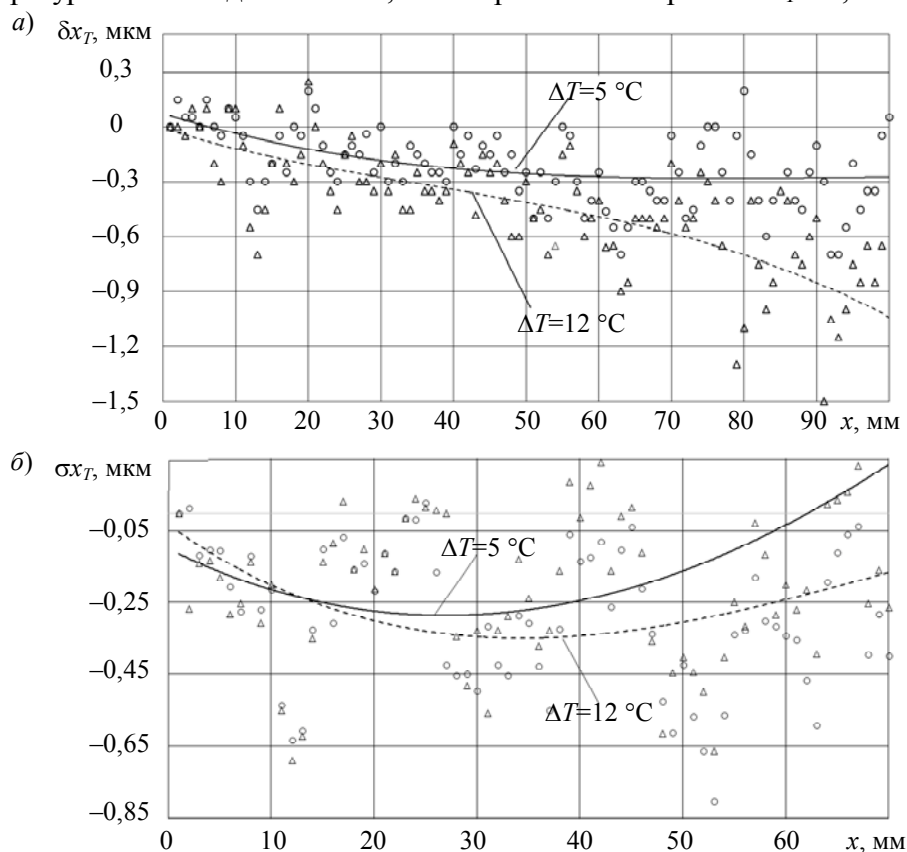


Рис. 6

**Выводы.** Предложена методика расчета максимальных значений частных составляющих дополнительной погрешности инкрементных ОЭПЛП, вызванной изменениями температуры окружающей среды. Анализ показал, что наиболее сильное влияние оказывают изменения линейных размеров АС и КС, обусловленные линейным расширением материала растров.

Экспериментальные исследования образца ОЭПЛП модели ЛИР-14 показали, что при увеличении температуры относительно номинального значения на 12 °С дополнительная составляющая систематической погрешности  $\delta x_T$  увеличивается на 1,1 мкм, что при точных измерениях требует ее компенсации.

Дальнейшие исследования дополнительной погрешности ОЭПЛП, вызванной воздействием температуры, целесообразно продолжить с выявлением корреляционных связей между составляющими.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преснухин Л. Н., Шаньгин В. Ф. и др. Фотоэлектрические преобразователи информации. М.: Машиностроение, 1974. 376 с.
2. Ernst A. Digitale Längen- und Winkelmeßtechnik. Verlag moderne industrie, D-86895 Landsberg/Lech. 1998.



3. Коротаев В. В., Прокофьев А. В., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Ч. I. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2012.
4. Каталог фирмы Heidenhain "Exposed Linear Encoders". May 2007. Angular encoders: General Catalog. Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2000. 82 p.
5. Обзорный каталог "Non-contact position encoders" фирмы Renishaw. Июль, 2007.
6. Муханин Л. Г. Схемотехника измерительных устройств: Учеб. пособие. СПб: Лань, 2009. 288 с.
7. Смирнов Н. В., Прокофьев А. В. Оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 27—30.
8. Ишанин Г. Г., Козлов В. В. Источники оптического излучения. СПб: Политехника, 2009. 415 с.
9. Anisimov A. G., Pantyushin A. V., Lashmanov O. U., Vasilev A. S., Timofeev A. N., Korotaev V. V. and Gordeev S. V. Absolute scale-based imaging position encoder with submicron accuracy // Proc. SPIE. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII. 13 May 2013. Vol. 87882T. [Электронный ресурс]: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.2021022>>. DOI:10.1117/12.2021022.
10. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под ред. В. Н. Дулина, М. С. Жука. М.: Энергия, 1977. 279 с.
11. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учеб. пособие. СПб: Лань, 2015. 400 с.

#### Сведения об авторах

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>Сергей Васильевич Медников</b>     | — Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; инженер; E-mail: mednikov_sv@corp.ifmo.ru  |
| <b>Александр Николаевич Тимофеев</b>  | — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; заведующий лабораторией; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru |
| <b>Александр Сергеевич Васильев</b>   | — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: a_s_vasilev@corp.ifmo.ru   |
| <b>Александр Валерьевич Прокофьев</b> | — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: avp79@yandex.ru  |

Поступила в редакцию  
01.03.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Медников С. В., Тимофеев А. Н., Васильев А. С., Прокофьев А. В. Исследование влияния температуры на погрешность инкрементных преобразователей линейных перемещений, основанных на растровых структурах // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 6. С. 539—548.

#### RESEARCH IN THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE ERROR OF INCREMENTAL CONVERTERS OF LINEAR DISPLACEMENTS, BASED ON RASTER STRUCTURES

S. V. Mednikov, A. N. Timofeev, A. S. Vasilev, A. A. Prokofyev

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: mednikov\_sv@corp.ifmo.ru

The influence of temperature on the error of incremental optoelectronic encoders of linear displacements based on raster structures, is considered. Basic principles of optoelectronic encoders of linear displacements are described. The performed theoretical analysis of additional error because of ambient temperature fluctuations demonstrates that the greatest influence is exerted by changes in the linear dimensions of the raster structures caused by linear expansion of the raster material. Results of experimental studies of the error of the LIR-14 encoder caused by changes in the ambient temperature are presented, and an estimate is given of the degree of influence of the error components due to this phenomenon.

**Keywords:** linear incremental encoder, line raster, raster modulation method, signal interpolation principle

**Data on authors**

- Sergey V. Mednikov** — ITMO University; Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Engineer; E-mail: mednikov\_sv@corp.ifmo.ru
- Alexander N. Timofeev** — PhD, Senior Scientist; ITMO University; Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Head of Laboratory; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru
- Alexander S. Vasilev** — PhD; ITMO University; Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: a\_s\_vasilev@corp.ifmo.ru
- Alexander A. Prokofyev** — PhD; ITMO University; Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: avp79@yandex.ru

**For citation:** Mednikov S. V., Timofeev A. N., Vasilev A. S., Prokofyev A. A. Research in the influence of temperature on the error of incremental converters of linear displacements, based on raster structures. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 6. P. 539—548 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-6-539-548