



Получено: 14.12.2022 г. | Принято: 20.12.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.58.68>

Научная статья

ЛИНЕЙНЫЙ НАНОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ДАТЧИК

Б.Г.Турухано¹, заведующий ЛГИИС, заслуженный изобретатель РФ, ORCID: 0000-0002-6441-4259 /

turukhano_bg@npri.nrcki.ru

Н.Турухано¹, вед. научн. сотр., ORCID: 0000-0001-6983-5725

Ю.М.Лавров¹, науч. сотр., ORCID: 0000-0001-8890-9929

О.Г.Ермоленко¹, вед. инженер-технолог, ORCID: 0000-0002-0460-0746

С.Н.Ханов¹, вед. инженер-электронщик, ORCID: 0000-0001-5237-1725

Аннотация. Линейный наноизмерительный голографический датчик (ЛНГД) относится к измерительной технике, точнее к области высокоточных измерений длин и перемещений линейными голографическими датчиками на базе голографических дифракционных решеток (ГДР), и может быть использован в машиностроении для прецизионного оборудования, в том числе и станочном, в оптико-механической и аэрокосмической промышленности для измерения концевых мер и т.д. Увеличена точность и разрешение ЛНГД при измерении линейных размеров во всем измеряемом диапазоне перемещений до метра и более, вне зависимости от качества направляющих системы. Таким образом, имеет место расширение диапазона обрабатываемых или исследуемых объектов при сохранении высокой точности и разрешения измерительной системы.

Ключевые слова: голографическая дифракционная решетка, нанодлиномер голографический

Для цитирования: Б.Г. Турухано, Н. Турухано, Ю.М. Лавров, О.Г. Ермоленко, С.Н. Ханов. Линейный наноизмерительный голографический датчик. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 1. С. 58–68. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.58.68>

Received: 14.12.2022 | Accepted: 20.12.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.58.68>

Original paper

LINEAR NANOMEASURING HOLOGRAPHIC SENSOR

Annotation. Linear nanomeasuring holographic encoder (LNHS) refers to measuring technology, more exactly precisely, to the field of highly accurate measurements of lengths and displacements by linear holographic sensors based on holographic diffraction gratings (HDC), and can be used in mechanical engineering for precision equipment, including machine tools, optical-mechanical and aerospace industry for measuring end standards, etc. Application of such sensors improves accuracy and resolution of LNHS when measuring linear dimensions in the entire measured range of displacements up to a meter or more, regardless of the quality of the guides of the system. Hence, there is an expansion of the range of processed or studied objects while maintaining high accuracy and resolution of the measuring system.

Keywords: holographic diffraction grating, vertical nanolength holographic encoder

For citation: B.G. Turukhano, N. Turukhano, Yu. M. Lavrov, O.G. Ermolenko, S.N. Khanov. Linear nanomeasuring holographic sensor. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 1. PP. 58–68. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.58.68>.

¹ ФГБУ "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова" Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Ленинградская обл., г. Гатчина, Россия / Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P.Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute"



ВВЕДЕНИЕ

Датчики линейных перемещений весьма разнообразны по конструкции и широко применяются во всех отраслях науки и техники. Наибольшей точностью обладают датчики на голографических дифракционных решетках (ГДР), так как они позволяют получать устойчивые сигналы в области наноперемещений, которые не нуждаются в специальной обработке (как это делается в случае использования нарезных дифракционных решеток), причем их освещение когерентным светом от красного полупроводникового лазера дополнительно повышает качество сигналов [1]. Существенное преимущество ГДР состоит также и в том, что за решетками образуются лишь три порядка дифракции: +1, -1 и 0.

В России разработан и выпускается ЛНГД длиной до 1000 мм, который работает на базе голографических дифракционных решеток с шагом 1 микрон [2]. В настоящее время известен датчик линейных перемещений [3] для измерения линейных размеров объектов.

Имеются различные варианты использования направляющей: внешнего устройства, по которому перемещается считывающая головка, к которой прикреплен датчик, с помощью чего осуществляется измерение линейного перемещения или автономная направляющая самого датчика, по которой перемещается его считывающая головка. При этом длина автономной направляющей должна быть не меньше линейного размера измеряемого объекта. Однако для сохранения точности датчика при осуществлении измерений необходимо, чтобы перемещение ГДР_{инд} осуществлялось вдоль некоторой оси, строго перпендикулярной штрихам ГДР_{изм}. Это ставит определенные условия к точности изготовления направляющей, с помощью которой перемещается считывающая головка с ГДР_{инд}. К примеру, если точность датчика порядка 1 микрона на один метр и мы хотим измерять размер объекта с такой же точностью, то, естественно, что качество направляющей внешнего устройства, используемого для перемещения считывающей головки, должно быть не хуже этой величины. Как правило, такие направляющие не изготавливают, особенно при больших длинах (до 1 м), а больше одного метра тем более, так как это очень сложно и для их изготовления необходимо затратить много времени и средств. Разные внешние устройства имеют направляющие разной точности, что делает практически невозможным использование точных датчиков, особенно на базе высокочастотных ГДР (до 1000 лин./мм) к устройствам, станкам, приборам и т. д. с некачественными направляющими. При этом во всех устройствах, где используются ЛГД, не предпринято никаких мер для устранения муаровых полос (рис.1), возникающих благодаря

INTRODUCTION

Linear displacement sensors are very versatile in design and widely used in all fields of science and technology. Sensors based on holographic diffraction gratings (HDGs) are characterized by the greatest accuracy, as they allow of receiving stable signals in the nano-displacement range, which do not require special processing (as is done in the case of rifled diffraction gratings), and their illumination with coherent light from a red semiconductor laser additionally improves signal quality [1]. Another significant advantage of HDGs is that only three orders of diffraction are formed behind the gratings: +1, -1 and 0.

In Russia, a LNHS up to 1,000 mm in length has been developed and produced, which operates on the basis of holographic diffraction gratings with 1 micron pitch [2]. Currently, a linear displacement sensor [3] is known for measuring linear dimensions of objects.

There are various ways of using a guide: as an external device on which a reading head, to which the encoder is attached, travels to measure linear displacement, or as a stand-alone guide of the sensor itself on which its reading head moves. Length of the self-contained guide must not be shorter than the linear dimension of the object to be measured.

However, in order to maintain the encoder accuracy when measuring, it is necessary that the HDG_{ind} moves along some axis strictly perpendicular to the HDG_{izm} strokes. This factor places certain condition on the guide rail accuracy along which the encoder head with the HDG_{ind} moves. For example, if the encoder accuracy is approximately 1 micron per metre and we want to measure an object with the same accuracy, then, naturally, the quality of the guide used to move a reading head should be not worse than said value. As a rule, such guides are not produced, especially for longer lengths (up to 1 metre), and even more than one metre, as it is very difficult, time-consuming and expensive to manufacture them. Different external units have different accuracy guides, which makes it virtually impossible to use precision sensors, especially those based on high-frequency HDGs (up to 1,000 lines/mm) in devices, machine tools, instruments, etc. with poor quality guides. At the same time, in all devices where LNHS are used, no measures have been taken to eliminate moiré fringes (Fig.1) arising due to poor-quality guides, which distort the true length or displacement value. Known is an LNHS described in work [2]. In its development the authors set a problem of excluding the influence of the external device guides and provide a self-contained high quality guide during measurements. It contains two glass substrates mounted along a motion line. One of the substrates contains the HDG_{izm}, the other – the self-contained guide of the sensor itself. The glued section is shaped like a T-bar (Fig.2). This design provides necessary rigidity.



некачественным направляющим, искажающим истинную величину длины или перемещения. Известен ЛГД, описанный в работе [2], при разработке которого авторами была поставлена задача ухода во время измерений от влияния направляющих внешнего устройства и создания при конструкции прибора своей автономной высококачественной независимой направляющей. Она содержит две стеклянные подложки, установленные вдоль линии перемещения. Одна из подложек содержит ГДР_{изм}, другая – автономную направляющую самого датчика. В сечении склейка имеет форму тавра (рис.2). Такая конструкция обеспечивает необходимую жесткость. Стеклянные подложки выполнены из борского стекла, обладающего высокими характеристиками плоскостности. ГДР_{изм} приклеена к базе направляющей одной своей гранью. Каретка является необходимым механизмом для считывания координат с ГДР_{изм}. На каретке расположена считывающая ГДР_{инд}. В корпусе ЛГД размещены ГДР_{изм} с направляющей и каретка, содержащая осветительную систему, ГДР_{инд} и две матрицы, каждая из них содержит два фотоприемника, расположенных по одному в каждом дифракционном порядке. В этом случае автономная направляющая оказывает меньше влияния на результат измерения величины перемещения, чем в случае использования внешней направляющей или автономной направляющей, полученной путем механической обработки. В каждой матрице фотоприемники расположены на прямой, перпендикулярной оси дифракционных пучков и штрихам решеток. Эта прямая обеспечивает возможность счета обтюрационных полос.

Фазовое распределение интерференционных полос в картине взаимодействия интерференционного поля (ИП) с голографической дифракционной решеткой вдоль оси OX можно представить как:

$$\Phi(x) = 2kx + \Delta f(x), \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda \sin/\theta/2 = \pi/d_0$ – волновое число, $d_0 = \lambda/\sin/\theta/2$ – период линий интерференционного поля, образованного двумя плоскими волнами S_1^0 и S_2^0 . В данной работе мы будем исследовать возможность определения величины перемещения с помощью измерительной голографической дифракционной решетки (ГДР_{изм}), действующей совместно с интерференционным полем от интерферометра или ИП, образованного за индикаторной решеткой. При их взаимодействии образуются интерференционные муаровые и обтюрационные полосы (рис.3) в зависимости от равенства или отличия их периодов. Стрелки на рис.3 совпадают с направлением перемещения считывающей головки ЛГД во время измерения длины объекта.

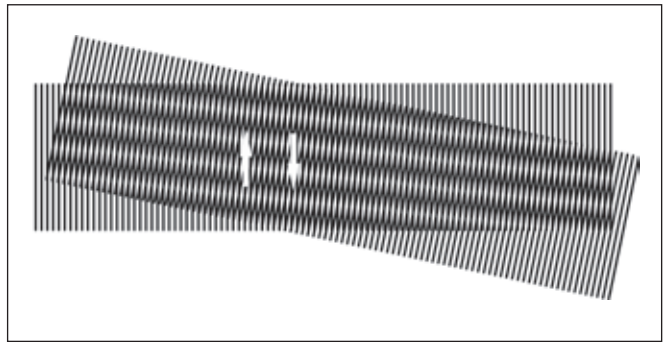


Рис.1. Муаровые полосы

Fig.1. Moiré fringes

The glass substrates are made of Borsky glass, which has high flatness characteristics. The HDG_{изм} is glued to the guide base with one of its faces. The carriage is the necessary mechanism for reading coordinates from the HDG_{изм}. The carriage accommodates the HDR_{изм} read-out. The LNHS case houses the HDG_{изм} with the guide rail and the carriage containing the illumination system, the HDG_{инд} and two matrices, each containing two photodetectors arranged one in each diffraction order. In this case the autonomous guide has less influence on the result of the displacement measurement than in the case of an external guide or an autonomous guide obtained by machining. In each matrix photodetectors are arranged in a straight line perpendicular to the axis of the diffraction beams and grating strokes. Such straight line enables the obturator fringes to be counted.

The phase distribution of the interference fringes in the interaction pattern of the interference field (IF) with holographic diffraction grating along the OX axis can be represented as

$$\Phi(x) = 2kx + \Delta f(x), \quad (1)$$

where $k = 2\pi/\lambda \sin/\theta/2 = \pi/d_0$ is the wave number, $d_0 = \lambda/\sin/\theta/2$ is the line period of the interference field formed

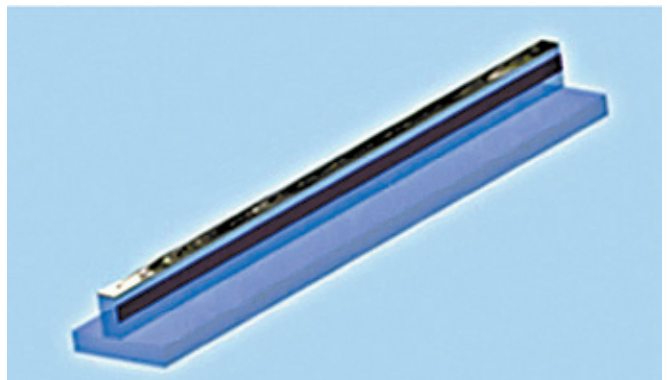


Рис.2. ГДР, склеенная с автономной направляющей
Fig.2. HDG bonded with self-contained guideline



Покажем, что поставленную задачу можно решить с помощью упорядоченно перемещающейся ГДР_{изм}. Суть метода заключается в том, что информация о фазовом распределении снимается в системе точек, жестко связанных с перемещающейся решеткой. При этом изменение разности фаз между точками будет однозначно определяться только фазовым распределением интерференционного поля. Дополнительная разность фаз, вносимая самим интерферометром или индикаторной решеткой будет постоянной величиной, аддитивно входящей в каждый акт измерения.

Метод определения фазового распределения вдоль измеряемой оси сводится к тому, что определяется фазовое распределение вдоль выбранного направления перемещения, в том числе определяются все граничные условия, позволяющие осуществить полное согласование по фазе значений фазовых распределений при перемещении. Рассмотрим взаимодействия интерференционного поля с ГДР_{изм} в случае образования муаровых полос. Рассмотрение проведем для случая квазиплоских волн. Пусть две квазиплоские монохроматические волны с комплексными амплитудами

$$S_1^G(x_1, y_1) - \exp(i)[k_{1G}r_1 + \Psi_1^G(x_1, y_1)], \quad (2)$$

$$S_2^G(x_1, y_1) - \exp(i)[k_{2G}r_1 + \Psi_2^G(x_1, y_1)] \quad (3)$$

формируют в плоскости X_1OY_1 , в которой записывается решетка с амплитудным пропусканием

$$T(x_1, y_1) = \alpha \cos[k_{CG}r_1 + \Psi^G(x_1, y_1)], \quad (4)$$

где $k_C = k_{1G} - k_{2G}$ - волновой вектор решетки, а

$$\Psi^G(x, y) = \Psi_1^G(x_1, y_1) - \Psi_2^G(x_1, y_1), \quad (5)$$

это функция, характеризующая фазовое распределение штрихов решетки.

Период решетки в этом случае:

$$d_C = \pi/K_C = \lambda/2\sin\theta_1/2, \quad (6)$$

где θ_1 - угол между волновыми векторами k_{1G} и k_{2G} , $K_C = |K_C|$ - волновое число решетки. Поместим решетку в плоскость XOY в системе координат XYZ , которая повернута относительно системы координат XYZ соответственно на углы $\psi\phi$ и осветим ее двумя квазиплоскими монохроматическими волнами с комплексными амплитудами:

$$\begin{aligned} S_1(x, y) - \exp(i)[k_1r + \Psi_1(x, y)], \\ S_2(x, y) - \exp(i)[k_2r + \Psi_2(x, y)], \end{aligned} \quad (7)$$

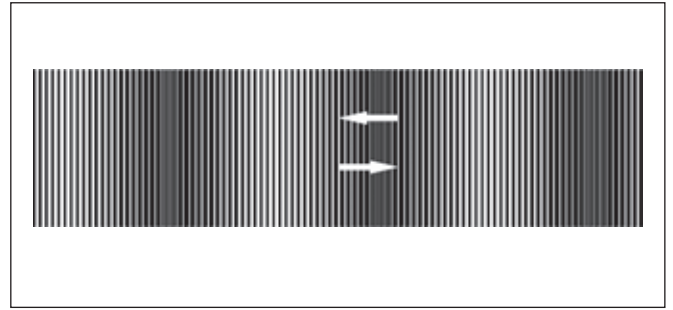


Рис.3. Фотография нониусных полос

Fig.3. Photo of the nonius stripes

by two plane waves S_1^0 and S_2^0 . In this paper we study a possibility of determining magnitude of displacement by means of a measuring holographic diffraction grating (HDC_{изм}) acting together with the interference field from an interferometer or IF formed behind the indicator grating. Their interaction produces interference moiré and obturator fringes (Fig.3), depending on equality or difference of their periods. The arrows in Fig.3 coincide with the direction of movement of the LNMHE reading head while measuring the object length.

Let us show that the set problem can be solved by orderly moving the HDR_{изм}. The essence of the method is that information about the phase distribution is taken in a system of points rigidly connected with the moving grating. In this case the phase difference change between the points will be uniquely determined by phase distribution of the interference field only. The additional phase difference introduced by the interferometer or indicator grating itself will be a constant, additively included in every measurement.

The method for determining phase distribution along the measured axis is reduced to determining phase distribution along the chosen direction of displacement, including determination of all the boundary conditions that allow complete phase agreement of phase distributions values during displacement. Let us consider interactions of the interference field with HDC_{изм} in the case of moiré fringes formation in the case of quasiplanar waves. Let two quasiplanar monochromatic waves with complex amplitudes:

$$S_1^G(x_1, y_1) - \exp(i)[k_{1G}r_1 + \Psi_1^G(x_1, y_1)], \quad (2)$$

$$S_2^G(x_1, y_1) - \exp(i)[k_{2G}r_1 + \Psi_2^G(x_1, y_1)], \quad (3)$$

form in the X_1OY_1 plane, in which the grating with amplitude transmittance is recorded

$$T(x_1, y_1) = \alpha \cos[k_{CG}r_1 + \Psi^G(x_1, y_1)], \quad (4)$$

where $k_C = k_{1G} - k_{2G}$ is the wave vector of the grade, and



где $k_1 = k_{1G}$, $k_2 = k_{2G}$. Волны $S_1(x, y)$ и $S_2(x, y)$ формируют в плоскости XOY исследуемое ИП с фазовым распределением

$$\Psi(x, y) = \Psi_2(x, y) - \Psi_1(x, y). \quad (8)$$

Введем параметр δ , характеризующий рассогласование периода ИП относительно периода ГДР_{изм} таким образом, чтобы волновое число поля

$$k = |k_2 - k_1| = k_G(1 - \delta); |\delta| \ll 1. \quad (9)$$

В результате взаимодействия ИП с решеткой в плоскости XOY образуется картина интерференционных обтюрационных и муаровых полос. Совместное решение уравнений (5) и (7) с учетом стандартных формул перехода из одной системы в другую ($r_1 \rightarrow r$) приводит к следующему выражению для распределения интенсивности муаровых полос:

$$I(x, y) = \{1 + \cos[k_G / \cos\gamma[(x \cos\phi + y \sin\phi) - (1 - \delta)x \cos\gamma] + \Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x, y)]\} \quad (10)$$

Поскольку $I(x, y)$ мало изменяется при изменении в широких пределах угла ν , члены, содержащие ν в выражении (10), опущены.

Из (10) можно записать фазовое распределение интерференционных муаровых полос $\Phi(x, y)$ в виде:

$$\Phi(x, y) = k_G / \cos\gamma[(x \cos\phi + y \sin\phi) - (1 - \delta)x \cos\gamma] + [\Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x, y)]. \quad (11)$$

Таким образом, получено выражение, позволяющее описать картину интерференционных муаровых полос в наиболее общем случае – при взаимодействии произвольным образом ориентированной неидеальной ГДР_{изм} с рассогласованным по периоду ИП. Следует отметить, что поскольку параметр рассогласования выбирался достаточно малым (случай, наиболее часто реализуемый на практике), то выражение (11) справедливо не только в плоскости XOY, но и на достаточно больших расстояниях по направлению распространения каждой из интерферирующих волн. Перейдем к анализу фазового распределения интерференционных муаровых полос. Перепишем (11) в виде:

$$\Phi(x, y) = \Phi^P(x, y) + [\Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x, y)], \quad (12)$$

где $\Phi(x, y)^P = k_G / \cos\gamma[(x \cos\phi + y \sin\phi) - (1 - \delta)x \cos\gamma]$.

Нетрудно заметить, что $\Phi(x, y)^P$ описывает взаимодействие идеальной ГДР_{изм} с идеальным ИП, сформированным двумя плоскими волнами, а второй член уравнения (11), заключенный в квадратные скобки, описывает отклонения фазовых распределений ИП

$$\Psi^G(x, y) = \Psi_1^G(x_1, y_1) - \Psi_2^G(x_1, y_1), \quad (5)$$

is a function that describes phase distribution of the grade strokes.

In this case the grade period is

$$d_G = \pi / K_G = \lambda / 2 \sin\theta_1 / 2, \quad (6)$$

where θ_1 is the angle between the wave vectors k_{1G} and k_{2G} , $K_G = |K_G|$ is the wave number of the grating. Let us place the grating in the XOY plane in the XYZ coordinate system, which is rotated relatively to the XYZ coordinate system by angles $\nu\phi$ respectively, and illuminate it with two quasilplane monochromatic waves with complex amplitudes:

$$\begin{aligned} S_1(x, y) &= \exp(i)[k_1 r + \Psi_1(x, y)], \\ S_2(x, y) &= \exp(i)[k_2 r + \Psi_2(x, y)], \end{aligned} \quad (7)$$

where $k_1 = k_{1G}$, $k_2 = k_{2G}$. Waves $S_1(x, y)$ and $S_2(x, y)$ form in the XOY plane the investigated IF with phase distribution

$$\Psi(x, y) = \Psi_2(x, y) - \Psi_1(x, y), \quad (8)$$

Then we introduce the parameter δ characterising mismatch of the IF period with respect to the HDG_{изм} period so that the wave number of the field:

$$k = |k_2 - k_1| = k_G(1 - \delta); |\delta| \ll 1, \quad (9)$$

As a result of interaction of IF with the grating in the XOY plane, a pattern of interference obturation and moiré fringes is formed. The joint solution of equations (5) and (7) taking into account the standard transition formulas from one system to another ($r_1 \rightarrow r$) leads to the following expression for the moiré fringe intensity distribution:

$$I(x, y) = \{1 + \cos[k_G / \cos\gamma[(x \cos\phi + y \sin\phi) - (1 - \delta)x \cos\gamma] + \Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x, y)]\} \quad (10)$$

Since $I(x, y)$ changes little if the angle ν changes over a wide range, the terms containing ν in (10) are omitted.

From (10) we can write phase distribution of the interference moiré fringes $\Phi(x, y)$ as

$$\Phi(x, y) = k_G / \cos\gamma[(x \cos\phi + y \sin\phi) - (1 - \delta)x \cos\gamma] + [\Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x, y)]. \quad (11)$$

Thus, we obtain an expression that allows us to describe the pattern of interference moiré fringes in the most general case, interaction of an arbitrarily oriented non-ideal HDG_{изм} with a period-mismatched IF. Note that since the mismatch parameter was chosen to



и ГДР_{изм} от идеальных. Остановимся на анализе $\Phi(x,y)^P$. Уравнение, описывающее конфигурацию и расположение муаровых полос в случае ИП и ГДР_{изм}, имеет вид:

$$k_C/\cos\gamma[(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1-\delta)x\cos\gamma] = 2\pi n, \quad (13)$$

где n – целое число. Уравнение (13) описывает ряд равностоящих линий с периодом:

$$d_M = d_C \cos\gamma / (\cos\phi - \cos\gamma + \delta\cos\gamma)^2 + \sin^2\phi, \quad (14)$$

$$\text{tg}\alpha = -1 / \cos\gamma \cos\phi [\cos\gamma(1-\delta) + \cos\phi]. \quad (15)$$

Наиболее интересным на практике является случай $\phi \ll 1$ и $\gamma \ll 1$. При этом, пренебрегая величинами второго порядка малости, имеем $d_M = d_C/\phi^2 + \delta^2$:

$$\alpha \approx \text{arctg}(\phi/2 + \gamma^2/2 - \delta/\phi). \quad (16)$$

Из (16) видно, что угол γ входит как величина второго порядка малости по сравнению с ϕ и δ , кроме того, при $\delta = \gamma^2/2$ величина α зависит только от одной переменной $\alpha = \alpha(\phi)$. Таким образом, подбирая параметр рассогласования δ , можно компенсировать угол наклона ГДР_{изм}. Поэтому, в дальнейшем мы будем рассматривать только две переменные: ϕ – угол наклона штрихов ГДР_{изм} относительно полос ИП и параметр δ – рассогласование по периоду. Согласно выражению (11), для $\Phi(x,y)$ при $\delta \ll 1$ и $\phi \ll 1$, $\Psi^G(x_1, y_1) \approx \Psi(x, y)$ и, исключая из рассмотрения γ , можно записать:

$$\Phi(x,y) = \Phi^P(x,y) + [\Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x,y)], \quad (17)$$

где $\Phi(x,y)^P \approx k_C [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1-\delta)x]$.

Выражение (17) достаточно точно описывает фазовое распределение интерференционных муаровых полос (во всех практически важных случаях). Подобным же способом можно найти и фазовое распределение интерференционных обтюрационных полос, получаемых благодаря разности частот ИП и ГДР_{изм}. Эти картины (рис.1 и 3) будут лежать в основе действия голографического датчика линейных перемещений. Коллимированный пучок излучения, генерируемый источником излучения, жестко связанным со считывающей головкой, падает на ГДР_{инд} и ГДР_{изм} решетки. При перемещении считывающей головки во время определения линейных размеров объекта, ГДР_{инд} смещается относительно ГДР_{изм}.

В поле интерференционных полос, образующихся за решетками, устанавливаются матрицы фотоприемников, которые расположены на линии, перпендикулярной штрихам решеток с целью регистрации интерференционных обтюрационных полос (рис.3). Стрелками показаны направления смещения

be small enough (the case most frequently encountered in practice), expression (11) is valid not only in the XOY plane but also at sufficiently large distances in direction of propagation of each of the interfering waves. Let us now proceed to analyze the phase distribution of the interference moiré fringes. Let us rewrite (11) as:

$$\Phi(x,y) = \Phi^P(x,y) + [\Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x,y)], \quad (12)$$

where $\Phi(x,y)^P = k_C [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1-\delta)x\cos\gamma]$.

It is easy to see that $\Phi(x,y)^P$ describes interaction of an ideal HDG_{изм} with an ideal IF formed by two plane waves, while the second term of equation (11), enclosed in square brackets, describes deviations of the phase distributions of the IF and HDG_{изм} from the ideal ones. Let us focus on the analysis of $\Phi(x,y)^P$. The equation describing the configuration and location of moiré fringes in the case of IF and HDG_{изм} is as follows:

$$k_C/\cos\gamma[(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1-\delta)x\cos\gamma] = 2\pi n, \quad (13)$$

where n is integer. Equation (13) describes a series of equidistant lines with a period:

$$d_M = d_C \cos\gamma / (\cos\phi - \cos\gamma + \delta\cos\gamma)^2 + \sin^2\phi, \quad (14)$$

$$\text{tg}\alpha = -1 / \cos\gamma \cos\phi [\cos\gamma(1-\delta) + \cos\phi]. \quad (15)$$

Most interesting in practice is the case of $\phi \ll 1$ and $\gamma \ll 1$. In this case, neglecting the values of the second order of smallness, we have $d_M = d_C/\phi^2 + \delta^2$:

$$\alpha \approx \text{arctg}(\phi/2 + \gamma^2/2 - \delta/\phi). \quad (16)$$

Equation (16) shows that the angle γ enters as a value of the second order of smallness as compared to ϕ and δ ; moreover, when $\delta = \gamma^2/2$, the value of α depends on only one variable $\alpha = \alpha(\phi)$. Thus, by fitting the mismatch parameter δ , we can compensate for the angle of slope of HDG_{изм}. Therefore, from now on, we will consider only two variables: ϕ , the slope angle of the HDG_{изм} bars with respect to the fringes of the IF and the mismatch parameter δ , the period mismatch. According to expression (11), for $\Phi(x,y)$ at $\delta \ll 1$ and $\phi \ll 1$, $\Psi^G(x_1, y_1) \approx \Psi(x, y)$ and, excluding γ from consideration, we can write:

$$\Phi(x,y) = \Phi^P(x,y) + [\Psi^G(x_1, y_1) - \Psi(x,y)], \quad (17)$$

where $\Phi(x,y)^P \approx k_C [(x\cos\phi + y\sin\phi) - (1-\delta)x]$.

Expression (17) quite accurately describes phase distribution of interference moiré fringes (in all practically important cases). Similarly, phase distribution of interference obturation fringes obtained due to the frequency difference between the IF and HDG_{изм} can be found in a similar way. These patterns (Fig.1 and Fig.3) will make



обтюрационных (нониусных) полос. При движении одной из решеток в этом же направлении фотоприемники преобразуют распределение интенсивности обтюрационных полос в электрические сигналы. При смещении считывающей головки одновременно с объектом во время определения его линейного размера $ГДР_{инд}$ смещается относительно $ГДР_{изм}$ и на выходах фотоприемников матрицы формируются переменные электрические сигналы, сдвинутые по фазе на 90° . Эти сигналы поступают затем в блок электроники, где с помощью компаратора формируются счетные импульсы, по которым определяется линейный размер объекта или величина перемещения. Опорные подшипники (первой группы подшипников), жестко связанные с индикаторной решеткой, перемещаются по базовой поверхности подложки измерительной решетки и подпружиненный подшипник этой же группы, перемещающийся по обратной поверхности этой подложки, позволяют сохранять постоянный зазор между решетками, обеспечивая тем самым работоспособность датчика на всем протяжении измерения линейного размера объекта независимо от качества направляющего устройства, к которому закреплена подвижная часть ЛГД.

НЕДОСТАТКИ УСТРОЙСТВА ПРОТОТИПА

При разработке выше описанного устройства ЛГД была решена задача по уменьшению влияния направляющих внешних устройств и создания, при конструкции прибора, своей собственной (автономной) направляющей, более точной и независимой от направляющей внешнего устройства, благодаря чему результаты измерения в меньшей степени зависели бы от качества направляющей внешнего устройства (станка, прибора и т.д.), и в каких-то пределах, зависели лишь от качества своей собственной. В описанном выше устройстве используется автономная, встроенная в самом датчике ЛГД. Однако величина любой реальной направляющей оказывает влияние на результат измерения величины перемещения или длины и это влияние существует, несмотря на то, что качество автономной направляющей намного выше, чем качество направляющей внешнего устройства. Предложенное борское стекло в качестве автономной направляющей само по себе, благодаря технологии изготовления, обладает высокой плоскостностью на большой длине и она не требует дополнительной и сложной механической обработки. Тем не менее, муаровые полосы появляются благодаря существованию реальных (не идеальных) направляющих. При появлении и решении новых современных задач в науке и технологии постоянно растут и требования к точности и разрешению ЛГД, поэтому этот вопрос нуждается в особом решении. Авторы данной работы предлагают исключение влияния автономной направляющей на величину

the basis for operation of the holographic linear displacement sensor. A collimated beam of radiation, generated by a radiation source rigidly connected to the reading head, falls on the grating HDC_{ind} and HDC_{izm} . When the reading head is moved during object linear measurement, the HDC_{ind} moves relative to the HDC_{izm} .

In the field of interference fringes generated behind the gratings, the photodetector arrays are placed on a line perpendicular to the grating strokes to record interference obturation fringes (Fig.3). The arrows show directions of the fringes (nonius) displacement. When one of the gratings moves in the same direction the photodetectors convert intensity distribution of the fringes into electrical signals. When the reading head moves simultaneously with the object during determination of its linear size, the HDC_{ind} moves relative to the HDC_{izm} and variable electrical signals, shifted in phase by 90 degrees, are generated at the outputs of the matrix photodetectors.

These signals are then fed into the electronic unit, where a comparator generates counting pulses which determine linear dimension of the object or the magnitude of its movement. The bearings (of the first bearing group), which are rigidly connected to the indicator grating, move along the base surface of the measuring grating substrate and the spring-loaded bearing of the same group, which moves on the reverse surface of this substrate, allows of maintaining a constant gap between the gratings, thus ensuring operability of the sensor throughout the measurement of the linear size of the object regardless of the guiding device quality, to which the moving part of the HDE is fixed.

DISADVANTAGES OF THE PROTOTYPE DEVICE

In developing the above-described HDG device, the objective was to reduce influence of the external device guides and to create, in the device design, its own (autonomous) guide, more accurate and independent of the external device guide; due to it the measurement results would be less dependent on quality of the external device (machine, device, etc), and to some extent, would depend only on quality of its own guide. The unit described above uses a self-contained, in-built HDG in the sensor itself. However, the size of any real guide has an effect on the result of displacement or length measurement and this effect exists despite the fact that quality of the stand-alone guide is much higher than that of the external device guide. The proposed "Borsky" glass as a self-contained guide, itself, due to its manufacturing technology, has high flatness over long lengths and it does not require additional and complex machining. Nevertheless, moiré fringes appear due to existence of real (not perfect) guides. With emergence and solution of new modern tasks in science and technology, the demands to accuracy and resolution of



перемещения при измерении длины отдельного изделия. Решение принимается не путем улучшения качества направляющей посредством механической обработки, что дорого, исключительно сложно и практически невозможно, особенно при больших длинах до метра и более, а путем осуществления в реальном времени цифровой компенсации погрешности, внесенные направляющей на величину перемещения или длины поверяемого или изготавливаемого изделия. Устройство ЛГД (рис.4) содержит измерительную дифракционную решетку с подложкой, индикаторную решетку и считывающую головку, источник излучения, коллиматор, матрицу фотоприемников. ЛГД содержит также стеклянную автономную направляющую, имеющую базовую и обратную поверхности, и она жестко присоединена к торцу подложки ГДР_{изм} (рис.2). Длина автономной направляющей не меньше линейного размера измеряемого объекта. Фотоприемники матрицы (рис.5) установлены по два после дифракционных решеток в каждом из ее двух дифракционных порядков, каждый из которых имеет ось параллельную оси пучка источника излучения.

Каждая пара фотоприемников установлена симметрично относительно оси пучков каждого из дифракционных порядков и на линии, перпендикулярной им осей. Кроме этого, дополнительно к каждой паре фотоприемников добавлены по одному фотоприемнику, расположенному в лазерном пучке, на одной линии с одним из имеющихся и на одинаковом от него расстоянии, равном расстоянию от первых двух и на перпендикуляре к линии, соединяющей первые два фотоприемника с той же стороны.

Считывающая головка жестко связана с подвижной частью внешнего устройства. Неточность изготовления направляющих, по которым движется одна из решеток, влияет на величину периода муаровых полос, а, следовательно, на величину самого перемещения, определяемую с их помощью, поэтому для измерения длины используют не эту величину, а величину обтюрационных полос, так как они не зависят (инвариантны) от направляющих. Чтобы исключить погрешность, вносимую этим недостатком датчика, необходимо использовать идеально плоские направляющие, что на практике практически невозможно. Поэтому в данном устройстве предлагается исключить эту погрешность путем ее вычитания из общей величины перемещения. Таким образом, с учетом того, что ЛГД осуществляет измерения линейных перемещений посредством обтюрационных полос, где $\Delta_{об}$ - истинная величина перемещения, вносимая при определении величины перемещения посредством обтюрационных полос, а $\delta_{напр.об.}$ - величина погрешности перемещения, то вносимая обтюрационными полосами за счет использования неточных направляющих:

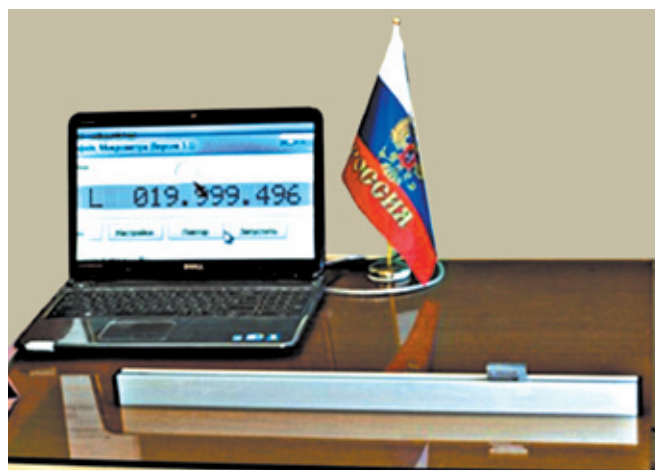


Рис.4. Датчик линейных перемещений

Fig.4. Linear displacement encoder

HDGs are constantly increasing, so this issue needs a special solution. The authors of this paper propose to eliminate the influence of an autonomous guide on the displacement value when measuring the length of an individual article. The solution is not to improve quality of the guide by machining, which is expensive, extremely difficult and impractical, particularly for longer lengths of up to a metre or more, but by implementing real-time digital compensation for the error introduced by the guide by movement or length of the item being verified or manufactured. The HDG device (Fig.4) contains a measuring diffraction grating with a substrate, an indicator grating and a reading head, an emission source, a collimator, and a matrix of photodetectors. The HDG also contains a glass autonomous guide that has a base and a back surface, and is rigidly attached to the end face of the HDG_{изм} substrate (Fig.2).

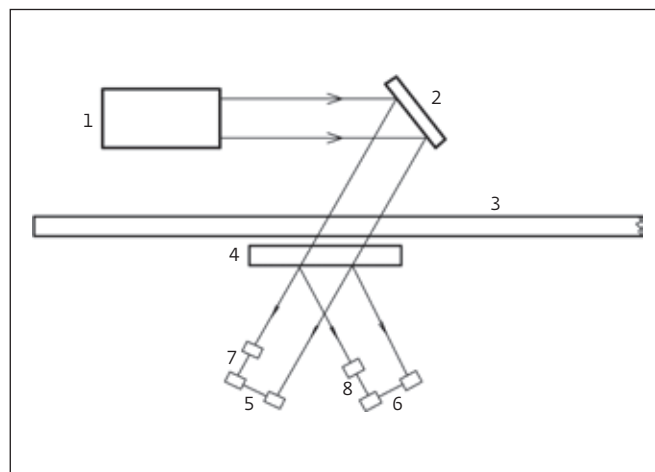


Рис.5. Расположение фотоприемников в ЛГД

Fig.5. Arrangement of photodetectors in LHS



$$\Delta_{\text{перем.об.}} = \Delta_{\text{об.}} + \delta_{\text{напр.об.}} \quad (18)$$

В связи с тем, что при измерении перемещения посредством обтюраторных полос ось подшипников, посредством которых одна решетка перемещается по направляющей относительно другой, перпендикулярна направлению перемещения, и решетка может наклоняться только в направлении перемещения, то при данной конструкции ЛГД величина $\delta_{\text{напр.об.}} = 0$ и $\Delta_{\text{перем.об.}} = \Delta_{\text{об.}}$, что означает, что обтюраторные полосы этого датчика независимы (инвариантны) от качества собственной направляющей. С другой стороны, величина перемещения, полученная при регистрации муаровых полос $\Delta_{\text{перем.м.}}$, в рамках нововведенного датчика на базе фотоприемников 7 и 8 (рис.5) следующая:

$$\Delta_{\text{перем.м.}} = \Delta_{\text{м}} + \delta_{\text{напр.м.}} \quad (19)$$

где $\Delta_{\text{м}}$ – величина самого перемещения, в случае ее определения посредством муаровых полос, а $\delta_{\text{напр.м.}}$ – дополнительная величина перемещения, вносимая в нем за счет использования неточных направляющих. В предложенное устройство ЛГД имеется возможность определить величину $\delta_{\text{напр.м.}}$, используя датчики на базе фотоприемников 5, 7 и 6, 8. В этом случае истинную величину перемещения можно найти следующим образом:

$$\Delta_{\text{перем.}} = \Delta_{\text{об.}} - \delta_{\text{напр.м.}} \quad (20)$$

где

$$\delta_{\text{напр.м.}} = (\Delta_{\text{перем.м.}} - \Delta_{\text{перем.об.}}) \quad (21)$$

Устройство ЛГД (рис.4) работает следующим образом: полупроводниковый лазер 1 (рис.5) излучает когерентный луч, направленный на коллиматор, формирующий слабо расходящийся луч. Расходящийся луч позволяет работать как с "обтюраторными", так и с "муаровыми" полосами [3]. Этот луч направляется на ГДР_{изм} 3 и ГДР_{инд} 4 под углом Брэгга. В случае ГДР с 1000 штрих/мм, это угол порядка 20°. После дифракции на ГДР_{изм} решетку 3 свет падает на ГДР_{инд} решетку 4. В данном конкретном случае длина ГДР_{изм} равна 1000 мм. Решетки 3 и 4 параллельны друг другу. Коллиматор необходим для точной настройки периода интерференционных обтюраторных полос. В случае расходящегося пучка лазера период штрихов первой дифракционной решетки 3 увеличивается по мере отдаления этой решетки от второй решетки 4. Таким образом, меняется частота

The length of the self-contained guide is not less than the linear size of the object to be measured. The photodetectors of the matrix (Fig.5) are mounted in two after the diffraction gratings in each of its two diffraction orders, each with the axis parallel to the beam axis of the radiation source.

Each pair of photodetectors is mounted symmetrically about the beam axis of each of the diffraction orders and along the line perpendicular to their axes. In addition, one photodetector is added to each pair of photodetectors, located in the laser beam, on the same line as one of the existing ones and at the same distance from it, equal to the distance from the first two and perpendicularly to the line connecting the first two photodetectors from the same side.

The reading head is rigidly connected to the moving part of the external device. Inaccuracy of the guides, along which one of the gratings moves, affects the value of the moiré fringe period and hence the value of movement itself, which is determined by them, so that not this value but the value of the obturation fringes is used for length measurement, since they are independent (invariant) of the guides. In order to eliminate the error introduced by this disadvantage it is necessary to use perfectly flat guides, which is practically impossible in practice. It is therefore proposed that this error is eliminated in this unit by subtracting it from the total value of displacement. Thus, in view of the fact that the HDG measures linear displacement by means of obturator strips, where $\Delta_{\text{об.}}$ is the true value of displacement introduced by the obturator strips, and $\delta_{\text{напр.об.}}$ is the amount of displacement error introduced by the obturation strips through the use of inaccurate guides:

$$\Delta_{\text{перем.об.}} = \Delta_{\text{об.}} + \delta_{\text{напр.об.}} \quad (18)$$

Since the axis of the bearings, serving to move one grating along the guide relative to the other is perpendicular to the movement direction, and the grating can only tilt in the direction of movement, at this HDG design the value of $\delta_{\text{напр.об.}} = 0$ and $\Delta_{\text{перем.об.}} = \Delta_{\text{об.}}$, which means that the obturator strips of this sensor are independent (invariant) of the quality of its own guide. On the other hand, the displacement value obtained by recording the moiré fringes $\Delta_{\text{перем.м.}}$, within the framework of the new sensor based on photodetectors 7 and 8 (Fig.5) is as follows:

$$\Delta_{\text{перем.м.}} = \Delta_{\text{м}} + \delta_{\text{напр.м.}} \quad (19)$$

where $\Delta_{\text{м}}$ is the magnitude of the displacement itself, in case it is determined by means of moiré fringes, and $\delta_{\text{напр.м.}}$ is the additional magnitude of displacement introduced by the use of inaccurate guides. In the proposed HDG device it is possible to determine the value of

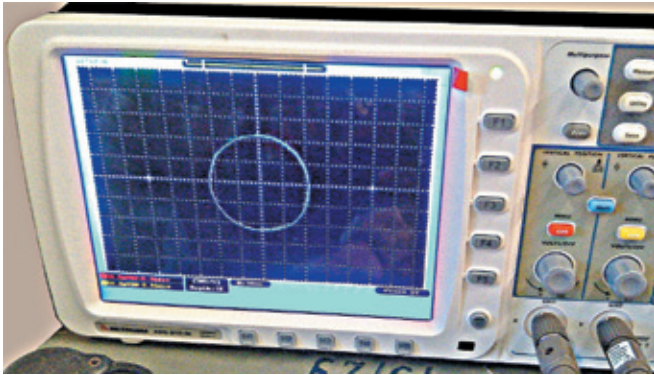


Рис.6. Вид синусоид от фотоприемников
Fig.6. View of the sine wave from the photodetectors

проектируемых штрихов первой решетки благодаря дифракции в плоскости второй решетки. Разность между периодами измерительной и индикаторной решетками определяет период обтюрационных полос, образованных за решетками. Эти полосы, попадая на фотоприемники 5 и 6, создают синусоидальные сигналы (рис.6). Фотоприемники 5 и 6 установлены на линии инварианта, которая перпендикулярна штрихам решеток. В случае использования идеально плоской направляющей величина перемещения ЛГД, определяемая обтюрационными полосами, будет соответствовать истинной величине перемещения. Выбирают ширину интерференционных полос таким образом, чтобы два фотоприемника из каждой матрицы фотоприемников создавали два сигнала, сдвинутых на 90° . Сдвиг на 90° необходим для определения направления перемещения каретки (реверса) и для дальнейшей интерполяции сигналов, что существенно повышает разрешение датчика. Фотоприемники 7 и 8 установлены на линии, перпендикулярной линии инварианта и параллельной штрихам. При движении ГДР_{инд} возникает бегущая синусоида.

Контролировать сдвиг на 90° во время настройки наиболее удобно с помощью метода фигур "Лиссажу" (рис.7). Необходимо получить фигуру "Лиссажу" в виде круга как от пары фотоприемников 5 и 7, так и от пары фотоприемников 6-8. В таком случае устройство будет считывать как обтюрационные, посредством пары фотоприемников 5 и 6, так и муаровые полосы посредством фотоприемников 5-7 и 6-8. Причем при одном и том же перемещении по идеальной направляющей их величины будут равны, то есть $\Delta_{м.} = \Delta_{об.}$. При неидеальной направляющей их разница равна $\delta_{напр.м.}$:

$$\Delta_{перем.м.} - \Delta_{об.} = \delta_{напр.м.} \quad (22)$$

$\delta_{напр.м.}$, using the sensors based on photodetectors 5, 7 and 6, 8. In this case, the true value of displacement can be found as follows:

$$\Delta_{перем.} = \Delta_{об.} - \delta_{напр.м.}, \quad (20)$$

where

$$\delta_{напр.м.} = (\Delta_{перем.м.} - \Delta_{перем.об.}). \quad (21)$$

HDC device (Fig.4) functions as follows: semiconductor laser 1 (Fig.5) emits a coherent beam directed at a collimator forming a slightly divergent beam. The divergent beam allows operation with both "obturator" and "moiré" bands [3]. This beam is directed onto HDC 3 and HDC 4 at a Bragg angle. In the case of HDRs with 1000 strokes/mm, it is an angle of about 20 degrees. After diffraction onto HDC_{изм} grating 3, the light falls onto HDC_{инд} grating 4. In this particular case the length of the GDC_{изм} is 1,000 mm. Gratings 3 and 4 are parallel to each other. A collimator is necessary to fine-tune the interference fringes period. In case of a divergent laser beam, the period of strokes of the first diffraction grating 3 increases as this grating gets farther away from the second grating 4. Thus, the frequency of the projected bars of the first grating changes due to diffraction in the plane of the second grating. The difference between the periods of the measuring and indicating gratings determines the period of the obturation bands formed behind the gratings. These bands, hitting the photodetectors 5 and 6, create sinusoidal signals (Fig.6). Photodetectors 5 and 6 are mounted on the invariant line, which is perpendicular to the grating bars. In case of a perfectly flat guide, the magnitude of HDC displacement determined by the obturator fringes will correspond to the true displacement magnitude. Select the width of the interference fringes so that two photodetectors from each photodetector matrix, produce two signals shifted by 90 degrees. A shift of 90 degrees is necessary to determine direction of carriage movement (reversal) and for further interpolation of the signals, which greatly increases resolution of the sensor. Photodetectors 7 and 8 are mounted on a line perpendicular to the invariant line and parallel to the strokes. A running sine wave is produced when the HDC_{инд} moves.

It is most convenient to control the 90 degree shift during adjustment using the Lissajous figure method (Fig.7). It is necessary to obtain a Lissajous figure in the form of a circle from both photodetector pair 5 and 7 and from photodetector pair 6-8. In that case the device would read both obturational, by means of a pair of photodetectors 5 and 6, and moiré stripes by means of photodetectors 5-7 and 6-8. At the same movement along the ideal guideline their magnitudes will be equal, i.e. $\Delta_{м.} =$

В предлагаемом авторами устройстве $\delta_{\text{напр.м.}}$ не оказывает влияние на измеряемую величину длины перемещения размещения фотоприемников 5 и 6 на линии инвариантности. В данном случае также независимо друг от друга считываются перемещения obturационных и муаровых полос посредством двух датчиков, соответственно один на базе фотоприемников 5 и 6, а другой на базе фотоприемников 7 и 8. Учитывая уравнение (21) в каждой точке перемещения и в реальном масштабе времени с помощью соответствующей цифровой программы, мы можем находить длину истинного перемещения $\Delta_{\text{перем}}$, вычитая из величины $\Delta_{\text{об.}}$ вклад $\delta_{\text{напр.м.}}$, определяя его с помощью муаровых и obturационных полос согласно выражению (20).

ВЫВОДЫ

Линейный наноизмерительный голографический датчик ЛГД на базе голографических дифракционных решеток, в соответствии с изобретением [4], обладает высокими метрологическими характеристиками, так как имеет возможность исключить влияние автономной направляющей на величину перемещения. Такой датчик полностью заменяет любые аналоги подобных датчиков линейных перемещений.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Turukhano B.G., Turukhano N. Phase synthesis of a holographic metrological diffraction gratings of unlimited length. *Optics & Laser Technology*, 1996. Vol. 28, no. 4, PP. 263–268.
2. Датчик линейных перемещений. Турухано Б.Г., Турухано Н. Патент РФ № 2197713 от 27.01.2000.
3. Фотоэлектрический преобразователь перемещений. Горелик В.П., Коваленко С.Н., Турухано Б.Г. Патент РФ № 1 651167. 27.06.1989.
4. Датчик линейных перемещений (ПИЯФ). Турухано Б.Г., Турухано И.А., Турухано Н. Патент на полезную модель № 201730, 29.12.2020.

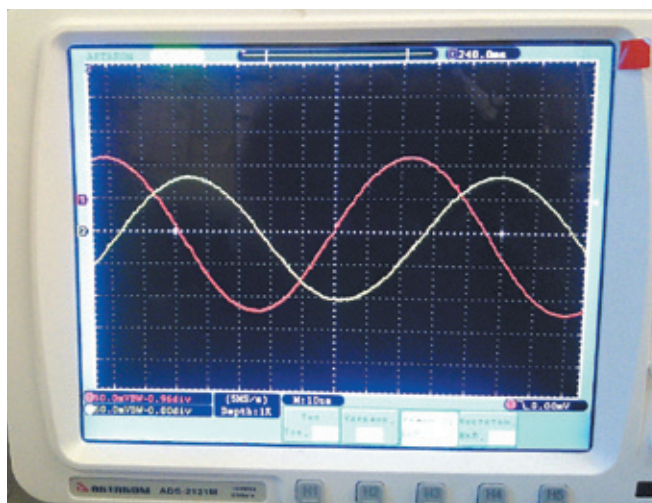


Рис.7. Фигура "Лиссажу"

Fig.7. Lissajous figure

$\Delta_{\text{об.}}$. With a non-ideal guideline their difference is equal to $\delta_{\text{напр.м.}}$:

$$\Delta_{\text{перем.м.}} - \Delta_{\text{об.}} = \delta_{\text{напр.м.}} \quad (22)$$

In the device proposed by the authors, $\delta_{\text{напр.м.}}$ has no influence on the measured value of the displacement length of photodetectors 5 and 6 along the invariance line. In this case, also independently of each other the displacements of obturation and moiré fringes are read by means of two sensors, respectively one sensor is based on photodetectors 5 and 6, and another is based on photodetectors 7 and 8. Considering equation (21) at each displacement point and in real time with the help of appropriate digital software, we can find the length of the true displacement $\Delta_{\text{перем}}$ by subtracting the contribution $\delta_{\text{напр.м.}}$ from the value $\Delta_{\text{об.}}$ by determining it with moiré and obturator strips according to expression (20).

CONCLUSIONS

Linear nano-measuring holographic sensor based on holographic diffraction gratings, according to invention [4], has high metrological characteristics, as it is able to eliminate influence of an autonomous guide on the magnitude of movement. Such sensor completely replaces any analogues of similar linear motion sensors.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper. ■



2023

5-7 апреля
Казахстан, Атырау



ATYRAU
OIL&GAS KAZAKHSTAN

20-я Юбилейная Северо-Каспийская
региональная выставка

*20 лет
успеха*

«Атырау Нефть и Газ»



Подробная информация:
www.oil-gas.kz



kioge.kz



kiogekazakhstan

