НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-635-642
УДК 681.786

# Применение анаморфотной оптической системы и высокоскоростного линейного фотоприемника в инкрементном преобразователе перемещений открытого типа

**Владимир Николаевич Кузнецов[1]✉, Аюр Тумэнович Гармаев[2], Иван Геннадьевич Дейнека[3], Александр Сергеевич Васильев[4], Кирилл Александрович Глазунов[5]**

[1,2,3,4,5] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] vnkuznetcov@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-7565-2466
[2] a_garmayev@list.ru, https://orcid.org/0009-0005-2977-5840
[3] igdeyneka@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-1557-8035
[4] a_s_vasilev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-2080-3252
[5] k1ria@live.ru, https://orcid.org/0009-0002-6645-2432

**Аннотация**

**Введение.** Оптико-оэлектронные преобразователи перемещений на базе изображающих оптических систем и двумерных матриц характеризуются широкими возможностями по снижению погрешности измерений за счет применения современных алгоритмов обработки изображений. Однако применение двумерных матриц в составе преобразователей перемещений приводит к значительному снижению частоты обновления позиции. Это ограничивает применение таких устройств в промышленности. В данной работе представлен вариант оптико-электронного преобразователя перемещений с применением высокоскоростного линейного фотоприемника и анаморфотной оптической системы на основе цилиндрической линзы, позволяющий увеличить частоту определения позиции и снизить погрешность ее определения. **Метод.** В качестве кодирующей структуры применена лента RTLC40 фирмы Renishaw с периодом следования штрихов 40 мкм, погрешностью изготовления 5 мкм/м и протяженностью 300 мм. Макет оптико-оэлектронного преобразователя перемещений реализован на базе рассчитанного и изготовленного объектива (линейное поле в пространстве предметов 0,84 мм, увеличение 10×). В макете применены цилиндрическая линза, линейный фотоприемник GL3504-BVM-NCN-AU1 и программируемая логическая интегральная схема 5CEFA9F23. Вычисление перемещения объекта измерений, на который устанавливается кодирующая структура, основано на определении энергетического центра изображения штрихов. Исследование погрешности представленного макета преобразователя перемещений осуществлялось с помощью интерферометра XD6 LS, моторизированного линейного транслятора LTS300/M. Частота обновления позиции измерена с помощью осциллографа MSO5074. **Основные результаты.** Применение цилиндрической линзы в составе объектива позволило увеличить облученность фотоприемника в три раза. Экспериментально определены частота обновления позиции и случайная составляющая погрешности исследуемого оптико-электронного преобразователя перемещений, составившие 10 кГц и 0,94 мкм на участке 290 мм соответственно. **Обсуждение.** Предлагаемая конструкция оптико-электронного преобразователя перемещений может быть рекомендована при проектировании преобразователей перемещений с применением оптических систем на основе цилиндрических линз. Для вычисления перемещений периодических структур рекомендованы программируемые логические интегральные схемы. Полученные результаты могут быть полезны специалистам, работающим в области разработки прецизионного оборудования измерения перемещений в станкостроении.

**Ключевые слова**

оптико-электронные преобразователи перемещений, оптические измерения, измерения перемещений, датчик линейных перемещений, линейный фотоприемник, цилиндрическая линза

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-91-06503.

**Ссылка для цитирования:** Кузнецов В.Н., Гармаев А.Т., Дейнека И.Г., Васильев А.С., Глазунов К.А. Применение анаморфотной оптической системы и высокоскоростного линейного фотоприемника в инкрементном преобразователе перемещений открытого типа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 635–642. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-635-642

© Кузнецов В.Н., Гармаев А.Т., Дейнека И.Г., Васильев А.С., Глазунов К.А., 2025

# Application of anamorphic optics system and a high-speed line scan photodetector in an open-type relative encoder

**Vladimir N. Kuznetsov[1]✉, Ayur T. Garmaev[2], Ivan G. Deyneka[3], Aleksandr S. Vasilev[4], Kirill A. Glazunov[5]**

[1,2,3,4,5] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] vnkuznetcov@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-7565-2466
[2] a_garmayev@list.ru, https://orcid.org/0009-0005-2977-5840
[3] igdeyneka@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-1557-8035
[4] a_s_vasilev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-2080-3252
[5] k1ria@live.ru, https://orcid.org/0009-0002-6645-2432

**Abstract**

Optical encoders based on imaging optical systems and two-dimensional sensor arrays have shown substantial potential for reducing measurement errors through the use of modern image processing algorithms. However, the application of two-dimensional photodiode array in optical encoders significantly reduces the update rate of positional data. This limitation is critical for wide industrial application. This study presents an optical encoder design that incorporates a high-speed linear photodiode array and an anamorphic optical system utilizing a cylindrical lens, allowing for increased update rates and reduced positional error. A Renishaw RTLC40 tape, with a grating period of 40 μm, fabrication accuracy of ±5 μm/m, and a length of 300 mm, was employed as the encoding structure. The prototype optical encoder was developed using a GL3504-BVM-NCN-AU1 linear photodetector array, a custom designed and manufactured objective (linear field in object plane of 0,84 mm, magnification 10×) with an integrated cylindrical lens and 5CEFA9F23 programmable logic device. The calculation of the object displacement is based on determining the energy centroid of the images of grating scale, which tightly mounted on the object. The error analysis of the proposed encoder prototype was determined using an XD6 LS interferometer and an LTS300/M motorized stage. Positional update frequency was measured with an MSO5074 oscilloscope. The use of a cylindrical lens amplified the irradiance projected onto the photodetector array, achieving a maximum gain factor of three. Update frequency and measurement error of the proposed optical encoder were experimentally determined and equals 10 kHz and 0,94 μm over 290 mm range, respectively. The proposed design of the optical encoder can be used as a recommendation for the development of encoders that employ cylindrical lens-based optical systems. Field-programmable gate array is recommended for grating scale displacement computation. The results obtained may prove valuable for specialists in precision displacement measurement and machine tool construction.

**Keywords**

optical encoder, displacement measurements, linear position sensor, line scan photodetector, cylindrical lens

**Acknowledgements**

The research was carried out by the expense of the Russian Science Foundation grant (project No. 23-91-06503).

**For citation:** Kuznetsov V.N., Garmaev A.T., Deyneka I.G., Vasilev A.S., Glazunov K.A. Application of anamorphic optics system and a high-speed line scan photodetector in an open-type relative encoder. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 635–642 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-635-642

## Введение

Преобразователи перемещений — класс устройств, предназначенных для определения положения узлов машин и механизмов в пространстве и передачи вычисленной позиции на управляющую электронику. Среди существующих типов преобразователей перемещений (емкостных, индуктивных, потенциометрических и других, согласно классификации в ГОСТ 26242-90[1]) оптико-электронные преобразователи перемещений характеризуются наилучшим соотношением между показателями погрешности, разрешения, диапазона перемещений и частоты обновления позиции [1].

Благодаря компактному исполнению и простоте установки (по сравнению с интерферометрами), оптоэлектронные преобразователи перемещений нашли широкое применение в области прецизионного станкостроения, приборостроения и автоматизации промышленных процессов [2, 3]. Теоретические характеристики оптико-электронных преобразователей перемещений могут достигать 6–10 нм по параметру разрешения, и погрешностью определения позиции ±1 мкм/м.

Оптические системы преобразователей перемещений можно разделить на проекционные системы [4], системы на основе интерференции дифракционных порядков в ближней зоне дифракции [5], а также интерферометрические с возникновением однократного или многократного разложения оптического излучения по дифракционным порядкам [6, 7]. Оптико-электронные преобразователи перемещений, основанные на явлениях дифракции и интерференции оптического излучения, получили широкое распространение благодаря малому размеру, высокой устойчивости к электромагнитным помехам и малой чувствительности к загрязнениям измерительных шкал [8]. Одним из основных недостатков таких преобразователей перемещений является их высокая чувствительность к колебаниям температуры и влажности в среде распространения излучения. При этом погрешность измерений может возрастать вплоть до сотен микрометров. Датчики на основе изображающих оптических систем характеризуются более выра-

[1] ГОСТ 26242-90. Системы числового программного управления. Преобразователи перемещений. Общие технические условия. Введ. 01.01.91. М.: Изд-во стандартов, 1990. 14 с.

женной устойчивостью к вариациям параметров среды распространения [9]. Благодаря непосредственному проецированию изображения на фотоприемное устройство, появляется возможность определять перемещение кодирующих структур (КС), которые могут отличаться по профилю, геометрическим размерам и периоду следования штрихов.

Пример конструкции преобразователя перемещений с применением оптической системы на основе линз представлен в работах [10, 11]. В настоящей работе предложено устройство, в состав которого входит магнитный датчик для грубого (с погрешностью ±0,5 мм) определения абсолютного положения и оптико-электронный преобразователь для точного определения относительного смещения. Для определения относительного перемещения был использован алгоритм на основе вычисления энергетического центра. Погрешность измерения после введения компенсации систематической составляющей не превысила 1,65 мкм по трем значениям среднеквадратического отклонения.

Одним из направлений дальнейшего развития тематики оптико-электронных преобразователей перемещений на базе изображающих оптических систем является увеличение частоты определения положения объекта измерений путем применения линейных фотоприемников и оптической системы на основе цилиндрической линзы.

Линейные фотоприемники по своему внутреннему устройству и принципу фотоэлектрического преобразования похожи на матричные фотоприемники [12]. Их отличием является использование в качестве фоточувствительной области одной или нескольких строк пикселов. Благодаря сокращению количества строк возрастает максимальная кадровая частота (до сотен тысяч кадров в секунду). С другой стороны, работа с одномерным сигналом не позволяет снизить влияние загрязнений и повреждений измерительной шкалы и увеличить отношение сигнал-шум изображения штрихов за счет суммирования регистрируемого пикселами сигнала по столбцам. Возрастание отношения сигнал-шум в случае применения линейного фотоприемника ограничивается (при прочих равных условиях) увеличением времени экспозиции, что может привести к снижению максимальной кадровой частоты, и, вместе с этим, к снижению частоты обновления измеряемой позиции. Для обеспечения высокой кадровой частоты и устойчивости к дефектам и пятнам на измерительной шкале предлагается анаморфотная оптическая система на основе цилиндрической линзы.

## Принцип работы предлагаемого оптико-электронного преобразователя перемещений

Структурная схема предлагаемого оптико-электронного преобразователя перемещений представлена на рис. 1.

Оптическое излучение от источника излучения отклоняется светоделительным кубом на 90°. Преломленное оптическое излучение падает на КС, жестко закрепленную на объекте измерений. Отраженное

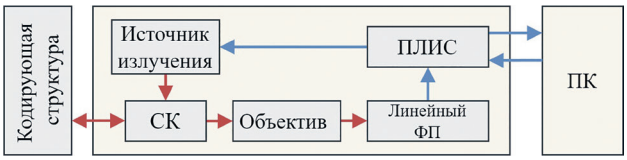


*Рис. 1*. Структура оптико-электронного преобразователя перемещений на базе изображающей оптической системы.

СК — светоделительный куб; ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема; ФП — фотоприемник; ПК — персональный компьютер

*Fig. 1*. Structural diagram of optical encoder based on imaging optical systems.

СК — beam-splitting cube; ПЛИС — field-programmable gate array; ФП — photodetector; ПК — personal computer

от КС оптическое излучение вновь проходит светоделительный куб и попадает в объектив. Объектив формирует оптическое изображение штрихов КС на поверхности линейного фотоприемника с 10× увеличением и преломлением в меридиональной плоскости за счет цилиндрической линзы. Фотоприемник преобразует оптическое излучение в электрический сигнал с последующим преобразованием в цифровой код. Оцифрованный сигнал передается на ПЛИС, в которой реализуется алгоритм вычисления положения объекта измерений, основанный на определении перемещения КС. При изменении положения объекта измерений (и, следовательно, КС) соответствующим образом перемещается изображение штрихов. По разности между текущим и предыдущим положениями штриха определяется перемещение КС, и, соответственно, положение объекта измерений. Вычисленное положение объекта измерений в виде цифрового значения передается на персональный компьютер или управляющую электронику в составе станка.

Оптическая система в составе предлагаемого оптико-электронного преобразователя перемещений спроектирована в виде телецентрической системы. Данное решение обусловлено тем, что для обработки изображения и вычисления результирующего смещения важно обеспечить минимальные отклонения периода и ширины штрихов. Телецентрическая система обеспечивает постоянный коэффициент увеличения оптической системы, не зависящий от расстояния между объективом и КС. Подробнее описанный объектив рассматривается в [13], его оптическая схема представлена на рис. 2.

Светоделительный куб *1* используется для освещения шкалы под прямым углом. Расчет параметров склеек *2* и *3* осуществлялся исходя из соображений уменьшения влияния аберраций 3-го порядка на длине волны 635 нм и оптимального соотношения коэффициента увеличения и габаритного размера объектива. Длина волны была выбрана в соответствии с полученным расчетным значением оптимальной длины волны источника излучения для выбранного фотоприемника.

Целью использования цилиндрической линзы *4* в составе оптической системы является увеличение облученности на чувствительной площадке фотоприемника. За счет преломления оптического излучения в меридиональной плоскости и отсутствия преломления

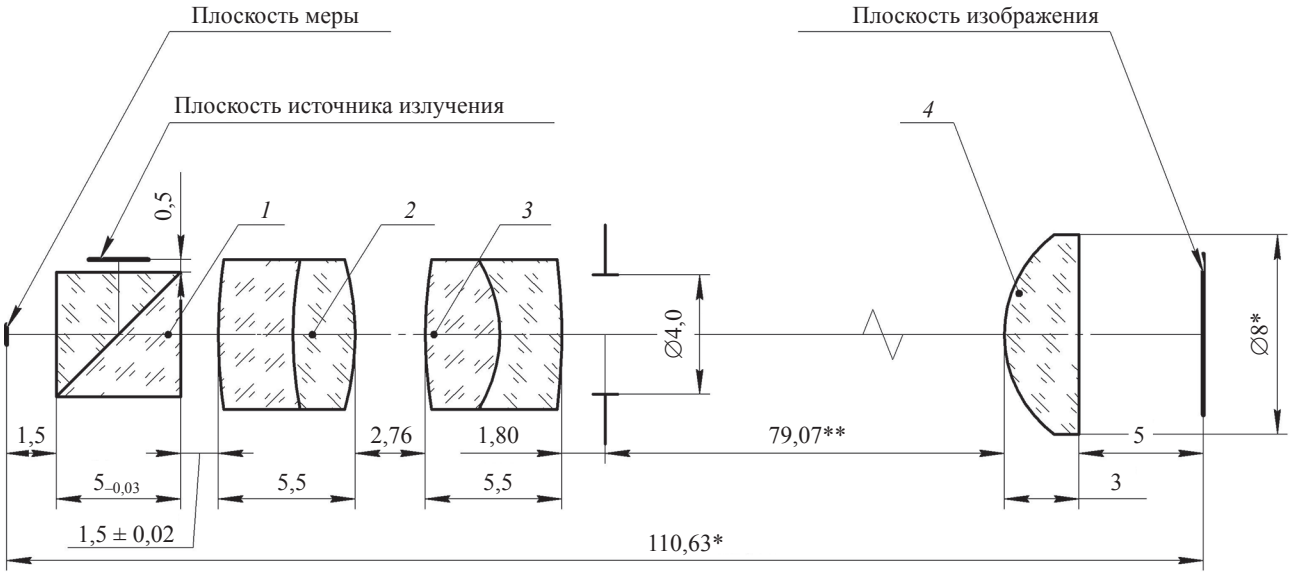


*Рис. 2*. Предлагаемая оптическая схема оптико-электронного преобразователя перемещений, вид для меридиональной плоскости: *1* — светоделительный куб; *2* и *3* — склейки; *4* — цилиндрическая линза.

* — размер для справок, ** — расчетный размер (при сборке объектива может быть скорректирован исходя из размеров линз с учетом погрешности изготовления)

*Fig. 2*. Proposed optical scheme of encoder, view for the meridional plane: *1* — beam-splitting cube; *2* and *3* — lens assembly; *4* — cylindrical lens.

* — reference dimension, ** — estimated dimension (can be adjusted during objective assembly based on the final lens dimensions)

в сагиттальной происходит концентрация оптического излучения в плоскости изображений. Моделирование хода лучей в геометрическом приближении, осуществляемое объективом, было проведено в программе ANSYS Zemax OpticStudio 2024.

На рис. 3 приведено сравнение изображений штрихов КС в плоскости детектирования, расположенной на первой поверхности цилиндрической линзы *4* (рис. 2) по ходу оптического луча, и в плоскости изображения оптической системы.

Как видно на рис. 3, применение цилиндрической линзы позволяет увеличить приходящую на линейный фотоприемник облученность до трех раз по сравнению с регистрацией изображения без нее.

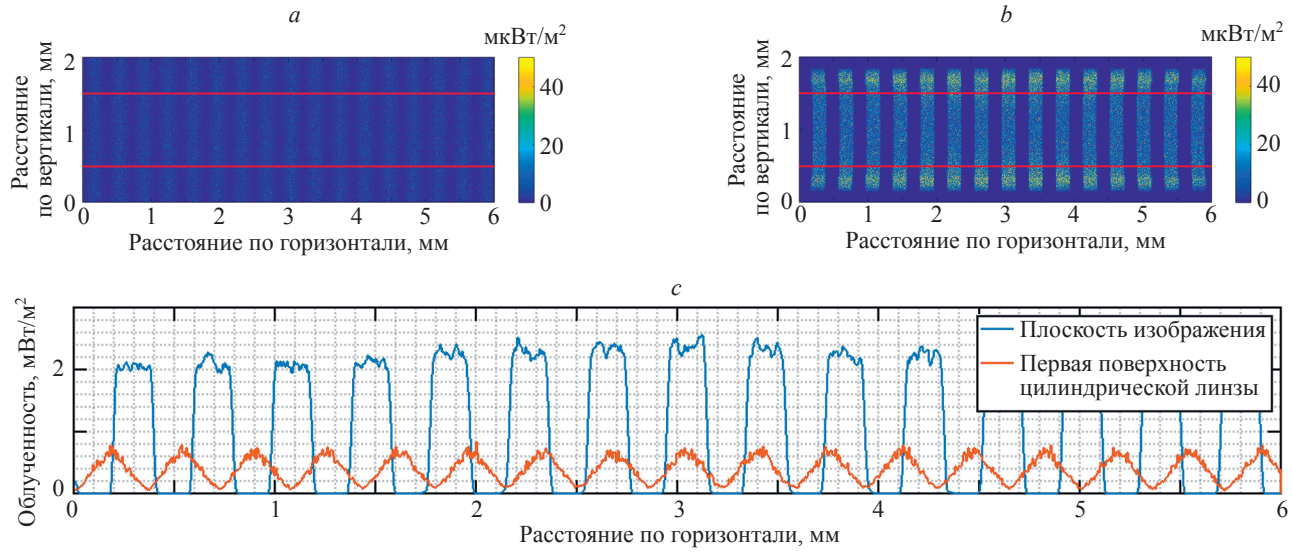


*Рис. 3*. Распределения облученности для первой поверхности цилиндрической линзы по ходу оптического луча (*a*) и на плоскости изображения (*b*). Сравнение значений облученности (рис. 3, *a*, *b*), полученных путем суммирования по вертикали (*c*).

Линиями красного цвета на рис. 3, *a* и *b* обозначен интервал суммирования значений облученности

*Fig. 3*. Irradiance distribution for the first surface of a cylindrical lens along the optical beam (*a*) and on the image plane (*b*). Comparison of irradiance values (Fig. 3, *a*, *b*), calculated by summation along vertical axis (*c*).

The red lines in Fig. 3, *a* and *b* mark the interval of summation of irradiance values

Линейный фотоприемник используется для преобразования оптического излучения в электрический сигнал. Существующие на данный момент линейные фотоприемники отличаются как по параметрам фоточувствительных элементов (размеры и количество пикселов, спектральная чувствительность, неоднородность фоточувствительности и другие), так и по способу передачи данных (регистр переноса заряда, полностью цифровой выход в виде параллельной или последовательной шины передачи) [14]. Одной из передовых фирм, разрабатывающих высокоскоростные линейные фотоприемники, является компания Gpixel (Китай). Линейный фотоприемник GL3504-BVM-NCN-AU1 выделяется среди аналогов других фирм (Hamamatsu, Toshiba, AMS-OSRAM) по совокупному соотношению таких параметров, как частота строк (до 172 тыс. строк в секунду), размеры пикселов и их количество (длина пиксела 7 мкм, ширина пиксела 7 мкм, 2048 штук), а также динамический диапазон (65,5 дБ) и отношение сигнал-шум (39,7 дБ).

Для определения перемещения был разработан алгоритм, в основе которого лежит вычисление энергетического центра. Для обнаружения штрихов используется принцип порогового детектирования. В качестве входных данных для алгоритма выступает принятый с линейного фотоприемника одномерный кадр. Осуществляется поиск области однократного пересечения порогового значения. Пороговое значение определяется как 70 % от максимального значения сигнала. По значениям в этой области вычисляется координата энергетического центра. Так, в разрабатываемом оптико-электронном преобразователе перемещений координатой энергетического центра является средневзвешенное значение сигнала на детектируемом штрихе, определяемое с помощью выражения:

$$x_j^{encent} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{j,i} U_{j,i}}{\sum_{i=1}^{n} U_{j,i}}, \qquad (1)$$

где $x_j^{encent}$ — координата энергетического центра штриха, находящегося в центральной области линейного фотоприемника $j$-го кадра, номер пиксела; $x_{j,i}$ — координата $i$-го пиксела $j$-го кадра, номер пиксела; $U_{j,i}$ — значение сигнала с $i$-го пиксела на $j$-ом кадре, относительные единицы; $n$ — количество пикселов внутри области работы алгоритма, $i = 1, \ldots, n, j \in \mathbb{N}$.

После определения координат энергетических центров по формуле (1) оценивается разность координат энергетических центров штриха на текущем кадре и предыдущем кадре, таким образом вычисляется перемещение, осуществленное между двумя кадрами.

С точки зрения обработки, на линейном фотоприемнике определяется несколько областей опроса, каждая с шириной, равной периоду КС после преобразования оптической системой. Это позволяет определять координату одного энергетического центра в каждый момент времени и фиксировать его появление/выход из области опроса. Таким образом, при линейном перемещении зависимость координаты энергетического центра от времени будет равна текущей фазе сигнала с точностью до константного множителя. Добавляя счетчик перепадов фазы, текущее значение перемещения можно вычислить с помощью выражения:

$$x_{\text{энк}} = x_j^{encent} k + PN, \qquad (2)$$

где $x_{\text{энк}}$ — текущее значение положения объекта измерений, мкм; $k$ — масштабный коэффициент, мкм/пиксел; $N$ — количество пройденных периодов; $P$ — период КС, мкм.

Представленный в формуле (2) масштабный коэффициент определяется как отношение количества пикселов, приходящихся на один период изображения штриха, к периоду КС. Вычисление положения оптико-электронного преобразователя перемещений по формуле (2) для нескольких областей опроса одновременно позволяет увеличить надежность измерений.

### Исследование предлагаемого преобразователя

**Описание исследуемого макета.** В качестве КС (рис. 1) была применена измерительная шкала RTLC40 (фирма Renishaw, Великобритания). Период штрихов данной шкалы составляет 40 мкм, длина шкалы – 300 мм. Измерительная шкала прикреплена к объекту измерения. Источник излучения представляет собой светодиод с диаметром линзы 3 мм, максимальной силой света 3 кд, пиковой длиной волны 635 нм и углом излучения 30°. Излучение направлено на светоделительный куб Edmund Optics (длина ребер 5 мм). Оптическое излучение, проходя через куб, попадает на измерительную шкалу и отражается от нанесенных на нее штрихов. Отраженное излучение далее снова проходит через светоделительный куб и попадает в объектив с увеличением $10^{\times}$ и цилиндрической линзой, преломляющей излучение в меридиональной плоскости. Изображение, построенное объективом, оцифровывается фотоприемником GL3504-BVM-NCN-AU1 и передается на ПЛИС 5CEFA9F23 в составе отладочной платы BeMicro CV A9. Цифровая схема, реализованная на ПЛИС, осуществляет обработку изображения с применением алгоритма вычисления энергетического центра и передает результирующую позицию на персональный компьютер по интерфейсу Ethernet.

**Результаты эксперимента.** На рис. 4 представлен внешний вид измерительного стенда, собранного для исследования параметров макета инкрементного преобразователя перемещений.

Положение узлов преобразователя перемещений корректировалось с помощью трех микропозиционеров. В качестве эталонного средства измерений был использован интерферометр XD6 LS, характеризующийся рабочим диапазоном 0–45 м и погрешностью измерений в 0,5 мкм/м. Отражатель интерферометра, а также КС RTLC40 закреплены на подвижной платформе моторизированного линейного транслятора LTS300/M. Макет преобразователя перемещений, интерферометр и линейный транслятор были подключены к персональному компьютеру для проведения измерений в автоматизированном режиме.

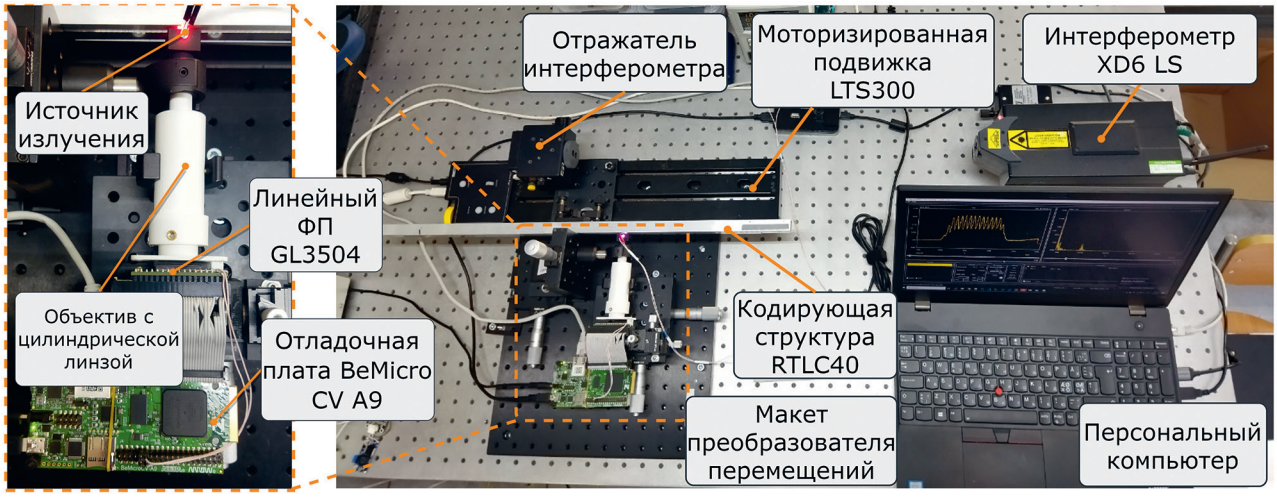


*Рис. 4*. Стенд для проведения исследований макета преобразователя перемещений

*Fig. 4*. Laboratory test setup for optical encoder prototype evaluation

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Первым шагом является передвижение платформы линейного транслятора LTS300/M к краю КС. Далее производится настройка параметров движения платформы (скорость 0,4 мм/с, ускорение 10 мм/с$^2$, шаг перемещения линейного транслятора 0,1 мм) линейного транслятора. Осуществляется сброс положения, фиксируемого интерферометром XD6 LS. Запускается процесс получения позиции, фиксируемого измерительной головкой макета инкрементного преобразователя, и положения, измеренного интерферометром. После каждого шага перемещения платформы линейного транслятора происходит однократная запись показаний, измеренных макетом и интерферометром. Затем платформа пошагово перемещается в прямом направлении движения, и возвращается в исходную позицию. В рамках эксперимента было проведено три серии измерений, диапазон измерений составил 290 мм. Для каждой серии измерений была вычислена абсолютная погрешность измерений (мкм) по выражению:

$$\Delta = x_{\text{энк}} - x_{\text{инт}}, \qquad (3)$$

где $x_{\text{энк}}$ и $x_{\text{инт}}$ — значения положений объекта измерений, определенные макетом преобразователя перемещений по формуле (2) и интерферометром.

Вычисленная по формуле (3) погрешность измерений представлена на рис. 5.

Погрешность измерений без дополнительной калибровки преобразователя перемещений составила 8 мкм. На графиках наблюдается систематическая составляющая погрешности, которая может быть вызвана несовершенством механической части моторизированного линейного транслятора (что вызывает изменение положения отражателя интерферометра при движении платформы), отклонениями положения шкалы, а также погрешностью изготовления КС. Поскольку систематическую составляющую погрешности можно исключить путем введения калибровочных зависимостей, важно определить значение случайной составляющей погрешности. Исключив систематическую составляющую погрешности по методу, описанному в [15] без отдельного рассмотрения обратного хода, остается случайная составляющая погрешности, представленная на рис. 6 (отсчеты серий измерений объединены).

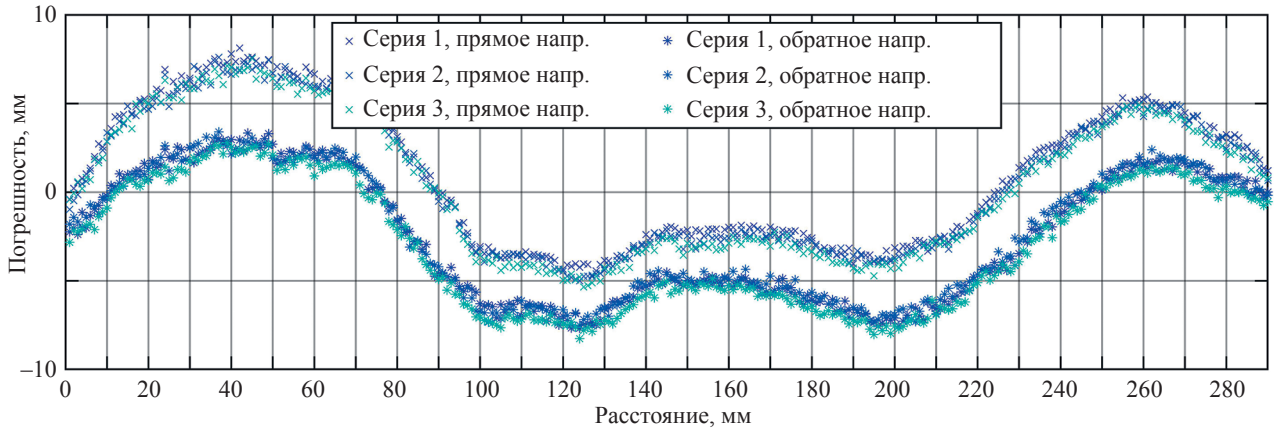


*Рис. 5*. Погрешность измерений для трех серий экспериментов

*Fig. 5*. Absolute error of position measurement for three series of experiments

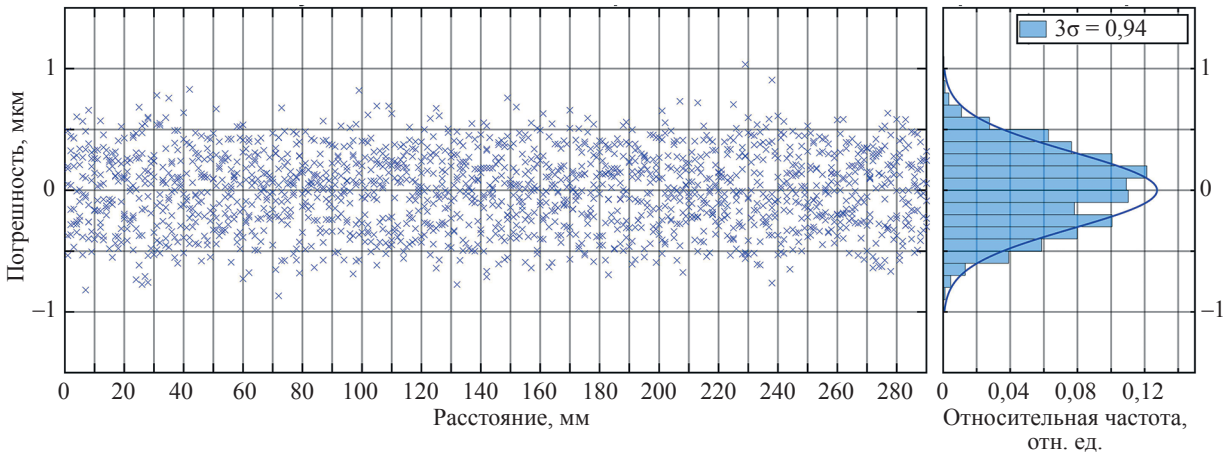


*Рис. 6*. Случайная составляющая погрешности, объединенная для трех серий экспериментов

*Fig. 6*. Random error (deviations) of position measurement for three series of experiments

Значения математического ожидания трех серий измерений в прямом направлении составили 0,28 мкм, –0,01 мкм и –0,27 мкм, в обратном –0,15 мкм, 0,21 мкм и –0,35 мкм. Погрешность позиционирования, определяемая как три значения среднеквадратических отклонений, в прямом направлении движения составила 0,55 мкм, 0,56 мкм и 0,57 мкм, в обратном направлении – 0,70 мкм, 0,68 мкм и 0,58 мкм соответственно. Значение трех объединенных среднеквадратических отклонений (3σ) случайной составляющей погрешности составило 0,94 мкм.

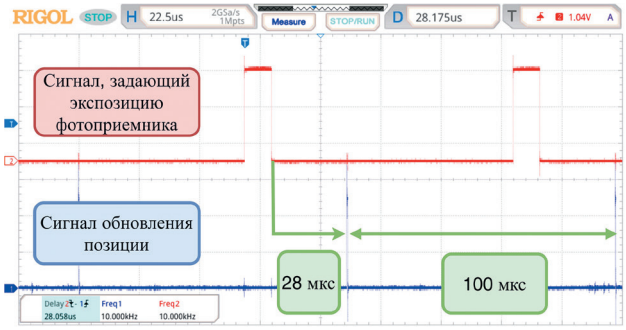


*Рис. 7*. Осциллограмма сигналов экспозиции для матрицы GL3504-BVM-NCN-AU1 и обновления позиции

*Fig. 7*. Oscillogram of exposure signal for GL3504-BVM-NCN-AU1 and position update signal

Для измерения значений частоты на выходе системы был использован осциллограф Rigol MSO5074. Результаты представлены на рис. 7.

Период следования сигналов обновления позиции составил 100 мкс, что соответствует частоте 10 кГц. Время вычисления позиции относительно окончания экспонирования на линейном фотоприемнике составило 28 мкс.

## Заключение

В работе представлен инкрементный оптико-электронный преобразователь перемещений открытого типа с применением высокоскоростного линейного фотоприемника и объектива на базе цилиндрической линзы. Результатом практической реализации предлагаемых способов повышения быстродействия и снижения случайной составляющей погрешности определения позиции объекта измерений стал действующий макет оптико-электронного преобразователя перемещений. Макет построен с использованием матрицы GL3504-BVM-NCN-AU1 и объектива на основе анаморфотной оптической системы с применением цилиндрической линзы. Частота обновления позиции составила 10 кГц, максимальное значение погрешности позиционирования, определяемое по трем значениям среднеквадратических отклонений, составило 0,94 мкм на диапазоне перемещений 290 мм.

## Литература

1. Fleming A.J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. V. 190. P. 106–126. https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.016
2. 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. 116 с.
3. Shimizu Y., Chen L., Kim D., Chen X., Li X., Matsukuma H. An insight into optical metrology in manufacturing // Measurement Science and Technology. 2021. V. 32. N 4. P. 042003. https://doi.org/10.1088/1361-6501/abc578

## References

1. Fleming A.J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, vol. 190, pp. 106–126. https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.016
2. Korotaev V.V., Prokofev A.V., Timofeev A.N. *Optoelectronic Transducers of Linear and Angular Displacements*. Part 1. *Optoelectronic Transducers of Linear Displacements*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2012, 116 p. (in Russian)
3. Shimizu Y., Chen L., Kim D., Chen X., Li X., Matsukuma H. An insight into optical metrology in manufacturing. *Measurement Science and Technology*, 2021, vol. 32, no. 4, pp. 042003. https://doi.org/10.1088/1361-6501/abc578

4. Cosijns S.J.A.G., Jansen M.J., Haitjema H. Advanced optical incremental sensors: encoders and interferometers // Smart sensors and MEMS: Intelligent Sensing Devices and Microsystems for Industrial Applications. Second Edition. 2018. P. 245–290. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102055-5.00010-3
5. Ye G, Liu H., Fan S., Li X., Yu H., Lei B., Shi Y., Yin L., Lu B. A theoretical investigation of generalized grating imaging and its application to optical encoders // Optics Communications. 2015. V. 354. P. 21–27. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.05.023
6. Luo L., Shan S., Li X. A review: laser interference lithography for diffraction gratings and their applications in encoders and spectrometers // Sensors. 2024. V. 24. N 20. P. 6617. https://doi.org/10.3390/s24206617
7. Ye G., Liu H., Lei B., Niu D., Xing H., Wei P., Lu B., Liu H. Optimal design of a reflective diffraction grating scale with sine-trapezoidal groove for interferential optical encoders // Optics and Lasers in Engineering. 2020. V. 134. P. 106196. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106196
8. Yu H., Chen X., Liu C., Cai G., Wang W. A survey on the grating based optical position encoder // Optics and Laser Technology. 2021. V. 143. P. 107352. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107352
9. Васильева А.В., Васильев А.С., Сычева Е.А., Коротаев В.В. Высокоточный абсолютный линейный датчик положения на основе стандартной штриховой меры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 9. С. 796–804. https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-9-796-804
10. Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Vasileva A.V., Anisimov A.G., Korotaev V.V. High-precision absolute linear encoder based on a standard calibrated scale // Measurement. 2018. V. 123. P. 226–234. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.071
11. Anisimov A.G., Pantyushin A.V., Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Timofeev A.N., Korotaev V.V., Gordeev S.V. Absolute scale-based imaging position encoder with submicron accuracy // Proceedings of SPIE. 2013. V. 8788. P. 87882T. https://doi.org/10.1117/12.2021022
12. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
13. Виссарионова Е.С., Бобе А.С., Кузнецов В.Н. Оптическое анаморфирование для схемы энкодера линейного перемещения // XII Конгресс молодых ученых: сборник научных трудов. 2023. С. 74–77.
14. Евтихиев Н.Н., Козлов А.В., Краснов В.В., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Метод измерения шумов цифровых камер автоматической сегментацией полосовой сцены // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 2. С. 267–276. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-815
15. Коротаев В.В., Краснящих А.В. Оптико-электронные приборы с оптической равносигнальной зоной: Методические указания по выполнению лабораторных работ. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. 115 с.

4. Cosijns S.J.A.G., Jansen M.J., Haitjema H. Advanced optical incremental sensors: encoders and interferometers. *Smart sensors and MEMS: Intelligent Sensing Devices and Microsystems for Industrial Applications. Second Edition*, 2018, pp. 245–290. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102055-5.00010-3
5. Ye G, Liu H., Fan S., Li X., Yu H., Lei B., Shi Y., Yin L., Lu B. A theoretical investigation of generalized grating imaging and its application to optical encoders. *Optics Communications*, 2015, vol. 354, pp. 21–27. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.05.023
6. Luo L., Shan S., Li X. A review: laser interference lithography for diffraction gratings and their applications in encoders and spectrometers. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 20, pp. 6617. https://doi.org/10.3390/s24206617
7. Ye G., Liu H., Lei B., Niu D., Xing H., Wei P., Lu B., Liu H. Optimal design of a reflective diffraction grating scale with sine-trapezoidal groove for interferential optical encoders. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 134, pp. 106196. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106196
8. Yu H., Chen X., Liu C., Cai G., Wang W. A survey on the grating based optical position encoder. *Optics and Laser Technology*, 2021, vol. 143, pp. 107352. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107352
9. Vasileva A.V., Vasilev A.S., Sycheva E.A., Korotaev V.V. High-precision absolute linear position sensor based on a standard line measure. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 9, pp. 796—804. (in Russian). https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-9-796-804
10. Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Vasileva A.V., Anisimov A.G., Korotaev V.V. High-precision absolute linear encoder based on a standard calibrated scale. *Measurement*, 2018, vol. 123, pp. 226–234. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.071
11. Anisimov A.G., Pantyushin A.V., Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Timofeev A.N., Korotaev V.V., Gordeev S.V. Absolute scale-based imaging position encoder with submicron accuracy. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8788, pp. 87882T. https://doi.org/10.1117/12.2021022
12. Gorbachev A.A., Korotaev V.V., Iaryshev S.N. *Solid-state Matrix Photoconverters and Cameras Based on them*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013, 98 p. (in Russian)
13. Vissarionova E.S., Bobe A.S., Kuznetcov V.N. Optical anamorphism for linear encoder circuit. *Proc. of the 12th Congress of Young Scientists*, 2023, pp. 74–77. (in Russian)
14. Evtikhiev NN, Kozlov AV, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov RS, Cheremkhin PA. A method for measuring digital camera noise by automatic segmentation of a striped target. *Computer Optics*, 2021, vol. 45, no. 2, pp. 267–276. (in Russian). https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-815
15. Korotaev V.V., Krasniashchikh A.V. *Optoelectronic Devices with Optical Equisignal Region*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2005, 115 p. (in Russian)


## Авторы


**Кузнецов Владимир Николаевич** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57673212700, https://orcid.org/0000-0001-7565-2466, vnkuznetcov@itmo.ru

**Гармаев Аюр Тумэнович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0005-2977-5840, a_garmayev@list.ru

**Дейнека Иван Геннадьевич** — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 6603305268, https://orcid.org/0000-0003-1557-8035, igdeyneka@itmo.ru

**Васильев Александр Сергеевич** — кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 24468859400, https://orcid.org/0000-0002-2080-3252, a_s_vasilev@itmo.ru

**Глазунов Кирилл Александрович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0002-6645-2432, k1ria@live.ru


## Authors


**Vladimir N. Kuznetsov** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57673212700, https://orcid.org/0000-0001-7565-2466, vnkuznetcov@itmo.ru

**Ayur T. Garmaev** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0005-2977-5840, a_garmayev@list.ru

**Ivan G. Deyneka** — PhD, Associate Professor, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 6603305268, https://orcid.org/0000-0003-1557-8035, igdeyneka@itmo.ru

**Aleksandr S. Vasilev** — PhD, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 24468859400, https://orcid.org/0000-0002-2080-3252, a_s_vasilev@itmo.ru

**Kirill A. Glazunov** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0002-6645-2432, k1ria@live.ru



*Статья поступила в редакцию 26.11.2024*
*Одобрена после рецензирования 10.06.2025*
*Принята к печати 24.07.2025*

*Received 26.11.2024*
*Approved after reviewing 10.06.2025*
*Accepted 24.07.2025*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»