



# Оптические нуль-индикаторы для гониометрических систем: обзор

В. Ю. Венедиктов, Б. Ньямверу, Р. А. Ларичев,  
Ю. В. Филатов, Е. В. Шишалова  
Санкт-Петербургский электротехнический университет  
«ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время высокоточное измерение углов необходимо во многих областях науки и промышленности. Прецизионные измерения углов особенно важны при проверке и контроле различных оптических деталей и угловых мер. Одним из самых точных приборов на данный момент является гониометр, позволяющий измерять углы бесконтактными методами. В данной статье рассматриваются различные типы нуль-индикаторов, применяемых в гоноиметрических системах, указываются их преимущества и недостатки. Обзор предназначен для того, чтобы дать базовое представление о гоноиметрических системах и нуль-индикаторах, используемых в угловых измерениях.

**Ключевые слова:** гоноиметрические системы, многогранная призма, автоколлиматор, нуль-индикатор

Статья поступила: 03.08.2022

Статья принята: 29.08.2022

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка гониометров неразрывно связана с развитием исследований в области кристаллографии. В 1783 году Арнольд Каранжо изобрел первый прибор для измерения угла между двумя гранями кристалла. Этот прибор учёный назвал контакт-ным гониометром, он состоял из двух металлических стержней, которые были соединены шарнирами в центре градуированного полукруга. Точность этого прибора составляла около 15 угловых минут [1].

# Optical Null-Indicators for Goniometric Systems: a Review

V. Yu. Venediktov, B. Nyamweru, R. A. Larichev, Yu. V. Filatov,  
E. V. Shishalova  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",  
St. Petersburg, Russia

Nowadays, high-precision angle measurement is necessary in many fields of science and industry. Precision angle measurements are especially important when checking and controlling various optical parts and angular measures. One of the most accurate devices at the moment is a goniometer, which allows you to measure angles by non-contact methods. This article discusses various types of null-indicators used in goniometric systems, their advantages and disadvantages are indicated. The review is intended to provide a basic understanding of goniometric systems and null-indicators used in angular measurements.

**Keywords:** goniometric systems, optical polygon, autocollimator, null-indicator

Received on: 03.08.2022

Accepted on: 29.08.2022

## 1. INTRODUCTION

The development of goniometers is inextricably linked with the development of research in the field of crystallography. In 1783, Arnold Carangeau invented the first device for measuring the angle between two faces of a crystal. The scientist called this device a contact goniometer. It consisted of two metal rods that were connected by hinges in the center of a graduated semicircle. The accuracy of this device was about 15 arc minutes [1].

In 1809, the English physicist William Hyde Wollaston developed an optical goniometer that measured the angles between the faces of a crystal using light reflected from them. The crystal was attached to a rotating graduated table, and the light source was directed to various facets of the crystal. The angle between the crystal faces was determined as the difference in the readings of the graduated table

В 1809 году английский физик Уильям Хайд Волластон разработал оптический гониометр, который измерял углы между гранями кристалла с помощью света, отраженного от них. Кристалл прикреплялся к вращающемуся градуированному столу, а источник света направлялся на различные грани кристалла. Угол между гранями кристалла определялся как разница показаний градуированного стола, на который падал отраженный от граней свет. Этот гониометр имел точность 5 угловых минут [2].

Развитие науки в области гониометрии привело к созданию новых приборов и прогрессивных методов и средств измерений углов, позволяющих вращать исследуемый объект в автоматическом режиме, использовать различные вспомогательные элементы, оптимизировать конструкции и повышать точность гониометров.

Идея измерения углов многогранной призмы с помощью гониометра появилась очень давно. Когда возникла необходимость измерения углов в астрономии с очень высокой точностью, также возникла необходимость калибровки средств измерений для повышения точности их измерений. В 1954 году в своей публикации под названием «The calibration of circular scale and precision polygon» Кук А. Х. описал калибровку многогранной призмы путем точного решения набора уравнений для разницы углов между ее гранями [3]. С развитием метрологии в области угловых измерений многогранная призма стала играть важную роль угловой меры. Международные сличения, обеспечивающие единство измерений, проходят с использованием многогранной призмы, которую последовательно калибруют на эталонных гониометрических системах национальных метрологических институтов разных стран [4,5].

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ГОНИОМЕТРОВ

Исходя из истории изобретения гониометров и методов их измерений, мы можем заключить, что существует два типа гониометров: контактный и отражательный (бесконтактный). Бесконтактный гониометр является наиболее точным и в настоящее время широко используется в метрологии, приборостроении и других научных и промышленных областях.

Полная гониометрическая система состоит из таких элементов, как угловая шкала; поворотный стол; привод, задающий вращение; оптическое устройство, задающее опорное направление;

on which the light reflected from the faces fell. This goniometer had an accuracy of 5 arc minutes [2].

The development of science in the field of goniometry led to the creation of new devices and progressive methods and means of measuring angles, allowing the object under study to rotate automatically, use various auxiliary elements, optimize designs and improve the accuracy of goniometers.

The idea of measuring the angles of an optical polygon using a goniometer appeared a long time ago. When it became necessary to measure angles in astronomy with very high accuracy, it also became necessary to calibrate measuring instruments to improve the accuracy of their measurements. In 1954, in his publication entitled “The calibration of circular scale and precision polygon”, A. H. Cook described the calibration of an optical polygon by accurately solving a set of equations for the difference of angles between its faces [3]. With the development of metrology in the field of angular measurements, the optical polygon began to play an important role as an angular measure. International comparisons, ensuring the unity of measurements, are carried out using a multi-faceted prism, which is consistently calibrated on the reference goniometric systems of national metrological institutes of different countries [4,5].

## 2. CLASSIFICATION OF CONTACTLESS GONIOMETERS

Based on the history of the invention of goniometers and their measurement methods, we can conclude that there are two types of goniometers: contact and reflective (contactless). The contactless goniometer is the most accurate and is currently widely used in metrology, instrumentation and other scientific and industrial fields.

A complete goniometric system consists of such elements as an angular scale; a turntable; a drive that sets the rotation; an optical device that sets the reference direction; an electronic unit that controls the engine and pre-processing data; a personal computer for receiving and processing data. The object under study is fixed on the turntable as shown in Fig. 1 [6].

According to the principle of operation, contactless goniometers are divided into static and dynamic. The static measurement method differs in that the moving parts of the goniometric system (the object under study and the turntable) remain stationary at the moment of measurement. In this mode, the optical device is an autocollimator, which measures the deviation of the normal to

электронный блок, который осуществляет управление двигателем и предварительную обработку данных; персональный компьютер для приема и обработки данных. Исследуемый объект закрепляется на поворотном столе так, как показано на рис. 1 [6].

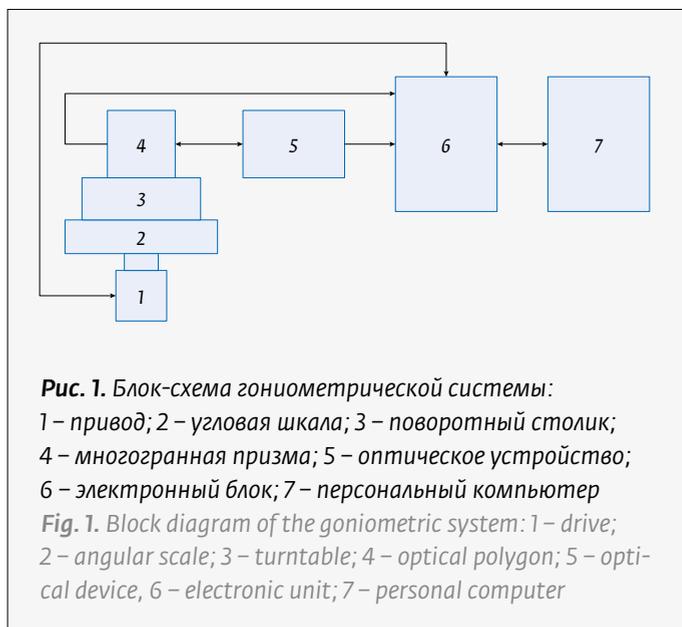
По принципу действия бесконтактные гониометры делятся на статические и динамические. Статический способ измерений отличается тем, что движущиеся части гониометрической системы (исследуемый объект и поворотный стол) остаются неподвижными непосредственно в момент измерений. В этом режиме оптическим устройством является автоколлиматор, который измеряет отклонение нормали к отражающей грани призмы от визирной оси автоколлиматора. Результат измерений в такой системе определяется показаниями угловой шкалы и автоколлиматора. Основной проблемой, связанной со статическим гониометром, является большая продолжительность измерений.

Динамическим гониометром называется устройство, в котором во время процесса измерений исследуемый объект вращается с квазипостоянной скоростью. В этом типе гониометров оптическим устройством, задающим опорное направление, является нуль-индикатор.

Блок-схема, представленная на рисунке 1, подходит как для статических, так и для динамических типов гониометров [7]. У двух режимов работы есть несколько отличий, которые мы рассмотрим. В современных статических гониометрах угловая шкала всегда представлена датчиками угла (обычно оптическими) или лимбом, в то время как в динамических гониометрах в качестве угловой шкалы может использоваться либо кольцевой лазер, либо оптический датчик угла. Второй особенностью является тип оптического устройства, используемого в системе. В составе статических гониометров используется автоколлиматор, а в составе динамических гониометров – нуль-индикатор.

Помимо принципа действия, гониометры делятся также по своему назначению. Задачи, выполняемые с помощью гониометров, могут быть следующие: калибровка многогранных призм, измерение показателя преломления, измерение внешних углов, измерение углов между двумя отражающими поверхностями [8].

Многогранная призма – это один из самых распространенных объектов, используемых при измерениях с помощью гониометров. Многогранная призма представляет собой изделие с фик-



**Рис. 1.** Блок-схема гониометрической системы:

1 – привод; 2 – угловая шкала; 3 – поворотный стол; 4 – многогранная призма; 5 – оптическое устройство; 6 – электронный блок; 7 – персональный компьютер

**Fig. 1.** Block diagram of the goniometric system: 1 – drive; 2 – angular scale; 3 – turntable; 4 – optical polygon; 5 – optical device, 6 – electronic unit, 7 – personal computer

the reflecting face of the prism from the sighting axis of the autocollimator. The measurement result in such a system is determined by the readings of the angular scale and the autocollimator. The main problem associated with a static goniometer is the long duration of measurements.

A dynamic goniometer is a device in which, during the measurement process, the object under study rotates at a quasi-constant speed. In this type of goniometers, the optical device that sets the reference direction is a null-indicator.

The block diagram shown in Fig. 1 is suitable for both static and dynamic types of goniometers [7]. The two modes of operation have several differences, which we will consider. In modern static goniometers, the angular scale is always represented by angle sensors (usually optical) or a limb, while in dynamic goniometers, either a ring laser or an optical angle sensor can be used as an angular scale. The second feature is the type of optical device used in the system. As part of static goniometers, an autocollimator is used, and as part of dynamic goniometers, a null-indicator is used.

In addition to the principle of operation, goniometers are also divided according to their purpose. The tasks performed using goniometers can be as follows: calibration of optical polygons, measurement of refractive index, measurement of external angles, measurement of angles between two reflecting surfaces [8].

An optical polygon is one of the most common objects used in measurements with goniometers. An optical polygon is a product with a fixed num-

сированным количеством сторон, которое считается одним из самых точных и надежных эталонных стандартов в области угловой метрологии. Примеры представлены на рисунке 2.

Как уже отмечалось выше, в основном они используются для калибровки средств измерений, в частности – для передачи величины угла от первичного эталона к рабочему оборудованию. Помимо указанных применений, многогранные призмы также используются в качестве элементов различных лазерных и оптических систем [9]. Существует множество параметров, описывающих многогранные призмы. Основными параметрами являются следующие: количество граней, модель, размеры, покрытие отражающей поверхности и материал, из которого изготовлена призма [10].

### 3. ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ НУЛЬ-ИНДИКАТОРОВ

Ноль-индикатор – это оптическое устройство, задающее опорное направление в пространстве и фиксирующее тот момент, когда его оптическая ось перпендикулярна отражающей поверхности исследуемого объекта. Существуют различные конфигурации ноль-индикаторов, однако можно выделить два основных типа: интерференционные и автоколлимационные [11].

#### 3.1. Автоколлимационный ноль-индикатор

Одним из первых ноль-индикаторов, которые стали применять в составе динамических гониометров, является устройство, построенное на базе автоколлиматора. Оптическая схема такого устройства представлена на рис. 3. Перед источником света 7 ставится задающая щель 6 определенной ширины. Такой же ширины перед фотоприемником 1 ставится анализирующая щель 2. Ширина щелей должна быть одинакова для того, чтобы выходной сигнал имел квазитреугольную форму. Свет, проходя через светоделительный кубик 3, падает на объектив 4 и затем на отражающую поверхность 5. Когда она становится перпендикулярной оси ноль-индикатора, изображение задающей щели попадает на анализирующую щель и на выходе фотоприемника формируется аналоговый сигнал.



Рис. 2. Примеры многогранных призм  
Fig. 2. Examples of optical polygons

ber of sides, which is considered one of the most accurate and reliable reference standards in the field of angular metrology. Examples are shown in Fig. 2.

As noted above, they are mainly used for calibration of measuring instruments, in particular, for transmitting the angle value from the primary standard to the working equipment. In addition to these applications, optical polygons are also used as elements of various laser and optical systems [9]. There are many parameters describing optical polygons. The main parameters are the following: the number of faces, model, dimensions, coating of the reflecting surface and the material from which the prism is made [10].

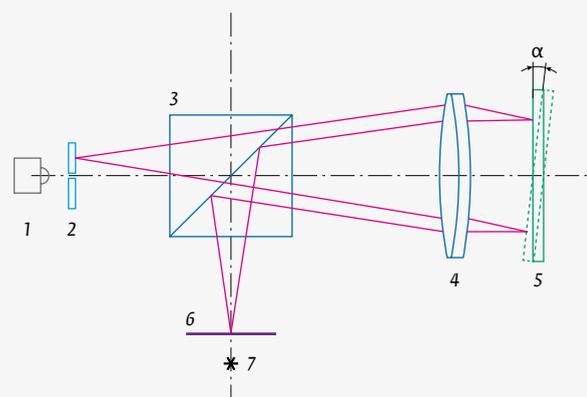


Рис. 3. Оптическая схема автоколлимационного ноль-индикатора: 1 – фотоприемник, 2 – анализирующая щель, 3 – светоделительный кубик, 4 – объектив, 5 – отражающая поверхность, 6 – задающая щель, 7 – источник света

Fig.3. Optical scheme of the autocollimation null-indicator: 1 – photodetector, 2 – analyzing slit, 3 – beam-splitting cube, 4 – lens, 5 – reflecting surface, 6 – setting slit, 7 – light source

Моменту совпадения нормали к поверхности с оптической осью АК соответствует максимум аналогового сигнала. Выходной импульс, используемый для дальнейшей обработки, формируется с помощью пороговой схемы по определенному уровню сигнала, причем этот уровень выбирается так, чтобы крутизна сигнала была на нем максимальной, чтобы уменьшить случайную погрешность измерений.

В общем случае вклад нуля-индикатора с пороговой схемой обработки аналогового сигнала в случайную погрешность единичного измерения гониометрической системы определяется двумя параметрами: угловой крутизной самого сигнала и соотношением сигнал/шум, который задается оптоэлектронными компонентами и самой схемой, участвующей в формировании и предварительной обработке сигнала. Вместо крутизны аналогового сигнала при различного рода оценках можно также оперировать параметром его угловой ширины, т.к. необходимая амплитуда сигнала определяется входными параметрами обрабатываемой схемы и составляет обычно порядка 3 В. Типовой образец рассматриваемого автоколлимационного нуля-индикатора (фокусное расстояние объектива – 250 мм и ширина задающей и анализирующей щели – 40 мкм) характеризуется шириной аналогового сигнала порядка 60 угл. сек. и соотношением сигнал/шум – 50. При этом величина случайной погрешности единичного измерения составляет порядка 0,6 угл. сек., что является неприемлемой величиной в современных высокоточных измерениях [12].

### 3.2. Интерференционный нуля-индикатор

Интерференционный нуля-индикатор представляет собой двухлучевой интерферометр, основанный на расщеплении луча призмой Кестерса (или бипризмой Дове) (рис. 4). Выходной аналоговый сигнал такого нуля-индикатора представляет собой комбинацию узкого импульса и квази-постоянной составляющей, которая намного шире импульса (примерно в 1600 раз) [13].

Данный тип нуля-индикатора характеризуется чрезвычайно малой шириной импульса (ширина импульса в интерференционном нуля-индикаторе определяется шириной световых пучков и расстоянием между ними, см. рис. 4). При ширине световых пучков и расстоянии между ними равными 10 мм угловая ширина импульса составляет всего лишь 0,6 угл.с. При соотношении сигнал/шум порядка 100 СКО слу-

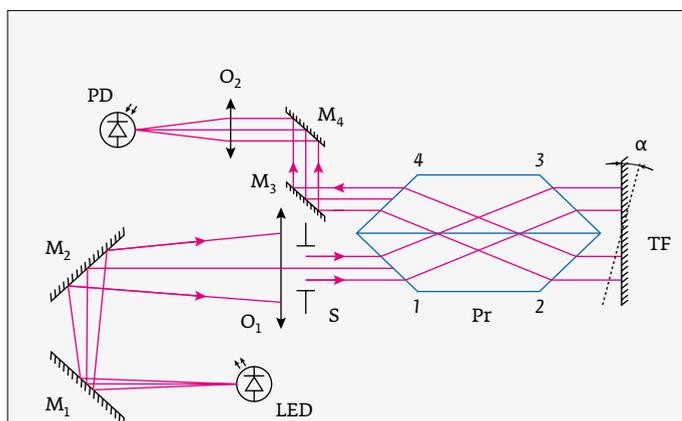
### 3. TYPES OF OPTICAL NULL-INDICATORS

A null-indicator is an optical device that sets a reference direction in space and fixes the moment when its optical axis is perpendicular to the reflecting surface of the object under study. There are various configurations of null-indicators, but two main types can be distinguished: interference and autocollimation [11].

#### 3.1. Autocollimation null-indicator

One of the first null-indicators that began to be used as part of dynamic goniometers is a device built on the basis of an autocollimator. The optical scheme of such a device is shown in Fig. 3. A reference slit 6 of a certain width is placed in front of the light source 7. Of the same width, an analyzing slit 2 is placed in front of the photodetector 1. The width of the slits must be the same in order for the output signal to have a quasi-triangular shape. The light passing through the beam-splitting cube 3 falls on the lens 4 and then on the reflecting surface 5. When it becomes perpendicular to the axis of the null-indicator, the image of the reference slit falls on the analyzing slit and an analog signal is formed at the output of the photodetector.

The moment when the normal to the surface coincides with the optical axis of the AK corresponds to the maximum of the analog signal. The output pulse



**Рис. 4.** Оптическая схема интерференционного нуля-индикатора: PD – фотодиод,  $O_{1,2}$  – объективы,  $M_{1,4}$  – зеркала, 1–4 – грани бипризмы Дове, TF – контролируемая грань, Pr – бипризма Дове, S – диафрагма, LED – светодиод,  $\alpha$  – угол поворота контролируемой грани

**Fig. 4.** Optical scheme of the interference null-indicator: PD – photodiode,  $O_{1,2}$  – lenses,  $M_{1,4}$  – mirrors, 1–4 – faces of the Dove biprism, TF – controlled face, Pr – Dove biprism, S – aperture, LED – LED,  $\alpha$  – angle of rotation of the controlled face

чайной погрешности составляет 0,03 угл.с. [14]. Исходя из таких точностных характеристик интерференционные нуль-индикаторы считались одними из самых точных в динамических гониометрических измерениях.

Недостатком этого типа нуль-индикаторов является сильная зависимость возможности его функционирования от качества отражающей поверхности и однородности среды, в которой распространяется свет. Искажение регистрируемого волнового фронта, соответствующее даже одной интерференционной полосе, может привести к сбою работы гониометрической системы.

Кроме того, существует еще один недостаток интерференционного нуль-индикатора. Гониометры-рефрактометры измеряют показатели преломления материалов, которые используются для изготовления специальных тестовых призм. Для определения показателей преломления измеряют углы между лучами, отраженными от внутренних и внешних поверхностей исследуемой призмы. Отраженный от внутренней поверхности грани луч проходит через призму дважды, преломляясь средой этой призмы, при этом на луч оказывает существенное влияние дисперсия. Явление дисперсии проявляется в том, что проходящие через среду лучи распадаются в пространстве на составляющие, которые имеют различную частоту. В таком случае при использовании источника света с широким спектром узкий интерференционный импульс превращается в размытую картину, что существенно снижает точность прибора.

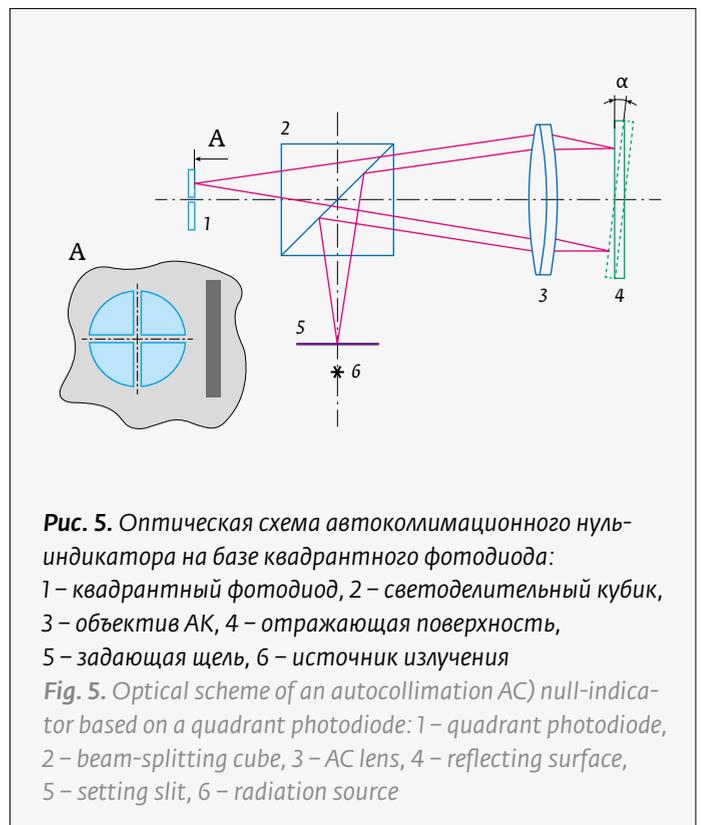
### 3.3. Автоколлимационный нуль-индикатор с дифференциальной схемой регистрации

В связи с вышеперечисленными проблемами была предложена схема автоколлимационного нуль-индикатора с дифференциальной схемой регистрации. Схема такого устройства представлена на рис. 5.

В качестве фотоприемника в данной схеме выступает квадрантный фотодиод, который представляет собой кремниевый фотодетектор с четырьмя светочувствительными областями (квадрантами). Фотоприемник расположен так, что оптическая ось нуль-индикатора проходит через перекрестие, образованное зазорами между квадрантами. При этом вертикальный зазор должен быть параллелен оси вращения отражающей поверхности.

used for further processing is formed using a threshold circuit for a certain signal level, and this level is selected so that the steepness of the signal is at its maximum in order to reduce the random measurement error.

In general, the contribution of a null-indicator with a threshold analog signal processing circuit to the random error of a single measurement of a goniometric system is determined by two parameters: the angular steepness of the signal itself and the signal-to-noise ratio, which is set by optoelectronic components and the circuit itself involved in the formation and preprocessing of the signal. Instead of the steepness of the analog signal, with various kinds of estimates, you can also operate with the parameter of its angular width, because the required signal amplitude is determined by the input parameters of the processing circuit and is usually about 3 V. A typical sample of the considered autocollimation null-indicator (the focal length of the lens is 250 mm and the width of the setting and analyzing slit is 40 microns) is characterized by the width of the analog signal of the order of 60 arc-sec and the signal-to-noise ratio is 50. In this case, the value of the random error of a single measurement is about 0.6 arc-sec, which is an unacceptable value in modern high-precision measurements [12].



После того как свет, отраженный от поверхности исследуемого объекта, попадает на квадранты, на выходе нуля-индикатора начинают формироваться сигналы с левых и правых площадок фотодиода. В момент, когда отражающая поверхность перпендикулярна оптической оси этого устройства, эти сигналы пересекаются и по точке пересечения формируется логический импульс, который подается в гониометр для дальнейшей обработки.

Процесс формирования сигнала представлен на рис. 6.

Изображение щели больше зазора между площадками, поэтому существует тот момент, когда сигналы с правых и левых площадок равны. При этом искомому моменту соответствует тот, когда центр масс изображения задающей щели находится в центре вертикального зазора.

Этот тип нуля-индикатора в ходе исследований показал хорошие результаты, его случайная погрешность оказалась на том же уровне, что и у интерференционного типа – порядка пяти сотых угловой секунды [12]. Его преимуществом является то, что нестабильность скорости вращения исследуемого объекта и нестабильность аналогового сигнала не оказывают практически никакого влияния на погрешность измерений. Но также был выявлен и существенный недостаток.

При установке данного нуля-индикатора относительно вращающейся угловой меры необходимо довольно точно выставлять параллельность вертикального зазора квадрантного фотодиода относительно оси вращения – с точностью порядка нескольких угловых минут [12]. При отклонении от параллельности на 20 угл. мин. систематическая погрешность измерений гониометрической системы достигала 0,4 угл. сек.

### 3.4. Автоколлимационный нуля-индикатор с цифровой обработкой аналогового сигнала

В настоящий момент одним из самых точных автоколлимационных нуля-индикаторов является нуля-индикатор с цифровой обработкой сигнала, которая основана на оценке его центра масс. Оптические схемы такого прибора имеют несколько вариаций, одна из которых аналогична схеме, представленной на рис. 3.

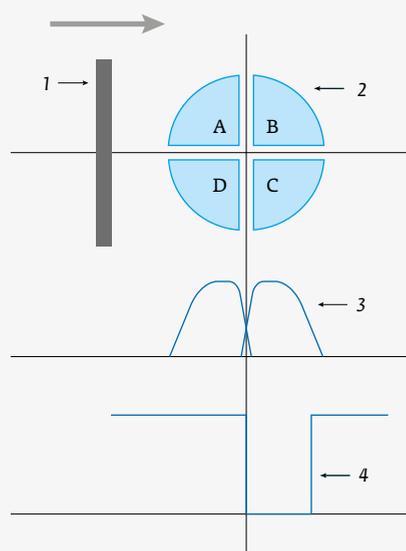
Фотоприемник генерирует аналоговый сигнал, максимум которого соответствует моменту точного совпадения нормали к отражающей поверхности и оси нуля-индикатора. Цифровая обра-

### 3.2. Interference null-indicator

The interference null-indicator is a two-beam interferometer based on beam splitting by a Kesters prism (or a Dove biprism) (Fig.4). The analog output signal of such a null-indicator is a combination of a narrow pulse and a constant component that is much wider than the pulse (about 1600 times) [13].

This type of null-indicator is characterized by an extremely small pulse width (the pulse width in an interference null indicator is determined by the width of the light beams and the distance between them, see Fig.4). With the width of the light beams and the distance between them equal to 10 mm, the angular width of the pulse is only 0.6 arc-sec. With a signal-to-noise ratio on the order of 100, the random error (RMS) is 0.03 arc-sec. [14]. Based on such accuracy characteristics, interference null-indicators were considered one of the most accurate in dynamic goniometric measurements.

The disadvantage of this type of null-indicators is the strong dependence of the possibilities of its functioning on the quality of the reflecting sur-



**Рис. 6.** Формирование выходного сигнала АНИ: 1 – изображение задающей щели, 2 – светочувствительные площадки, 3 – сигналы с правых и левых площадок, 4 – выходной импульс, стрелкой показано перемещение изображения щели, А–D – зоны фотодиода

**Fig. 6.** Generation of ANI output signal: 1 – the image of the master slit, 2 – photosensitive sites, 3 – signals from the right and left sites, 4 – output pulse, the arrow shows the movement of the slit image, А–D – photodiode zones

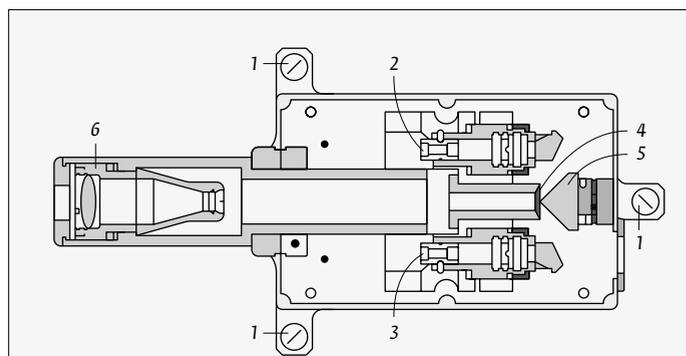
**Таблица.** Зависимость величины случайной погрешности нуля-индикации от соотношения сигнал/шум

**Table.** Dependence of the random error of the null indicator on the signal-to-noise ratio

Соотношение сигнал/шум Signal-to-noise ratio	100	50	25	12	6
СКО, угл.с. RMS, arc-sec.	0,0066	0,017	0,034	0,096	0,14

ботка сигнала, основанная на оценке его центра масс, позволяет добиться точности измерений, определяемой случайной погрешностью единичного измерения в 0,02 угл. сек. [15]. Схема цифрового автоколлимационного нуля-индикатора представлена на рис. 7.

Сигнал, попадающий на фотоприемник, усиливается и подается в устройство регистрации сигналов, где оцифровывается для дальнейшего определения центра масс. Логическое устройство выдает пакет данных, который содержит количество периодов оптического энкодера от момента превышения сигналом порогового уровня до момента, когда сигнал оказывается ниже порога; значения сигнала внутри этого интервала; длительность сигнала и временные привязки в микросекундах. Далее все данные обрабатываются и с помощью программного пакета вычисляется центр масс, исходя из которого определяется момент перпендикулярности контролируемой поверхности к оптической оси нуля-индикатора.



**Рис. 7.** Схема цифрового нуля-индикатора: 1 – крепления, 2 – источник света, 3 – фотоприемник, 4 – оптическая маска, 5 – поворотная призма, 6 – объектив

**Fig. 7.** Diagram of the digital null-indicator: 1 – mounts, 2 – light source, 3 – photodetector, 4 – optical mask, 5 – rotating prism, 6 – lens

face and the uniformity of the medium in which light propagates. Distortion of the recorded wavefront corresponding to even one interference fringe can lead to malfunction of the goniometric system.

In addition, there is another disadvantage of the interference null-indicator. Goniometers-

refractometers measure the refractive indices of materials that are used to make special test prisms. To determine the refractive indices, the angles between the rays reflected from the inner and outer surfaces of the prism under study are measured. The beam reflected from the inner surface of the face passes through the prism twice, being refracted by the medium of this prism, while the beam is significantly influenced by dispersion. The phenomenon of dispersion is manifested in the fact that the rays passing through the medium are decomposed in space into components that have different frequencies. In this case, when using a light source with a wide spectrum, a narrow interference pulse turns into a blurry picture, which significantly reduces the accuracy of the device.

### 3.3. Autocollimation null-indicator with differential registration scheme

In connection with the above problems, an autocollimation null-indicator scheme with a differential registration scheme was proposed. The diagram of such a device is shown in Fig. 5.

The photodetector in this scheme is a quadrant photodiode, which is a silicon photodetector with four photosensitive regions (quadrants). The photodetector is positioned so that the optical axis of the null-indicator passes through the crosshair formed by the gaps between the quadrants. In this case, the vertical gap must be parallel to the axis of rotation of the reflecting surface.

After the light reflected from the surface of the object under study hits the quadrants, signals from the left and right areas of the photodiode begin to form at the output of the null-indicator. At the moment when the reflecting surface is perpendicular to the optical axis of this device, these signals intersect and a logical pulse is formed at the intersection point, which is fed to the goniometer for further processing. The signal generation process is shown in Fig. 6.

The image of the gap is larger than the gap between the pads, so there is a moment when the



Недостатком такого нуль-индикатора является наличие постообработки, которая может внести определенный вклад в погрешность прибора. Однако по экспериментальным данным этот нуль-индикатор все же выигрывает у других типов по точности. В работе [15] были проведены модельные эксперименты, задачей которых было определение случайной погрешности нуль-индикации и ее зависимости от соотношения сигнал/шум. В таблице приведены полученные результаты. Полученные результаты показывают, что при соотношении сигнал/шум 50 случайная погрешность оказывается менее 0,02 угл.с., что характеризует нуль-индикатор с цифровой обработкой сигнала наилучшим образом.

### 3.5. ДРУГИЕ СХЕМЫ НУЛЬ-ИНДИКАТОРОВ

Помимо представленных конфигураций нуль-индикаторов, существуют и другие, однако сейчас они практически не используются из-за своих недостатков (особенностей эксплуатации и низкой точности).

Первый тип, который мы рассмотрим – автоколлимационный нуль-индикатор, задающая и анализирующая щели которого представляют из себя маски, области прозрачности которых чередуются по псевдошумовому закону (случайным образом распределенные щели). Прозрачному и непрозрачному участку маски соответствуют элементы кодовой последовательности – 1 и 0. При этом выходной сигнал определяется автокорреляционной функцией. Когда контролируемая поверхность перпендикулярна оси нуль-индикатора, у автокорреляционной функции наблюдается резкий всплеск, по максимуму которого и определяется искомый момент. Недостатком такого нуль-индикатора является дифракционное искажение светового луча, которое, как оказалось в результате экспериментального исследования опытного образца, сводит на нет все преимущества использования псевдошумовой маски [16].

Второй тип представляет собой автоколлимационный нуль-индикатор с качающимся направлением оптического луча. В этом нуль-индикаторе после прохождения щели луч отражается от «качающегося зеркала», установленного на пьезоэлектрическом основании, которое перемещает зеркало относительно центральной оси. Выходной сигнал фотоприемника поступает на встроенный усилитель, который позволяет отфильтровать сигнал по частоте качания,

signals from the right and left pads are equal. In this case, the desired moment corresponds to the one when the center of mass of the image of the target slit is in the center of the vertical gap.

This type of null-indicators has shown good results in the course of research, its random error turned out to be at the same level as that of the interference type – about five hundredths of an arc second [12]. Its advantage is that the instability of the rotation speed of the object under study and the instability of the analog signal have virtually no effect on the accuracy of the device. But a significant drawback was also identified.

When installing this null-indicator relative to a rotating angular measure, it is necessary to fairly accurately set the parallelism of the vertical gap of the quadrant photodiode relative to the axis of rotation – with an accuracy of the order of several arc minutes [12]. With a deviation from parallelism by 20 arc-min the systematic measurement error of the goniometric system reached 0.4 arc-sec.

### 3.4. Autocollimation null-indicator with digital processing of an analog signal

At the moment, one of the most accurate autocollimation null-indicators is a null-indicator with digital signal processing, which is based on an estimate of its center of mass. The optical circuits of such a device have several variations, one of which is similar to the scheme shown in Fig. 3.

The photodetector generates an analog signal, the maximum of which corresponds to the moment of exact coincidence of the normal to the reflecting surface and the axis of the null-indicator. Digital signal processing, based on the evaluation of its center of mass, allows you to achieve measurement accuracy determined by the random error of a single measurement of 0.02 arc-sec [15]. The scheme of the digital autocollimation null-indicator is shown in Fig. 7.

The signal entering the photodetector is amplified and fed into the signal recording device, where it is digitized for further determination of the center of mass. The logic device outputs a data packet that contains the number of periods of the optical encoder from the moment the signal exceeds the threshold level to the moment when the signal is below the threshold; the values of the signal within this interval; the duration of the signal and time bindings in microseconds. Then all the data is processed and the center of mass is calculated using the software package, based on which the moment of perpendicular of the controlled



и на синхронный детектор [3]. Недостатком такого варианта является требование достаточно низкой скорости вращения исследуемого объекта, что замедляет процесс измерений.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимости от технических возможностей, требований и поставленных задач следует выбирать подходящий нуль-индикатор, учитывая его параметры и факторы, влияющие на точность конкретной конфигурации нуль-индикатора. Подытожив, проведем краткое сравнение рассмотренных в данной статье нуль-индикаторов.

Автоколлимационный нуль-индикатор с пороговой схемой обработки имеет относительно простую конструкцию, однако из-за большой ширины аналогового сигнала точность прибора сильно падает.

Интерференционный нуль-индикатор является одним из самых точных за счет малой ширины интерференционного импульса. Данный тип нуль-индикатора крайне требователен к качеству контролируемой поверхности, так как из-за различных неровностей и неоднородностей световой луч испытывает дисперсию, интерференционная картина размывается и точность прибора снижается, либо же прибор выходит из строя.

Автоколлимационный нуль-индикатор с дифференциальной схемой регистрации с точки зрения формирования логического сигнала имеет существенное преимущество, так как формирование логического импульса происходит строго по точке пересечения сигналов, симметричных относительно момента формирования этого импульса. Систематическая погрешность данного нуль-индикатора зависит в основном от точности юстировки его компонентов и равномерности освещенности фотодиода.

Автоколлимационный нуль-индикатор с цифровой обработкой сигнала является одним из самых точных типов нуль-индикаторов, однако его недостатком является наличие постобработки.

Нуль-индикаторы с псевдошумовыми масками и с качающимся направлением светового луча на данный момент практически не используются. Недостатком первого является дифракционное искажение светового луча. Недостаток второго нуль-индикатора заключается в том, что скорость вращения исследуемого объекта должна быть низкой, что сказывается на продолжительности измерений.

surface to the optical axis of the null-indicator is determined.

The disadvantage of such a null-indicator is the presence of post-processing, which can make a certain contribution to the error of the device. However, according to experimental data, this null-indicator still outperforms other types in accuracy. In [15], model experiments were carried out, the task of which was to determine the random error of the null indication and its dependence on the signal-to-noise ratio. The table shows the results obtained.

The results obtained show that with a signal-to-noise ratio of 50, the random error turns out to be less than 0.02 arc-sec., which is characterized by a null-indicator with digital signal processing in the best way.

#### 3.5. OTHER SCHEMES OF NULL-INDICATORS

In addition to the presented configurations of null-indicators, there are others, but now they are practically not used due to their shortcomings (operating features and low accuracy).

The first type that we will consider is an autocollimation null-indicator, the defining and analyzing slits of which are masks whose transparency areas alternate according to a pseudo-noise law (randomly distributed slits). The transparent and opaque parts of the mask correspond to the elements of the code sequence - 1 and 0. In this case, the output signal is determined by the autocorrelation function. When the controlled surface is perpendicular to the axis of the null-indicator, the autocorrelation function has a sharp spike, the maximum of which determines the desired moment. The disadvantage of such a null-indicator is the diffraction distortion of the light beam, which as it turned out, as a result of an experimental study of the prototype, it negates all the advantages of using a pseudo-noise mask [16].

The second type is an autocollimation null-indicator with a rocking direction of the optical beam. In this null-indicator, after passing through the slit, the beam is reflected from a "rocking mirror" mounted on a piezoelectric base, which moves the mirror relative to the central axis. The output signal of the photodetector goes to the built-in amplifier, which allows filtering the signal by the swing frequency, and to the synchronous detector [3]. The disadvantage of this option is the requirement of a sufficiently low rotation speed of the object under study, which slows down the measurement process.



## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы Ю. В. Филатов и Р. А. Ларичев благодарны за финансовую поддержку работ грантом РФФ № 20-19-00412.

## REFERENCES

1. Sir C., Simon J. The evolution of the goniometer. *Nature*. 1915; 95(2386):564–565.
2. *The History of Goniometers*. URL.: <http://saveliv.blogspot.com/2013/07/the-history-of-goniometers.html>.
3. Kinnane M. N., Hudson L. T., Henins A., Mendenhall M. H. A simple method for high-precision calibration of long-range errors in an angle encoder using an electronic nulling autocollimator. *Metrologia*. 2015; 52(2): 244–250.
4. СНекИрда К. В., Шур В. Л., Кос'мина М. А., Лейбенгардт Г. И., ЛукИн А. Я. Измерение углов многогранных призм на государственном первичном эталоне единИцы плоского угла GET 22-2014. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2017; 3: 19–24.  
Чекирда К. В., Шур В. Л., Кос'мина М. А., Лейбенгардт Г. И., ЛукИн А. Я. Измерение углов многогранных призм на государственном первичном эталоне единИцы плоского угла ГЭТ 22-2014. *Измерительная техника*. 2017; 3: 19–24.
5. Probst R., Wittekopf R. *Angle calibration on precision polygons*. Final Report of EUROMET Project #371. PTBF-43 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany). 2001. 54 p.
6. Nava-Sandoval R., Díaz-Uribe R. Optical polygon calibration using only one autocollimator. *18th IMEKO World Congr. 2006 Metrol. a Sustain. Dev.* 2006;3: 1818–1820.
7. Burnashev M. N., Luk'yanov D. P., Pavlov P. A., Filatov YU. V. Razvitiye metodov i sredstv lazernoy dinamicheskoy goniometrii. *Kvantovaya elektronika*. 2000; 30(2):141–146.  
Бурнашев М. Н., Лукьянов Д. П., Павлов П. А., Филатов Ю. В. Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии. *Квантовая электроника*. 2000; 30(2):141–146.
8. Vishnyakov G. N. et al. Measuring the refractive index on a goniometer in the dynamic regime. *J. Opt. Technol.* 2005; 72(12): 929.
9. Akgoz S. A., Yandayan T. High precision calibration of polygons for emerging demands. *J. Phys. Conf. Ser.* 2018; 1065(14).
10. Project E. Bilateral Comparison of measurements of precision polygons. *Technical protocol*. no. January 2008; 2005.
11. Filatov Yu. V., Nikolaev M. S., Larichev R. A. Study of adjustment influence on the autocollimating null-indicator accuracy. *SPIE / COS Photonics Asia*. 10 October. 2020.
12. Larichev R. A., Filatov YU. V. Avtokollimatsionnyy nul'-indikator: razrabotka i primeneniye v dinamicheskoy goniometrii. *Opticheskij zhurnal*. 2013;80(9): 39–44.  
Ларичев Р. А., Филатов Ю. В. Автокollимационный нуль-индикатор: разработка и применение в динамической гониометрии. *Оптический журнал*. 2013;80(9): 39–44.
13. Filatov YU. V. Analiz raboty interferentsionnogo uglovogo nul'-indikatora. *OMP*. 1989;4: 13–16.  
Филатов Ю. В. Анализ работы интерференционного углового нуль-индикатора. *ОМП*. 1989;4: 13–16.
14. Pavlov P. A., Filatov YU. V. *Lazernaya goniometriya*. – SPb: Izd-vo SPbGETU «LETI». 2012. 184 pp.  
Павлов П. А., Филатов Ю. В. *Лазерная гониометрия*. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. 184 стр.
15. Pavlov P. A., Larichev R. A., Filatov Yu. V. Digital autocollimating null-indicator for dynamic goniometry. *Opt. Eng.* 2020; 59(10):1–8.
16. Evstaf'ev E. N., Pavlov P. A., Luk'yanov D. P. et al. Issledovanie tochnostnykh harakteristik avtokollimatsionnogo nul'-indikatora s psevdoshumovoy maskoy. *Metody i ustrojstva opticheskoy golografiy*. – L.: Fiziko-tekhnicheskij in-t im. A. F. Ioffe. 1983.  
Евстафьев Е. Н., Павлов П. А., Лукьянов Д. П. и др. Исследование точностных характеристик автоколлимационного нуль-индикатора с псевдощумовой маской. *Методы и устройства оптической голографии*. – Л.: Физико-технический ин-т им. А. Ф. Иоффе. 1983.

## АВТОРЫ

В. Ю. Венедиктов, Б. Ньямверу, Р. А. Ларичев, Ю. В. Филатов, Е. В. Шишалова, кафедра лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация.

## 4. CONCLUSION

Depending on the technical capabilities, requirements and tasks, you should choose a suitable null-indicator, taking into account its parameters and factors affecting the accuracy of a specific configuration of the null-indicator. Summing up, we will make a brief comparison of the null-indicators considered in this article.

The autocollimation null-indicator with a threshold processing scheme has a relatively simple design, however, due to the large width of the analog signal, the accuracy of the device drops significantly.

The interference null-indicator is one of the most accurate due to the small width of the interference pulse. This type of null-indicator is extremely demanding on the quality of the controlled surface, since due to various irregularities and inhomogeneities, the light beam experiences dispersion, the interference pattern is blurred and the accuracy of the device decreases, or the device fails.

An autocollimation null-indicator with a differential registration scheme has a significant advantage from the point of view of the formation of a logical signal, since the formation of a logical pulse occurs strictly at the intersection point of signals symmetrical with respect to the moment of formation of this pulse. The systematic error of this null-indicator depends mainly on the accuracy of the alignment of its components and the uniformity of illumination of the photodiode.

An autocollimation null-indicator with digital signal processing is one of the most accurate types of null-indicators, but its disadvantage is the presence of post-processing.

Null-indicators with pseudo-noise masks and with a rocking direction of the light beam are practically not used at the moment. The disadvantage of the first is the diffraction distortion of the light beam. The disadvantage of the second null-indicator is that the rotation speed of the object under study should be low, which affects the duration of measurements.

## CREDITS

Yu. V. Filatov and R. A. Larichev are grateful for the financial support provided by the RSF Grant No. 20-19-00412

## AUTHORS

V. Yu. Venediktov, B. Nyamweru, R. A. Larichev, Yu. V. Filatov, E. V. Shishalova, Laser Measurement and Navigation Systems department, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia.

XXVI МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВКА СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА



# INTERPOLITEX '22



18—20 ОКТЯБРЯ 2022  
МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»

ВТОРОЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ  
«ИНТЕРПОЛИТЕХ: ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ  
БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА»



При поддержке



Соорганизатор

СВЯЗИСТ

Проект ОВК «БИЗОН»



INTERPOLITEX.RU