

Экспериментальное сравнение интерференционного и автоколлимационного нуль-индикаторов

Б. Ньямверу¹✉, Е. В. Шишалова²

¹Колледж бизнес-образования СВЕ, Дар-эс-Салам, Танзания

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ bonifacenyamweru23@gmail.com

Аннотация

Введение. В настоящее время во многих научных и промышленных задачах требуется измерение углов с высокой точностью. Одним из самых распространенных высокоточных углоизмерительных приборов является гониометр, в составе которого могут применяться различные типы нуль-индикаторов (НИ). НИ, в свою очередь, имеют различные принципы работы и по-разному воспринимают некоторые факторы, способные вносить вклад в погрешность измерений.

Цель работы. Экспериментальное сравнение двух типов НИ: интерференционного с призмой Кестерса и автоколлимационного на базе квадрантного фотодиода.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели была собрана экспериментальная установка, включающая два НИ, которые могут подключаться к одному гониометру и измерять накопленные углы одной многогранной призмы в одинаковых условиях.

Результаты. В результате измерений и проведенной процедуры кросс-калибровки были получены 4 набора данных. Анализ обработанных данных показал, что разница погрешностей кольцевого лазера при использовании двух НИ не превысила 0.06", что находится в пределах случайной погрешности. В то же время, разница между отклонениями отражающих граней от номинального положения для двух граней этот предел превысила, что подтверждает влияние отклонения поверхности от плоскости на угловые измерения с разными типами НИ.

Заключение. По результатам эксперимента с точки зрения случайной погрешности интерференционный НИ проявил себя лучше, продемонстрировав СКО измеренных значений 0.02" при измерениях в ходе 25 оборотов призмы. В то же время автоколлимационный НИ имел СКО на уровне 0.04" при измерениях в течение 64 оборотов. Предположительно это может быть связано с установкой НИ. Также необходимо отметить, что корреляция между статистическими характеристиками самой отражающей грани и разницей между ее отклонениями, определяемыми разными типами НИ, отсутствует.

Ключевые слова: динамический гониометр, интерференционный нуль-индикатор, автоколлимационный нуль-индикатор, многогранная призма, систематическая погрешность, случайная погрешность

Для цитирования: Ньямверу Б., Шишалова Е. В. Экспериментальное сравнение интерференционного и автоколлимационного нуль-индикаторов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 149–158. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-149-158

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.06.2023; принята к публикации после рецензирования 13.07.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Experimental Comparison of Interference and Autocollimating Null Indicators

Boniface Nyamweru^{1✉}, Elizaveta V. Shishalova²

¹College of Business Education (CBE), Dar es Salaam, Tanzania

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ bonifacenyamweru23@gmail.com

Abstract

Introduction. At present, measurement of angles with high accuracy is an essential task in various scientific and industrial fields. The goniometer is one of the most widespread high-precision angle measuring devices, which can incorporate various types of null indicators. In turn, null indicators (NI) are based on different operating principles and can be sensitive to external factors that contribute to the measurement error.

Aim. Experimental comparison of two NI types: an interference NI with a Koester prism and an autocollimating NI based on a quadrant photodiode.

Materials and methods. An experimental setup was assembled, including two NI that could be connected to one goniometer and measure the accumulated angles of one optical polygon under the same conditions.

Results. As a result of conducting measurements and performing a cross-calibration procedure, four sets of data were obtained. An analysis of the processed data showed that the difference in the errors of the ring laser when using two NI did not exceed 0.06 arc seconds, being within the margin of random error. At the same time, the difference between the deviations of the reflecting faces from the nominal position for the two faces exceeded this limit, which confirms the effect of deviation of the surface from the plane on angular measurements with different types of null indicators.

Conclusion. According to the results obtained, from the random error point of view, the interference null indicator NI showed higher performance, demonstrating the RMS of measured values of 0.02 angular seconds when measured during 25 prism revolutions. At the same time, the autocollimating null indicator NI had an RMS at the level of 0.04 angular seconds when measured during 64 revolutions. Presumably, this may be caused by the installation specifics of NI. It should also be noted that there is no correlation between the statistical characteristics of the reflecting face itself and the difference between its deviations determined by different NI types.

Keywords: dynamic goniometer, interference null indicator, autocollimating null indicator, optical polygon, systematic error, random error

For citation: Nyamweru B., Shishalova E. V. Experimental Comparison of Interference and Autocollimating Null Indicators. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 149–158. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-149-158

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 01.06.2023; accepted 13.07.2023; published online 28.09.2023

Введение. Во многих областях науки и техники требуется измерение углов с высокой точностью. Одним из самых распространенных приборов для высокоточного измерения углов является гониометр. Гониометр – это прибор, предназначенный для измерения углов между отражающими свет гранями различных деталей, а также для измерения углов отклонения световых лучей. В области метрологии гониометры часто используются для проверки многогранных призм (МП) и других оптических деталей [1].

В общем случае гониометры делятся на

статические и динамические, в состав последних чаще всего входит кольцевой лазер (КЛ) и для измерений используется нуль-индикатор (НИ) [2–4]. Основное отличие динамического гониометра заключается в том, что при измерениях с его помощью измеряемый объект (ИО) непрерывно вращается. В качестве ИО в работе выступает МП [5].

НИ – это устройство, которое задает опорное направление в пространстве и регистрирует тот момент, когда отражающая грань ИО становится перпендикулярной оптической оси

(опорному направлению) НИ, в дальнейшем будем называть этот момент искомым [6]. КЛ в составе гониометра служит некой эталонной угловой шкалой, имеющей высокую точность.

Одним из самых первых НИ возник автоколлимационный НИ (АНИ) с пороговой схемой регистрации сигнала. Пороговая схема регистрации предполагает выработку логического импульса на выходе НИ в тот момент, когда значение аналогового сигнала на фотоприемнике превышает некоторый заданный уровень. Схема такого устройства довольно проста, однако точность во многих задачах недостаточна из-за большой ширины аналогового сигнала квазиреугольной формы, по которому с помощью пороговой схемы определяется искомым момент.

Вышеупомянутого недостатка лишен интерференционный НИ (ИНИ), выходной сигнал которого имеет широкий пьедестал и узкий импульс, максимум которого соответствует искомому моменту. Малая ширина интерференционного импульса позволяет более точно определять момент совпадения оси НИ и нормали к отражающей поверхности ИО. Однако на точность результатов негативно влияют неровности поверхности объекта, неоднородность среды и другие факторы, из-за которых размывается интерференционная картина [7, 8].

НИ, который имеет высокую точность и не так чувствителен к качеству отражающей поверхности, является НИ с цифровой обработкой сигнала. Способ обработки сигнала такого устройства основан на оценке центра масс аналогового сигнала НИ, что определяет более высокую точность измерений по сравнению с АНИ с пороговой схемой регистрации. Точность такого способа ограничена в основном нестабильностью скорости вращения объекта, отношением сигнал/шум и частотой дискретизации сигнала. Также среди недостатков такого НИ можно выделить сложность обработки сигнала [9].

Нельзя не отметить особенности АНИ с дифференциальной схемой регистрации, который построен на базе квадрантного фотодиода. В отличие от ранее рассмотренных типов НИ искомым момент в данном случае определяется не по одному сигналу, а по точке пересечения двух сигналов, что положительно сказывается на точности при-

бора и степени ее зависимости от различных факторов, способных исказить сигнал [10].

При высокоточных измерениях углов качество отражающих поверхностей исследуемого объекта может влиять не только на точность измерений, проведенных с помощью ИНИ, но также и на точность измерений, проведенных с помощью АНИ [11, 12]. Целью данной работы является оценка степени соответствия измерений, проведенных с различными типами НИ в одинаковых условиях.

Нуль-индикаторы. Для сравнения степени влияния качества отражающих поверхностей ИО в работе используются ИНИ и АНИ с дифференциальной схемой регистрации сигнала.

Оптическая схема ИНИ представлена на рис. 1. Излучение светодиода 1 отражается от зеркала 3 и попадает на объектив 4, который формирует параллельный пучок света. Свет после прохождения диафрагмы 5 падает на входную грань призмы Кестерса 6. На выходе призмы формируется два параллельных пучка света I и II. При отражении от контролируемой поверхности 7 между ними появляется сдвиг фаз, определяемый углом поворота α . Два луча проходят через призму в обратном направлении, совмещаются на светоделительном покрытии и интерферируют. Интерференционная картина проходит через объектив 8, отражается зеркалом 9 и проецируется на фотодиод 2.

При повороте контролируемой поверхности изменяется угловое рассогласование пучков I и II и интерференционное поле на входе НИ ме-

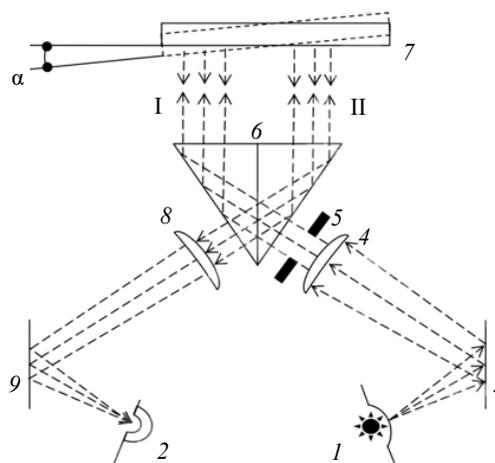


Рис. 1. Оптическая схема интерференционного НИ
Fig. 1. Optical scheme of an interference NI

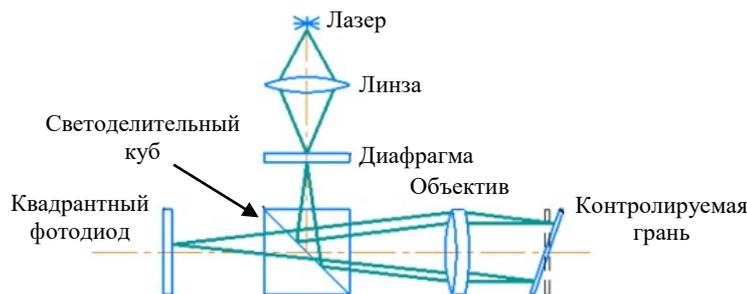


Рис. 2. Оптическая схема автоколлимационного НИ
 Fig. 2. Optical scheme of an autocollimating NI

няется. Когда нормаль к отражающей поверхности совпадает с направлением падающих световых пучков, их волновые фронты совмещаются и на выходе НИ наблюдается максимальный выходной сигнал.

При наличии неровностей на отражающей поверхности пучки I и II будут рассеиваться на этих неровностях, и интерференционная картина будет отличаться от идеальной, что приведет к потере точности прибора.

Оптическая схема АНИ представлена на рис. 2. Излучение лазера проходит через собирающую линзу и попадает на круглую диафрагму. Далее лучи через светоделительный куб и объектив попадают на отражающую поверхность ИО. Изображение щели, отраженное от грани, проецируется на квадрантный фотодиод.

Процесс формирования сигнала АНИ представлен на рис. 3. Изображение щели I попадает на левые площадки фотодиода, и с них начинают поступать сигналы, которые суммируются. При повороте ИО полученный суммарный сигнал начинает увеличиваться до

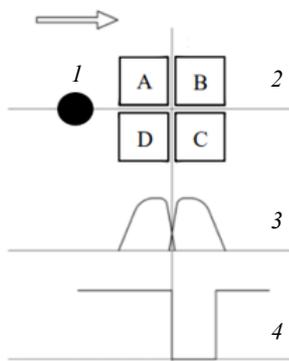


Рис. 3. Формирование выходного сигнала автоколлимационного НИ

Fig. 3. Generation of the autocollimating NI output signal

тех пор, пока изображение не окажется полностью на площадке фотодиода. По мере прохождения изображения дальше вдоль фокальной плоскости сигнал резко уменьшается и, еще до того момента, пока он не упал до нуля, начинает появляться сигнал с правых площадок. По точке пересечения сигналов 3 на выходе НИ формируется логический импульс 4, который поступает в гониометр для дальнейшей обработки.

Неровности на отражающих гранях приведут к перераспределению интенсивности изображения I, из-за чего сигналы 3 будут иметь искаженную форму, и точка пересечения этих сигналов сместится. Вследствие смещения точки пересечения сигналов логический импульс 4 будет формироваться либо раньше, либо позже искомого момента.

Планирование эксперимента. Для эксперимента будет использоваться лазерный динамический гониометр на базе КЛ КМ-11 [13], на котором штатно установлен ИНИ с призмой Кестерса. В роли АНИ с дифференциальной схемой регистрации выступает АНИ на базе квадрантного фотодиода, он является автономным устройством, однако может подключаться к блоку электроники гониометра вместо встроенного НИ.

Чтобы добиться идентичности условий измерений, необходимо их проводить последовательно и при неизменности расположения всех основных и вспомогательных элементов, входящих в состав экспериментальной установки. Все элементы установки не меняют своего пространственного расположения на протяжении всего эксперимента, при этом переключение между НИ осуществляется механически путем переключения выходных проводов НИ к электронному блоку гониометра.

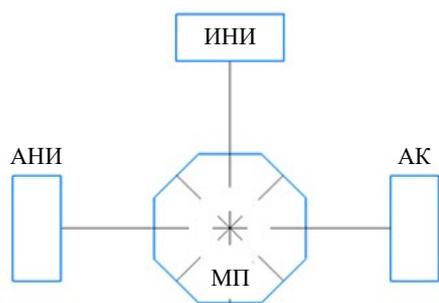


Рис. 4. Вид сверху

Fig. 4. View from above

НИ расположены под углом 90° относительно оси вращения МП, наклон которой юстируется с помощью визуального автоколлиматора (АК). АНИ предварительно прошел процедуру выставки вокруг собственной оптической оси [14]. Расположение этих элементов показано на рис. 4.

Для того чтобы выделить именно те отклонения, которые связаны с применением конкретного типа НИ, необходимо провести кросс-калибровку. Эта процедура позволяет разделить отклонения каждой из граней призмы от номинального положения и отклонения шкалы КЛ в точках расположения граней призмы от номинального положения [15].

В результате проведения измерений и последующей процедуры кросс-калибровки должны быть получены 4 набора данных. Два из них представляют собой отклонения граней призмы от номинального положения, причем различие между ними будет обусловлено только разницей между типами использовавшихся НИ, а другие два – это погрешности КЛ, также относящиеся к измерениям с разными типами НИ. Так как КЛ в измерениях был один и тот же, в теории эти значения должны быть идентичны. На практике они могут различаться, но не более чем на величину, определяемую уровнем случайной погрешности измерений. По степени соответствия между этими значениями можно будет судить об успешности проведенного эксперимента.

Эксперимент. Экспериментальная установка представлена на рис. 5. АНИ 1 направлен на МП 3, на которую также направлен ИНИ 2 под углом 90° относительно автоколлимационного. Оба НИ подключаются к блоку электроники 6 гониометра 5.

В начале эксперимента пузырьковым уровнем ось вращения выставлялась параллельно гравитационной вертикали, чтобы проекция скорости вращения Земли на ось чувствитель-

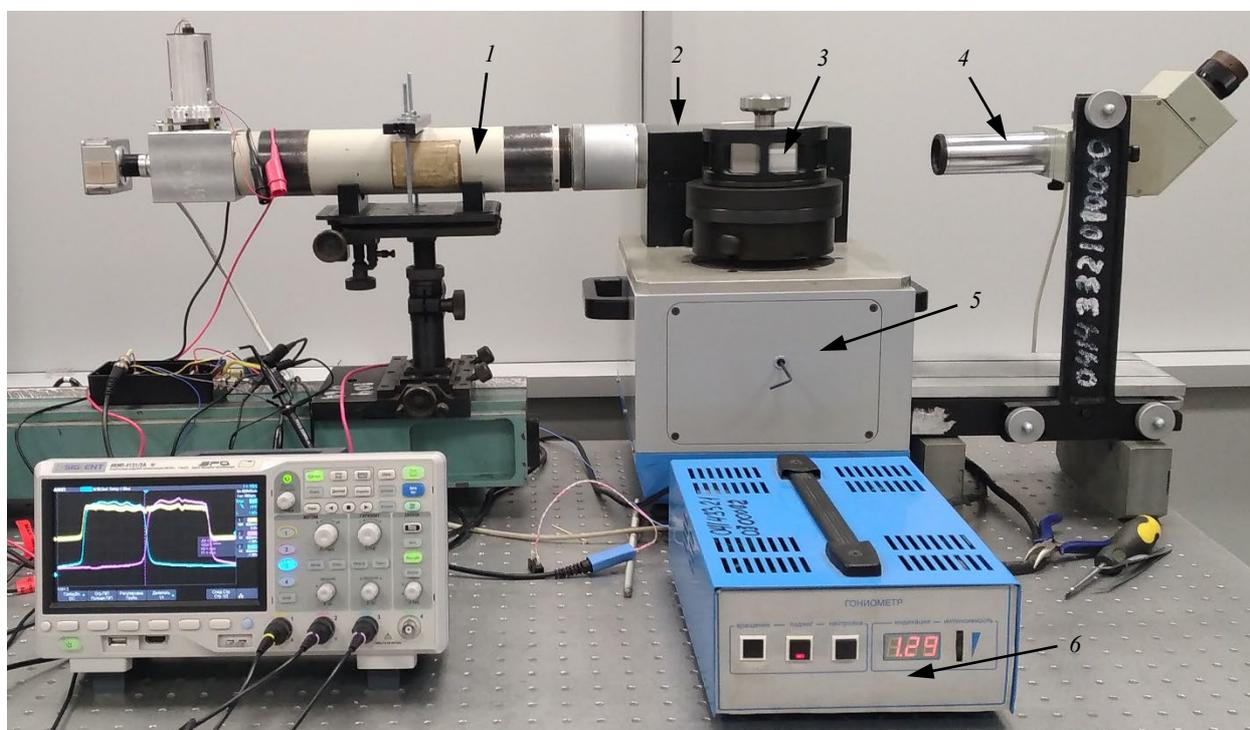


Рис. 5. Экспериментальная установка

Fig. 5. Experimental setup

ности КЛ была постоянной. Затем с помощью стрелочного индикатора таким образом выставлялся эксцентриситет установки МП на поворотный стол, чтобы он составлял менее 5 мкм, а с помощью визуального АК 4 наклон призмы относительно оси вращения выставлялся таким образом, чтобы он не превышал 30".

Измерения проводились при 64 и 25 оборотах призмы с АНИ и ИНИ соответственно, случайная погрешность измерений составляла 0.02" для ИНИ и 0.04" для АНИ. В качестве измеряемого объекта выступала восьмигранная призма, являющаяся образцовой угловой мерой с калибровочным сертификатом, выданным ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Результатами измерений для каждого из НИ являются 8 наборов накопленных углов призмы (измеренных относительно первой грани), при этом каждый новый набор получался при последовательном повороте призмы относительно шкалы КЛ на 45°.

В табл. 1 и 2 представлены отклонения измеренных от номинальных углов призмы для

двух типов НИ. Под номером подразумевается номер смещения.

В результате обработки измеренных значений были получены четыре набора отклонений: граней призмы и шкалы КЛ, относящихся к двум типам НИ. Отклонения представлены на рис. 6 и 7.

В теории систематическая погрешность КЛ не должна различаться для двух НИ, так как гониометр для измерений используется один и тот же. Причина, по которой значения на графике неодинаковы, может быть связана со случайной погрешностью.

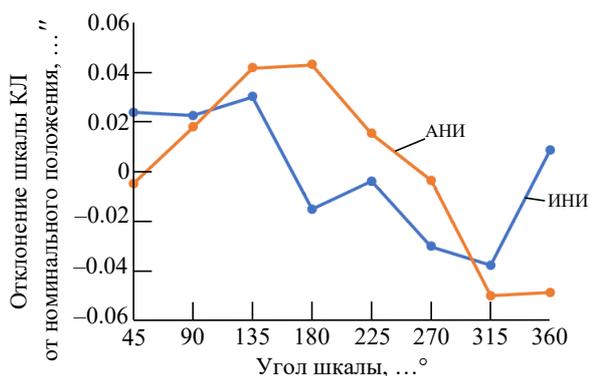


Рис. 6. Погрешность шкалы КЛ
 Fig. 6. Ring laser scale deviation

Табл. 1. Отклонения измеренных углов от номинальных для АНИ

Tab. 1. Nominal angles deviation measured by the ANI

Отклонения от номинальных углов, ..."								
Угол/номер	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0.09	0.11	-0.68	0.03	3.59	-1.48	0.44	-1.57
2	-1.66	-0.09	-0.56	-0.64	3.65	2.11	-1.06	-1.22
3	-1.3	-1.68	-0.72	-0.58	2.98	2.21	2.54	-2.73
4	-2.76	-1.29	-2.36	-0.75	3	1.45	2.61	0.83
5	0.69	-2.82	-1.99	-2.37	2.82	1.45	1.82	0.91
6	0.72	0.72	-3.51	-2.05	1.2	1.27	1.85	0.16
7	0	0.67	-0.03	-3.62	1.52	-0.32	1.61	0.16
8	0	0	0	0	0	0	0	0

Табл. 2. Отклонения измеренных углов от номинальных для ИНИ

Tab. 2. Nominal angles deviation measured by the INI

Отклонения от номинальных углов, ..."								
Угол/номер	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0.12	0.19	-0.81	0.1	3.54	-1.59	0.48	-1.67
2	-1.8	0.03	-0.65	-0.78	3.65	1.94	-1.03	-1.25
3	-1.36	-1.63	-0.82	-0.59	2.81	2.05	2.5	-2.79
4	-2.93	-1.23	-2.52	-0.8	2.92	1.2	2.49	0.68
5	0.64	-2.79	-2.07	-2.43	2.74	1.36	1.72	0.73
6	0.63	0.72	-3.65	-2	1.11	1.13	1.82	-0.07
7	-0.2	0.78	-0.12	-3.59	1.55	-0.48	1.59	0.1
8	0	0	0	0	0	0	0	0

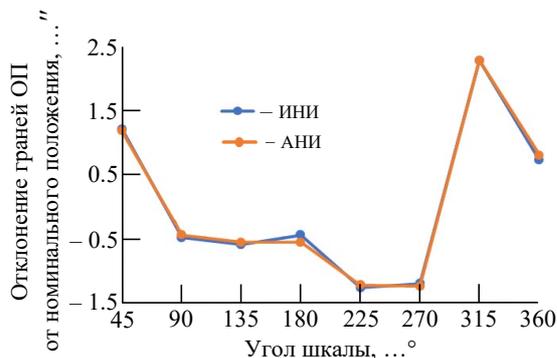


Рис. 7. Отклонения граней призмы от номинального положения

Fig. 7. Polygon faces deviation from nominal position

Так как случайная погрешность ИНИ равна $0.02''$, а АНИ – $0.04''$, разница между погрешностями КЛ для двух НИ не должна превышать суммарную случайную погрешность $0.06''$, иначе эксперимент нельзя считать успешным.

На рис. 7 представлены отклонения граней призмы от номинального положения, измеренные с помощью разных НИ.

Как отмечалось ранее, кросс-калибровка позволяет разделить погрешности КЛ и МП для АНИ и ИНИ. Систематическая погрешность МП для обоих НИ имеет схожий характер во всех углах призмы, как показано на рис. 6.

На рис. 8 представлены различия отклонений граней МП и шкалы КЛ для двух НИ.

Результаты вычислений показывают, что различие погрешностей КЛ для двух типов НИ находится в пределах $0.06''$, что находится в пределах суммарной случайной погрешности измерений. Это говорит о том, что результаты эксперимента можно считать достоверными. Различие отклонений граней призмы, обусловленное применением разных типов НИ, находится в пределах $0.05''$ за исключением 4-й и 8-й граней. Для этих граней различие отклонений превышает установленный уровень случайной погрешности в $0.06''$ и является именно следствием того, что два используемых НИ (АНИ и ИНИ) по-разному воспринимают неидеально плоские грани.

На восьмигранную призму, принимавшую участие в эксперименте, помимо калибровочного сертификата имелась также информация о качестве отражающих граней в виде значений среднеквадратического отклонения (СКО) и размаха отклонений точек поверхности (рис. 9).

Экспериментальное сравнение интерференционного и автоколлимационного нуль-индикаторов
Experimental Comparison of Interference and Autocollimating Null Indicators

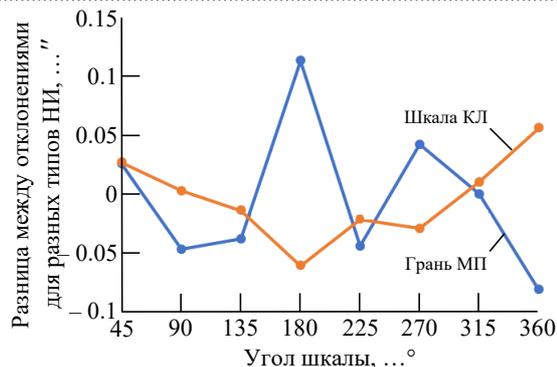


Рис. 8. Различия отклонений граней МП и шкалы КЛ

Fig. 8. Difference between deviations of polygon faces and ring laser scale

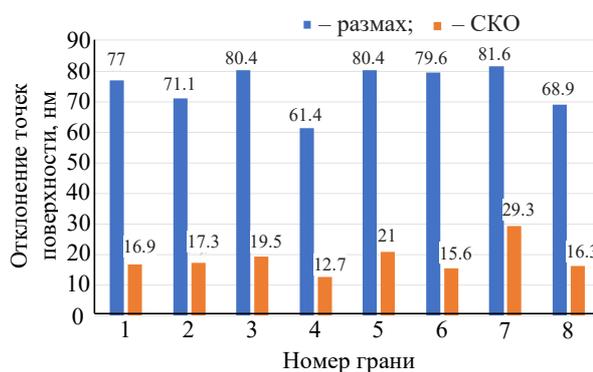


Рис. 9. Отклонение точек отражающих граней призмы

Fig. 9. Reflecting face points deviation

Как видно из рис. 9, грани призмы № 4 и 8 с точки зрения статистических параметров качества поверхности в чем-то даже превосходят остальные – имеют самые низкие значения размаха точек относительно средней плоскости и одни из самых низких значений СКО. Логичным было бы предположить, что чем меньше СКО и разброс точек поверхности, тем она более плоская и тем более схожим должно быть восприятие такой поверхности разными НИ. Но результаты, приведенные на рис. 8, говорят о том, что такое предположение неверно. Отсюда можно сделать вывод, что СКО и разброс отклонений точек поверхности не могут являться объективными критериями оценки отражающей поверхности, участвующей в угловых измерениях.

Заключение. В статье представлено экспериментальное исследование соответствия угловых измерений, проводимых с помощью разных типов НИ – АНИ и ИНИ. В идентичных условиях были проведены измерения отклонений граней восьмигранной призмы от их номи-

нального значения. Для исключения систематической погрешности КЛ, представляющего собой шкалу экспериментальной гониометрической установки, была также проведена процедура кросс-калибровки.

По результатам эксперимента с точки зрения случайной погрешности ИНИ проявил себя лучше, продемонстрировав СКО измеренных значений $0.02''$ при измерениях в ходе 25 оборотов призмы. В то же время АНИ имел СКО на уровне $0.04''$ при измерениях в течение 64 оборотов. Предположительно, это может быть связано с тем, что ИНИ был установлен на корпусе самого гониометра, а АНИ – на опоре рядом с гониометром. Данное конструктивное решение было обусловлено возможностями лаборатории. Незначительные вибрации, передающиеся через оптический стол, могли спровоцировать увеличение случайной погрешности измерений, но на систематическую погрешность и, соответственно, идентичность условий измерений они не влияют.

Анализируя полученные систематические отклонения, можно сделать несколько выводов. Во-первых, эксперимент прошел удачно, так как различие между отклонениями шкалы гониометра, полученными в результате кросс-калибровок с разными типами НИ, не превысило порога в $0.06''$, задаваемого уровнем случайной погрешности. Во-вторых, выбор типа НИ совместно с неидеальностью отражающих поверхностей граней призмы влияет на результат угловых измерений, проводимых на динамическом гониометре, так как для некоторых граней разница между их отклонениями превысила порог случайной погрешности. Также необходимо отметить, что корреляция между статистическими характеристиками самой отражающей грани и разницей между ее откло-

нениями, определяемыми разными типами НИ, отсутствует. Необходимо искать другие характеристики отражающей поверхности, которые помогли бы спрогнозировать сходимость результатов угловых измерений, проводимых с помощью разных НИ.

Необходимо отметить, что обозначение влияния "типа" НИ в некоторой степени является условным. На самом деле приведенные результаты демонстрируют, что влияние оказывает неплоскостность поверхности и метод определения нормали к этой неплоской поверхности, реализованный в НИ. Очевидно, что методы, реализованные в НИ, построенных на применении разных оптических явлений – интерференции и автоколлимации, будут различаться наиболее ощутимо. Именно поэтому они были выбраны для проведения эксперимента – для обеспечения его репрезентативности. Хотя это не исключает того, что восприятие одной и той же неплоской поверхности может отличаться у разных модификаций НИ одного типа или даже у одинаковых моделей НИ со специфическими дефектами.

Наибольшую значимость полученные результаты представляют для метрологической задачи передачи единицы плоского угла с помощью образцовых угловых мер – МП и клиньев. Как правило, призмы калибруются с помощью эталонных измерительных средств, получают калибровочный паспорт и далее используются для оценки точности углоизмерительных средств более низкого уровня. Результаты, представленные в статье, показывают, что при сопоставлении углоизмерительных средств с помощью МП с точностями выше $0.1''$, необходимо также учитывать, какими средствами регистрируются отражающие грани призмы в этих средствах.

Список литературы

1. Иванов П. А. Автоколлиматоры и гониометры. Обзор современных моделей // Фотоника. 2018. Т. 12, № 1 (69). С. 66–74. doi: 10.22184/1993-7296.2018.69.1.66.74
2. Filatov Yu. V., Loukianov D. P., Probst R. Dynamic angle measurement by means of a ring laser // Metrologia. 1997. Vol. 34, № 4. P. 343–351. doi: 10.1088/0026-1394/34/4/7
3. Бачиш Е. А., Павлов П. А. Исследование метрологических характеристик лазерного динамиче-

ского гониометра // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 19–23.

4. Precision angle measurement systems on the basis of ring laser gyro / Yu. V. Filatov, P. A. Pavlov, A. A. Velikoseltsev, K. U. Schreiber // Sensors. 2020. Vol. 20, № 23. P. 1–14. doi: 10.3390/s20236930

5. Павлов П. А., Филатов Ю. В. Результаты калибровки многогранных призм с помощью лазерного гониометра ИУП-1Л // Изв. ГЭТУ. 1997. Вып. 509. С. 41.

6. Оптические нуль-индикаторы для гониометрических систем: обзор / В. Ю. Венедиктов, Б. Ньямверу, Р. А. Ларичев, Ю. В. Филатов, Е. В. Шишалова // Фотоника. 2022. Т. 16, № 6. С. 464–475. doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.6.464.474

7. Павлов П. А. Анализ погрешности углового интерференционного нуль-индикатора // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2008. № 4. С. 55–62.

8. Филатов Ю. В. Анализ работы интерференционного углового нуль-индикатора // Опт.-мех. промышленность. 1989. № 4. С. 13–17.

9. Pavlov P. A., Larichev R. A., Filatov Yu. V. Digital autocollimating null-indicator for dynamic goniometry // Optical Engineering. 2020. Vol. 59, № 10. P. 104103. doi: 10.1117/1.OE.59.10.104103

10. Ларичев Р. А., Филатов Ю. В. Автоколлимационный нуль-индикатор: разработка и применение в динамической гониометрии // Опт. журн. 2013. Т. 80, № 9. С. 39–44.

11. Ларичев Р. А., Филатов Ю. В. Влияние топографии отражающей поверхности на угловые измерения с использованием автоколлиматора // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2012. № 7. С. 90–96.

12. Filatov Yu. V., Larichev R. A. Aberration influence on accuracy of angle measurements by means of autocollimator // Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engineering. Munich, Germany, 22–25 June 2015. P. 95253O. doi: 10.1117/12.2184726

13. Павлов П. А. Анализ алгоритмов измерений лазерным динамическим гониометром // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 17–20.

14. Study of adjustment influence on the autocollimating null-indicator accuracy / Yu. V. Filatov, M. S. Nikolaev, R. A. Larichev, P. A. Pavlov // Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engineering. 11–16 Oct. 2020. P. 115520H. doi: 10.1117/12.2573769

15. Павлов П. А. Особенности метода кросскалибровки в лазерной гониометрии // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 21–24.

Информация об авторах

Ньямверу Бонифаций – ассистент преподавателя Департамента правовой и промышленной метрологии Колледжа бизнес-образования СВЕ. Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – оптические метрологические системы.

Адрес: Колледж бизнес-образования СВЕ, ул. Биби-Тити-Мохаммед, Дар-эс-Салам, 1968, Танзания
E-mail: bonifacenyamweru23@gmail.com

Шишалова Елизавета Викторовна – магистрант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – высокоточные угловые измерения.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: lizabelaya.00@mail.ru

References

1. Ivanov P. A. Autocollimators and Goniometers. Review of Modern Models. Photonics Russia. 2018, vol. 12, no. 1(69), pp. 66–74. doi: 10.22184/1993-7296.2018.69.1.66.74 (In Russ.)

2. Filatov Yu. V., Loukianov D. P., Probst R. Dynamic Angle Measurement by Means of a Ring Laser. Metrologia. 1997, vol. 34, no. 4, pp. 343–351. doi: 10.1088/0026-1394/34/4/7

3. Bachish E. A., Pavlov P. A. Laser Dynamic Goniometer Metrological Characteristics. Measurement Techniques. 2009, vol. 52, no. 5, pp. 465–471. doi: 10.1007/s11018-009-9305-4

4. Filatov Yu. V., Pavlov P. A., Velikoseltsev A. A., Ulrich Schreiber K. Precision Angle Measurement Systems on the Basis of Ring Laser Gyro. Sensors. 2020, vol. 20, no. 23, pp. 1–14. doi: 10.3390/s20236930

5. Pavlov P. A., Filatov Yu. V. *Rezultaty kalibrovki mnogogrannykh prizm s pomoshch'yu lazernogo goniometra IUP-1L* [Calibration Results for Polyhedral Prisms Using the IUP-1L Laser Goniometer]. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 1997, vol. 509, p. 41. (In Russ.)

6. Venedictov V. Yu., Nyamweru B., Larichev R. A., Filatov Yu. V., Shishalova E. V. Optical null-indicators

for goniometric systems: a review. Photonics Russia. 2022, vol. 16, no. 6, pp. 464–475. doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.6.464.474 (In Russ.)

7. Pavlov P. A. The Error Analysis of an Angular Interference Null-Indicator. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2008, no. 4, pp. 55–62. (In Russ.)

8. Filatov Yu. V. Analysis of the Operation of an Interference Angular Null Indicator. *Opt.-mekh. Prom-st'*. 1989, no. 4, pp. 13–17. (In Russ.)

9. Pavlov P. A., Larichev R. A., Filatov Y. V. Digital Autocollimating Null-Indicator for Dynamic Goniometry. Optical Engineering. 2020, vol. 59, no. 10, p. 104103. doi: 10.1117/1.OE.59.10.104103

10. Larichev R. A., Filatov Yu. V. An Autocollimation Null Detector: Development and Use in Dynamic Goniometry. Journal of Optical Technology. 2013, vol. 80, no. 9, pp. 554–557. doi: 10.1364/JOT.80.000554

11. Larichev R. A., Filatov Yu. V. The Influence of Reflecting Face Topography on Angular Measurements with Aids of Autocollimator. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2012, no. 7, pp. 90–96. (In Russ.)

12. Filatov Yu. V., Larichev R. A. Aberration Influence on Accuracy of Angle Measurements by Means of

Autocollimator. Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engineering. Munich, Germany, 22–25 June 2015, p. 95253O. doi: 10.1117/12.2184726

13. Pavlov P. A. Laser Dynamic Goniometer Measurement Algorithms. Measurement Techniques. 2008, vol. 51, no. 1, pp. 22–27. doi: 10.1007/s11018-008-0005-2

14. Filatov Yu. V., Nikolaev M. S., Larichev R. A., Pavlov P. A. Study of Adjustment Influence on the Au-

tocollimating Null-Indicator Accuracy. Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engineering. 11–16 Oct. 2020, p. 115520H. doi: 10.1117/12.2573769

15. Pavlov P. A. Aspects of the Cross-Calibration Method in Laser Goniometry. Measurement Techniques. 2015, vol. 58, no. 9, pp. 970–974. doi: 10.1007/s11018-015-0827-7

Information about the authors

Boniface Nyamweru, Assistant Lecturer at the Department of Legal and Industrial Metrology, College of Business Education CBE. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: optical metrology systems.

Address: College of Business Education CBE, Bibi Titi Mohamed St., Dar es Salaam 1968, Tanzania

E-mail: bonifacenyamweru23@gmail.com

Elizaveta V. Shishalova, Graduate Student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: high precision angle measurements.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: lizabelaya.00@mail.ru
