

АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ НУЛЬ-ИНДИКАТОР: РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ГОНИОМЕТРИИ

© 2013 г. Р. А. Ларичев*, аспирант; Ю. В. Филатов*, доктор техн. наук

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

E-mail: kerrang87@mail.ru

В статье рассматриваются основные недостатки нуль-индикаторов, применяемых на данный момент в динамической гониометрии. Выдвинута гипотеза о влиянии отклонения отражающей грани от плоскости на результаты угловых измерений. Предложена модифицированная схема нуль-индикатора на базе автоколлиматора, в которой реализован дифференциальный метод измерения.

Ключевые слова: динамический гониометр, нуль-индикатор, призма, автоколлиматор.

Коды OSIC: 120.3930, 120.1680, 120.6650.

Поступила в редакцию 18.02.2013

Единица плоского угла чаще всего передается от эталонов к рабочим измерительным средствам с помощью образцовых угловых мер – многогранных призм. Вместе с многогранными призмами в угловых измерениях используются визуальные и фотоэлектрические автоколлиматоры, которые в сочетании с преобразователями угла формируют гониометрические измерительные системы (гониометры) [1]. Передача единицы угла может проводиться в статическом режиме, т.е. в момент сравнения показаний поверяемого и образцового средства их подвижные части неподвижны. Для такой процедуры вместе с многогранной призмой чаще всего используется автоколлиматор. Также существуют динамические методы передачи единицы плоского угла [2], когда подвижные части поверяемого и образцового средств вращаются с некоторой постоянной скоростью. В таком случае вместе с многогранной призмой используется нуль-индикатор. Нуль-индикатор – это оптическое устройство, задающее опорное направление в пространстве. В момент, когда отражающая грань во время вращения становится перпендикулярна данному направлению, на выходе нуль-индикатора создается электрический импульс, при возникновении которого происходит снятие показаний с преобразователя угла или поверяемого средства.

Одним из первых нуль-индикаторов, которые стали применять в динамической гониометрии, является устройство, построенное на базе автоколлиматора. В схему устройства перед осветителем вводится задающая щель определенной ширины, а перед фотоприемным устройством – анализирующая щель той же ширины. В момент, когда грань становится перпендикулярной оптической оси нуль-индикатора, изображение щели попадает на анализирующую щель. На выходе фотоприемного устройства возникает аналоговый сигнал, максимум которого соответствует моменту совпадения нормали к грани с оптической осью автоколлиматора. Выходной импульс формируется с использованием пороговой схемы по некоторому уровню аналогового сигнала. Уровень стараются выбрать таким образом, чтобы крутизна сигнала на нем была максимальной. Это уменьшает случайную погрешность измерений при некотором определенном уровне сигнал-шум.

Другим вариантом нуль-индикатора является интерференционный нуль-индикатор [3]. На рис. 1 представлена оптическая схема интерференционного нуль-индикатора, в котором используется бипризма Дове.

Форма выходного сигнала определяется широким пьедесталом и узким импульсом, соответствующим максимальной освещенности интерференционной картины на фотоприемни-

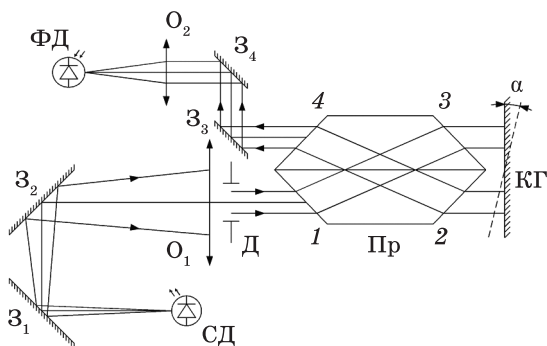


Рис. 1. Оптическая схема интерференционного нуля-индикатора. ФД – фотодиод, O_1 и O_2 – объективы, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 – зеркала, Пр – бипризма Дове (1–4 – грани призмы), КГ – контролируемая грань, Д – диафрагма, СД – светодиод.

ке. Максимум электрического импульса соответствует моменту совпадения оптической оси нуля-индикатора с нормалью к отражающей поверхности контролируемой грани. Необходимо отметить, что ширина узкого импульса в несколько раз меньше ширины аналогового сигнала, получаемого в автоколлимационном нуля-индикаторе. Данный факт дает интерференционному нуля-индикатору существенный выигрыш в точности.

С другой стороны, точность измерений с помощью интерференционного нуля-индикатора сильно зависит от искажений волновых фронтов отраженных световых пучков. Подобные искажения могут возникать в силу различных причин. Например, волновой фронт может искажаться при отражении световых пучков от неидеально плоской поверхности или при прохождении через среду с неоднородностями.

Зависимость погрешности интерференционного нуля-индикатора от формы отражающей поверхности была рассмотрена ранее [4]. В данной работе рассчитывалось смещение максимума интерференционного импульса от величины и формы отклонения отражающей поверхности от плоскости. При некоторых типах искажений отражающей поверхности смещение максимума интерференционного импульса может достигать 0,5".

Проблема влияния формы отражающей поверхности на угловые измерения на данный момент стоит довольно остро. В различных национальных метрологических лабораториях для передачи единицы плоского угла используются различные измерительные средства и методи-

ки. Результаты международных сличений, проводимых с использованием одной и той же многогранной призмы, показали, что различия в полученных результатах достигают значений 0,5". При этом каждая лаборатория заявляет точность своих измерений не хуже 0,1" [5]. Максимальные различия результатов наблюдались между лабораториями, использующими разные типы автоколлиматоров. В данном случае очевидно влияние отклонения отражающих граней призмы от плоскости на различные модели оптических измерительных приборов.

В работе [6] теоретически и экспериментально показано, как приборы, использующие различный принцип измерения (фазовый интерферометр и автоколлиматор), по-разному определяют угловое положение отражающей поверхности с незначительными отклонениями от плоскости. Аналитически угловое положение поверхности с отклонением от плоскости определяется через аппроксимацию поверхности плоскостью и, соответственно, определением углового положения этой аппроксимирующей плоскости. Отсюда можно сделать вывод, что при проведении измерения углового положения поверхности приборами различного типа используются разные способы нахождения аппроксимирующей плоскости к неплоской поверхности.

Представляется очевидным предположение, что автоколлиматор и интерференционный нуля-индикатор также по-разному определяют аппроксимирующую плоскость к исследуемой поверхности в силу разных принципов измерения. Таким образом, полагая, что не существует призм с идеально плоскими гранями, приходим к выводу, что результаты, полученные с помощью статического (с автоколлиматором) и динамического (с интерференционным нуля-индикатором) методов проверки многогранной призмы не могут в полной мере соответствовать друг другу. Если учесть, что на данный момент наиболее распространенным является статический метод с использованием автоколлиматора, то для приведения статического и динамического методов к единству резонно было бы использовать в динамическом методе нуля-индикатора на базе автоколлиматора.

Существует еще один недостаток применения интерференционного нуля-индикатора при угловых измерениях. Одной из задач, где применяется динамическая гониометрия, является рефрактометрия. С помощью динамического

гонометра-рефрактометра возможно измерение показателя преломления материала, из которого изготавливают специальные тестовые призмы. Для вычисления показателя преломления этого материала необходимо измерять углы между лучами, отраженными от внешних и внутренних поверхностей граней призмы. Луч, отраженный от внутренней поверхности грани призмы, дважды проходит через призму, преломляясь ее средой. При этом присутствует явление дисперсии. Лучи, проходя среду призмы, пространственно раскладываются на составляющие с различной частотой, и в результате интерференции вместо узкого интерференционного импульса получаем размытую картину. Этот процесс был детально рассмотрен в работе [7]. На работу нуля-индикатора, построенного на базе автоколлиматора, дисперсия не оказывает существенного влияния.

В связи с вышеперечисленными соображениями возникла идея создания автоколлимационного нуля-индикатора с дифференциальной схемой регистрации. Данный автоколлимационный нуля-индикатор может быть построен на базе визуального автоколлиматора. Для того чтобы прибор функционировал как нуля-индикатор, необходимо марку заменить на щель определенной ширины, а окуляр – на фотоприемное устройство. В качестве светочувствительного элемента предлагается использовать квадрантный фотодиод. Оптическая схема устройства представлена на рис 2.

При установке фотоприемника соблюдается условие, что оптическая ось устройства прохо-

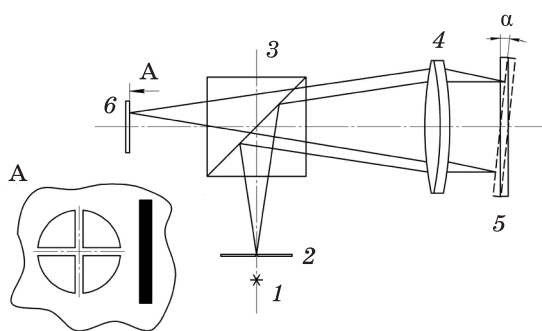


Рис. 2. Оптическая схема автоколлимационного нуля-индикатора. 1 – источник излучения, 2 – задающая щель, 3 – светоделительный кубик, 4 – объектив автоколлиматора, 5 – отражающая поверхность, 6 – квадрантный фотодиод. На выноске А показан вид фотодиода и изображения задающей щели со стороны отражающей поверхности.

дит через перекрестие зазоров между анодными площадками. Также во время юстировки взаимного положения призмы и нуля-индикатора должно выполняться условие, что зазор между правыми и левыми площадками фотодиода параллелен оси вращения отражающей поверхности (условимся обозначать площадки правыми и левыми относительно вертикального зазора, если смотреть со стороны отражающей поверхности).

Для регистрации момента, когда отражающая поверхность перпендикулярна оптической оси устройства, используются объединенные сигналы, поступающие с правой и левой пар чувствительных площадок фотодиода. На рис. 3 показан процесс формирования выходного импульса в процессе прохождения изображения задающей щели по светочувствительному элементу.

На рисунке представлен момент, когда изображение щели только появилось в фокальной плоскости объектива, т.е. угол между оптической осью устройства и нормалью к отражающей поверхности стал достаточно мал, чтобы основная часть испускаемого света после отражения попадала обратно в апертуру объектива. При дальнейшем повороте призмы изображение щели перемещается в фокальной плоскости (показано стрелкой). Когда изображение щели попадает на левые площадки, с них начинают поступать сигналы, которые затем суммируются. По мере поворота призмы суммарный сигнал с левых площадок увеличивается до того момента, когда изображение щели достиг-

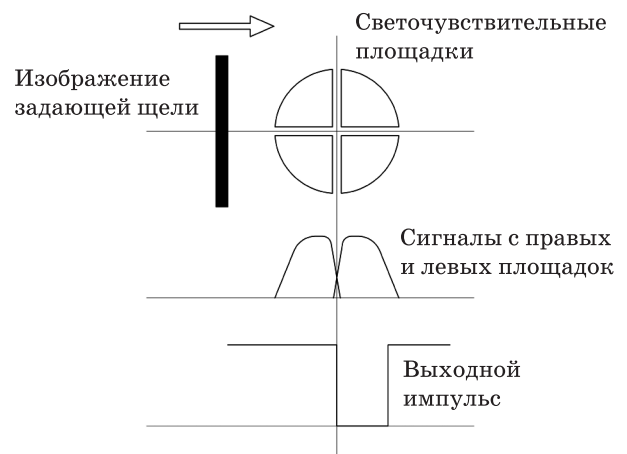


Рис. 3. Процесс формирования выходного импульса автоколлимационного нуля-индикатора.

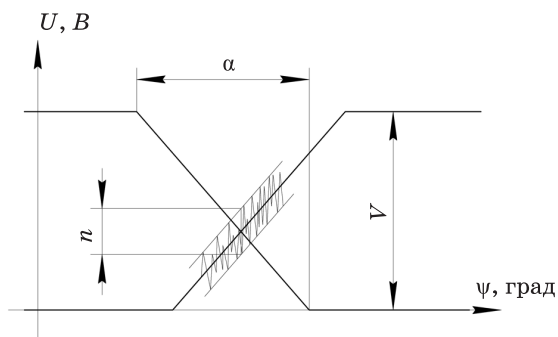


Рис. 4. Шумовая составляющая в сигналах автоколлимационного нуль-индикатора.

нет вертикального зазора между площадками. После этого сигнал с левых площадок начинает резко уменьшаться и, пока он не упал до нуля, появляется сигнал с пары правых площадок за счет того, что изображение щели шире зазора между площадками. В момент, когда центр изображения щели совпадает с центром вертикального зазора между площадками, сигналы с левой и правой пар площадок становятся равными. Если построить зависимость сигналов с левых и правых площадок от времени, то получим картину, симметричную относительно того момента, когда сигналы сравниваются (как показано на рисунке).

Так как перекрестие зазоров фотодиода находится на оптической оси устройства, тот момент, когда центр изображения щели совпадает с центром вертикального зазора и сигналы с правых и левых площадок становятся равны, считаем искомым. В этот момент отражающая поверхность становится нормальной к оптической оси устройства и на выходе нуль-индикатора формируется логический сигнал обратной полярности (переход от логической единицы к нулю).

Подобная схема регистрации обладает существенными преимуществами перед теми, что были реализованы в устройствах, рассмотренных выше. Во-первых, за счет того, что формирование выходного импульса происходит строго в момент, соответствующий перпендикулярности отражающей грани к оптической оси устройства, исключается влияние нестабильности скорости вращения призмы. Во-вторых, благодаря тому, что аналоговые сигналы, по чьему пересечению идет формирование, симметричны относительно момента формирования, исключается влияние нестабильности формы аналогового сигнала. Особое значение данные преимущества имеют для некоторых методов измерения показателя преломления, потому

как при вращении призмы лучи, отраженные от различных поверхностей, могут вращаться с различными угловыми скоростями.

Рассмотрим некоторые возможные погрешности предлагаемого устройства, которые могут влиять на погрешность измерений динамического гониометра. Случайная погрешность определения момента перпендикулярности отражающей поверхности к оптической оси устройства зависит от крутизны сигналов, поступающих со светочувствительных площадок, и уровня шума, присутствующего в данных сигналах (рис. 4).

Погрешность единичного измерения будет определяться следующим выражением:

$$\Delta\varphi = n \left(\frac{V}{\alpha} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где α – угол поворота отражающей поверхности, соответствующий падению сигнала от максимального уровня до нулевого; n – уровень шумовой составляющей сигнала; V – уровень сигнала, поступающего со светочувствительных площадок.

Угол α определяется шириной изображения задающей щели, следовательно, чем уже щель, тем меньше α . Получается, что для уменьшения случайной погрешности единичного измерения есть два пути. Первый заключается в увеличении отношения сигнал/шум, а второй – в уменьшении ширины щели. При этом необходимо соблюсти условие того, что ширина изображения задающей щели должна быть больше ширины зазора между светочувствительными площадками фотодиода. Необходимо отметить, что величина случайной погрешности единичного измерения для данного устройства не является критичной, так как динамический гониометр позволяет в автоматическом режиме проводить серии измерений за сравнительно короткие интервалы времени. Тогда случайная погрешность может быть уменьшена за счет статистической обработки полученных данных.

Рассмотрим возможные причины возникновения систематических погрешностей. Источники возникновения смещения точки пересечения сигналов фотоприемника могут относиться как к оптической схеме устройства, так и к его электронной части. Например, различия в чувствительности правых и левых площадок фотодиода приведут к разнице в уровнях сигналов, и тогда точка пересечения сместится в сторону сигнала с меньшим уровнем. Благодаря тому, что динамический гониометр измеряет углы

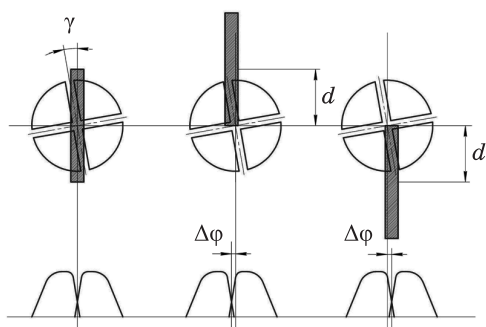


Рис. 5. Схема влияния поворота фотоприемника на угловые измерения.

между гранями многогранных призм, постоянные систематические смещения, не меняющиеся от грани к грани, можно не учитывать.

Рассмотрим далее факторы, которые вносят смещения, меняющиеся от грани к грани. На рис. 5 представлен случай, когда погрешность в установке фотоприемника и неточность юстировки исследуемой призмы приводят к систематической погрешности, меняющейся по гармоническому закону.

Неточность юстировки призмы может приводить к тому, что изображение задающей щели смещается относительно фотоприемника в вертикальном направлении, при этом для разных граней смещение будет разным. На рисунке представлены варианты, когда изображение не смещено, а также, когда оно смещено вверх и вниз на величину d . Фотоприемник развернут вокруг оси устройства на угол γ . Истинным моментом перпендикулярности отражающей грани к оси устройства является тот момент, когда центр изображения щели находится на одной вертикальной прямой с центром фотоприемника. В случаях, когда изображение щели смещено, получается, что в регистрации участвует либо верхняя, либо нижняя части изображения. Вкупе с разворотом фотоприемника это приводит к появлению погрешности $\Delta\phi$.

Как уже было отмечено, искомому моменту соответствует нахождение на одной вертикальной прямой центра фотоприемника и центра

изображения щели. Отсюда следует, что неравномерность освещения щели также может вносить систематическую погрешность в измерения.

Представленная концепция автоколлимационного нуля-индикатора была реализована в виде макета. Макет был построен на базе упрощенного автоколлиматора АКТ-15 с фокусным расстоянием 0,5 м, где вместо окуляра использовался фотоприемник с квадрантным фотодиодом QD7-5T производства фирмы Centronic (Великобритания). Площадь всех чувствительных площадок диода составляла 7 мм^2 , диаметр – 3 мм, зазор между чувствительными площадками – 0,2 мм. Перед осветителем была установлена регулируемая щель с ценой деления регулировочного микрометрического винта 5 мкм. Были проведены предварительные испытания вместе с динамическим гониометром и аттестованной призмой, в ходе которых было отмечено влияние вышеперечисленных факторов на точность измерений. Использовалась восьмигранная призма с гранями размером $53 \times 25 \text{ мм}$, объектив был установлен на расстоянии 10 см от грани. В качестве осветителя использовался светодиод с красной линией излучения. Несмотря на то что испытывался лишь макет, были получены довольно неплохие результаты. СКО случайной погрешности для 25 измерений составило $0,05''$, а суммарная систематическая погрешность – $0,15''$. Данные результаты были лучшими из серии измерений, проведенных при различной ширине задающей щели. В этом случае ширина щели составляла 315 мкм.

В заключение отметим, что в статье представлены существующие на данный момент варианты нуля-индикаторов, применяемых в динамической гониометрии. Отмечены присущие им недостатки. Предложена новая модификация нуля-индикатора на базе автоколлиматора с использованием дифференциальной схемы регистрации. Результаты предварительных испытаний макета подтверждают состоятельность предложенной схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Brucas D., Giniotis V.* Calibration of precision polygon/autocollimator measurement system. // J. Phys.: Conf. Ser. 238 (2010) 012014.
 2. *Бурнашев М.Н., Лукьянов Д.П., Павлов П.А., Филатов Ю.В.* Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 2. С. 141–146.
 3. *Кривцов Е.П., Павлов П.А., Юдин А.М.* О точности интерференционного нуль-индикатора // Применение лазеров. Л., 1984.
 4. *Филатов Ю.В.* Анализ работы интерференционного углового нуль-индикатора // ОМП. 1989. №4. С. 13–16.
 5. *Probst R., Wittekopf R.* Angle calibration on precision polygons. Final Report of EUROMET Project #371. РТВ-F-43 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany) 2001. 54 p.
 6. *Stone J.A., Amer M., Faust B., Zimmerman J.* Uncertainties in Small-Angle Measurement Systems Used to Calibrate Angle Artifacts // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2004. V. 109. P. 319–333.
 7. *Павлов П.А.* Разработка и исследование высокоточных лазерных гониометрических систем. Автореф. дис. докт. техн. наук. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 32 с.
-