

УДК 53.087.92 + 681.7.064.64

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КАЛИБРОВКА УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ШКАЛ С НЕРЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ

© А. Н. Бублик¹, А. В. Кирьянов^{2,3}, В. П. Кирьянов³,
А. Г. Каракоцкий³

¹АО «Производственное объединение

“Уральский оптико-механический завод”» им. Э. С. Яламова,
620100, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 33Б

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

E-mail: alexey@iae.nsk.su

Разработана и апробирована методика калибровки шкал с нерегулярной структурой, характерной для абсолютных угловых датчиков на основе псевдослучайных кодов. Экспериментально получены результаты калибровки на уровне $\pm 2,2''$ с неопределённостью $\pm 0,5''$, характерной для используемой измерительно-диагностической установки АЭ.1686. Достоверность результатов калибровки нерегулярных шкал подтверждается идентичностью полученных кривых при их сличении с кривой калибровки регулярной шкалы, сформированной на другом радиусе в едином технологическом цикле совместно с одной из контролируемых нерегулярных шкал.

Ключевые слова: шкалы с нерегулярной структурой, псевдослучайный код, считывающая головка, круговая измерительно-диагностическая установка.

DOI: 10.15372/AUT20240511

EDN: FCWSSF

Введение. С момента создания базовых геодезических приборов (теодолитов, тахеометров и др.) в них использовались измерительные шкалы визуального отсчёта. Эти шкалы имели, как правило, регулярный принцип деления угловых интервалов. Появившиеся в конце XX в. теодолиты и тахеометры с электронным отсчётом угловых координат изменили характер требований к измерительным системам геодезических приборов. Начиная с 2000-х гг., в геодезическом приборостроении сформировалась устойчивая тенденция использования измерительных шкал на основе псевдослучайных кодов, позволяющих с помощью одной измерительной дорожки реализовывать структуры абсолютных датчиков для обеих измерительных осей геодезических приборов. Эти шкалы имеют топологические элементы с переменными размерами и классифицируются уже как измерительные шкалы с нерегулярной структурой. Однако в промышленности в настоящее время отсутствуют надёжные алгоритмы контроля точности подобных структур.

Цель данной работы — разработка методики и представление экспериментальных результатов по автоматизированной калибровке измерительных шкал с нерегулярной топологией, а также создание программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) для решения данной задачи.

Принципы построения фотоэлектрических датчиков (ФД) абсолютного типа. В современных углоизмерительных приборах (гониометрах, поворотных столах и т. д.), а также геодезическом оборудовании (теодолитах, тахеометрах и т. д.) для из-



Рис. 1

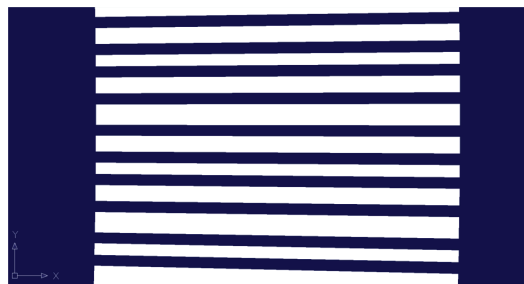


Рис. 2

Рис. 1. Изображение фрагмента топологии измерительной шкалы с псевдослучайным кодом тахеометра 5Та5

Рис. 2. Изображение фрагмента топологии измерительной шкалы с псевдослучайным кодом тахеометра 6Та3

мерения угла поворота применяются фотоэлектрические датчики инкрементного и абсолютного типов с использованием оптических шкал. При этом абсолютные датчики имеют ряд существенных преимуществ перед инкрементными в связи с тем, что в них не накапливаются ошибки определения положения угла поворота. Однако ФД абсолютного типа, в которых считывание информации происходит одновременно с нескольких информационных дорожек (поперечный метод считывания), получили ограниченное распространение. Связано это с существенным усложнением реализации процесса считывания информации при увеличенной разрядности выходного кода. Так, например, для того, чтобы иметь всего 4096 угловых положений на оборот, необходим 12-разрядный код ($N = 2^{12} = 4096$). Соответственно, оптическая шкала такого ФД должна иметь 12 измерительных дорожек (треков).

В последние 15–20 лет появились модели ФД абсолютного типа на основе псевдослучайных бинарных последовательностей (pseudorandom binary sequence — PRBS) [1]. Фотоэлектрические датчики абсолютного типа, построенные с применением PRBS-последовательности, имеют только одну измерительную дорожку, содержащую двоичную последовательность, элементы которой кодируются одним символом на шаг пространственного квантования. Такие датчики использовались в составе геодезических приборов ведущих фирм-производителей: Sokkia (Япония), Trimble (США), Leica (Швейцария), Nicon (Япония), Topcon (Япония).

В 2010 г. угловой датчик на основе псевдослучайных кодов был разработан для электронного тахеометра 5Та5 производства АО «ПО «УОМЗ»» (акционерное общество «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод»» им. Э. С. Яламова, г. Екатеринбург) [2]. Принцип формирования топологии оптической шкалы заключается в использовании двух типов штрихов: одинарной и двойной ширины (рис. 1). Данная структура обеспечивает непосредственное определение 3600 позиций с шагом угловой дискретизации, равным $0,1^\circ = 360''$.

В 2016 г. АО «ПО «УОМЗ»» выпустил новую модель электронного тахеометра под шифром 6Та3 [3]. В нём использован угловой датчик, в котором была применена иная кодировка пространственного положения штрихов измерительной шкалы (рис. 2).

В отличие от тахеометра 5Та5, использующего штрихи как одинарной, так и двойной ширины, в новом тахеометре предложено иное кодирование логических «1» и «0» на лимбе, биты которых сформированы штрихами одинаковой ширины и переменными промежутками между ними. Предусмотрено, что их расположение симметрично относительно центра бит. В целом измерительная шкала такого тахеометра имеет кодовую дорожку, обеспечи-

вающую дешифровку 1600 бит, которые сформированы по окружности диаметром, равным 77 мм.

Методика контроля топологии углоизмерительных шкал. Измерительные шкалы электронных тахеометров, так же как и измерительные лимбы тахеометров с визуальным отсчётом (т. е. предназначенные для непосредственного считывания оператором показаний прибора), требуют проведения оперативного контроля точности изготовления топологии углоизмерительных структур. Методики контроля топологии измерительных шкал во многом зависят от выбора средств, применяемых для выполнения подобных операций. В свою очередь, выбор таких средств определяется категорией процедуры измерения: ручной или автоматизированной [4–6]. Для измерительных шкал с числом штрихов более чем 10^3 необходимы автоматизированные методы контроля. Например, целесообразно использовать динамический метод контроля, когда контролируемая углоизмерительная шкала устанавливается соосно с референтной шкалой на общем роторе, с помощью которого они приводятся в режим синхронного вращения. Если контролируемая и образцовая структуры имеют одинаковое число элементов топологии, то разброс их пространственного положения относительно друг друга может выступать мерой неточности формирования топологии контролируемой структуры (растра, шкалы, лимба кодового диска и т. д.). При этом количественные показатели разброса получают путём заполнения временных интервалов, сформированных метками, выделенными в ходе регистрации контролируемых признаков структур (например, передних или задних краёв штрихов). Для этого обе шкалы оснащены считывающими головками, которые регистрируют моменты прохождения перед ними границ характерных элементов топологии.

Типичным примером реализации динамического метода контроля точности формирования топологии углоизмерительных шкал является методика контроля с помощью измерительной машины модели АС-700, изготовленной на АО «ПО «УОМЗ»» [7]. Главная отличительная особенность этой установки — реализация процедуры формирования виртуальных шкал, идентичных контролируемому, которая выполняется с помощью электронного синтезатора на базе системы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), подключаемой к референтному угловому датчику установки, и управляемого делителя частоты следования импульсов. Наличие в составе ФАПЧ управляемого делителя позволяет получить поток событий, характеризующих собой моменты прохождения краёв штрихов виртуальной шкалы, число штрихов в которой точно равно числу штрихов в контролируемом объекте. При этом их пространственное положение адекватно по точности расположения штрихов референтного углового датчика, в которых число штрихов чаще всего не совпадает с числом штрихов в контролируемом объекте.

В контроллере измерительной установки АС-700 из упомянутых импульсных потоков формируются новые импульсные потоки $\Delta\Phi 1$ и $\Delta\Phi 2$, в которых информативным параметром является разность абсолютных моментов их появления, а не их абсолютный момент. Данный параметр характеризует, соответственно, разброс положений краёв штрихов контролируемого объекта относительно соответствующих краёв шкалы, взятой в качестве эталона. Количественные оценки разброса положений краёв штрихов контролируемого объекта относительно соответствующих краёв шкалы, взятой в качестве эталона, получают с помощью измерения длительности интервалов $\Delta\Phi i$, например путём заполнения их импульсами. Такая система регистрации позволяет формировать в пределах каждого оборота ротора виртуальную шкалу с числом штрихов, равным числу штрихов контролируемой шкалы, точность пространственного расположения которых определяется точностью используемого референтного датчика АС-700. Однако конструкция синтезатора виртуальных шкал на основе системы с ФАПЧ не подходит для контроля шкал с нерегулярным характером их формирования и требуется кардинальная модернизация конструкции установки АС-700.



Рис. 3. Круговая измерительно-диагностическая установка модели АЭ.1686

Для устранения этого ограничения разработаны методика автоматизированной калибровки углоизмерительных шкал с нерегулярной топологией и ПАО на основе применения круговой измерительно-диагностической установки (КИДУ) модели АЭ.1686 [8, 9], созданной в Институте автоматики и электрометрии СО РАН (рис. 3).

Её основное отличие состоит в том, что процессор, используемый для управления КИДУ, формирует набор данных для определения координат характерных элементов топологии, а не их разности. Эти координаты применяются для программной эмуляции функций автоматической подстройки фазы и измерения различий в нерегулярных последовательностях: контролируемой и виртуальной.

Экспериментальные результаты автоматизированной калибровки углоизмерительных шкал с нерегулярной структурой. Экспериментальные исследования проводились с двумя экземплярами шкал, топология которых соответствует структуре, представленной на рис. 2 (имевшими в измерениях оперативные номера 89 и 92). Регистрировались и обрабатывались результаты измерений, соответствующие моментам прохождения передних и задних краёв штрихов. На рис. 4, *a* представлены графики калибровки шкалы № 89 по передним краёв штрихов (кривая синего цвета) и по задним (кривая красного цвета), а на рис. 4, *b* — аналогичные графики калибровки шкалы № 92.

В обоих случаях накопленная погрешность шкал (в зарубежной технической литературе обозначается как погрешность δ_{p-p} , т. е. от пика до пика) лежит в пределах $\pm 2,2''$ в диапазоне от 0 до 360° .

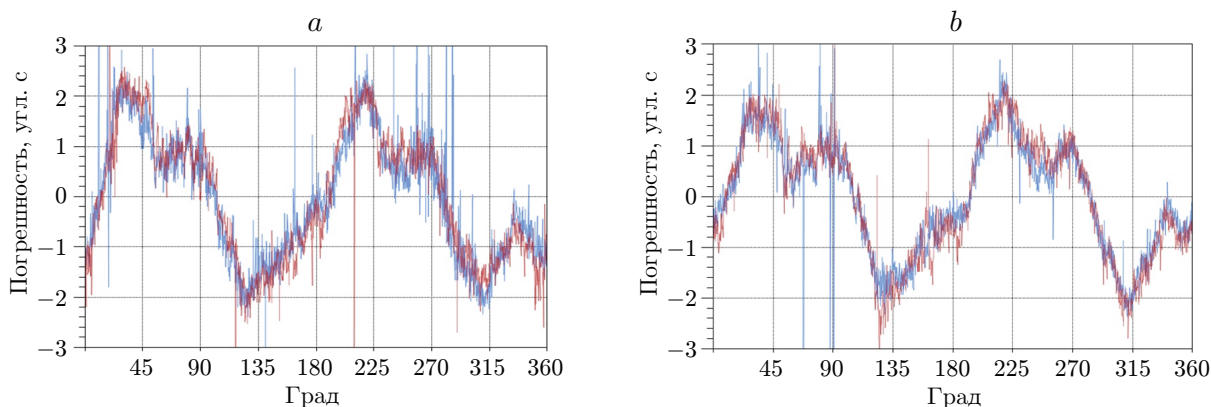


Рис. 4. Кривые калибровки шкал с нерегулярными структурами: *a* — шкала № 89, *b* — шкала № 92

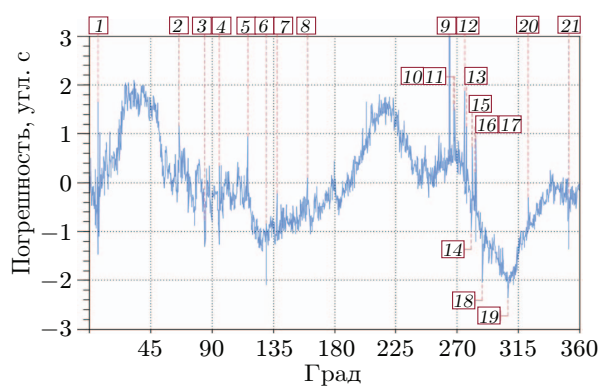
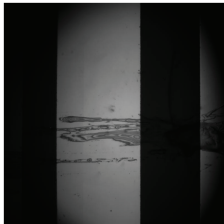
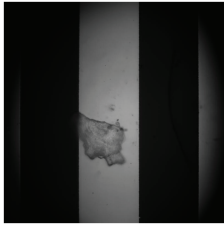
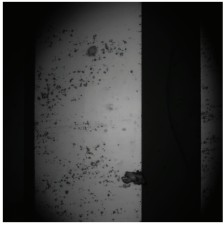
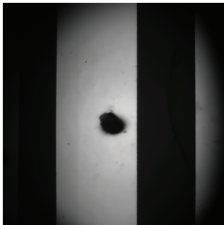


Рис. 5. Погрешность оптического кодового лимба № 89 с выделенными оператором участками диагностики (в квадратах указаны номера дефектов из таблицы)

Таблица

Дефекты оптической шкалы

Номер выделенного участка	Координата дефекта	Фотография
1	$R = 39,2 \text{ мм}$ $\varphi = 6,23^\circ$	
9	$R = 39,2 \text{ мм}$ $\varphi = 264,5^\circ$	
13	$R = 39,2 \text{ мм}$ $\varphi = 276,91^\circ$	
16	$R = 39,2 \text{ мм}$ $\varphi = 283,85^\circ$	

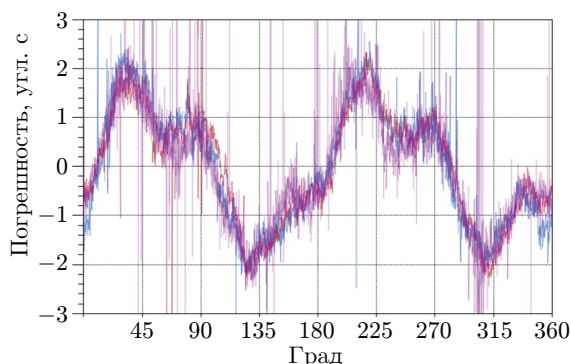


Рис. 6. Сличение результатов калибровки трёх структур. Синим цветом обозначена шкала с нерегулярной топологией № 89, красным цветом — шкала с нерегулярной топологией № 92, розовым цветом — регулярный растр на фотошаблоне № 92

Разработанное ПАО позволяет оператору в ручном режиме с помощью курсора брать на полученном графике измерений для визуального исследования любой интересующий его участок (например, какой-либо штрих). Прецизионный поворотный стол КИДУ автоматически выведет считывающую головку на выбранный участок объекта и отобразит его на технологическом мониторе. Оператор может наблюдать особенности топологии штриха в окрестностях выбранного ранее радиуса измерений. При необходимости имеется возможность просканировать с помощью прецизионной каретки линейных перемещений выбранный штрих вдоль радиуса в любом направлении. Подобный результат измерений показан на рис. 5.

Некоторые результаты диагностирования дефектов исследуемой оптической шкалы № 89 с нерегулярной топологией и участками, выделенными оператором, приведены в таблице.

Особый интерес представляет доказательство достоверности полученных результатов калибровки структур с нерегулярной топологией. Данный результат достигался следующим образом. На фотошаблоне с оперативным номером 92 наряду с контролируемой структурой псевдослучайного кода была записана технологическая дорожка (трек) с регулярной структурой традиционного измерительного растра. Поскольку обе измерительные дорожки изготовлены на фотошаблоне на одном оборудовании в едином технологическом цикле только на разных радиусах, калибровка этих принципиально разных (с метрологических позиций) структур с помощью одной и той же измерительной установки должна дать одинаковый результат как для регулярной, так и нерегулярной структур.

На рис. 6 представлен результат сличения кривых калибровки шкал № 89 (кривая синего цвета) и № 92 (кривая красного цвета) с результатом калибровки регулярной шкалы (кривая розового цвета), сформированной на фотошаблоне шкалы № 92.

Нетрудно убедиться в том, что результаты контроля всех трёх структур лежат в пределах $\pm 2,2''$ в диапазоне от 0 до 360° .

Заключение. В ходе выполнения исследования разработана методика автоматизированной калибровки измерительных шкал с нерегулярной топологией и создано программно-алгоритмическое обеспечение для решения данной задачи. Получены результаты калибровки нерегулярных структур, изготовленных АО «ПО «УОМЗ»», на уровне $\pm 2,2''$ с неопределённостью $\pm 0,5''$, характерной для используемой измерительно-диагностической установки модели АЭ.1686. Апробированная в экспериментах методика калибровки нерегулярных шкал, характерных для ФД абсолютного типа на основе псев-

дослучайных кодов, не требует значительного времени для её выполнения и может быть рекомендована для применения в условиях серийного производства с целью реализации оперативного контроля подобных шкал на 100 %.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по государственному заданию № 124041700067-6 в ИАиЭ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Petriu E. M.** Absolute position measurement using pseudo-random binary encoding // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 1998. 1, Iss. 3. P. 19–23.
2. **Тарков В. А.** Особенности построения позиционных датчиков угла современных геодезических приборов // Оптический журнал. 2011. 78, № 5. С. 70–76.
3. **Тарков В. А.** Экономичный высокоточный датчик абсолютного углового положения // Сб. матер. XII Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016». Новосибирск, Россия, 18–22 апр., 2016. Т. 2. С. 88–92.
4. **Петров В. В., Митрофанов С. С.** Методы и средства аттестации оптических лимбов и кодовых дисков // Оптико-механическая промышленность. 1982. № 3. С. 52–58.
5. **Mukai N., Kono T., Suzuki A. et al.** High accuracy scale disk for rotary encoder // Proc. of the 1st Int. Conf. on Positioning Technology. Hamamatsu, Japan, 9–11 June, 2004. P. 312–316.
6. **Šiaudinyte L., Juška V., Dumbrava V. et al.** Measurement and determination of encoder disc surface parameters in x-z planes using a conventional optical disc reading head // Measurement: Journ. the Int. Measurement Confederation. 2020. 152. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107299.
7. **Абрамов Ю. Ф., Кирьянов В. П., Кирьянов А. В. и др.** Модернизация оптического делительного производства уральского оптико-механического завода на основе современных лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий // Оптический журнал. 2006. 73, № 8. С. 61–65.
8. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Чуканов В. В.** Использование дифференциального метода измерений для контроля точности прецизионных углоизмерительных структур // Автоматрия. 2016. 52, № 4. С. 45–52. DOI: 10.15372/AUT20160406.
9. **Кирьянов А. В., Зотов А. А., Каракоцкий А. Г. и др.** Оперативный контроль оптических прецизионных углоизмерительных структур // Оптический журнал. 2019. 86, № 9. С. 60–62.

Поступила в редакцию 28.02.2024

После доработки 10.06.2024

Принята к публикации 24.07.2024