

Исследования динамических гониометров с оптическим датчиком угла

Е. М. ИВАЩЕНКО, П. А. ПАВЛОВ

С.-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
С.-Петербург, Россия, e-mail: pavl-petr@yandex.ru

Приведена структурная схема и описана калибровка динамических гониометров, предназначенных для определения параметров цифровых преобразователей угла. Показано, что устранение нестационарности случайной погрешности при помощи фильтрации верхних частот позволяет определить поправки к результатам измерений и снизить в полтора раза суммарную погрешность динамических гониометров, построенных с использованием шарикового подшипника.

Ключевые слова: динамический гониометр, оптический датчик угла, цифровой преобразователь угла.

The block diagram and the calibration of dynamic goniometers intended for absolute rotary encoders determination are described. The elimination of random error instability by means of treble filtration allows to determine the measuring result corrections and to reduce by half the total error of dynamic ball bearing goniometers.

Key words: dynamic goniometer, optical angle encoder, absolute rotary encoder.

Цифровые преобразователи угла (ЦПУ) предназначены для определения параметров вращательного движения механизмов и систем [1]. Согласно исследованиям [2] производство и использование ЦПУ в мире с каждым годом увеличивается на 5 %. В настоящее время существуют ЦПУ с погрешностью порядка долей угловой секунды и разрядностью в диапазоне 8—26. Задача контроля метрологических характеристик ЦПУ в широком динамическом диапазоне, соответствующем режимам их эксплуатации, решается при помощи гониометров, работающих в динамическом режиме, т. е. динамических гониометров (ДГ).

На рис. 1 представлена структурная схема такого гониометра, которая отражает не только его работу при контроле ЦПУ, но и различия в составе на стадиях выходного контроля и калибровки. Образцовый оптический датчик угла ОДУ и ЦПУ жестко закреплены на шпинделе Ш, вращающемся в подшипниках. Привод, состоящий из двигателя Д и системы управления СУД, вращает шпиндель Ш с заданной скоростью. Съем данных с ОДУ проводится через угловые интервалы, задаваемые ЦПУ. Выходные сигналы ОДУ и ЦПУ проходят через соответствующие преобразователи и направляются в блок электроники БЭ, осуществляющий предварительную обработку данных и передачу их в персональный компьютер ПК.

На стадии выходного контроля определяют систематическую и случайную погрешности ДГ. В дальнейшем систематическая погрешность ОДУ учитывается в виде поправок к результатам измерений. Выходной контроль осуществляют при помощи кольцевого лазера КЛ, данные с которого снимают через равные угловые интервалы, задаваемые ОДУ.

Часть системы II, включающая многогранную призму МП, нуль-индикатор НИ и юстировочный столик ЮС, предназначена для калибровки гониометра. Согласно поверочной схеме [3] погрешности гониометров определяют при помощи многогранных призм 0-го и 1-го классов по [4], аттестованных в качестве эталонов 1-го и 2-го разрядов. Особенностью калибровки является необходимость фиксации положения

МП в динамике, для чего разработаны специальные устройства — нуль-индикаторы НИ. В этом случае съем данных с ОДУ проводят по сигналам НИ, вырабатывающего импульсы в моменты времени, когда очередная нормаль к грани МП параллельна оптической оси НИ.

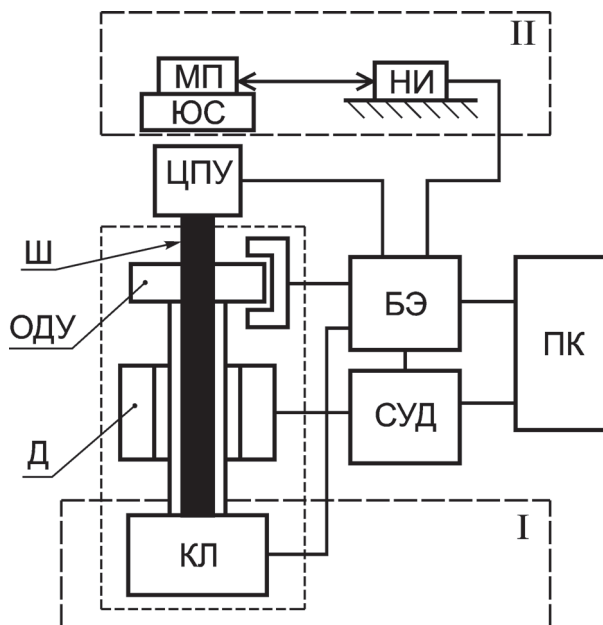


Рис. 1. Структурная схема динамических гониометров:

МП — многогранная призма; ЮС — юстировочный столик; НИ — нуль-индикатор; ЦПУ — контролируемый цифровой преобразователь угла; Ш — шпиндель; ОДУ — образцовый оптический датчик угла; БЭ — блок электроники; ПК — персональный компьютер; СУД — система управления двигателем; Д — двигатель; КЛ — кольцевой лазер; I — элементы, используемые на стадии выходного контроля; II — элементы, используемые при калибровке

В работе исследованы ДГ различной точности на стадии выходного контроля с использованием методов, предложенных в [5, 6]. Состав исследуемых гониометров приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав исследуемых динамических гониометров

Тип	Разновидности составных частей	
	образцового преобразователя угла	подшипника
ДГ1	ОДУ А-205 (две независимых головки)	Радиально-упорный шариковый, класс точности 4
ДГ2	ОДУ Renishaw Rexm (три независимых головки)	То же
ДГ3	ОДУ А-205 (две независимых головки)	Аэростатический

Исследование ДГ на стадии выходного контроля. Погрешность ДГ на стадии выходного контроля, в основном, определяется погрешностями ОДУ и КЛ. Использование метода компенсации обобщенного сдвига нуля [7] и реверсивного метода [6] позволяет устранить систематическую погрешность КЛ и тем самым найти систематическую погрешность ОДУ.

Случайную погрешность определяем согласно методу исследования случайной погрешности динамических гониометров (ДГСП-метод) [5]. Для этого находим полусумму результатов измерений с двух диаметрально расположенных головок ОДУ:

$$\varphi_{im} = (\varphi_{1im} + \varphi_{2im})/2,$$

где φ_{1im} , φ_{2im} — результаты измерений, полученные с первой и второй головок ОДУ, соответственно; i — номер измерения внутри оборота; m — номер оборота.

Затем формируем массив случайных величин:

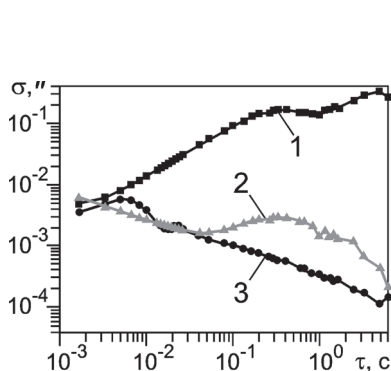


Рис. 2. Вариации Аллана для случайной погрешности:

1 — ДГ1 с шариковым подшипником; 2 — ДГ1 с шариковым подшипником при использовании фильтрации; 3 — ДГ3 с воздушным подшипником; τ — интервал усреднения

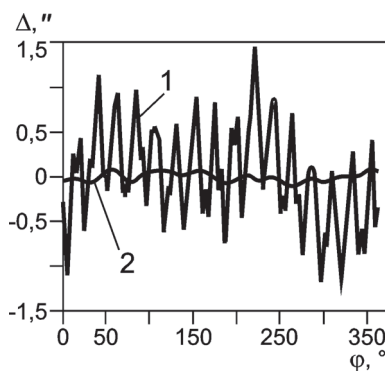


Рис. 3. Систематическая погрешность ОДУ Renishaw Rexm в составе ДГ2 после проведения фильтрации (1) и повторяемость систематической погрешности (2)

$$\delta\varphi_k = \varphi_{im} - \bar{\varphi}_i; \bar{\varphi}_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \varphi_{im},$$

где $k = N(m-1) + i$; N — количество отсчетов на обороте; M — количество оборотов шпинделя за одно измерение.

Далее методами математической статистики [8] анализируем массивы случайных величин, характеризующих случайную погрешность.

Исследование случайной погрешности гониометра ДГ1 с шариковым подшипником показало, что массивы случайных величин не являются стационарными. Для выяснения возможных причин появления нестационарности случайная погрешность проанализирована при помощи вариации Аллана [9], которая позволила выделить ее составляющие.

Характер вариации Аллана случайной погрешности ДГ1 (см. рис. 2, кривая 1) указывает на присутствие случайного дрейфа, вызванного длиннопериодическими (с периодом более периода вращения шпинделя) случайными процессами. Согласно [5, 10, 11] таким процессом может быть коллективное перемещение шариков в подшипнике на частоте, близкой к половинной частоте вращения шпинделя. Для устранения его влияния проведена фильтрация верхних частот. Частота среза выбрана из условия, что полезный сигнал ОДУ сосредоточен на первой и выше гармониках частоты вращения. Кривая 2 на рис. 2 изображает вариацию Аллана случайной погрешности ДГ1 после фильтрации; ее характер указывает на отсутствие случайного дрейфа. Оценка характеристик случайной погрешности показывает, что случайный процесс стал стационарным, а закон распределения соответствует закону распределения Релея с масштабом 0,26, которому подчиняются погрешности геометрической формы [12]; среднее квадратичное отклонение (СКО) составило 0,06".

Результаты исследования гониометра ДГ2 также указывают на нестационарность массивов случайных величин, которая устраняется фильтрацией верхних частот.

Исследование гониометра ДГ3, построенного с использованием аэростатической опоры, выявило, что массивы случайной погрешности являются стационарными, закон распределения соответствует нормальному, СКО равно 0,03". Вариация Аллана, характерная для случайной погрешности ДГ3, изображена кривой 3 на рис. 2. Ее наклон с коэффици-

ентом, равным $-0,5$, указывает на преобладание белого шума в случайной погрешности измерения. В этом случае можно говорить о том, что погрешность ДГ, в основном, определяется погрешностью образцового ОДУ, а характер вращения не оказывает на нее существенного влияния.

Для определения систематической погрешности ОДУ в состав схемы исследуемых ДГ вводится кольцевой лазер КЛ. Съем данных с него осуществляется через равные угловые интервалы, задаваемые ОДУ, при вращении по и против часовой стрелки. Реверсивным методом получена его систематическая погрешность в составе гониометра ДГ3, вид ее соответствует представленному в [13] виду систематической погрешности ОДУ А-205 и характеризуется отсутствием высокочастотных составляющих, основная погрешность сосредоточена на второй гармонике, амплитуда которой не превышает 0,2".

Систематическая погрешность ОДУ Renishaw Rexm в составе ДГ2 после проведения фильтрации

исходных данных представлена на рис. 3 (кривая 1). Она не превышает 1,5" и, в основном, сосредоточена на 16 гармонике. Ее повторяемость находится в пределах 0,3".

Полученные значения для случайной погрешности и повторяемости систематической позволяют оценить суммарное СКО ДГ [14]. Так, для ДГ2 СКО равно 0,2". Систематическая погрешность ОДУ в составе ДГ1 не выявлена ввиду преобладающей случайной.

Калибровка ДГ. При калибровке измеряются углы аттестованной восьмигранной призмы (ПМ8). Измерения проведены для нескольких значений угловых скоростей, охватывающих динамический диапазон гониометра.

Систематическая погрешность определена как отличие измеренных значений углов МП от их действительных, приведенных в паспорте призмы. Также при калибровке гониометров находится массив случайных погрешностей, который проверяется на стационарность и присутствие периодических составляющих, а также идентифицируется закон распределения.

В процессе калибровки на различных скоростях вращения шпинделя определено, что характер погрешностей ДГ не изменяется. При нахождении систематической погрешности ДГ2 учтена систематическая погрешность ОДУ в его составе, полученная на стадии выходного контроля. Результат калибровки: максимальное значение систематической погрешности ДГ2 составила 0,2", СКО случайной погрешности равно 0,06", а ее закон распределения соответствует распределению Релея.

В табл. 2 приведены оценки суммарного СКО измерений ДГ при их калибровке.

Таблица 2
Оценка суммарного СКО измерений

Условия определения СКО	Суммарное СКО для разных типов ДГ	
	ДГ1	ДГ2
Без фильтрации и учета систематической погрешности ОДУ	0,3	1,1
С фильтрацией и без учета систематической погрешности ОДУ	0,2	0,8
С учетом систематической погрешности ОДУ и без фильтрации	—	0,3
С фильтрацией и учетом систематической погрешности ОДУ	—	0,2

Суммарное СКО измерений определяли по формуле [14]:

$$\delta = \sqrt{(\sigma_{\max}^m)^2 + \left[(\Delta_{\max}^m)^2 + (\delta_n)^2 \right] / 3},$$

где δ_n — погрешность калибровки призмы ПМ8; $\Delta_{\max}^m$ — максимальное отличие измеренных отклонений от их действительных значений; $\sigma_{\max}^m$ — максимальное СКО случайной погрешности измерений.

Из представленных в табл. 2 данных следует, что применение фильтрации верхних частот уменьшает суммарную

погрешность ДГ1 и ДГ2 с 0,3" до 0,2". Следует отметить, что динамические гониометры ДГ2 с ОДУ Renishaw Rexm, имеющие значительную систематическую погрешность, и ДГ-1 с ОДУ А-205, использующие шариковые подшипники, в итоге обладают равными точностными характеристиками.

Выводы. Использование ДГСП-метода при исследовании динамических гониометров с шарикоподшипниками позволило выявить нестационарность массивов случайной погрешности.

Применение высокочастотной фильтрации входных данных с частотой среза, определяемой частотой вращения шпинделя динамического гониометра, позволило устранить нестационарность, определить систематическую и снизить случайную погрешности гониометров.

Л и т е р а т у р а

1. Домрачев В. Г., Мейко Б. С. Цифровые преобразователи угла. Принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Taylor J. K. Market prospects for position sensors [Электрон. ресурс]. <http://www.sensorsmag.com/sensors/position-presence-proximity/market-prospects-position-sensors-1445> (дата обращения 10.09.2013 г.).
3. ГОСТ 8.266—77. Гониометры. Методы и средства поверки.
4. ГОСТ 2875—88. Меры плоского угла призматические. Общие технические условия.
5. Баринаева Е. А. и др. Метод и результаты исследования случайной погрешности оптического датчика угла // Метрология. 2011. № 7. С. 17—25.
6. Иващенко Е. М., Павлов П. А. Метод устранения влияния магнитного поля в лазерном гониометре // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 18—22; Ivashchenko E. M., Pavlov P. A. A method of eliminating the influence of magnetic field in a dynamic laser goniometer linear and angular measurements // Measurement Techniques. 2013. V. 55. N. 10. P. 1141—1147.
7. Павлов П. А. Анализ алгоритмов измерений лазерным динамическим гониометром // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 17—20; Pavlov P. A. Laser dynamic goniometer measurement algorithms. 2008. V. 51. N. 1. P. 22—27.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989.
9. Allan D. W., Shoaf J. H., Halford D. Statistics of time and frequency data analysis // Res. NBS. 1974. N. 140. P. 151—204.
10. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение, 2001.
11. Биргер А. И. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978.
12. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006.
13. Баринаева Е. А., Иващенко Е. М., Павлов П. А. Результаты исследования погрешности гониометрической системы // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 5. С. 98—103.
14. ГОСТ 8.207—76. Прямые измерения с многократными наблюдениями.

Дата принятия 01.11.2013 г.