

ОПТИЧЕСКИЙ ЦИФРОВОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ

© 2013 г. А. Н. Королев*, доктор техн. наук; А. Я. Лукин**, канд. физ.-мат. наук;
Г. С. Полищук***, канд. техн. наук; В. П. Трегуб***, канд. техн. наук

* ООО «Оптротех», Санкт-Петербург

** СПбГПУ, Санкт-Петербург

*** ОАО «ЛОМО», Санкт-Петербург

E-mail: a.korolev@optrotech.ru

Описан оптический цифровой автоматизированный измеритель отклонений от прямолинейности, основанный на известном принципе визирования на оптическую марку. Использование в качестве фотоприемного устройства цифровой телевизионной камеры и соответствующего программного обеспечения позволило полностью автоматизировать все измерительные операции и значительно повысить точность измерений.

Ключевые слова: измерение отклонений от прямолинейности, измерение отклонений от соосности, оптическая марка, светочувствительная матрица, цифровая обработка изображений, погрешность измерения.

Коды OSIC: 100.2000, 120.3930, 120.6650.

Поступила в редакцию 09.12.2012.

Измерение отклонений от прямолинейности, плоскостности и соосности является важным инструментом технологии крупного и среднего машиностроения, авиастроения, судостроения и широко используется для контроля плит, направляющих станков, рам крупногабаритных двигателей, прокатных станов, прессов, турбин, а также для проверки прямолинейности движения частей станков и других механизмов в процессе их перемещения.

Известна система контроля соосности, реализованная по авторефлексионной схеме [1]. Указано, что предел допускаемого среднеквадратического отклонения (СКО) случайной составляющей основной погрешности не превышает 0,05 мм на дистанции до 10 м.

Известен также лазерный измеритель непрямолинейности [2], использующий аксикон для формирования удобной для измерений кольцевой структуры лазерного пучка. При этом измерения координат проводятся по центральному пятну кольцевой структуры, диаметр которого в несколько раз меньше диаметра исходного лазерного пучка. Погрешность измерений определяется точностью измерения координат малого

центрального пятна на фоне спекл-шумов, и составляет $\pm (0,004 + 3 \times 10^{-3} L)$, где L – дистанция в метрах.

Известен прибор под названием “Труба измерительная визирная ППС–11” [3, 4], предназначенный для измерения отклонений от прямолинейности для линейно протяженных объектов, отклонения от соосности для отверстий и труб, а также для оценки непараллельности, перпендикулярности и негоризонтальности поверхностей различных изделий. Прибор выпускался на ОАО “ЛОМО” и до сих пор широко используется для точных измерений отклонений от прямолинейности на предприятиях тяжелого машиностроения, станкостроения, судостроения и в других производствах.

Приборы такого типа выпускаются также за рубежом, где получили название “Alignment Telescope”. Наиболее известными являются приборы фирмы Taylor Hobson Ltd. (Великобритания) [5].

В визирной трубе изображение оптической марки, которая может находиться на различных (до 30 м) расстояниях от торца трубы, проецируется объективом и фокусирующей линзой

в плоскость сетки. Фокусирующая линза перемещается по точной направляющей, которая обеспечивает сохранение положения визирной линии (оптической оси системы “объектив-фокусирующая линза”) при любых продольных перемещениях фокусирующей линзы. Смещение изображения марки относительно визирной линии измеряется оптическим микрометром, состоящим из наклонной плоскопараллельной пластинки и отсчетных барабанов, связанных с поворотом пластинки вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Контроль совмещения проводится оператором при наблюдении изображения в окуляр.

При измерениях оператор должен сфокусировать трубу на марку, перемещая фокусирующую линзу с помощью рукоятки фокусировки. Затем измеряется смещение изображения марки относительно визирной линии путем поворота плоскопараллельной пластинки вокруг горизонтальной и вертикальной осей и совмещения центра изображения марки с центром перекрестия сетки. При этом количество измерений зависит от расстояния до марки и при расстояниях более 10 м должно быть не менее 10.

Основным недостатком данных приборов являются невысокая точность и низкая производительность измерений, связанная с большим объемом операций, выполняемых вручную.

Авторами разработан цифровой измеритель отклонений от прямолинейности ОПТРО–

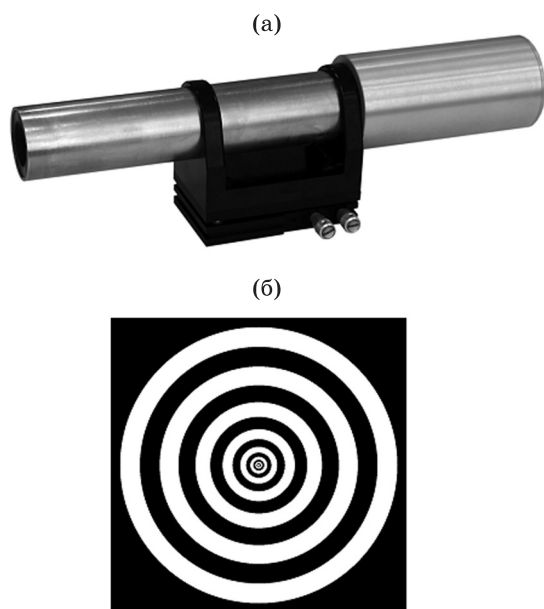


Рис. 1. Общий вид визирной трубы прибора ОПТРО–ППС–031 (а) и форма марки (б).

ППС–031 [6], основанный на визировании измерительной марки. В этом приборе в качестве фотоприемного устройства использована цифровая телевизионная (ТВ) камера. Обработка массива видеоданных, а также управление всеми измерительными процедурами выполняются с помощью соответствующего программного обеспечения.

В описанном приборе в качестве приемного устройства использована цифровая ТВ камера BR–1340LM–UF [7] с КМОП-матрицей размером 5,7×6,3 мм (1280×1024 пикс, пиксел 5,2×5,2 мкм).

На рис. 1 показаны общий вид визирной трубы цифрового измерителя и форма марки, используемой для измерений. Марка представляет собой оптический транспарант с рисунком в форме окружностей разного диаметра с единым центром. Осветителем марки является матрица светодиодов. В базе данных для работы программы используется таблица, включающая номер окружности и диаметр колец. Значения диаметров окружностей описываются функционалом, позволяющим вычислить ряд значений относительной ширины колец и использовать этот ряд для автоматизированного распознавания номера окружности. Форма марки обеспечивает возможность измерений в диапазоне от 0 до 30 м: при малых дистанциях формируется изображение центральных окружностей малого диаметра, при больших дистанциях окружности малого диаметра перестают разрешаться и для измерений используется изображение периферийных окружностей большого диаметра.

При $L \leq 30$ м авторы использовали марку с максимальным диаметром 55 мм. При увеличении диаметра марки возможно увеличение дистанции до 50 и даже до 100 м. Ограничением в данном случае являются жесткость измерительного стенда и стабильность окружающей среды.

Общая схема цифрового измерителя отклонений от прямолинейности и соосности приведена на рис. 2, где

- 1 – оптическая марка (с осветителем);
- 2 – измеряемое изделие (станина, плита, направляющая и пр.);
- 3 – основной объектив;
- 4 – фокусирующая линза;
- 5 – оборачивающая оптическая система;
- 6 – цифровая ТВ камера;
- 7 – блок управления шаговым приводом для перемещения фокусирующей линзы 4;

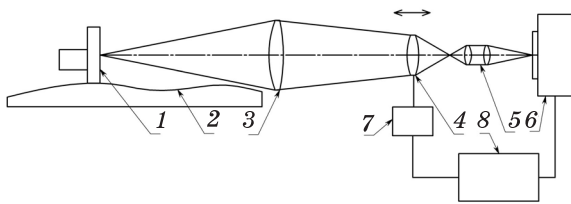


Рис. 2. Общая схема цифрового измерителя отклонений от прямолинейности ОПТРО–ППС–031 (пояснения в тексте).

8 – компьютер, к которому подключены цифровая ТВ камера 6 и блок управления (контроллер) шагового двигателя 7. Шаговым приводом будем называть совокупность шагового двигателя и механизма (например реечного или винтового) для передачи вращательного движения шагового двигателя в поступательное перемещение фокусирующей линзы 4.

В процессе измерений оптическая марка размещается на измеряемом изделии последовательно вдоль трассы измерений на разных расстояниях от прибора.

Фокусировка на оптическую марку проводится по команде из программы и реализуется путем перемещения фокусирующей линзы. При перемещении линзы в каждом кадре, регистрируемом ТВ камерой, вычисляется параметр фокусировки, который определяется суммой значений первой производной для всех точек двумерного цифрового массива, соответствующего изображению марки. Процесс автофокусировки завершается при достижении максимального значения параметра фокусировки.

В процессе измерений для каждого положения оптической марки по программе автоматически проводятся следующие процедуры:

- а) автоматическая фокусировка изображения оптической марки на матрице ТВ камеры 5;
- б) измерение масштаба изображения, а точнее, увеличения (уменьшения) оптической системы (путем измерения диаметра окружностей, их сопоставления с номинальными размерами и вычисления средневзвешенного значения);
- в) измерение расстояния до оптической марки (по табличной базе данных, связывающей масштаб изображения с дистанцией);
- г) измерение положения центра изображения оптической марки 1 на матрице (путем измерения координат центра для каждой

окружности и определения средневзвешенного значения для всей совокупности анализируемых окружностей на изображении марки);

д) вычисление смещения центра изображения оптической марки 1 относительно координаты следа визирной линии;

е) вычисление смещения центра оптической марки 1 в пространстве предметов относительно базовой линии.

Следом визирной линии (СВЛ) является точка пересечения визирной линии с плоскостью светочувствительной матрицы ТВ камеры.

Выполнение всех перечисленных измерительных процедур основано на цифровой обработке изображения марки на матрице ТВ камеры. При этом цифровая технология позволяет использовать множество уровней усреднения результатов измерения, в частности –

- 1) результатов измерения координат центра для всей совокупности окружностей изображения марки в каждом зарегистрированном кадре;
- 2) результатов измерения в единичном измерении для заданной совокупности кадров;
- 3) результатов измерения для заданной совокупности единичных измерений;
- 4) результатов измерений для заданной совокупности фокусировок.

Это позволяет получить с высокой точностью не только результат измерения, но также оценку случайной погрешности, отражающей качество измерения.

Конечной задачей измерений следует считать определение профиля детали относительно базовой линии, соединяющей начальную и конечную точки.

Введем следующие обозначения:

L – дистанция от прибора до марки;

X, Y – координаты центра изображения марки по осям x и y в шкале координат фотоприемной матрицы;

dX, dY – отклонение по осям x и y профиля детали от базовой линии;

V – оптическое уменьшение объектива.

Рассмотрим вычисление профиля измеряемой детали на примере отклонений от прямолинейности по оси y .

Если в процессе измерений получены результаты для N точек на шкале дистанций, то координаты профиля детали в каждой точке n ($n = 1, \dots, N$) определяются выражением

$$P_n = (Y_n - Y_c)V_n, \quad (1)$$

где Y_c – координата СВЛ на приемной ТВ матрице. (Процедура определения координат СВЛ на фотоприемной матрице ТВ камеры будет рассмотрена ниже.)

Расчет координат базовой линии выполняется по формуле

$$B_n = P_1 + \frac{P_N - P_1}{L_N - L_1} (L_n - L_1). \quad (2)$$

Затем вычисляются координаты профиля относительно базовой линии

$$dY_n = P_n - B_n. \quad (3)$$

Для примера в таблице приведены результаты измерения координат профиля рельса в режиме: 5 фокусировок – 5 измерений для каждой фокусировки – 5 кадров для каждого измерения. Нетрудно посчитать, что в каждой точке профиля использована измерительная информация для 125 кадров.

В таблице дополнительно использованы следующие обозначения: sdX – СКО среднего значения dX , sdY – СКО среднего значения dY , sX – СКО среднего значения X , sY – СКО среднего значения Y , sV – СКО среднего значения V .

Как видно из таблицы СКО среднего значения для координаты центра изображения марки (sX , sY) практически не превышает 0,2 мкм, СКО среднего значения результатов измерения (sdX , sdY) в диапазоне дистанций 1,6 – 3,3 м не превышает 1,5 мкм. Величина sV показывает реальность оценки расстояния до марки L с погрешностью порядка 1 мм.

Эксперименты для больших дистанций (порядка 30 м) показывают, что СКО среднего значения для координаты центра изображения марки (sX , sY) практически не меняется с дистанцией. Значения (sdX , sdY) и (sX , sY) в первом приближении связаны через значение оптического уменьшения V . Это подтверждается данными таблицы. Для дистанции 30 м увеличение $V \approx 50^\times$. Поэтому на этой дистанции значения (sdX , sdY) могут достигать 10 мкм, что подтверждается измерениями. На дальностях порядка 30 м погрешность оценки расстояния не превышает 10 мм.

Таким образом, точность цифрового измерителя ОПТРО–ППС–031 на порядок и более превышает точность визуального прибора ППС–11.

Стандартным методом оценки погрешности измерений для визирных приборов является определение разности результатов измерений для двух положений прибора с поворотом относительно оси трубы на 180° . На рис. 3 в форме

Таблица, Протокол измерений профиля изделия

n	L , м	dX , мкм	dY , мкм	sdX , мкм	sdY , мкм	X , мкм	Y , мкм	sX , мкм	sY , мкм	V	sV
1	1,608	0	0	0,3	0,3	3396,50	2357,17	0,06	0,07	3,9406	0,0001
2	1,71	24,1	-71,5	1,0	0,6	3398,76	2403,06	0,19	0,14	4,1378	0,0001
3	1,813	4,4	-131,6	0,7	0,3	3390,71	2448,32	0,16	0,06	4,335	0,0003
4	1,918	-15,8	-157,3	0,5	0,4	3383,19	2497,81	0,11	0,09	4,5312	0,0005
5	2,023	8,4	-158,2	0,1	0,1	3385,70	2548,91	0,02	0,03	4,7264	0,0002
6	2,13	40,8	-128,0	0,4	0,3	3389,64	2602,85	0,08	0,07	4,9217	0,0005
7	2,236	59,7	-78,0	0,2	0,3	3390,65	2656,38	0,04	0,06	5,1144	0,0005
8	2,344	74,8	-25,9	0,6	0,5	3390,84	2707,14	0,11	0,10	5,309	0,0008
9	2,45	67,4	36,4	0,5	0,7	3386,99	2755,61	0,09	0,12	5,4996	0,0003
10	2,558	30,0	83,6	0,4	0,4	3378,07	2798,56	0,07	0,08	5,6919	0,0004
11	2,664	18,1	117,5	0,4	0,3	3374,09	2836,31	0,07	0,04	5,8834	0,0004
12	2,771	-41,0	129,0	0,5	0,4	3362,61	2867,81	0,08	0,08	6,0739	0,0006
13	2,877	-23,4	128,6	0,8	1,3	3364,07	2895,48	0,13	0,21	6,2649	0,0002
14	2,982	-24,1	110,1	0,4	0,7	3362,61	2918,40	0,07	0,11	6,4537	0,0005
15	3,087	-6,0	85,4	0,4	0,4	3364,06	2939,10	0,06	0,07	6,643	0,0002
16	3,193	11,0	47,3	0,8	1,2	3365,27	2957,00	0,12	0,19	6,8344	0,0006
17	3,299	0	0	0,4	1,0	3362,43	2972,36	0,06	0,14	7,0235	0,0006

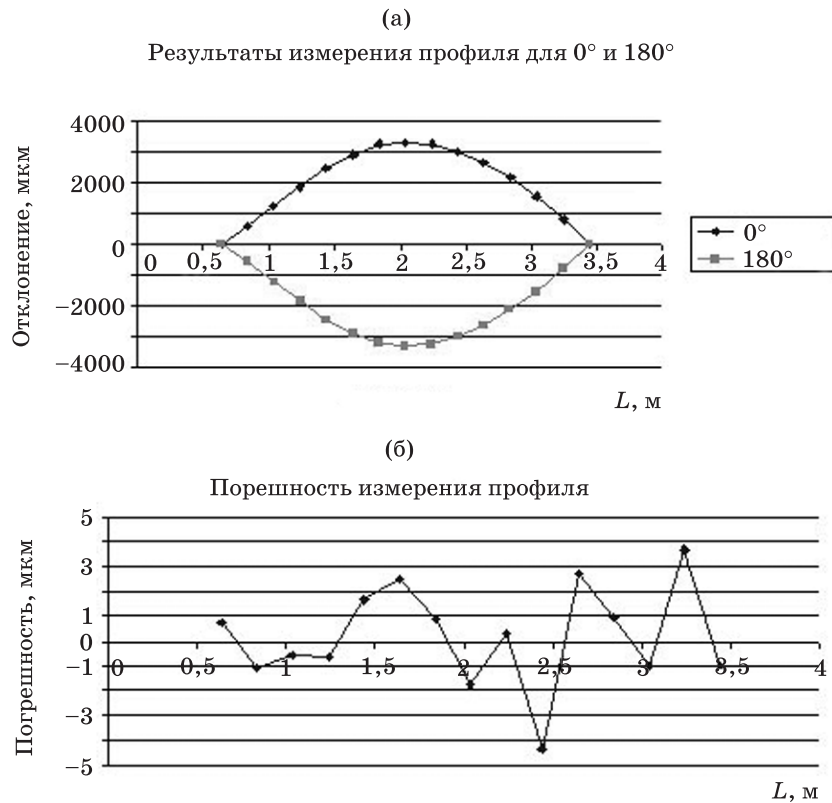


Рис. 3. Зависимости измеренных отклонений профиля для двух положений прибора (а) и зависимости разности результатов измерений для каждой точки профиля (б).

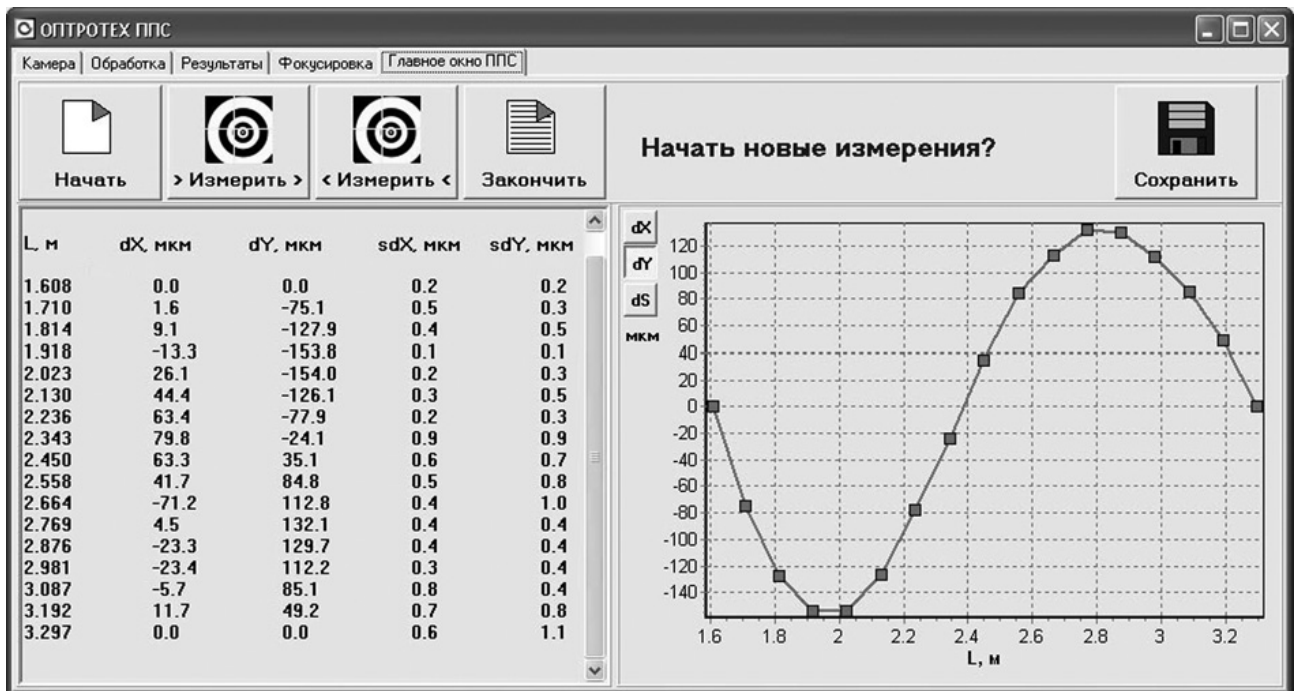


Рис. 4. Окно программы с результатами измерений.

графиков представлены результаты двух серий измерений отклонений профиля для двух положений прибора (0° и 180°), а также погрешность измерений для каждой измеренной точки профиля как разность (сумма) двух серий измерений. На обоих графиках по оси x отложены значения дистанции, на которых проведены измерения, по оси y – значения отклонения от базовой линии и погрешность. Как видно из рис. 3, погрешность в диапазоне дистанций 0,7 – 3,5 м не превышает нескольких микрометров.

Основной систематической погрешностью в данной измерительной технологии является погрешность координат СВЛ, которые соответствуют координатам точки пересечения (визирной) оси с плоскостью фотоприемника. При увеличении дистанции влияние этой величины стремится к нулю. Поэтому наиболее интересными, с точки зрения метрологии, являются измерения в ближней области дистанций.

В визуальных приборах измерительное перекрестие путем юстировки выводит на оптическую ось прибора. В цифровом приборе совершенно не нужно выводить какую-нибудь центральную точку светочувствительной матрицы на оптическую ось. Да это и невозможно, учитывая точность измерения положения центра изображения марки, составляющую доли микрометра. Простой метод определения координат СВЛ на фотоприемной матрице состоит в следующем. Проводятся измерения профиля одной делала в исходном положении (0°) и с по-

воротом на 180° относительно оси трубы. При расчете двух вариантов профиля координаты СВЛ являются единым параметром. Вычисляется сумма профилей (координаты профиля для 0° и для 180° отличаются знаком) и путем подбора координат СВЛ добиваются минимизации этой суммы. Эта процедура легко выполняется в программе Excel. Полученные значения координат СВЛ вводятся в базу данных программы для расчетов в процессе эксплуатации прибора.

Следует отметить, что формирование протокола измерений и графика отклонений центра марки 1 от базовой линии начинается в цифровом измерителе уже с измерения третьей точки на трассе измерений (две точки – это только базовая линия) и результат каждого следующего измерения сразу отражается на графике и в протоколе. При появлении новой крайней точки, ближней или дальней, проводится пересчет базовой линии. Поэтому точки в цикле измерений могут следовать в любом порядке. Окончательный протокол измерений и график профиля детали формируются в реальном времени по команде “Закончить”, после того как измерена последняя точка (рис. 4).

В визуальном приборе на обработку результатов измерений с вычислением базовой линии и искомых отклонений профиля инструкцией предусмотрено время 30 мин. Таким образом, производительность цифрового измерителя многократно отличается от производительности визуального.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов А.Г., Алеев А.М., Пантюшин А.В., Тимофеев А.Н. Основные погрешности контроля соосности с помощью авторефлексионной оптико-электронной системы // Оптический журнал. Т. 76. №1. 2009. С. 3–8.
2. Пинаев Л.В., Леонтьева Г.В., Бутенко Л.Н., Серегин А.Г. Лазерный измеритель непрямолинейности. Патент РФ № 2457434. 2010.
3. Апенко М.И., Араев В.А., Афанасьев В.А., Дурейко Г.В., Заказов Н.П., Романов Д.А., Усов В.С. Оптические приборы в машиностроении. Справочник. М.: Машиностроение, 1974. С. 120–167.
4. Данилевич Ф.М., Никитин В.А., Смирнова Е.П. // Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов. М.: Машиностроение, 1976. С. 222–241.
5. Проспект фирмы Taylor Hobson (www.taylor-hobson.com).
6. Королев А.Н., Лукин А.Я., Малинин С.М., Полищук Г.С., Трегуб В.П. Цифровой измеритель отклонения от прямолинейности и соосности. Патент РФ № 112396. 2012.
7. <http://www.es-exp.ru>.