621.7.08

Методика калибровки оптоэлектронного сенсора для контроля диаметра пружин растяжения

Л. А. ВАРЖИЦКИЙ

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, Самара, Россия, e-mail: lavarj1950@gmail.com

Рассмотрены особенности контроля диаметра пружин растяжения и других спиралевидных тел в процессе их изготовления и обоснован выбор оптоэлектронного способа измерения диаметра пружин. Приведены конструктивные данные и характеристики разработанного сенсора, удовлетворяющие технологическим требованиям. Предложена и реализована методика калибровки сенсора. Выполнено тестирование сенсора в реальном технологическом процессе. Получены удовлетворительные результаты сопоставления оценок диаметра оптоэлектронным и косвенным методами.

Ключевые слова: *оптоэлектроника, пружина, диаметр, поле допуска.*

Features of the control strain diameter helical springs and other bodies during the manufacturing process discussed in the article. Selecting optoelectronic measurement method is justified. The design and characteristics developed for process control sensor are shown. Methods of sensor calibration proposed and implemented. Testing of the sensor in real process performed. Satisfactory results of the comparison with the diameter of the estimates of the indirect method are discussed.

Key words: *optoelectronics, spring, diameter measurement, tolerance zone.*

Во многих отраслях современной промышленности используются витые пружины, спирали, струны и другие изделия цилиндрической спиралевидной формы (далее – спирали), длина которых во много раз превышает их диаметр. В процессе изготовления контролируются диаметр, длина, число витков и другие параметры спиралей, регламентируемые принятыми стандартами [1]. Потребность в развитии методов и приборов контроля диаметра таких изделий обусловлена следующими обстоятельствами: применение универсальных инструментов (микрометров и калибров) сопровождается субъективными ошибками, трудоёмко и не подлежит автоматизации; выборочная оценка диаметра не даёт представления о таких характеристиках, как среднее значение и его доверительный интервал, вероятность нахождения диаметра в поле допуска; применение лазерных цифровых систем, стоимость которых зачастую превышает стоимость технологического оборудования, оправдано лишь в исключительных случаях. В связи с этим развитие методов контроля диаметра спирали без использования универсальных приборов весьма актуально.

Одной из основных задач реализации таких методов является калибровка сенсора, формирующего информационный сигнал. В настоящей работе представлены методика калибровки оптоэлектронного сенсора и результаты его тестирования. Исследовали спираль номинальным диаметром 2,0 мм, навитую из стальной калиброванной проволоки круглого сечения по ТУ 3-1002-72 (сталь марки 12Х18Н10Т), которая используется для изготовления материала «металлическая резина» (МР) и упругодемпфирующих элементов из этого материала. Полученные результаты могут быть полезны для решения более широкого круга задач – контроля диаметра проволоки, струн, боуденовских оболочек и изделий с наружной резьбой (винтов, шпилек и т. п.).

Важность контроля качества при производстве материала МР и других волокновых материалов подтверждается результатами ряда работ, свидетельствующими о тесной связи упругодемпфирующих свойств изделий из этих материалов и характеристик спиралей, составляющих их основу [2–4]. Данная связь является следствием того, что структура материала МР представляет композицию случайно-ориентированных и спрессованных фрагментов спирали [5–7]. В частности, одним из основных параметров является диаметр спирали, так как коэффициент k её жёсткости при осевой деформации обратно пропорционален кубу диаметра и определяется как

$$k = Gd^4/(8D_0^3 n),$$

где G – модуль сдвига стали; d – диаметр проволоки; D_0 – диаметр витка по осевой линии проволоки; n – число витков в отрезке спирали.

При контроле диаметра следует учитывать следующие специфические особенности спирали МР – диаметр цилиндра непостоянен, а осевая линия имеет изгиб (не является прямой). Эти особенности спирали показаны на микрофотографии фрагмента реальной спирали (рис. 1). Микрофотография получена с помощью цифрового микроскопа DTX 500 LCD (Levenhuk Inc., *США*). Данные особенности приводят к тому, что однократные измерения с помощью микрометра или других контактных инструментов не могут дать объективную оценку диаметра спирали.

Среди многочисленных методов бесконтактного контроля (ультразвуковых, индукционных, лазерных) оптоэлектронные методы занимают особое место, так как их применение

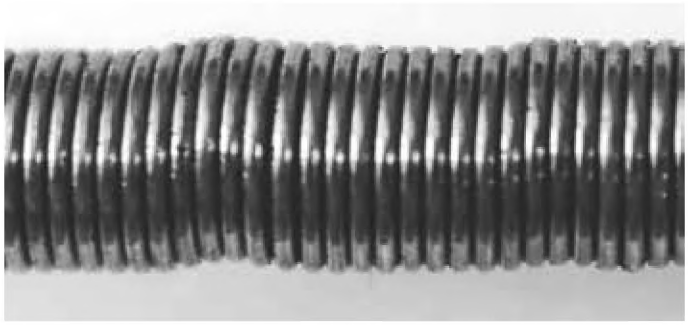

Рис. 1. Микрофотография фрагмента спирали

относительно простое и не требует значительных затрат. На этих методах основано действие дискретных оптоэлектронных сенсоров с открытым оптическим каналом в сенсорах положения и приближения, а также в энкодерах. В последнее время интенсивно разрабатываются аналоговые сенсоры, в которых формируется оценка искомой величины с учётом связи между размерами объекта или его положением и потоком излучения. Такие приборы оказываются весьма эффективными даже при измерениях деформации по нескольким осям и составляют серьёзную конкуренцию традиционным тензометрическим приборам [8]. Однако непрерывный контроль диаметра движущихся объектов остаётся малоизученным.

В настоящей статье представлены результаты, полученные с помощью оптопары с круглой апертурой. Для расширения диапазона измеряемых диаметров использовали приборы инфракрасного диапазона с апертурой диаметром 5 мм: фотодиод L-7113SF6C (Kingbright Electronic Co, Тайвань) и фототранзистор BPW96C (Vishay Intertechnology, Inc., США). Контролируемую спираль фиксировали в оптическом канале с помощью направляющих втулок с цилиндрическими отверстиями диаметром 2,5 мм и двух призм. Для термокомпенсации применяли термистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, включённый в коллекторную цепь фототранзистора. Температурный дрейф показаний сенсора в результате термокомпенсации снизился на порядок: с 4,40 до 0,45 мкм/°С.

Диаметр спирали определяет поток инфракрасного излучения, попадающего на фототранзистор, и напряжение на его коллекторе. В общем случае зависимость потока от диаметра имеет нелинейный характер. Однако в относительно узком диапазоне изменения диаметра спирали (±0,5 мм) световой поток изменяется практически линейно, и характеристика датчика может быть аппроксимирована линейной зависимостью вида

$$U_1 = sD + b,$$

где U_1 – напряжение на коллекторе фототранзистора; s – чувствительность; D – наружный диаметр витка спирали; b – смещение характеристики сенсора.

Напряжение U_1 усиливалось и масштабировалось в измерительном усилителе. Усилитель основан на классической схеме из трёх операционных усилителей [9], не предъявляющей жёстких требований к характеристикам используемых микросхем. Усилитель обеспечивает увеличение чувствительности в восемь раз и согласование динамических диапазонов сенсора и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Статическая характеристика оптоэлектронного сенсора в виде зависимости выходного напряжения усилителя U_2 от диаметра калибровочных тел $D_к$ представлена на рис. 2.

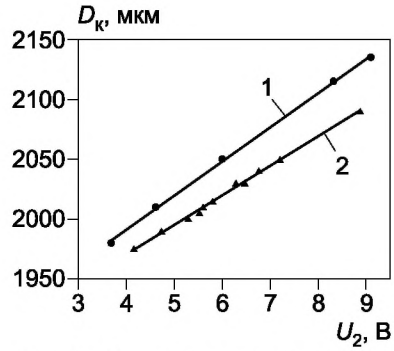

Рис. 2. Статические характеристики оптоэлектронного сенсора, полученные при калибровке спиралей на керне (*1*) и цилиндрических калибров (*2*)

Для определения статистической характеристики сенсора и его калибровки использовали цилиндрические тела и специально изготовленную спираль, навитую из указанной выше проволоки. Это позволило снизить погрешность оценки диаметра, обусловленную различием шероховатости поверхностей гладкого цилиндрического калибра и спирали. Без калибровки сенсора данная погрешность может достигать 40 мкм при диаметре спирали 2000 мкм. Такая же погрешность получается в результате расчётной оценки погрешности (по разности площадей теней цилиндрического калибра и спирали). Для нахождения чувствительности по

Таблица 1

Результаты калибровки сенсора

$D_к$, мкм	Цилиндрические калибры			Спирали на керне		
	U_2, мВ	$D_р$, мкм	δD, %	U_2, мВ	$D_р$, мкм	δD, %
1895	850	1893,4	0,08	–	–	–
1975	4150	1972,6	0,12	–	–	–
1980	–	–	–	3670	1984,1	0,21
1990	4720	1986,3	0,19	–	–	–
2000	5290	2000,0	0,00	–	–	–
2005	5520	2005,5	–0,02	–	–	–
2010	5600	2007,4	0,13	4600	2009,2	–0,04
2015	5800	2012,2	0,14	–	–	–
2030	6470	2028,3	0,08	–	–	–
2030	6280	2023,7	0,31	–	–	–
2040	6760	2035,2	0,23	–	–	–
2050	7200	2045,8	0,20	6000	2047,0	–0,15
2090	8880	2086,1	0,19	–	–	–
2115	–	–	–	8320	2109,6	–0,25
2135	–	–	–	9100	2130,7	–0,20

результатам калибровки выполнена линейная регрессия, уравнения которой для спирали на керне и цилиндрических калибров имеют вид, соответственно:

$$D_р = 28{,}42U_2 + 1878;$$
$$D_р = 24{,}60U_2 + 1872, \quad (1)$$

где $D_р$ – расчётные значения диаметра.

Как и предполагалось, характеристика сенсора, полученная с использованием цилиндрических калибров, смещена вниз и вправо (в область больших напряжений при одинаковых диаметрах) по отношению к характеристике для спирали. Результирующая чувствительность сенсора при калибровке на специальных спиралях составила 0,027 мкм/мВ или 37 мВ/мкм, что вполне достаточно для технологического контроля. Так, при динамическом диапазоне сигнала 0–10 В и применении восьмиразрядного АЦП (с дискретностью 39 мВ) разрешающая способность сенсора составит немногим более 1 мкм. При необходимости разрешение можно увеличить за счёт увеличения разрядности АЦП (до 12–16 и более разрядов) и других схемотехнических решений. Результаты калибровки приведены в табл. 1, там же указаны напряжения U_2, номинальные диаметры $D_к$ калибров и расчётные по (1) значения $D_р$.

В диапазоне измеряемых диаметров 1895–2135 мкм получена интегральная нелинейность $\delta D \le 0{,}35$ %. Таким образом, удовлетворительные значения чувствительности, нелинейности и динамического диапазона разработанного сенсора определяют целесообразность его применения для контроля диаметра спиралей и других подобных изделий.

Приведённые специфические особенности спирали, а также неизбежные смещения в оптическом канале в процессе её навивки вносят значимую (не более ±30 мкм) случайную составляющую сигнала сенсора. Это обстоятельство практически исключает возможность измерений, основанных на детерминированной модели сигнала. Данная модель пригодна лишь для калибровки сенсора по образцовой и неподвижной спирали. Пути решения этой задачи, относящиеся к математической статистике и теории распознавания образов, общеизвестны и стандартизованы [10]. Однако для выбора метода решения и его практической реализации необходимо предварительно получить сведения об основных статистических свойствах сигнала – функции плотности вероятности, средних значениях и дисперсии.

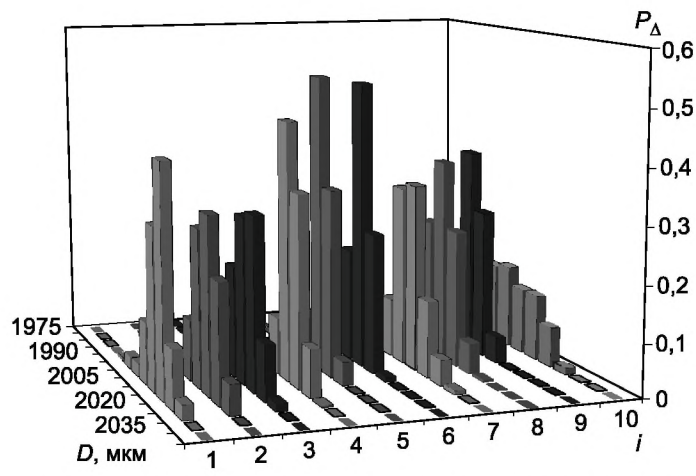

Рис. 3. Гистограммы мгновенных значений диаметра D спирали

С этой целью были выполнены оцифровка, регистрация сигналов с помощью анализатора ZET 017-U8 (ООО «Электронные технологии и метрологические системы», Россия) и статистическая постобработка. В качестве оценки значений плотности вероятности использовались выборочные частоты $P_Δ$ попадания значений диаметра в интервал $Δ = 5$ мкм. Число m интервалов гистограммы выбрано в соответствии с правилом Стёрджеса:

$$m = 1 + \log_2 N,$$

где N – объём выборки.

При объёме выборки $N = 2 \cdot 10^5$ число интервалов $m = 19$. Учитывая поле допуска на диаметр в ±50 мкм, получаем ширину одного интервала гистограммы 5,3 мкм. Полученные (средствами пакета EXCEL 2010) гистограммы значений диаметра D для десяти фрагментов спирали приведены на рис. 3. Фрагменты получены для нескольких типовых режимов работы навивочного автомата, используемых в условиях производства. Объём выборки по каждой гисто-

Таблица 2

Статистические характеристики сигнала сенсора

Характеристика	Значение характеристики для фрагментов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Среднее арифметическое D_m	2014,8	2016,2	2013,5	2014,7	2014,2	2007,6	2010,4	2007,3	2002,2	1999,4
Стандартное отклонение σ	5,6	5,5	5,6	3,9	3,2	3,4	5,8	5,1	5,2	10,6
Доверительный интервал среднего Δα	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,06
Математическое ожидание $M(D)$	2017,3	2018,8	2016,0	2017,1	2016,7	2010,1	2012,9	2009,8	2004,7	2001,9
$D_{косв}$	2023	2019	2015	2015	2011	2000	2007	2004	1996	1999,5
Разность $ΔD = D_{косв} - D_m$	8,2	2,8	1,5	0,3	–3,2	–7,6	–3,4	–3,3	–6,2	0,1

грамме –(15…20)·10^4 точек при длительности каждой реализации порядка 60 с. Результаты обработки свидетельствуют об устойчивом одномодальном характере закона распределения и разбросе значений в выборке не более ±25 мкм.

Определим основные статистические характеристики сигнала сенсора. С этой целью для каждого из десяти фрагментов были определены среднее арифметическое, математическое ожидание, медиана, стандартное отклонение и коэффициенты формы распределения – эксцесс и асимметрия. Получена также оценка доверительного интервала для среднего (для доверительной вероятности 0,99). Значения основных характеристик для всех исследованных фрагментов приведены в табл. 2.

Данные табл. 2 позволяют сделать следующие выводы:

сигнал оптоэлектронного сенсора имеет незначительные флуктуации – стандартное отклонение σ<6 мкм (за исключением десятого фрагмента спирали, навитого с завышенным натяжением проволоки) при среднем значении D_m=1999…2016 мкм;

большой объём выборки и малое стандартное отклонение обеспечили весьма малый доверительный интервал оценки среднего Δα<0,06 мкм (при доверительной вероятности 0,99);

численный эксперимент по сокращению размера выборки до 1000 точек свидетельствует о естественном увеличении доверительного интервала оценки среднего до 0,4 мкм, что вполне допустимо для технологического контроля;

характер распределения плотности вероятности – одномодальный, несимметричный, отличающийся от нормального по значениям коэффициентов эксцесса и асимметрии;

вероятность нахождения диаметра в интервале $M(D)$ ±5 мкм составляет 0,7–0,9, т. е. не менее 70 % длины спирали имеет диаметр, находящийся в интервале ±5 мкм, включающем среднее значение.

Представляет интерес сопоставления результатов измерений диаметра оптоэлектронным методом с оценками диаметра, полученных другим методом. Существует несколько косвенных методов оценки диаметра спирали, основанных на измерении длины проволоки, массы фрагмента (витка) или электрического сопротивления. При этом считается, что спираль имеет идеальную форму – прямую осевую линию, витки в виде окружности постоянного (по длине фрагмента) диаметра, шаг витков, равный диаметру проволоки. Наружный диаметр $D_{косв}$ идеализированной спирали определяется измеренными значениями длины спирали и проволоки:

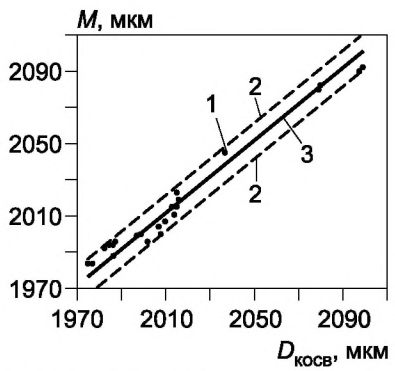

Рис. 4. Результаты сопоставления оценок диаметра спирали:
1 – результаты измерения; *2* – границы поля допуска (±10 мкм от линии регрессии); *3*– линия регрессии

Таблица 3

Результаты сопоставления оценок диаметра спирали оптоэлектронным и косвенным методами

Номер фрагмента	$M(D)$,мкм	$D_{косв}$,мкм	$D_р$,мкм	ΔD,мкм
1	1975	1984	1977	–9
2	1977	1984	1979	–7
3	1983	1992	1984	–9
4	1985	1994	1986	–9
5	1986	1994	1988	–8
6	1987	1988	1988	–1
7	1987	1996	1989	–9
8	1997	1999	1999	–2
9	1999	2000	2001	–1
10	2002	1996	2004	6
11	2007	2004	2009	3
12	2008	2000	2010	8
13	2010	2007	2012	3
14	2013	2015	2015	–2
15	2014	2011	2016	3
16	2015	2023	2017	–8
17	2015	2015	2017	0
18	2016	2019	2018	–3
19	2037	2045	2039	–8
20	2079	2080	2081	–1
21	2080	2082	2082	–2
22	2098	2090	2099	8
23	2099	2092	2101	7

$$D_{косв} = D_0 + d = \left(L_{пр} d / L_{сп} \pi\right) + d = d\left[\left(L_{пр} / L_{сп} \pi\right) + 1\right], \qquad (2)$$

где $L_{пр}$ – длина отрезка проволоки, израсходованной на один фрагмент спирали; $L_{сп}$ – длина спирали.

В соответствии с выражением (2) для косвенной оценки наружного диаметра спирали достаточно знать отношение длин проволоки и спирали, а также диаметр проволоки. Длину проволоки измеряли энкодером E30S4 (Autonics, Корея) с шагом дискретизации 1,2 мм, входящим в состав оборудования навивочного автомата. Результаты вычисления по (2) диаметров 23 фрагментов и средние значения $M(D)$, полученные статистической обработкой, представлены в табл. 3.

Результаты сопоставления оценок диаметра, полученных с помощью оптоэлектронного сенсора и косвенным методом, представлены на рис. 4. Разность оценок диаметра не превышала ±10 мкм, находясь в поле допуска шириной 20 мкм, построенная относительно от линии регрессии.

Уравнение линии регрессии имеет вид

$$M(D) = 1{,}001 D_{косв}.$$

Коэффициент парной корреляции равен 0,990, что свидетельствует о практически линейной связи этих оценок. Основные причины различия оценок диаметра следующие: погрешность косвенной оценки диаметра, в частности, из-за отклонения формы спирали от идеализированной; движение спирали в оптическом канале; нелинейность характеристики оптоэлектронного сенсора. Увеличение сходимости результатов потребует уменьшения погрешности косвенного метода оценки, а также модернизации конструкции сенсора.

Заключение. Контроль диаметра протяжённых спиралей может быть осуществлён на основе использования щелевых оптронов с открытым оптическим каналом и статистических методов обработки данных. Калибровка сенсора должна выполняться с помощью калибровочных спиралей и с привлечением статистической обработки сигналов в соответствии с изложенной в работе методикой. Достаточно высокие чувствительность и линейность характеристики оптоэлектронного сенсора позволяют реализовать метод в модуле автоматизированной системы контроля технологического процесса, исключив таким образом субъективные ошибки.

Практическая реализация рассмотренного метода в системе автоматизированного контроля потребует решения следующих задач: выбора непараметрического алгоритма проверки гипотез и его реализации на программируемых логических контроллерах с целью своевременного выявления брака непосредственно в ходе технологического процесса; модернизации конструкции сенсора для уменьшения влияния движения спирали на оценку её диаметра; реализации косвенного метода оценки диаметра, функционирующего в автоматизированной системе одновременно с оптоэлектронным.

Литература

1. **ГОСТ Р 50753–95.** Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из специальных сталей и сплавов. Общие технические условия.

2. **Troynikov A. A., Lazutkin, G. V.** Experimental determination of the variation of the elastic damping properties MR material in a continuous operation // ARPN J. Eng. and Appl. Sci. 2014. V. 9. No. 12. P. 2876–2879.

3. **Hong J., Zhu B., Ma Y.** Theoretical and experimental investigation on nonlinear characterization of metal rubber // Proc. ASME Turbo Expo. Structures and Dynamics, Pts. A and B. 2011. V. 6. P. 877–886.

4. **Cao F., Bai H., Ren G., Fan H.** Constitutive model of metal rubber material based on curved cantilever beam of variable length // Chinese J. Mechanical Eng. 2012. V. 48. No. 24. P. 61–66.

5. **Zhu B., Ma Y., Hong J.** Theoretical analysis on stiffness and damping characteristics of metal rubber // J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2011. V. 37. No. 10. P. 1298–1302.

6. **Лазуткин Г. В.** Динамика виброзащитных систем с конструкционным демпфированием и разработка виброизоляторов из проволочного материала МР. Самара: СамГУПС, 2010.

7. **Бальшин М. Ю.** Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Металлургия, 1972.

8. **Palli G., Moriello L., Melchiorri C.** Performance and Sealing Material Evaluation in 6-axis Force-Torque Sensors for Underwater Robotics // IFAC-Papers on Line. 2015. V. 48. No. 2. P. 177–182.

9. **Horowitz P., Hill W., Robinson I.** The art of electronics. Cambridge: Cambridge university press, 1980.

10. **ГОСТ Р 50.1.037–2002.** Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. II. Непараметрические критерии.

Дата принятия: 01.03.2017.