

нулей N_{0+}^* доплеровского сигнала от расстройки ξ . Аппаратурой, описанной в [1], измерялось среднее число нулей в секунду доплеровского сигнала с гауссовым энергетическим спектром ($\beta \sim 0,001$), прошедшего через широкополосный и узкополосный фильтры. Нормированная частотная характеристика $H(\xi)$ узкополосного (β_0 порядка 0,01) фильтра приведена на рис. 4 (кривая 1). Здесь же отражена зависимость δ_{N_0} от расстройки ξ (кривая 2). В качестве N_0 принималось среднее число нулей сигнала на выходе широкополосного фильтра, а в качестве N_0^* — на выходе узкополосного. Для сравнения на этом же рисунке построен график зависимости δ_{N_0} от ξ (кривая 3), рассчитанный по формуле (28) для $\beta=0,001$ и $\mu=0,1$. Как видно из рисунка, порядок экспериментально найденной величины δ_{N_0} при расстройках в пределах $\pm 0,3$ близок к теоретическому. При больших расстройках возрастает отклонение экспериментальной кривой от теоретической, что объясняется «негауссовостью» фильтра и влиянием амплитудного порога в счетчике числа нулей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Г. Василенко, Ю. Н. Дубнищев, В. П. Коронкевич, В. С. Соболев, А. А. Столповский, Е. Н. Уткин. Лазерные доплеровские измерители скорости. Новосибирск, «Наука», 1975. 164 с.
2. Б. С. Рижкевичус, В. Й. Смирнов. Оптический доплеровский метод исследования турбулентных потоков с использованием спектрального анализа сигнала. — «Квантовая электроника», 1973, № 2 (14), с. 86—89.
3. C. Greated, T. S. Durrani. Signal analysis for laser velocimeter measurements. — «J. Phys. E», 1971, vol. 4, p. 24—26.
4. R. J. Adrian. Statistics of laser doppler velocimeter signals: frequency measurement. — «J. Phys. E», 1972, vol. 5, № 1, p. 91—95.
5. T. S. Durrani, C. Greated. Theory of LDV tracking systems. — «IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst.», 1974, vol. AES-10, № 4, p. 418—428.
6. P. M. Iten, R. Dändliker. A sampling FM wide-band demodulator useful for laser doppler velocimeters. — «Proc. IEEE», 1972, vol. 60, № 12, p. 1470—1475.
7. M. O. Deighton, E. A. Sayle. An electronic tracker for the continuous measurement of doppler frequency from a laser anemometer. — «DISA Inform.», 1971, № 12, p. 5—10.
8. Ю. Г. Василенко, Ю. Н. Дубнищев, Е. Н. Уткин. О снижении уровня аддитивных помех в выходном сигнале лазерного измерителя. — «Опт. и спектр.», 1973, т. 5, № 2, с. 306—308.
9. Дж. Бендат. Основы теории случайных шумов и ее применение. М., «Наука», 1965. 464 с.
10. В. И. Тихонов. Выбросы случайных процессов. М., «Наука», 1970. 392 с.
11. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. М., «Сов. радио», 1974. 552 с.

Поступила в редакцию 24 марта 1975 г.

УДК 535.417:531.71:531.74

И. С. БОЛДЫРЕВА, В. А. БУТОРИН, Р. М. БЫЧКОВ,
В. И. ВОЛКОВ, В. П. КОРОНКЕВИЧ, Е. С. НЕЖЕВЕНКО

(Новосибирск)

КОНТРОЛЬ РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В настоящее время для контроля размеров деталей сложной формы широко применяются проекционные оптико-механические приборы, принцип действия которых основан на сравнении теневого контура контролируемой детали с эталонным полем допусков. Эталонное поле допусков выполняется на стекле или кальке в виде двойного контура,

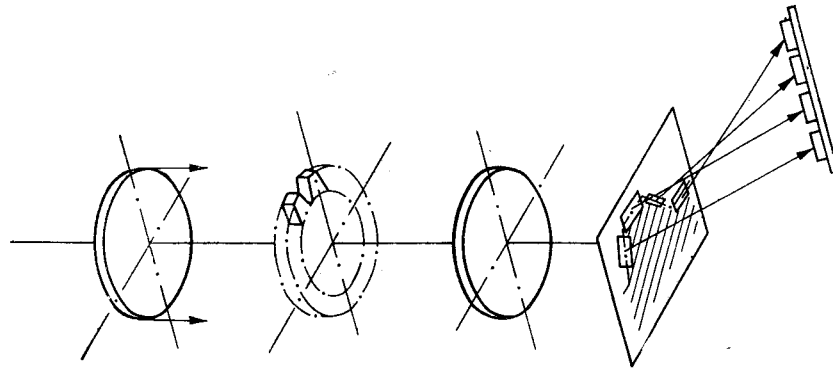


Рис. 1.

соответствующего минимально и максимально допустимым размерам поверяемой детали [1]. Примерами подобных устройств могут служить стандартные проекторы типа ЧП-2 или БП-3 [2]. Все измерения на этих приборах проводятся вручную и требуют значительных затрат времени на проведение контрольно-измерительных операций.

В предлагаемой работе эталонное поле допусков заменяется набором голограмм, на которые в когерентном свете проектируется теневой контур контролируемого изделия. Голограммы, полученные путем когерентного сложения двух пучков света, фактически представляют интерферограмму с синусоидальным распределением яркости. При освещении таких голограмм положение восстановленных источников света может быть спроектировано в плоскость линейки из фотоприемников (рис. 1).

На рис. 2 изображена теневая проекция контролируемой детали, совмещенная с двойным контуром поля допусков. Разобьем поле допусков на ряд элементарных площадок, количество которых определяется сложностью контура детали и числом контролируемых размеров.

Как видно из рисунка, действительный размер детали A может быть определен по формуле

$$A = A_{\max} - (\Delta a_1 + \Delta a_2), \quad (1)$$

где A_{\max} — максимально допустимый размер, заданный в соответствии с техническими требованиями; Δa_1 и Δa_2 — части поля допуска, не перекрытые измеряемой деталью. Следовательно, задачу измерения размеров детали, изображенной на рис. 2, можно свести к определению размеров неперекрываемых зон площадок 1, 2 эталонного поля допуска соответствующими частями контура детали.

На рис. 3 изображена схема, с помощью которой измеряются размеры неперекрываемых зон элементарных площадок эталонного поля допуска. При этом отдельные площадки поля на фотопластинке 5 записываются в виде голограмм.

Схема работает следующим образом. Луч лазера 1 коллимируется афокальной системой 2 и освещает контролируемый объект 3. Проекционная система 4 проектирует теневое изображение контролируемого объекта на эталонное поле контура детали, нанесенное на фотопластинку 5. В результате наложения теневого изображения контура объекта на эталонное поле контура детали отдельные участ-

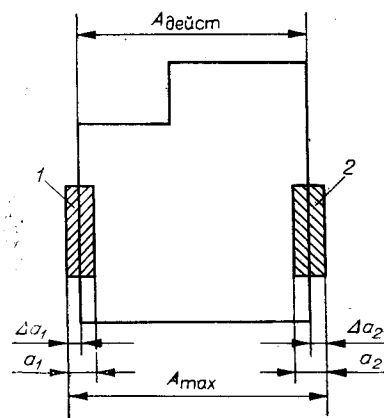


Рис. 2.

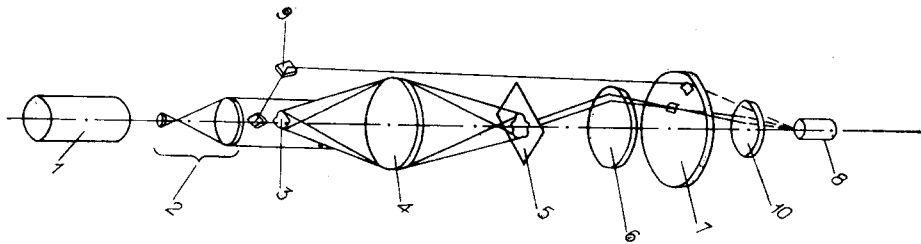


Рис. 3.

ки голограмм попадают в область тени контура. Не перекрытые тенью участки голограмм восстанавливают изображения источников, которые оптической системой 6, 10 проектируют на фотоприемник 8. С помощью сканирующего устройства 7 происходит последовательное считывание восстановленных пучков. Для исключения ошибок измерения, вызванных колебаниями мощности излучения лазера, в оптической схеме предусмотрен контрольный канал 9, с помощью которого определяются нормирующие коэффициенты измеренных интенсивностей источников, восстановленных с голограмм, относительно излучения лазера.

Рассмотрим алгоритм работы системы на примере измерения размера A (см. рис. 2).

Световой поток, падающий на фотоприемник, от полностью открытой голограммы 1 может быть определен как

$$\Phi_1 = k_1 E(t_1) a_1 b_1, \quad (2)$$

где $E(t_1)$ — мощность излучения лазера во время измерения светового потока; k_1 — коэффициент пропускания оптической системы и элементарной голограммы; a_1 и b_1 — линейные размеры голограммы.

Световой поток, поступающий на фотоприемник по контрольной цепи 9 через время τ , после измерения Φ_1

$$\Phi_{01} = k_0 E(t_1 + \tau) a_0 b_0. \quad (3)$$

Здесь $E(t_1 + \tau)$ — мощность излучения лазера во время измерения светового потока Φ_{01} ; k_0 — коэффициент пропускания оптической системы контрольного канала; a_0 и b_0 — линейные размеры диафрагмы, определяющей сечение светового пучка контрольного канала.

Если контур детали перекрывает часть голограмм, то световой поток Φ_1 изменяется и становится равным

$$\Phi'_1 = k_1 E(t'_1) \Delta a_1 b_1, \quad (4)$$

где $E(t'_1)$ — мощность излучения лазера во время измерения светового потока Φ'_1 ; Δa_1 — линейный размер непокрытой части голограммы.

Световой поток, поступающий на фотоприемник по контрольной цепи 9 во время $(t'_1 + \tau)$, равен

$$\Phi'_{01} = k_0 E(t'_1 + \tau) a_0 b_0. \quad (5)$$

Время τ определяется сканирующим устройством и выбирается достаточно малым, чтобы мощность излучения лазера за это время можно было считать неизменной, т. е.

$$E(t_1) \cong E(t_1 + \tau); \quad E(t'_1) \cong E(t'_1 + \tau). \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (2) — (5) и учитывая (6), получим

$$\Delta a_1 = a_1 \frac{\Phi'_1}{\Phi_1} \frac{\Phi_{01}}{\Phi'_{01}}. \quad (7)$$

Аналогично можно найти выражение для определения Δa_2 :

$$\Delta a_2 = a_2 \frac{\Phi'_2 \Phi_{02}}{\Phi_2} \quad (8)$$

Подставляя значения Δa_1 и Δa_2 из (7) и (8) в (1), получим

$$A = A_{\max} - \left[a_1 \frac{\Phi'_1 \Phi_{01}}{\Phi_1} + a_2 \frac{\Phi'_2 \Phi_{02}}{\Phi_2} \right] \quad (9)$$

При линейной световой характеристике фотоэлемента [3, 4]

$$I = f(\Phi) \quad (10)$$

можно перейти от световых потоков к токам или напряжениям, т. е.

$$A = A_{\max} - \left[a_1 \frac{U'_1 U_{01}}{U_1} + a_2 \frac{U'_2 U_{02}}{U_2} \right] \quad (11)$$

Это выражение определяет алгоритм, по которому можно вычислить значение контролируемого размера A , по известным A_{\max} , a_1 и a_2 и напряжениям на нагрузке фотоприемника, измеренным в указанном выше порядке. Коэффициенты при a_1 и a_2 являются нормировочными коэффициентами, позволяющими учесть влияние таких дестабилизирующих факторов, как нестабильность мощности излучения лазера, нестабильность чувствительности ФЭУ и др.

Аналогично может быть найден алгоритм для определения угловых характеристик деталей сложной формы. Покажем это на примере определения непараллельности (перекоса) одной из сторон контролируемой детали относительно эталонного поля контура детали. На рис. 4 изображена часть теневой проекции детали, совмещенной с голограммами 1 и 2. Очевидно, разность площадей непокрытых зон голограмм можно определить как

$$S_2 - S_1 = b^2 \operatorname{tg} \varphi, \quad (12)$$

откуда

$$\varphi = \operatorname{arctg} (S_2 - S_1) / b^2 \quad (13)$$

или

$$\varphi = \operatorname{arctg} (a_3 - a_1) / 2b, \quad (14)$$

где $S_1 = [(a_1 + a_2) / 2] b$ — площадь первой голограммы, не перекрытая теневым изображением детали; $S_2 = [(a_2 + a_3) / 2] b$ — то же для второй голограммы; b — высота голограмм; a — ширина голограмм; a_1 ; a_2 ; a_3 — размеры оснований непокрытых участков голограмм.

Световой поток, проходящий через открытые голограммы, будет равен

$$\Phi_1 = E_1(t_1) a b k_1, \quad (15)$$

$$\Phi_2 = E_2(t_2) a b k_2. \quad (16)$$

Здесь и далее приняты те же обозначения, что и в выражениях (2) — (5), с индексацией, соответствующей каждой из голограмм.

Световой поток в контрольном канале в моменты измерения через открытые голограммы определится как:

$$\Phi_{01} = E_1(t_1) a_0 b c k_0; \quad (17)$$

$$\Phi_{02} = E_2(t_2) a_0 b c k_0. \quad (18)$$

Совмещая теневое изображение контролируемой детали с эталонным полем и освещая его коге-

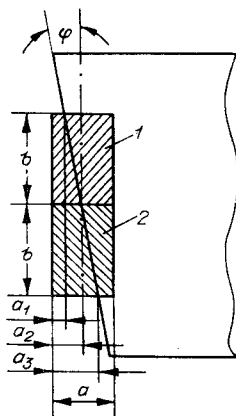


Рис. 4.

рентным излучением лазера, получим световой поток, прошедший через непорезанные области голограмм:

$$\Phi'_1 = E'_1(t'_1) [(a_1 + a_2)/2] b k_1; \quad (19)$$

$$\Phi'_2 = E'_2(t'_2) [(a_2 + a_3)/2] b k_2. \quad (20)$$

Световой поток в контрольном канале в моменты времени t'_1 и t'_2

$$\Phi'_{01} = E_{01}(t'_1) a_0 b_0 k_0; \quad (21)$$

$$\Phi'_{02} = E_{02}(t'_2) a_0 b_0 k_0. \quad (22)$$

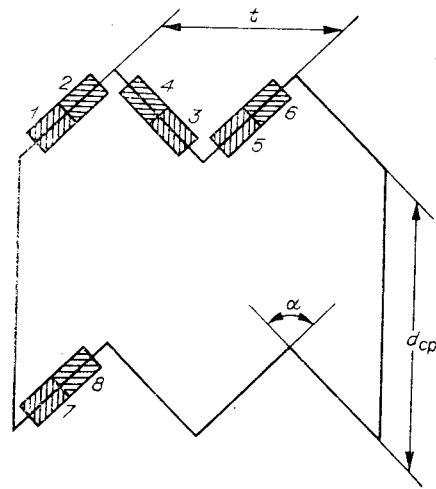


Рис. 5.

Решая совместно эти уравнения с (15)—(16), находим величину угла, характеризующего непараллельность контролируемой стороны относительно оси голограмм эталонного поля допусков:

$$\varphi = \pm \operatorname{arctg} \left(\frac{\Phi_{02}}{\Phi_2} \frac{\Phi'_2}{\Phi'_{02}} - \frac{\Phi_{01}}{\Phi_1} \frac{\Phi'_1}{\Phi'_{01}} \right) \frac{a}{b}. \quad (23)$$

Переходя к напряжениям, принимая световую характеристику фотомножителя линейной, получим

$$\varphi = \pm a \operatorname{ctg} \left(\frac{U_{02}}{U_2} \frac{U'_2}{U'_{02}} - \frac{U_{01}}{U_1} \frac{U'_1}{U'_{01}} \right) \frac{a}{b}. \quad (24)$$

Знак перед arctg определяет направление непараллельности (перекося) относительно оси голограмм.

Использование полученных результатов можно проиллюстрировать на примере составления алгоритмов для контроля параметров метрической резьбы, а именно, половины угла профиля $\alpha/2$, среднего диаметра $d_{ср}$ и шага резьбы t (рис. 5):

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \left\{ 60^\circ - \frac{a}{b} \left[\pm \operatorname{arctg} \left(\frac{U_{02} U'_2}{U_2 U'_{02}} - \frac{U_{01} U'_1}{U_1 U'_{01}} \right) \mp \operatorname{arctg} \left(\frac{U_{04} U'_4}{U_4 U'_{04}} - \frac{U_{03} U'_3}{U_3 U'_{03}} \right) \right] \right\}; \quad (25)$$

$$d_{ср} = d_{\max} - \frac{a}{2 \cos \alpha} \left[\left(\frac{U'_2 U_{02}}{U_{02} U_2} + \frac{U'_1 U_{01}}{U_{01} U_1} \right) + \left(\frac{U'_8 U_{08}}{U_{08} U_8} + \frac{U'_7 U_{07}}{U_{07} U_7} \right) \right]; \quad (26)$$

$$t = t_{\text{ном}} - \frac{a}{2 \cos \alpha} \left[\left(\frac{U'_2 U_{02}}{U_{02} U_2} + \frac{U'_1 U_{01}}{U_{01} U_1} \right) - \left(\frac{U'_6 U_{06}}{U_{06} U_6} + \frac{U'_5 U_{05}}{U_{05} U_5} \right) \right], \quad (27)$$

где нумерация напряжений нормирующих множителей соответствует номерам голограмм, участвующих в измерениях, а индексация аналогична обозначениям в выражениях (9), (11). Полученные алгоритмы можно легко реализовать, используя стандартное оборудование — аналого-цифровой преобразователь и ЭВМ. Для оценки погрешности предлагаемого способа контроля размеров деталей сложной формы были проведены измерения шага элемента прямоугольной резьбы на установке, собранной по схеме рис. 6.

Эталонное поле профиля резьбы было выполнено в виде отдельных голограмм размером $2 \times 0,13$ мм, симметрично расположенных по контуру на фотопластинке ЛОИ-2, как показано на рис. 5. В этом случае в выражении (27) $\cos \alpha = 1$ и алгоритм можно свести к виду

$$t = t_{\text{ном}} - a \left(\frac{U'_1 U_{01}}{U'_{01} U_1} - \frac{U'_2 U_{02}}{U'_{02} U_2} \right). \quad (28)$$

Эталонное поле и контролируемый элемент резьбы были аттестованы на универсальном измерительном микроскопе УИМ с погрешностью ± 2 мкм. В результате аттестации были получены параметры эталонного поля профиля резьбы a и $t_{\text{ном}}$, а также контролируемый параметр реального винта — шаг резьбы t . При проведении эксперимента совмещение контролируемого объекта с эталонным полем производилось вручную с визуализацией на экране (экран на схеме не показан). Последовательное считывание информации осуществлялось сканирующим устройством в виде диска с отверстиями под углом $22^\circ 30''$ и скоростью вращения, равной 50 об/мин. Световые пучки, прошедшие поочередно по контрольному и измерительному каналам, попадали на фотокатод фотоумножителя ФЭУ-55 и через линейный усилитель поступали на стандартный аналого-цифровой преобразователь типа Ф722/2 с временем преобразования, равным 1 мс. Результаты измерений выводились на цифровое печатающее устройство. Полученные данные приведены в таблице.

№ п/п	Шаг, измеренный на УИМ, мм	Шаг, измеренный на голографической установке, мм	Расхождение результатов, мм
1	5,006	5,003	+0,003
2	5,010	5,005	+0,005
3	5,004	5,008	-0,004
4	5,004	5,007	-0,003
5	5,007	5,001	+0,006
6	5,009	5,004	+0,005

Полученные данные приведены в таблице.

Таким образом, использование возможностей голографической техники позволяет создать быстродействующие автоматические системы контроля деталей сложной формы с разделением получаемой информации о контролируемых параметрах детали по отдельным каналам для ее последующей обработки на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Ф. Тищенко. Зубчатые передачи часовых механизмов. М., Машгиз, 1963, с. 195—196.
2. Ю. Г. Городецкий. Конструкции, расчет и эксплуатация измерительных инструментов и приборов. М., «Машиностроение», 1971, с. 159—168.
3. И. И. Анисимова, Б. М. Глуховский. Фотоэлектронные умножители. М., «Сов. радио», 1974. 59 с.
4. Н. А. Соболева, А. Е. Меламид. Фотоэлектронные приборы. М., «Высшая школа», 1974. 223 с.

Поступила в редакцию 28 ноября 1975 г.

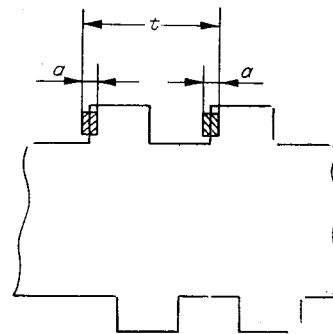


Рис. 6.