

очень слабое практически линейное увеличение расстояния между максимумами основных лепестков. Контраст контура не зависит от ширины спектра излучения. Имеет место слияние боковых лепестков контура в «крылья», интенсивность которых не превышает уровня лепестков когерентного контура.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие рекомендации по выбору параметров бинарного оконтуривающего фильтра для получения качественных контурных изображений в свете протяженного полихроматического источника: отношение размера центрального непрозрачного экрана фильтра к его апертуре должно лежать в диапазоне от 0,16 до 0,35 (оптимальным является отношение, равное 0,2). На источник света накладывается единственное принципиальное ограничение: его размер, приведенный к плоскости фильтра, не должен превышать ширины непрозрачного экрана.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют о перспективности применения протяженных источников (ламп накаливания) в схемах локальной обработки (оконтуривания) объектов.

Автор признателен В. Б. Луппу за помощь при проведении экспериментов, Б. Е. Кривенкову и Ю. В. Чугую за конструктивное обсуждение результатов работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптическая обработка информации/Под ред. Д. Кейсесента.— М.: Мир, 1980.
2. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.
3. Крылов К. И., Прокопенко В. Г., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении.— Л.: Машиностроение, 1978.
4. Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В. Качественное оконтуривание двумерных теневых изображений // Автометрия.— 1979.— № 1.
5. Birch K. G. A spatial frequency filter to remove zero frequency // Opt. Acta.— 1968.— 15, N 2.— P. 113.
6. Birch K. G. An analysis of the generalized binary filter // Opt. Acta.— 1970.— 17, N 1.— P. 43.
7. Gupta S. V., Sen D. Dark-field (diffrimoscopic) images of periodic objects // Opt. Acta.— 1972.— 19, N 2.— P. 125.
8. Gupta S. V., Sen D. Diffrimoscope image formation under partially coherent illumination (straight edge) // Opt. Acta.— 1971.— 18, N 7.— P. 507.
9. Gupta S. V., Sen D. Diffrimoscope image formation under partially coherent illumination (slits and opaque strips) // Ibid.— N 10.— P. 779.
10. Вертопрахов В. В., Луппу В. Б., Чугуй Ю. В. Оконтуривание бинарных объектов в белом свете // VI Всесоюз. школа-семинар по оптической обработке информации: Тез. докл.— Фрунзе: ФПИ, 1986.— Ч. 1.
11. Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. Интегралы и ряды. Элементарные функции.— М.: Наука, 1981.
12. Young M. Linewidth measurement by high-pass filtering: a new look // Appl. Opt.— 1983.— 22, N 13.— P. 2022.

*Поступила в редакцию 12 апреля 1989 г.*

УДК 687.7 : 621.3.019.3 : 681.3

**Е. Н. БОГОМОЛОВ, Н. В. ВАСИЛЕЦ, В. В. ВЕРТОПРАХОВ,  
Ю. В. ЧУГУЙ, С. Ф. ШУЛЬЖЕНКО, В. П. ЮНОШЕВ, И. В. ЯРОСЛАВЦЕВ**  
(Новосибирск)

### **ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩИХСЯ ИЗДЕЛИЙ «КОНТУР-3»**

Автоматизация производства массовой продукции с одновременным повышением ее качества и производительности труда — одна из актуальных научно-технических задач. Наиболее узким местом ее являются сбо-

рочные операции, которые предъявляют, как правило, повышенные требования к точности геометрических размеров комплектующих изделий для предотвращения выхода из строя сборочных автоматов или выпуска бракованной продукции. Эффективный путь решения задачи — 100 %-й контроль геометрических параметров изделий, в частности линейных размеров и расположения поверхностей элементов этих изделий. В последнем случае часто возникает необходимость в измерении таких пространственных характеристик, как отклонения от соосности и перпендикулярности одной части изделия относительно другой (базовой).

Перспективным для контроля представляется использование методов фурье-оптики [4, 2], основанных на корреляционном сравнении во времени движущихся изделий со специального вида образцовыми изображениями, представленными на транспарантах [3, 4]. В этих методах оптимально сочетаются возможности оптики и электронной техники. В 1984 г. авторами создан такого рода оптико-электронный измеритель линейных размеров изделий (в одной проекции) типа тел вращения [5]. Позднее этот метод был распространен на случай контроля пространственных характеристик изделий путем введения дополнительного ортогонального канала. На его основе в 1985 г. Институтом автоматизации и электрометрии совместно с СКБ НИИ СО АН СССР разработан и создан двухканальный оптический измеритель «Контур-3». Ниже описан принцип действия измерителя, рассмотрено влияние дефокусировки изделия на результаты измерения, представлен опытный образец измерителя «Контур-3» и приведены его основные технические характеристики.

**Принцип действия измерителя** основан на корреляционном методе сравнения изображения изделия с образцовыми изображениями в двух ортогональных проекциях. В качестве примера на рис. 1, а схематично показано контролируемое изделие типа тела вращения, состоящее из цилиндрических участков с диаметрами  $D_1, D_2$  и высотами  $H_1, H_2$ . Эти участки в общем случае не являются идеальными цилиндрами, и их взаимное расположение до некоторой степени может быть произвольным. В этой связи у изделия можно контролировать несколько диаметральных сечений на уровнях  $y_1, y_2$  для первого участка ( $m = 1$ ) и  $y_3, y_4$  — для второго ( $m = 2, m$  — номер участка); кроме того, контролируются высоты образующих каждого участка, отклонение от соосности ( $l_2$ ) и отклонения от перпендикулярности ( $w_1, w_2$ ) торцов участков.

Для пояснения принципа действия измерителя обратимся к рис. 2, на котором представлена схема его оптического блока. Здесь 1, 13 — галогенные лампы накаливания; 2, 14 — конденсоры; 3, 15 — диафрагмы; 4, 16 — коллимирующие линзы; 5, 8, 17, 20 — объективы; 6, 18 — одномерные фильтры пространственных частот; 7, 19 — зеркала; 9, 21 — маски; 10, 22 — транспаранты (см. рис. 1, б); 11, 23 — коллективные линзы; 12, 24 — фотоприемники, состоящие из фотодиодов и усилителей-формирователей; 25 — логическая схема ИЛИ.

Оптический блок состоит из двух осветителей (элементы 1—4 и 13—16) и коррелятора изображений в двухканальном исполнении (элементы 5—12 и 17—24). При этом элементы 1—12 и 13—24 составляют соответственно первый и второй каналы измерителя. Область пересечения световых пучков, формируемых осветителями каналов (элементы 1—4 и 13—16), образует измерительную зону, в которой движется контролируемое изделие 26 со скоростью  $v$  вдоль оси  $x$ . Для определенности рассмотрим преобразование светового поля в первом канале. При вхождении объекта в измерительную зону он модулирует световой пучок осветителя, который благодаря диафрагме 3 является частично когерентным. Полученное световое распределение далее объективами 5, 8 и высокочастотным фильтром 6, образующими систему пространственно-частотной одномерной фильтрации, подвергается операции оконтуривания, при которой выделяются вертикальные (и близкие к этому направлению) границы изображения изделия, а горизонтальные — подавляются. Контурное изображение изделия (см. рис. 1, а) состоит из четырех узких светящих-

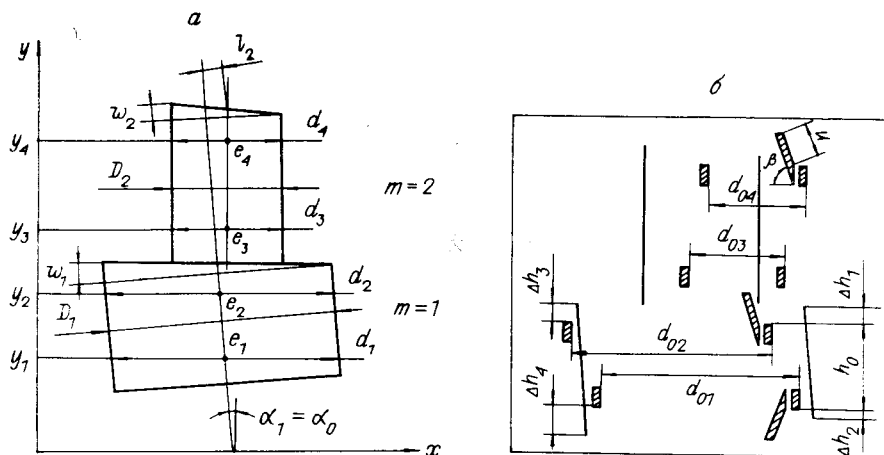


Рис. 1

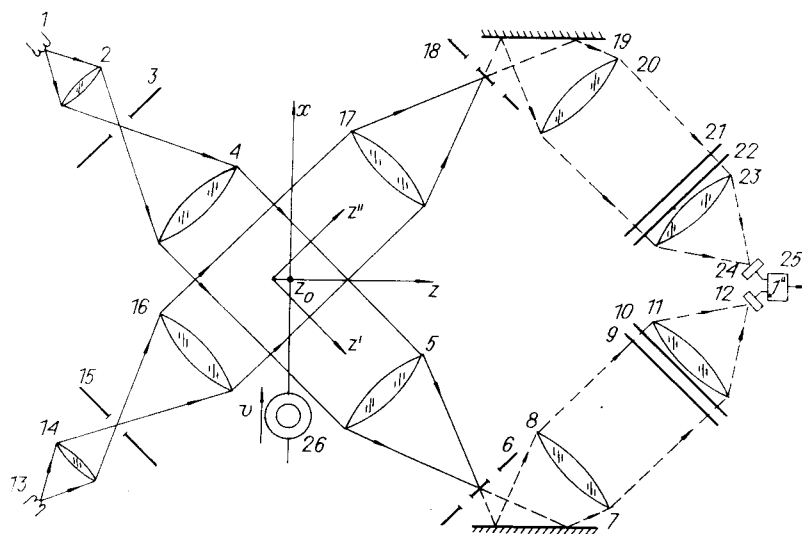


Рис. 2

ся полос (соответствующих образующим двух цилиндрических участков), показанных на рис. 1, б жирными линиями. Это изображение далее модулируется образцовым изображением, представленным на транспаранте 10 в виде лабра вертикальных и наклонных прозрачных штрихов, причем вертикальные штрихи задают опорные диаметры  $d_{01}$ ,  $d_{02}$ ,  $d_{03}$  и  $d_{04}$  (см. рис. 1, б) и служат для измерения диаметров изделия в сечениях  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  и  $d_4$ . Наклонные штрихи используются для измерения высот цилиндрических участков изделия.

При движении изделия его контурное изображение перемещается в направлении  $x$  и в определенные моменты пересекает штрихи транспаранта, в результате чего проходящий через него световой поток (при интегрировании коллективной линзой 11 и фотоприемником 12) имеет вид последовательности импульсов, соответствующей операции корреляции по оси  $x$  контурного изображения изделия с образцовым. Полученный сигнал далее обрабатывается электронным блоком (выполненным на основе стандартной микроЭВМ [5]) с целью определения геометрических параметров изделия, соответствующих его продольному сечению, задаваемому оптической осью первого канала. Аналогично с помощью второго канала определяются параметры изделия в его ортогональном про-

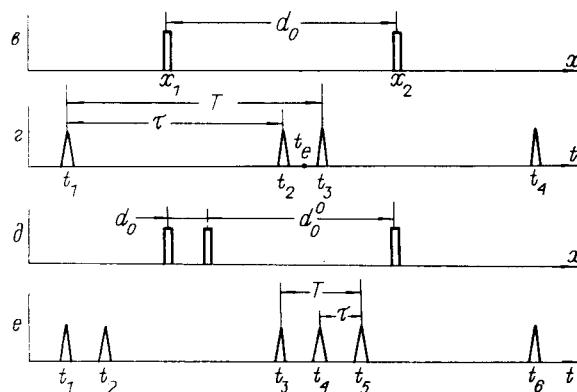


Рис. 3

ристики изделия.

Рассмотрим математическую сторону метода на примере контроля диаметра  $d$  изделия (в одном канале). На рис. 3 показаны распределение интенсивности света в теновом изображении движущегося изделия ( $a$ ) и результат его оконтуривания ( $b$ ), который приближенно можно описать функцией

$$f(x - vt) = \delta(x - e - vt - d/2) + \delta(x - e - vt + d/2), \quad (1)$$

где  $\delta(\cdot)$  — функция Дирака;  $e$  — координата центра сечения изображения. Полученное изображение сравнивается с образцовым в виде двух штрихов, пропускание которых приближенно можно описать выражением

$$q(x) = \delta(x - x_1) + \delta(x - x_2). \quad (2)$$

Здесь  $x_1, x_2$  — координаты прозрачных штрихов с расстоянием между ними  $d_0 = x_2 - x_1$ . В результате корреляции сигналов (1) и (2) с выхода фотоприемника получаем (рис. 3,  $z$ )

$$g(t) = \delta(t - t_1) + \delta(t - t_2) + \delta(t - t_3) + \delta(t - t_4), \quad (3)$$

где  $t_1 = (x_1 - e - d/2)/v$ ,  $t_2 = (x_2 - e - d/2)/v$ ,  $t_3 = (x_1 - e + d/2)/v$ ,  $t_4 = (x_2 - e + d/2)/v$ .

Путем заполнения временных интервалов метками высокой частоты  $\nu$  и подсчета их числа между максимумами корреляционной функции осуществляется преобразование положения центров импульсов  $t_1, t_2, t_3, t_4$  в двоичные коды. Исходя из них, в электронном блоке определяются длительности опорного  $\tau = t_2 - t_1$  и измерительного  $T = t_3 - t_1$  интервалов и далее вычисляется размер изделия по формуле  $d = d_0 T / \tau$ .

Очевидно, что при постоянных за время измерения параметрах  $\nu$  и  $\nu$  конечный результат не зависит от их значений. Если же они меняются во времени, то благодаря наличию опорного размера  $d_0$  влияние их на точность измерений заметно ослабляется.

Для определения пространственных характеристик изделия необходимо также знать положение  $e$  оси (центра сечения) изделия относительно штрихов транспаранта, которое пропорционально положению середины интервала между вторым и третьим импульсами:  $t_e = (t_2 + t_3)/2$  (см. рис. 3,  $z$ ). Очевидно, что параметр  $e = c - d_0 t_e / \tau$ , где  $c = (x_1 + x_2)/2$  — координата центра между штрихами.

С целью контроля размеров изделия одновременно в нескольких сечениях  $y_1, \dots, y_4$  (см. рис. 1,  $a$ ) за время его одного прохода по измерительной зоне необходимо, чтобы корреляционные функции этих сечений не накладывались друг на друга. Это достигается, как показано в [4], соответствующим смещением групп штрихов на транспаранте (см. рис. 1,  $b$ ).

В каждом сечении могут быть введены свои опорные расстояния  $d_{0i}$ . В этом случае размер изделия  $d_i$  в  $i$ -м сечении ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) и

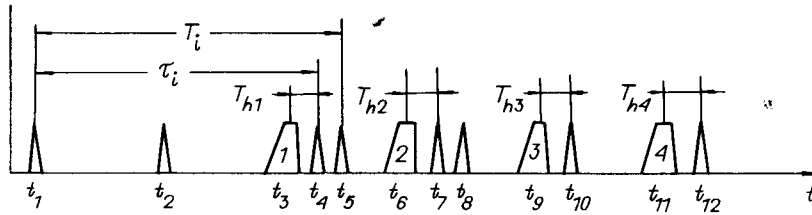


Рис. 4

положение его центра  $e_i$  определяются по формулам  $d_i = d_0 T_i / \tau_i$ ,  $e_i = c_i - d_0 t_{ei} \tau_i$ . (4)

В качестве диаметра  $D_m$  цилиндрического участка в зависимости от решаемой измерительной задачи может выбираться либо усредненное значение  $d_i$  по всем сечениям в пределах участка, либо максимальное или минимальное значение.

**Определение проекций пространственных характеристик изделия.**

Находим математические выражения проекций пространственных характеристик: ориентации, высот, отклонения от соосности и перпендикулярности.

*Ориентация участка изделия* характеризуется углом  $\alpha_m$  между его осью и осью ординат  $y$  транспаранта. Под ориентацией изделия понимаем положение  $\alpha_0$  базовой оси изделия, которой может служить либо ось одного из участков, как в нашем случае:  $\alpha_0 = \alpha_1$  (см. рис. 1, а), либо общая ось изделия (все дальнейшие выкладки справедливы для обоих случаев).

Ориентация участка изделия вычисляется по взаимным смещениям центров сечений с номерами  $i, j$ , принадлежащих данному участку  $m$ :

$$\alpha_m = \text{arctg} [e_j - e_i] / (y_j - y_i). \quad (5)$$

*Отклонение от соосности* [6] цилиндрического  $m$ -го участка относительно базовой оси вызывает, во-первых, взаимный сдвиг центров сечений  $(e_j - e_i)$ , где  $i$ -е сечение принадлежит базовому участку,  $j$ -е сечение — участку с номером  $m$ , и, во-вторых, наклон оси этого участка относительно базовой. Таким образом, величина отклонения от соосности определяется как максимальное значение величины (см. рис. 1, а)

$$l_m = [(e_j - e_i) + (\bar{y}_m - y_j) \text{tg } \alpha_m - (\bar{y}_m - y_i) \text{tg } \alpha_0] \cos \alpha_0 \quad (6)$$

при двух крайних значениях координаты  $\bar{y}_m$  торцов участка: верхнего и нижнего. В выражении (6) второй и третий члены учитывают превышение уровня торцов  $\bar{y}_m$  над уровнем  $j$ -го и  $i$ -го сечений. Общий множитель  $\cos \alpha_0$  отражает наклон изделия в измерительной зоне.

*Измерение высот изделия* осуществляется путем нанесения на транспарант наклонных прозрачных штрихов, например, как показано на рис. 1, б. Эти штрихи расположены на уровне торцов цилиндрических участков под углом  $\beta$  к направлению движения изделия на расстоянии  $a$  от диаметральных штрихов. Длина наклонного штриха  $u$  превышает сумму полей допусков высот и отклонений от перпендикулярности.

Рассмотрим измерение высоты одного участка изделия ( $m = 1$ ). При движении его контурного изображения (на рис. 1, б показано двумя жирными линиями) по такому транспаранту с фотодиода снимается сигнал, форма которого приведена на рис. 4. Наклонным штрихам соответствуют импульсы, помеченные цифрами 1—4, их длительность прямо пропорциональна превышению  $\Delta h$  высоты участка изделия над расстоянием между штрихами по вертикали  $h_0$  (см. рис. 1, б). Эти превышения определяются через временные интервалы между центрами импульсов:  $T_{h1} = t_4 - t_3$ ,  $T_{h2} = t_7 - t_6$ ,  $T_{h3} = t_{10} - t_9$ ,  $T_{h4} = t_{12} - t_{11}$  (см. рис. 4), величины которых пропорциональны половинам  $\Delta h$ . Таким образом,

$$\Delta h_1 = 2Qd_0 T_{h1} / \tau_i;$$

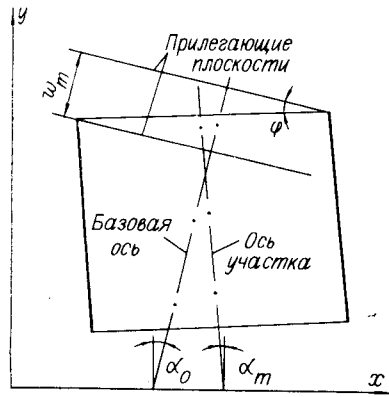


Рис. 5

$$\begin{aligned} \Delta h_3 &= 2Qd_{0i}T_{h3}/\tau_i; \\ \Delta h_2 &= 2Qd_{0j}T_{h2}/\tau_j; \\ \Delta h_4 &= 2Qd_{0j}T_{h4}/\tau_j, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\tau_i, \tau_j$  — опорные временные интервалы  $i$ -го и  $j$ -го сечений;  $Q \equiv 1/(\text{tg } \alpha_m + \text{ctg } \beta)$ . Высота цилиндрического участка вдоль его оси соответственно равна

$$H_m = [h_0 + (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4)/2]/\cos \alpha_m. \quad (8)$$

Высота всего изделия может определяться в зависимости от измерительной задачи либо суммированием высот его

участков, либо по нижнему и верхнему торцам изделия.

Отклонение от перпендикулярности торцов [6] цилиндрических участков относительно базовой оси определяется как расстояние между прилегающими к торцу плоскостями, перпендикулярными этой оси (рис. 5). Отклонение от перпендикулярности приводит к пропорциональному смещению «высотных» импульсов (см. рис. 4), по которым и находится величина отклонения от перпендикулярности  $w_m$ .

Путем несложных преобразований можно выразить указанное отклонение следующим образом:

$$w_m = \left| D_m \frac{\sin \alpha_0}{\cos \alpha_m} - [\Delta h_1 - \Delta h_3]_m (1 + \text{tg } \alpha_m \text{tg } \alpha_0) \cos \alpha_0 \right|, \quad (9)$$

где  $[\cdot]_m$  обозначает, что  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_3$  относятся к участку с номером  $m$ ; их величины определяются выражениями (7).

**Восстановление пространственных характеристик** производится на основе ортогональных проекций изделия ( $x', y$ ) и ( $x'', y$ ), измеряемых соответственно в двух каналах измерителя. Если в каждом из каналов формируются свои корреляционные функции  $g'(t')$  и  $g''(t'')$  (рис. 6, а), то при их логическом суммировании на элементе 25 (см. рис. 2) получаем общий корреляционный сигнал (рис. 6, б):

$$g(t) = g'(t - t_I) + g''(t - t_{II}), \quad (10)$$

где  $t_I = -z_0/v$ ,  $t_{II} = z_0/v$  — моменты времени пересечения осью изделия оптических осей  $z'$  и  $z''$  каждого из каналов (см. рис. 2). Смещение компонент  $g'$  и  $g''$  друг относительно друга составляет величину  $\Delta t = t_{II} - t_I = 2z_0/v$ . Заметим, что, измеряя взаимное смещение импульсов между каналами (см. рис. 6, б):  $T = \Delta t + t_e'' - t_e'$ , можно легко определить положение траектории контролируемого изделия:

$$z_0 = v(T - t_e'' + t_e')/2. \quad (11)$$

В зависимости от указанного смещения и траектории изделия импульсы каждого из каналов могут быть либо полностью разнесены во времени (как показано на рис. 6, б), либо вкладываться друг в друга.

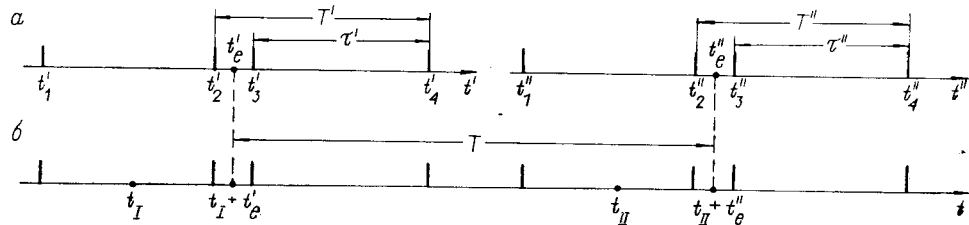


Рис. 6

Для нормальной работы измерителя необходимо, чтобы измерительные импульсы каналов не совпадали друг с другом. Это достигается путем установления величины допускаемой дефокусировки изделия в измерительной зоне и соответствующим расположением штрихов на транспарантах.

На основе априорной информации о типоразмерах изделия и конфигурации транспарантов из корреляционного сигнала (10) (см. рис. 6, б) выделяются импульсы, принадлежащие различным каналам и сечениям изделия. Измерение временных интервалов между соответствующими импульсами позволяет определять проекции пространственных характеристик изделия.

Таким образом, отклонение от соосности вычисляется по формуле

$$l_m = \sqrt{l_m'^2 + l_m''^2}, \quad (12)$$

где  $l_m'$  и  $l_m''$  — проекции несоосности в двух ортогональных направлениях, определяемые выражением (6). Далее все переменные со штрихами относятся к проекциям, а переменные без штрихов обозначают пространственные характеристики. В частности, ориентации осей находятся из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_m' + \operatorname{tg}^2 \alpha_m''}, \quad (13)$$

где величины  $\alpha_m'$  и  $\alpha_m''$  определяются (5).

Отклонения от перпендикулярности торцов цилиндрических участков (при условии малости этих отклонений по сравнению с диаметрами цилиндров) находятся по формуле

$$w_m = \sqrt{w_m'^2 + w_m''^2}, \quad (14)$$

где  $w_m'$  и  $w_m''$  описываются выражением (9).

Измерение диаметров участков и их высот в двух проекциях позволяет найти их усредненные значения

$$D_m = (D_m' + D_m'')/2; \quad H_m = (H_m' + H_m'')/2. \quad (15)$$

**Особенностью реализации данного метода измерений параметров изделия в двух ортогональных проекциях является то, что при самосканировании изделием своего изображения неизбежно происходит его дефокусировка в процессе формирования корреляционной функции. Это обстоятельство вызывает появление как систематических (для линейных размеров), так и случайных (для пространственных характеристик) погрешностей измерений. С целью исключения (снижения) этих погрешностей приведем анализ процесса формирования корреляционной функции.**

При движении изделия по измерительной зоне под углом  $45^\circ$  к оптической оси канала (см. рис. 2) за время между появлением первого и третьего импульсов (см. рис. 3, з) оно проходит расстояние, равное своему размеру  $d$ , и на такую же величину дефокусируется контур изделия в плоскости транспаранта. При больших диаметрах изделия это приводит к заметному уменьшению амплитуды крайних импульсов. С целью снижения влияния этого эффекта измерительную информацию об изделии необходимо регистрировать при малом перемещении изделия, когда величина дефокусировки не будет превышать некоторой наперед заданной величины. Это достигается введением на транспаранте дополнительного третьего штриха в сечении. Функция пропускания такого транспаранта приведена на рис. 3, д, а корреляционная функция — на рис. 3, е. В этом случае появляется еще одно опорное расстояние  $d_0^0$  и для измерительных целей обрабатываются центральные импульсы корреляционной функции:  $T = t_5 - t_3$ ,  $\tau = t_5 - t_4$ . Измерительные интервалы формируются при перемещении изделия на расстояние  $(d - d_0^0) \ll d$ , т. е. при существенно меньшей дефокусировке контурного изображения. При этом

крайние импульсы  $(t_1, t_2, t_3)$ , формируемые при большой дефокусировке  $\sim d$  и имеющие малую амплитуду, не используются. Таким образом, размер изделия в сечении находится по формуле

$$d_i = d_0^0 + d_{0i}T_i/\tau_i. \quad (16)$$

$$d'(z') = d(0) + 2\varepsilon'z'; \quad d''(z'') = d(0) + 2\varepsilon''z'', \quad (17)$$

где  $d(0)$  — реальный диаметр изделия; величина  $2\varepsilon$  имеет смысл коэффициента дефокусировки, который в общем случае зависит от контролируемого диаметра в сечении в силу эффектов объемности на цилиндрическом объекте.

В соответствии с этим опорные и измерительные интервалы также зависят от коэффициента дефокусировки и реальной траектории изделия. Если коэффициент дефокусировки поддается калибровке и остается постоянным во времени, то траектория изделия в силу технологических разбросов параметров устройства подачи изделий не является стабильной во времени и изменяется от изделия к изделию. Это обстоятельство требует измерения положения траектории согласно выражению (11). Как показывают расчеты, для устранения погрешностей измерения, вызванных дефокусировкой контурного изображения, измерение диаметров в двух каналах необходимо проводить по формулам

$$\begin{aligned} d' &= d_0^0 + \bar{d}_0' T'/\tau' - 2\varepsilon' \bar{d}_0' (T'/\tau' - \bar{z}_0'); \\ d'' &= d_0^0 + \bar{d}_0'' T''/\tau'' - 2\varepsilon'' \bar{d}_0'' (T''/\tau'' - \bar{z}_0''), \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\bar{d}_0' = d_0^0/(1 + \varepsilon')$ ,  $\bar{d}_0'' = d_0^0/(1 - \varepsilon'')$  — «искаженные» опорные расстояния, позволяющие компенсировать систематические погрешности при измерении диаметров;  $\bar{z}_0'$ ,  $\bar{z}_0''$  — приведенные константы, зависящие от параметров оптической схемы, транспарантов и номинальной траектории контролируемых деталей. Третий член в (18) компенсирует возможную случайную погрешность измерения диаметров сечений. Все константы  $d_0^0$ ,  $\bar{d}_0$  и  $\varepsilon$  по каждому каналу определяются при калибровке измерителя.

Кроме того, можно показать, что величины сдвигов центров сечений описываются выражениями

$$\begin{aligned} e' &= c' - \bar{d}_0'(1 + \varepsilon')t_e'/\tau' + \varepsilon'\bar{d}_0'T'/2\tau'; \\ e'' &= c'' - \bar{d}_0''(1 - \varepsilon'')t_e''/\tau'' + \varepsilon''\bar{d}_0''T''/2\tau'', \end{aligned} \quad (19)$$

здесь  $c' = [x_1' + x_2' + \varepsilon'(x_2' + x_3')]/2(1 + \varepsilon')$ ;  $c'' = [x_1'' + x_2'' + \varepsilon''(x_2'' + x_3'')]/2(1 - \varepsilon'')$ ;  $x_1'$ ,  $x_2'$ ,  $x_3'$  — координаты штрихов на транспаранте первого канала,  $x_1''$ ,  $x_2''$ ,  $x_3''$  — второго канала. С целью упрощения записи в выражениях (17) — (19) индекс  $i$  номера сечения опущен.

На основании измеренных положений центров (19) вычисляются пространственные характеристики изделий в соответствии с формулами (5) — (9).

Анализ выражений (19) показывает, что они корректируют искажения корреляционных функций  $g'$  и  $g''$ , вызванные дефокусировкой изображения изделия в процессе его движения по измерительной позиции. Эти искажения пропорциональны, во-первых, измеряемому диаметрам и, во-вторых, коэффициентам дефокусировки. Игнорирование этого обстоятельства (т. е. без осуществления указанных корректировок) может при-



**Измеритель конструктивно** состоит из оптико-механического и электронного блоков. Оптико-механический блок построен по схеме, приведенной на рис. 2. Осветители выполнены на базе малогабаритной галогенной лампы КГМ 12 × 20. Объективы прямого и обратного преобразований Фурье имеют фокусное расстояние 90 мм и световой диаметр 30 мм. Одномерный фильтр пространственных частот выполнен в виде двух прозрачных прямоугольников, симметрично расположенных относительно центра фильтра. Вопросы выбора параметров диафрагмы 3 (15) и фильтра 6 (18) для получения качественного контурного изображения изделия в свете галогенной лампы рассмотрены в [7].

Транспаранты представляют собой прозрачные узкие вертикальные и наклонные штрихи, нанесенные на непрозрачную подложку. Совокупность таких штрихов задает эталонное изображение, с которым происходит сравнение контролируемых изделий. На один такой транспарант (в каждом канале) может быть записано множество эталонных изображений для различных типов изделий. Для выделения определенного изображения на транспаранте служит маска, состоящая из набора отверстий в тонкой металлической пластине [8]. Путем смены маски на транспаранте открываются соответствующие штрихи, необходимые для измерения параметров другого типа изделий.

Технология изготовления транспарантов должна обеспечивать геометрические размеры штрихов с погрешностью не более  $\pm 5$  мкм. Для этой цели может применяться стандартная фотолитографическая техника или лазерные построители изображений [9].

В корпусе оптико-механического блока расположены два усилителя-формирователя, осуществляющие усиление сигналов фотоприемников и преобразование к уровням ТТЛ. Их основные характеристики: отношение сигнал/шум на выходе не менее 12, полоса частот от 100 Гц до 1 МГц, потребляемая мощность 1 Вт. С выхода формирователя снимается корреляционный сигнал в виде последовательности прямоугольных импульсов, во временных интервалах между которыми заключена информация о контролируемых и эталонных размерах.

Электронный блок, построенный на базе микроЭВМ «Электроника 60М», включает в себя процессор М2 и унифицированные узлы: последовательный интерфейс для связи с дисплеем; оперативное запоминающее устройство 28 Кслов с автономной регенерацией; постоянное запоминающее устройство 2 × 256 слов, предназначенное для хранения программы загрузчика; адаптер связи с цветным монитором; интерфейс для согласования канала ЭВМ и печатающего устройства DZM-180 в режиме прерывания канала ЭВМ; устройство параллельного обмена И1. Кроме того, в этот блок входит оригинальное устройство — преобразователь «время — код», предназначенный для измерения временных интервалов между измерительными импульсами и преобразования их в 16-разрядный двоичный код. Измерение интервалов осуществляется в диапазоне 0,2 мкс — 160 мс. Управление преобразователем «время — код» и передача данных из него в ЭВМ происходят через устройство И1.

**Работа измерителя** осуществляется в двух режимах: измерения и калибровки. В режиме измерения по измерительной позиции движется контролируемое изделие, при этом в оптическом блоке формируется корреляционный сигнал, поступающий на преобразователь «время — код». В нем временные интервалы между импульсами заполняются метками высокой частоты, подсчитывается их число между первым и последующими импульсами. Эти числа в двоичном коде через устройство И1 последовательно считываются в ОЗУ электронного блока. Массив чисел обрабатывается управляющей программой с целью вычисления геометрических параметров контролируемого изделия, сравнения полученных параметров с заранее заданными полями допусков и выдачи сигнала раз-

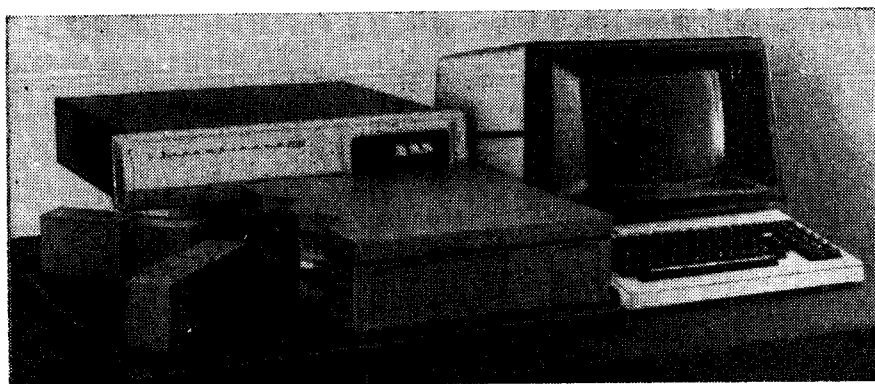


Рис. 7.

браковки «годен — брак» через устройство И1 на исполнительное устройство разбраковки изделий.

В режиме калибровки определяются константы по обоим каналам  $d_{0i}^0$ ,  $\bar{d}_0$ ,  $\bar{z}_0$ ,  $\epsilon_i$ , необходимые для вычисления параметров изделия в режиме измерения. Калибровка осуществляется путем многократного прогона по измерительной позиции эталонного изделия с последующим усреднением для уменьшения влияния случайной составляющей погрешности. Усредненные значения констант калибровки запоминаются в ОЗУ и выводятся на экран дисплея. После этого измеритель готов к работе в режиме измерения. Погрешность аттестации эталонных изделий не должна превышать следующих величин: по диаметрам  $\pm 1$  мкм; по высотам  $\pm 4$  мкм; по отклонению от соосности  $\pm 2$  мкм; по отклонению торцов от перпендикулярности к оси  $\pm 4$  мкм на длине 20 мм. Калибровка производится после каждого включения измерителя и при переходе к другому типу изделия.

Внешний вид измерителя «Контур-3» приведен на рис. 7. Прибор обладает широкими функциональными возможностями (измерение, статистическая обработка, отображение и документирование результатов измерений; работа в составе конвейерных и роторно-конвейерных линий и выдача управляющих сигналов на исполнительное устройство разбраковки деталей; формирование банка данных по качеству продукции в составе АСУ ТП).

Дополняя измеритель механизмами подачи изделий, в качестве которых могут выступать как существующие, так и вновь разрабатываемые (с учетом конкретной технологии производства изделий), можно создавать контрольно-измерительные автоматы широкого назначения. Механизм подачи изделий должен удовлетворять следующим требованиям: скорость подачи 0,1—0,3 м/с; кратковременная нестабильность скорости не более 0,5 м/с<sup>2</sup>; биения перпендикулярно направлению движения  $\pm 0,1$  мм; должен также обеспечиваться режим многократного прогона по измерительной позиции эталонного изделия.

В заключение приведем технические характеристики измерителя «Контур-3»: производительность измерения и контроля не менее 1 шт./с; рабочее поле измерения 20 × 20 мм; основная погрешность измерения (с вероятностью 0,95): диаметров в двух проекциях 10 мкм, высот 40 мкм, отклонений от соосности 20 мкм, от перпендикулярности 40 мкм на длине 20 мм; число одновременно контролируемых параметров не менее 5.

Измеритель может эффективно использоваться в крупносерийном и массовом производствах для 100 % размерного контроля изделий типа ступенчатых валиков. В частности, на базе прибора «Контур-3» разработан и создан автомат контроля и разбраковки линейных и пространственных характеристик изоляторов электролитических конденсаторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьева Т. Б., Бычков Р. М., Коронкевич В. П. и др. Применение методов когерентной оптики для контроля геометрических параметров изделий // Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Всесоюз. конф.— Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
2. Богомолов Е. Н., Ведерников В. М., Вертопрахов В. В. и др. Оптико-электронная система измерения размеров движущихся объектов на основе рассеяния световых волн // Автометрия.— 1981.— № 1.
3. Богомолов Е. Н., Вертопрахов В. В., Чугуй Ю. В., Юношев В. П. Быстродействующее оптическое контрольно-измерительное устройство // Измер. техника.— 1985.— № 11.
4. А. с. 1185080 СССР. Устройство для измерения размеров изделий/Е. Н. Богомолов, В. В. Вертопрахов, С. В. Михляев и др.— Заявл. 30.09.83; Оpubл. 15.06.85, Бюл. № 38.
5. Богомолов Е. Н., Василенко Ю. Г., Василец Н. В. и др. Высокопроизводительный оптический измеритель размеров «Контур-2» // Автометрия.— 1987.— № 3.
6. ГОСТ 24642—81(СТ СЭВ 301—76). Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения.— Введ. 01.07.81.— М.: Изд-во стандартов, 1984.
7. Вертопрахов В. В. Оконтуривание бинарных объектов в частично когерентном полихроматическом свете // Автометрия.— 1989.— № 5.
8. А. с. 1416866 СССР. Устройство для измерения размеров изделий/В. В. Вертопрахов, Ю. В. Чугуй.— Заявл. 25.08.86; Оpubл. 15.04.88, Бюл. № 30.
9. Спектор Б. И., Твердохлеб П. Е., Трубецкой А. В., Щербаченко А. М. Лазерная запись высокоинформативных изображений // Автометрия.— 1985.— № 6.

*Поступила в редакцию 20 апреля 1989 г.*

УДК 681.17.18 : 681.32 : 658.562

**Е. Н. БОГОМОЛОВ, Н. В. ВАСИЛЕЦ, Б. Е. КРИВЕНКОВ, Ю. В. ЧУГУЙ,  
Л. М. ШУЛЬЖЕНКО, В. П. ЮНОШЕВ, И. В. ЯРОСЛАВЦЕВ**

*(Новосибирск)*

### **ФОТОДИОДНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ РАЗМЕРОВ «СЕНСОР»**

Современное приборостроение испытывает острую потребность в высокопроизводительных системах бесконтактного контроля геометрических параметров промышленных изделий [1]. Такие системы должны обладать большой точностью (погрешность единицы микрометров и менее) и быстродействием (сотни измерений в секунду), высокими пространственным разрешением и надежностью, достаточным измерительным объемом. Удовлетворить этим, зачастую противоречивым, требованиям удается при использовании оптико-электронных методов измерений, в частности на основе интегральных многоэлементных фотоприемников — фотодиодных линеек [2]. Эти фотоприемники в сравнении с широко распространенными ПЗС-линейками выгодно отличаются хорошей температурной стабильностью, отсутствием эффекта «растекания» заряда, более простой электронной схемой управления. Однако, как правило, они обладают большим разбросом чувствительности элементов.

На основе интегральных фотодиодных линеек Институтом автоматики и электрометрии совместно с СКБ научного приборостроения СО АН СССР в 1985—1986 гг. разработан и создан высокопроизводительный оптико-электронный измеритель размеров «Сенсор» для измерения и контроля размеров среднегабаритных (до 50 мм) изделий.

В предлагаемой работе описаны принцип действия, алгоритм определения размеров и программное обеспечение измерителя. На основании экспериментальных исследований анализируются его точностные характеристики.

**Принцип действия, состав и работа измерителя.** В основу принципа действия прибора положен теневой метод измерений, который предпола-