



*The contact-contactless and contactless methods and visual-measuring means of size control in foundry and other fields are examined.*

*Е. И. МАРУКОВИЧ, ИТМ НАН Беларуси,  
А. П. МАРКОВ, В. Ф. ГОГОЛИНСКИЙ, А. А. АЛЕКСАНДРОВИЧ, ГУ ВПО БРУ,  
А. В. КОНОВ, ЗАО НПЦ «Молния»,  
Е. В. БЕЛЯНКО, ИИТ*

УДК 620.179:681.7.068

## ВИЗУАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Для ряда изделий специфических конструкций и форм все большее значение приобретают современная аппаратура и технологии оперативного контроля размеров и форм. Растущие объемы и разнообразие номенклатуры, создание новейших макро- и микрогабаритных отливок, непрерывное формообразование с ускоренными режимами литья, имитационное моделирование, экспериментальные исследования и производственные испытания — все это и другие конструкторско-технологические задачи ставят повышенные требования к технике и технологиям параметрического контроля в литейном производстве. Оперативный контроль размеров и форм позволяет своевременно скорректировать отдельные операции технологического процесса, теплофизические параметры литья и внести изменения в конструкцию изделия. Своевременно полученная первичная информация упреждает гарантированное качество продукции и обеспечивает возможности рачительного использования материально-энергетических ресурсов и дорогостоящего оборудования [1, 2].

Для эксплуатационных условий участков и цехов существующая контрольно-измерительная аппаратура по своим информационно-физическим возможностям уступает требованиям прогрессивно развивающейся техники и технологиям литья. Интенсификация и энергосбережение, автоматизация и ускоренные испытания новой техники требуют постоянного совершенствования контрольно-измерительной аппаратуры. В ее номенклатуре преобладающее положение занимают приборы и устройства размерного контроля. К числу наиболее употребительных параметров относятся геометрические размеры, форма сечений и профилей, контуры наружных и внутренних поверхностей и др. В ряде конструкций и изделий литей-

ного производства выделяются некоторые характерные измерительные операции: измерения расстояния от точки до точки; расстояния от линии до линии и от линии до воображаемой точки или линии (оси); диаметров и форм отверстий и каналов, параллельности осей и отверстий; соосности и угольности осей.

Техника и технологии оперативного контроля отливок и форм должны быть максимально адаптированы к специфике продукции и литейного производства. При большом разнообразии физико-технических задач и методов создания адаптивных к условиям и требованиям объектов аппаратных средств контроля требуется всесторонний учет достоинств и ограничений разнообразных по своей физической природе датчиков и преобразователей. Но в информационной цепи преобразований они все должны системно объединяться с учетом единства цели и принятых критериев.

В соответствии с технологическим процессом вся продукция литейного производства подвергается визуальному осмотру, а наиболее ответственные отливки проверяются и по геометрическим параметрам (состояние и форма поверхности, наличие и размеры внутренних отверстий и каналов, габариты и др.). В большинстве используются типовые контрольно-измерительные средства на основе прямых или косвенных, абсолютных или относительных схем и методов измерений. В цеховых условиях применяются линейки и рулетки, рейсмусы и угольники, микрометры, штангенциркули и другие измерительные средства. Более ответственные операции по проверке соответствия отливок нормативным (конструктивным) требованиям выполняются в лабораториях с соответствующими условиями и аппаратурой.

Применимость различных устройств для визуального размерного контроля в большинстве случаев определяется спецификой конструкции, особенностями размерной цепи и отдельных элементов, требуемой производительностью, точностью, поточностью производства и т.д. Здесь находят применение ручные и неавтоматизированные устройства и приспособления, облегчающие весьма трудоемкий и ответственный труд контролеров. За счет отдельных приспособлений, датчиков, метрологических схем совершенствуются и автоматизируются некоторые операции в преобразовательной структуре измерительных приборов. При этом устанавливается функциональная связь между параметрами контролируемого элемента изделия, его формой и размерами, входными и выходными параметрами датчика и другими звеньями информационной цепи.

В отличие от одноконтактной метрологической схемы измерений, ограниченной малогабарит-

ными изделиями, для крупногабаритных изделий выгоднее применять двух- и трехконтактные. Выбор числа контактных точек особенно важен при контроле сечений, формы, профилей и других параметров сложноконтурных изделий.

Используемые на практике измерения накладными приборами сравнительно просты и производительнее ручного инструмента. Более употребительными являются усовершенствованные схемы измерений по элементам контура, например, длине, высоте и т.д. В так называемых приборах типа «наездника» устанавливается функциональная связь между высотой стрелки  $h$  и диаметром изделия при фиксированных значениях других параметров расчетной схемы (рис. 1).

В приспособлениях типа призмы (рис. 1, а) отливка 1 занимает соответствующее диаметру положение относительно граней 2 призмы с жестко фиксированным углом  $\alpha$  и датчиком 3.

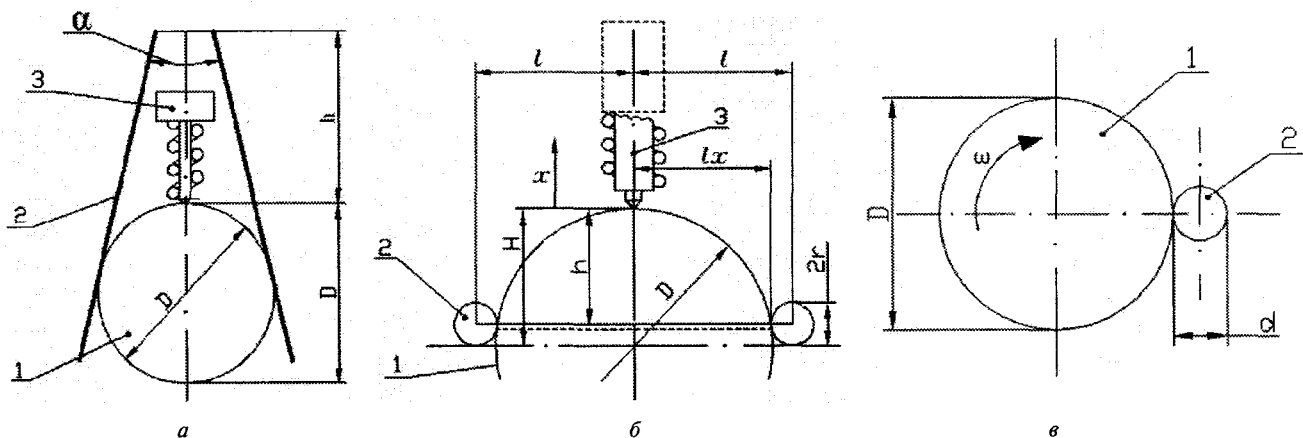


Рис. 1. Схемы косвенных измерений диаметров: а – двухточечных; б – трехточечных; в – с обкатным роликом; 1 – изделие; 2 – ролики (призмы); 3 – датчик с подпружиненным стержнем

В размерной цепи значение диаметра  $D$  выражается в высоте  $h$ , воспринимаемой датчиком в виде текущей координаты  $x$ . При этом

$$D = \frac{2h}{\sin 0,5\alpha - 1} \quad \text{или} \quad \Delta D = \frac{2h}{\frac{1}{\sin 0,5\alpha} - 1}$$

Лучшими метрологическими характеристиками отличаются схемы трехконтактных измерений (рис. 1, б). Здесь высота  $H$  при фиксированных значениях диаметра роликов  $2r$  и расстоянии  $l$  однозначно определяет диаметр изделия  $D$ :

$$H = 0,5(D+d) - \sqrt{\left(\frac{D-d}{2}\right)^2 - l^2},$$

или в приращениях информативного параметра

$$\Delta D = \left(\frac{l^2}{H^2} - 1\right) \Delta H.$$

Чувствительный элемент 3 датчика воспринимает координату стрелки сегмента с последующим

преобразованием в выходной сигнал другой физической природы.

Существенным преимуществом таких схем (рис. 1, б) является совмещенное выполнение «наездником» функции метрологической базы и механического преобразователя, т.е. при таких измерениях «наездник» сам адаптируется к контролируемому изделию и обеспечивает масштабирование изменения диаметра изделия во входное перемещение (координату) чувствительного элемента датчика. В схемах косвенных измерений больших диаметров и длин движущихся изделий в качестве механического преобразователя и базы используется обкатной (мерный) ролик, обороты которого считываются датчиком (рис. 1, в). Путем сравнения (соотношения) длин окружностей изделия и эталона (ролика, как базы) устанавливается численное значение диаметра по абстрактному выходному сигналу датчика, связанного с обкатным роликом. Аналогичные схемы используются для автоматизации измерений длин, уровней, расходов и других величин, преобразованных в угловое перемещение.

Трехконтактная метрологическая схема в конструкциях измерительных приборов с контактными опорными роликами (базовыми) и измерительными преобразователями координаты стрелки сегмента позволяет оперативно измерять диаметры крупногабаритных изделий в эксплуатационных и цеховых условиях. Выходной сигнал для наружных  $y_n$  и внутренних  $y_b$  диаметров определяется выражениями:

$$y_n = S_n \left[ C - 0,5D + 0,5\sqrt{(D-d)^2 - l^2} \right],$$

$$y_b = S_n \left[ C + 0,5D - 0,5\sqrt{(D-d)^2 - l^2} \right],$$

где  $S_n$  – чувствительность измерительного преобразователя перемещений;  $C$  – постоянная (конструктивная) величина;  $D$  – измеряемый диаметр;  $d$  – диаметр базового ролика;  $l$  – расстояние (жесткое) между контактными точками роликов.

В представленной конструкции визуально-измерительного прибора (рис. 2) принята жесткая скоба  $1$  и постоянная величина  $C$ . При фиксированной длине хорды, косвенно определяемой расстоянием между центрами базовых роликов  $2$ , координата измерительного стержня  $4$  с подпружиненным наконечником  $5$  однозначно определяется диаметром изделия  $3$ . Перемещение (положение) шторки  $6$  на стержне визуализируется в цифровом значении текущего диаметра на отсчетном устройстве  $8$ . Световодный модуль  $9$  обеспе-

чивает функциональное преобразование перемещения в линейную координату световой полосы на отсчетном устройстве. Автономный источник излучения  $7$  включается в момент измерения, а текущее значение диаметра отсчитывается при фиксированном положении стержня, для чего предусматривается специальный стопорный механизм  $10$ .

Для линейного преобразования координаты  $x$ , определяемой нелинейной зависимостью  $x = C - 0,5D + 0,5\sqrt{(D+d)^2 - l^2}$  в световодном модуле, технологически осуществляется преобразование координаты  $x$  по следующей функции:

$$y = f(x) = \int_{x_0}^x \sqrt{(D'_x)^2 (K^2 - 1)} dx,$$

где

$$D'_x = l^2 / [d - 2(x - C)]^2 - 1;$$

$$x_0 = C - 0,5D_0 + \sqrt{(D_0 - d)^2 - l^2};$$

$d$  – диаметр ролика;  $l$  – расстояние между осями роликовых опор;  $C$  – постоянная скобы;  $K$  – коэффициент преобразования статический;  $D_0$  – наименьшее значение диаметра.

Применимость визуально-измерительных накладных приборов определяется их мобильностью и метрологическими возможностями. Сравнительно простые по конструкции и удобные в технологическом контроле такие средства ограничены

своими динамическими характеристиками. Наличие механического контакта с изделием сказывается на точности измерений из-за влияния износа опор и других факторов технологического характера.

Лучшими визуально-измерительными возможностями отличаются методы и схемы бесконтактных измерений, особенно в оперативном контроле сложнопрофильных и сложноконтурных изделий. В отличие от бесконтактных емкостных, электромагнитных и других подобных измерений более адаптивными к условиям литейного производства являются оптические и пневматические системы визуально-измерительного контроля.

Наряду с информационно-метрологическими преимуществами оптические и пневматические схемы измерений отличаются рядом конструктивно-технологических особенностей. В них рационально реализуются бесконтактные методы и соответствующие схемы преобразований первичной информации о размерах и форме конт-

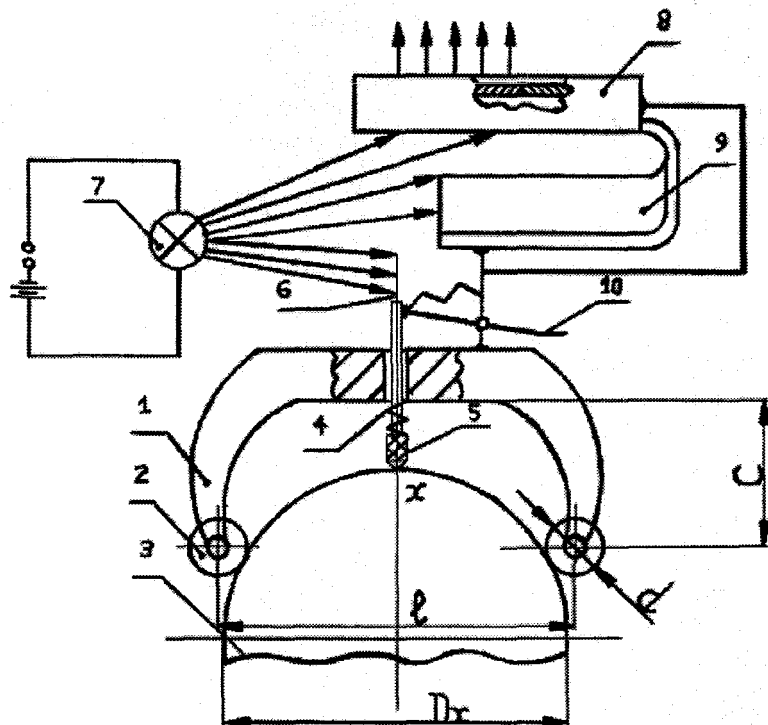


Рис. 2. Схема преобразовательного устройства: 1 – скоба; 2 – ролики; 3 – изделие; 4, 5 – стержень подпружиненный; 6 – шторка; 7 – излучатель; 8 – устройство отсчетное; 9 – модуль световодный; 10 – механизм стопорный

ролируемых изделий. Однако при высоком быстродействии и чувствительности в оптических преобразователях предъявляются жесткие требования к источникам излучений. Высокая чувствительность пневматических преобразователей ограничена диапазоном и быстродействием. При этом за счет пневматики создается возможность взаимной ориентации на измерительной позиции первичного преобразователя и изделия, что упрощает метрологию и технологию оперативного контроля. В схемах комбинированных пневмо-оптических преобразований функциональные ограничения одних дополняются информационно-метрологическими преимуществами других.

Современная микропневматика, волоконная оптика, оптоэлектроника, микропроцессорная техника и многообразная элементная база других областей приборостроения создают научно-техническую перспективу совершенствования и развития техники и технологий оперативного контроля и в литейном производстве, а за счет волоконно-оптических связей обеспечивается эффективное первичное преобразование с одновременным помехозащищенным дистанцированием информации к пользователю.

В бесконтактном оперативном контроле с учетом эксплуатационных условий и специфики изделий литейного производства эффективно реализуются алгоритмы и структуры средств одно-, двух- и трехконтактных измерений. Области применения абсолютных и относительных, прямых и косвенных измерений определяются метрологией, технологией производства и конструктивными особенностями изделий. Соответственно им выбираются и метрологические схемы измерений. Если для абсолютных измерений требуется некоторая фиксированная метрологическая база, то в схемах совокупных и относительных измерений функции такой базы может выполнять и первичный преобразователь. Однако более универсальными являются контрольно-измерительные средства, построенные на методе непосредственной оценки относительными измерениями. Существенная особенность измерительных схем заключается в том, что контролируемое изделие (его элемент) непосредственно встраивается в параметрическую цепь информационных преобразований, что не допускает разрыва в такой последовательности операций.

В технике оптического контроля размеров и сечений протяженных изделий, имеющих форму

тел вращения, в том числе и сложноконтурных, широкое применение находят теневые методы. В первичном преобразователе, реализующим структурно-алгоритмические преобразования по одноконтактной метрологической схеме (рис. 3), изделие 1 непрерывно сканируется световым потоком от источника 2.

Узкий луч света взаимодействует с элементарной поверхностью изделия в контролируемом сечении, как бы снимая координату верхней точки контура. Посредством оптической связи (б) формируется оптическая первичная информация, которая воспринимается приемной частью линейки световодов 3. Соответствующая координате верхней точки границы свет-тень площадь затемненных волокон по волоконной связи 4 в сжатой форме отображается на приемной площадке фотоприемника 6. В выходных унифицированных аналоговом  $y_1$  и/или дискретном  $y_2$  сигналах 5 представляется первичная информация о текущих значениях контролируемого изделия. При этом положение изделия на измерительной позиции фиксируется (центрируется) на стойке 7.

Гибкая волоконно-оптическая связь позволяет дистанцировать фотоприемник, изменяя его пространственное положение, и реализовывать типовые схемы накапливающего или позиционного считывания оптических сигналов. Для схем позиционного считывания линейка формируется из входных торцов лент когерентных световодов.

При своей конструктивной простоте в схемах одноконтактных измерений ограничены метрологические возможности (чувствительность, точ-

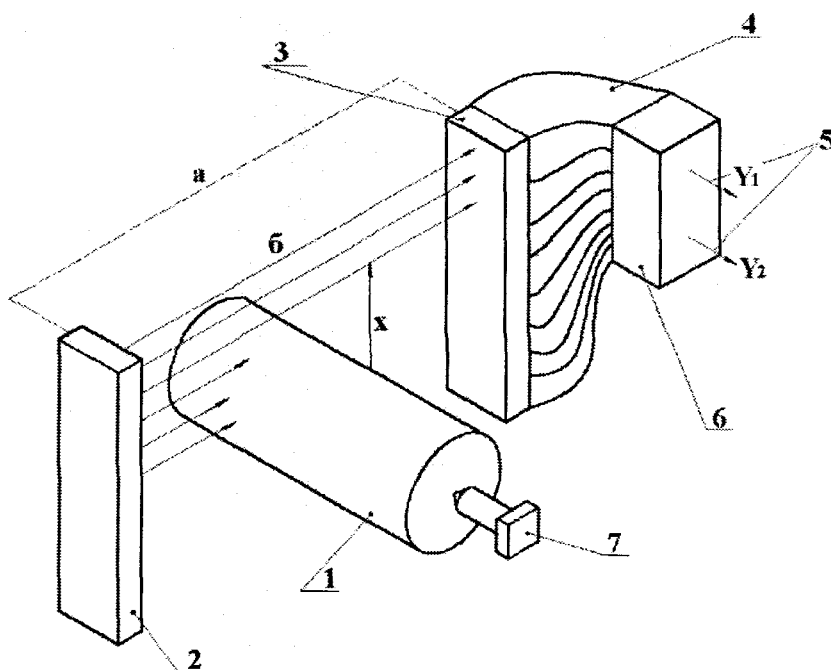


Рис. 3. Имитационная структура опико-электронных преобразований по одноконтактной метрологической схеме: 1 – изделие; 2 – источник; 3 – линейка световодная; 4 – связь волоконная; 5 – выходы электрические; 6 – фотопреобразователь; 7 – устройство центровки; а – связь механическая; б – связь оптическая

ность) из-за некогерентности и нестабильности источников излучения и физических особенностей взаимодействия светового потока с контуром изделия. На результат измерения существенное влияние оказывают погрешности базирования (центрирования) изделия на измерительной позиции.

Для реализации двухконтактной (двухточечной) метрологической схемы световой поток излучателя расщепляется и разводится на две

одноконтактные части (рис. 4). С этой целью излучение источника 1 формируется оптической системой 2 и посредством отражателей 3 и 4 направленно воздействует на верхний и нижний контуры поверхности изделия 5. Граничные световые потоки одновременно воспринимаются двумя секциями приемной части световодного модуля 6, выходы которых оптически связаны со светоприемниками 7, с последующей обработкой и отображением в электронном модуле 8.

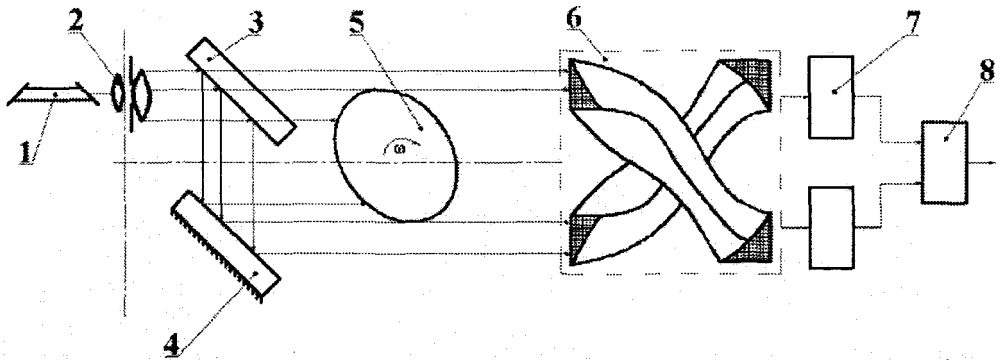


Рис. 4. Имитационная структура опико-электронных преобразований по двухконтактной метрологической схеме: 1 – источник излучения; 2 – оптическая система; 3, 4 – световые отражатели; 5 – изделие; 6 – волоконно-оптический модуль; 7 – светоприемники; 8 – устройство отображения

При высокой чувствительности и точности первичных оптических преобразований волоконно-оптическое преобразование на вторичном уровне обеспечивает помехозащищенную передачу и высокую мобильность технических средств. Формируемая на этом уровне измерительная информация посредством некогерентных световодных преобразователей позволяет реализовывать физико-оптические преобразования с высокими информационно-метрологическими характеристиками при сравнительно упрощенной технологии изготовления световодного модуля. В таком исполнении измерительная информация о размерах и форме контролируемых изделий определяется эффективной площадью засвеченных (затемненных) входных торцов секций световодного преобразователя. Такая структура преобразований информации исключает ошибки квантования уровня, где измерительные возможности преобразователей ограничены геометрическими размерами лент (дискретов) когерентных световодов [9, 11].

Посредством световодных систем визуализации изображений труднодоступных (без разборки) элементов сложноконтурных изделий эффективно реализуются оптические схемы проекционных измерений. Оптические гибкие связи на элементах волоконной оптики позволяют не только направленно передавать излучение непосредственно в контролируемую зону пространства, но сосредоточенно регулировать фазочастотные параметры излучения. За счет наложения изображений контура реального участка (детали) изделия и его

эталона (образца) создаются предпосылки для бесконтактного контроля профиля в динамике.

Принципиальные возможности такой техники показаны на примере стробоскопического прибора визуального контроля (рис. 5). Изображение элемента 1 передачи (зуба) оптической системой 2 проецируется на приемный торец световодной системы дистанцирования изображений 3. С помощью объектива 4 это изображение масштабируется с представлением на отсчетном устройстве 5, на котором контрастно представлено и изображение эталонного элемента (образцового). Путем совмещения (наложения) двух проецируемых изображений отсчитываются значения отклонений (не совпадений) точек по всему контуру контролируемого профиля с визуальным наблюдением или регистрацией в установленной форме. Для создания стробоскопического эффекта наблюдаемый элемент объекта освещается импульсным источником 7 с блоком питания, управляемым генератором 8. Параметры светового потока поддерживаются с помощью регулятора частоты 10 и регулятора фазы 11. Встроенная в блок питания оптическая система формирует регулируемый по частоте и фазе световой поток на входном торце осветительного световода 12. С его выхода обеспечивается необходимая освещенность именно на рассматриваемом элементе.

Проекционные приборы с наложением изображений эталона и реального контура позволяют расширить области практического применения оптических методов и разнообразных схем контроля контуров и профилей многоэлементных, сложноконтурных и протяженных изделий.

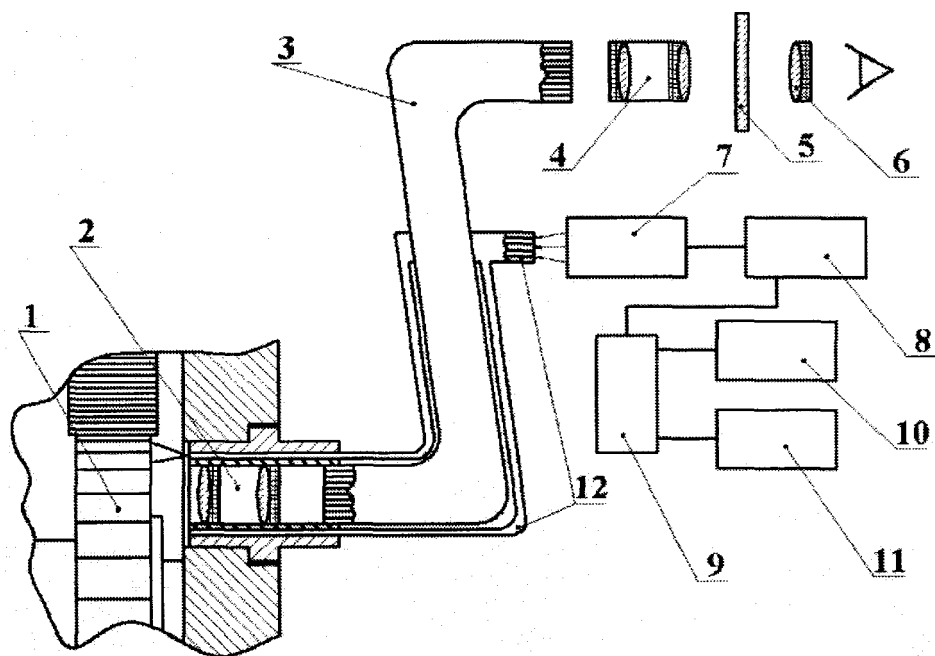


Рис. 5. Схема дистанционного контроля профилей вращающегося элемента с ограниченным доступом: 1 – зубчатая передача редуктора; 2 – система формирования изображения; 3 – канал световодной передачи изображений; 4 – объектив, формирующий отображение на отсчетном устройстве 5 с окуляром 6; 7 – источник излучения импульсный; 8 – блок питания; 9 – генератор; 10 – регулятор частоты; 11 – регулятор фазы; 12 – световод осветительный

Среди методов и схем бесконтактных измерений высокой чувствительностью и разрешающей способностью отличаются пневматические первичные преобразователи геометрических величин в перемещение. Высокая точность при ограниченных диапазонах и частотах, инерционность и нелинейность характеристики усложняют алгоритмы и структуру преобразований.

Первичные пневматические преобразователи перемещений весьма эффективны в технике измерений и контроля диаметров, сечений, профилей продольных контуров и других геометрических форм, особенно тел вращения. Принципиальная особенность пневматических преобразований усложняет контрольно-измерительные операции для изделий со ступенчатыми продольными и поперечными контурами. Из-за малых начальных зазоров между поверхностью и измерительными соплами, а также из-за динамики пневматической измерительной системы чувствительный первичный элемент в цепи преобразований не успевает отслеживать резкие изменения профилей контуров.

Преимущественное применение находят дифференциальные пневматические системы в качестве первичных преобразователей геометрических величин в перемещения. На их основе рационально реализуются преобразовательные структуры технических средств с бесконтактными оптическими преобразователями. Бесконтактно-бесконтактные измерительные преобразователи не оказывают обратного воздействия в цепи преобразований и на контролируемое изделие, что обеспе-

чивает высокие информационно-метрологические показатели как в статическом, так и динамическом режимах работы аппаратуры.

При своих конструктивно-технологических возможностях пневмо-эжекторные преобразователи обеспечивают и более высокое быстродействие при сравнительно высокой производительности и чувствительности.

Пневмо-эжекторный первичный преобразователь строится на основе кольцевой камеры 1 с тангенциальными каналами 2 питания (рис. 6). Кольцевое выходное сопло 3 с охватывающим его кольцевым приемным соплом 4 и каналом 5 охватывает поперечный контур изделия 7. Стенки приемного сопла 4 выполнены в виде ирисовых диафрагм и охватывают сопло 3, которые в совокупности образуют кольцевой пневмо-эжекторный преобразователь. Для его настройки предусматривается регулировочный механизм 6. Результаты контроля снимаются с устройства отсчета, связанного со вторичным измерительным преобразователем [13].

Среди бесконтактных измерений профилей и контуров находят применение и более сложные в структурно-алгоритмической реализации триангуляционные методы. Однако в сравнении с ними лучшими информационно-метрологическими характеристиками отличается аппаратура, реализующая метод светового сечения. Лазерные источники, обладающие монохроматичностью, когерентностью и малой расходимостью, позволяют сформировать тонкую полосу света, в отраженном сечении которого формируется текущая информация о

координатах контура изделия. Программно-алгоритмическая обработка координат контура при высокой производительности и точности позволяет автоматизировать такую весьма сложную и ответственную контрольно-измерительную операцию [14, 15].

Современная информатика и информационно-преобразовательная техника позволяют успешно комбинировать высокопроизводительную контрольно-измерительную аппаратуру. Однако достижения прикладной математики и физики, геометрической и волоконной оптики, пневматики и гидравлики, оптоэлектроники и лазерной техники, механики и других областей приборостроения должны системно объединяться в структурно-функциональной цепи измерительных преобразований. В таком комбинированном объединении при минимальных материально-энергетических затратах оптимизируются структуры визуально-измерительных средств.

### Литература

1. Марукович Е.И., Малявко Л.П., Марков А.П., Шварц Е.Г. Оптический контроль внутренних полостей литых изделий // *Литье и металлургия*. 2004. №4(32). С. 101–105.
2. Марукович Е.И., Марков А.П., Горбунов Д.А. и др. Некоторые направления совершенствования технологического контроля в литейном производстве оптоволоконными средствами // *Литье и металлургия*. 2006. №2(38). Ч. 2. С. 107–111.
3. Филинов В.Н. Неразрушающий контроль. В 7-ми т. / Под общ. ред. В.В.Клюева. М.: Машиностроение, 1989.
4. Неразрушающий контроль. В 5-ти кн. Кн. 4: Контроль излучениями / Е.Н. Епифанцев, Е.А. Гусев, В.И. Матвеев, Ф.Р. Соснин / Под ред. В.В.Сухорукова. М.: Высш. шк., 1992.
5. Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль: Справ. В 7-ми т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.1: В 2-х кн. Кн. 1: Визуальный измерительный контроль. М.: Машиностроение, 2003.
6. Высокский А.В. Основные направления развития средств линейных измерений, контроля и управления в машиностроении // *Измерительная техника*. 1983. №4. С. 35–36.

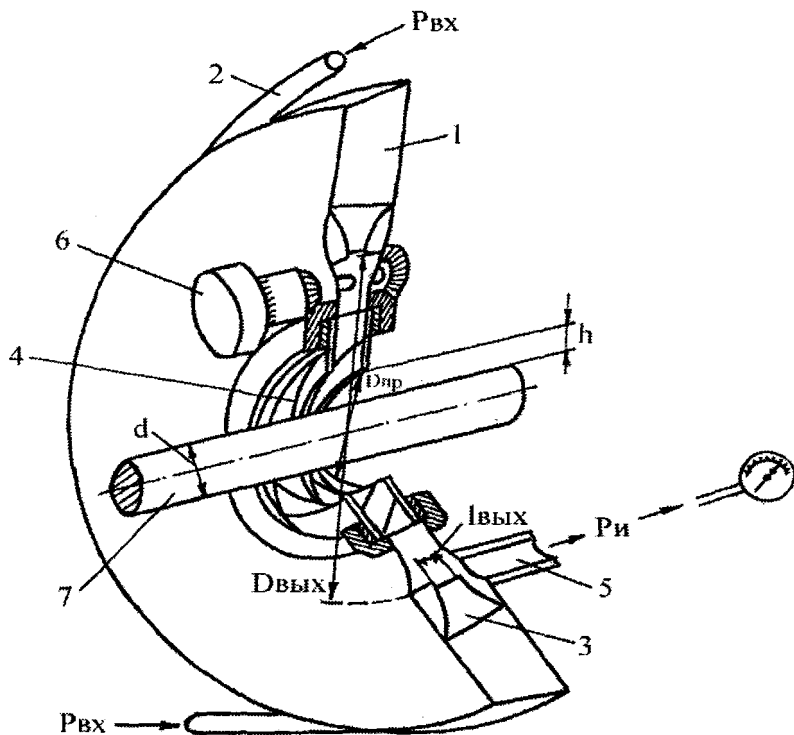


Рис. 6. Схема пневмо-эжекторного преобразователя бесконтактных измерений: 1 – кольцевая пневматическая камера; 2 – тангенциальные каналы питания; 3 – кольцевое выходное сопло; 4 – кольцевое приемное сопло; 5 – измерительный канал; 6 – регулировочный механизм; 7 – контролируемое изделие

7. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983.
8. Активный контроль размеров / Под ред. С.С. Волосова. М.: Машиностроение, 1984.
9. Марков П.И., Шаповалов В.М. Волоконно-оптические преобразователи в приборах технологического контроля. Мн.: Наука и техника, 1984.
10. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики. М.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Канюхов М.Е., Плют А.А., Шаповалов В.М. Оптоэлектронные измерительные преобразователи. Л.: Энергия, 1977.
12. Александров В.К., Биенко Ю.Н., Ильин В.Н. Оптоэлектронные средства размерного контроля технологических микробъектов. Мн.: Наука и техника, 1988.
13. Гоголинский В.Ф., Марков П.И. и др. Бесконтактное пневматическое устройство для измерения диаметров валов: А.с. 920372 СССР: Оpubл. 15.04.82 г.
14. Лолухин В.А., Гурылев А.С. Автоматизация визуального технологического контроля в электронном приборостроении. Л.: Машиностроение, 1987.
15. Кеткович А.А., Чичигин Б.А. Лазерный профилометр изделий сложной формы // *Литье и металлургия*. 2005. №2(34). С. 141–142.