



Марков А. П.



Гоголинский В. Ф.



Азарко А. А.



Старовойтов А. Г.



Патук Е. М.

40 лет ИТМ НАН Беларуси

А. П. МАРКОВ, В. Ф. ГОГОЛИНСКИЙ, А. А. АЗАРКО, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», А. Г. СТАРОВОЙТОВ, РУП «Могилевэнерго», Е. М. ПАТУК, ИТМ НАН Беларуси

УДК 681.7.068:681.335.2

БЕСКОНТАКТНЫЕ СПОСОБЫ И СРЕДСТВА КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОФИЛОМЕТРИИ

The modern ways and technologies of combined profilometry of extended surfaces on the basis of pneumatic-optical and optical-electronic structures of informational transformations are examined.

Введение. В технике и технологиях размерного контроля важное значение имеют геометрические параметры сложнопрофильных поверхностей. Специфику таких геометрических тел определяют профили, форма и сечения, контуры и рельеф, особенно протяженных и длинномерных изделий.

Отличительными признаками сложнопрофильных протяженных поверхностей являются наличие относительно малых геометрических параметров элементов и больших продольных размеров пространственно распределенной поверхности в виде совокупности таких элементов. Геометрические параметры h_i могут иметь случайно распределенную структуру профилей (микронеровности, выступы, впадины) или конструктивно определенную структуру (профили зубьев колес, профили винтовых линий, профили лопаток газотурбинных двигателей, профиль винтов вертолетов и др.).

По соотношению параметров h_i и длины l_i протяженные поверхности могут быть малой протяженности $l_i < 10h_i$; средней протяженности $(10 < l_i < 10^3) \cdot h_i$; большой протяженности $(10^3 < l_i < 10^7) \cdot h_i$; функционально определенной геометрией поверхности.

Если геометрия поверхности малой протяженности соизмерима с полем зрения оптической системы скопирования, то для восприятия геометрии поверхности средней протяженности увеличенное их оптическое изображение превосходит поле зрения приемной системы скопирования. Для скопирования среднепротяженной поверхности необходимо продольное сканирование приемной системы относительно поверхности или поверхности относительно приемника изображений.

В отличие от них скопирование поверхностей с функционально определенной геометрией и большой протяженности связано с операциями периодической или непрерывной связи отдельных участков с информационным приемником их оптических изображений. Пространственно-временное деление поверхностей большой протяженности на отдельные участки связано с возможностями пространственного скопирования измерительной системы и ее разрешающей способностью. При этом резко возрастает объем первичной информации по скопированию и координатной привязке полученных данных к реальным участкам.

Моделирование элементов поверхности. Так как скопирование профилей основывается на измерении изменений геометрических параметров, то для универсализации моделирования целесообразно использовать модель элементарного участка поверхности Δl_i независимо от ее протяженности. Профиль такого эле-

ментарного участка примем как «микропрофиль», являющийся объектом скопирования. Совокупности пространственно распределенных и конструктивно связанных микропрофилей образуют поверхность протяженного геометрического тела.

Как при выборочном и пооперационном контроле, так и в мониторинге на потоке необходима оперативная информация о характере отклонений геометрических параметров. Всякие изменения макроскопических свойств поверхности зарождаются и формируются на микроуровнях структуры материала. При этом интегрированные изменения разнообразных свойств геометрического тела сосредоточиваются в локализованной приповерхностной зоне.

В приграничной области на границе раздела двух фаз в особенностях пространственно-временных изменений эффективно проявляются локальные структурные связи элементов геометрического тела и корреляционные связи случайных отклонений профилей. Их пространственно-временное изменение технологически и конструктивно проявляется в совокупности некоторых характерных признаков. С появлением таких признаков формируется первичное сообщение о пространственно-временных изменениях геометрического тела. В нормированных параметрах и свойствах нормально функционирующего изделия нет причин возникновения первичных сообщений и нет источников первичной информации.

В переходе от абсолютных к относительным оценкам состояния поверхности более рационально реализуются информационно-преобразовательные процессы: снижается диапазон измерений, повышается чувствительность, улучшается метрология. Реализация способов и средств оперативной оценки поверхности по отклонениям геометрических параметров обеспечивает максимальную комфортность, минимальную энергозатратность, повышенную восприимчивость и оперативную доступность к источникам информации.

Эффекты взаимодействия. В источниках первичной информации отображается физическая сущность происходящих изменений сложнопрофильной поверхности геометрического тела. Особенности технологической информации связаны с физическими эффектами проявляемости и выявляемости аномальных отклонений профилей при взаимодействии со спектрально-энергетическим излучателем. При всем различии в физической природе между технологическими признаками и информативными излучениями (абстрактными сигналами) устанавливается их определенное соответствие.

При выборе физических эффектов максимального проявления информативных источников особое внимание уделяется информативности первичных признаков и чувствительности приемников информативных излучений в соответствующей фоновой обстановке обследованного микропрофиля.

Сложнопрофильные металлические поверхности отличаются некоторым своеобразием взаимодействия со спектрально-энергетическим излучателем. При этом на элементарную зону поверхности воздействуют одновременно лучистые потоки различных длин волн. С учетом принципа аддитивности эффект результирующего воздействия излучателя на поверхность определяется суммой произведений информативных излучений, взятых через равные интервалы длин волн. При этом суммирование взаимодействий компонент лучистого потока проводится по диапазону, в котором результирующее взаимодействие отличается от нуля.

Информационный эффект спектрально-энергетического воздействия на металлическую поверхность проявляется в большом коэффициенте отражения и чрезвычайно сильном поглощении приграничного слоя. Уже на удалении одной волны излучения видимого спектра полностью поглощаются металлической поверхностью. Отражательная способность металлической поверхности обусловливается многофакторным отражением в процессе рассеяния воздействующего излучения.

Способы и технологии комбинированной профилометрии. Проблемы комбинированной профилометрии связаны с формализацией зарождающихся признаков изменяющейся поверхности в абстрактные источники первичной информации. При этом посредством локальных связей локализуется признаковое пространство некоторой зоны и проводится его анализ с соответствующей идентификацией технологических отклонений. В структуре информационно-технологических преобразований важное значение имеют поиск пространственно распределенных источников информации, их достоверная локализация и обнаружение техническими средствами [1].

Основу таких преобразований составляет спектрально-энергетическая трансформация информативных излучений, выявленных информационной системой на фоне дестабилизирующих воздействий (помех) окружающей среды. В информативности признаков изменений профилей поверхности проявляются эффекты спектрально-энергетического взаимодействия с излучением. Их сгруппированной совокупностью формируется источник информации и соответствующее информативное излучение. В его выявляемости отражается

восприимчивость способов и средств к пространственно-временной изменчивости профилей элементов поверхностей геометрического тела.

Специфика изменяющихся профилей протяженных поверхностей определяет структуру трансформации первичной информации. Применительно к задачам достоверной выявляемости изменяющихся профилей ориентированный поиск информативных источников может обеспечивать пространственно-временную локализацию отклонений, их разброс в поле допусков, пеленгацию, дистанцирование, документирование и другие воздействия.

Динамика копирования профилей протяженных поверхностей определяет совокупность требований к способам и технологиям:

- непрерывное копирование микропрофиля и всей поверхности геометрического тела;
- температурный диапазон с верхней границей нагретой поверхности до 1500 К;
- исключение влияния чувствительного элемента копирующей системы на структуру материала и параметры микропрофиля;
- согласование базы измерений с элементами поверхности геометрического тела;
- адаптацию копирующей системы к задачам, целям, алгоритмам и условиям функционирования геометрического тела;
- оптимизацию структуры копирования с учетом распределения случайных погрешностей измерений геометрических параметров поверхностей в функции протяженности.

Определяющее значение в выборе структуры копирования поверхностей имеют эффекты взаимодействия чувствительного звена первичного преобразователя с микропрофилем. В многозвенной цепи информационных преобразований системно объединяются преобразователи различного функционального назначения и различной физической природы [2].

На процесс трансформации изменяющихся параметров и свойств микропрофилей существенное влияние оказывают отражающая способность и пространственное положение геометрического тела, скорость продольного перемещения и нестабильность копирования, вибрации геометрического тела и изменения метрологической базы на измерительной позиции и ряд других факторов, влияющих на формирование, преобразование и трансляцию первичной информации.

Ограниченные возможности контактных способов и технологий копирования микропрофилей создают перспективы изыскания и создания бесконтактных средств автоматизированного копирования. С учетом материала и жесткости (эла-

стичности) поверхностей применимость бесконтактных индуктивных, емкостных, радиоактивных и других способов электрических измерений неэлектрических величин весьма ограничена. В большей мере условиям автоматизированного копирования соответствуют комбинированные способы съема и трансформации измерительной информации с оптико-электронной и микропроцессорной обработкой [1, 3].

Оптические и оптико-электронные технологии отличаются значительными преимуществами, особенно в восприятии, преобразовании и передаче информативных излучений. Случайно распределенные признаки изменяющейся поверхности усложняют поиск и локализацию границ информационных зон и участков изменяющихся профилей. Поисковые системы в основном ориентированы на экстремальные ситуации в обнаружении предельных границ отклонений в совокупном признаковом пространстве (диапазон, экстремальные пределы и другие ограничения).

Ограниченность схем и конструкций оптических способов и средств обусловлена особенностями взаимодействия светового потока с поверхностью. С переходом на когерентные и импульсные источники со спектрально и пространственно управляемыми световодными излучателями возросла эффективность комбинированных способов профилометрии поверхностей. На их основе элементы рельефной поверхности, профилей и других геометрических параметров преобразовываются в соответствующие входные координаты измерительных преобразователей. Бесконтактный прием информативных излучений улучшает метрологию и расширяет область динамических преобразований. При этом информационная связь приемника через некоторую физическую среду исключает непосредственный механический контакт с поверхностью элементов геометрического тела.

Бесконтактное следящее сканирование контуров в системе с бесконтактной аэростатической стабилизацией положения приемника на оперативной измерительной позиции изделия открывает новые технологические возможности мониторинга поверхностей любой конструктивной сложности, протяженности и жесткости (эластичности).

Бесконтактная профилометрия (без непосредственного механического контакта) обеспечивает возможности контроля поперечного и продольного профилей поверхности как в статике, так и движущегося изделия. В бесконтактной профилометрии, основанной на методах световых сечений, информация об отклонениях координатных точек поверхности снимается по экстремальным откло-

нениям одной (относительный контроль) или двух (абсолютный контроль) координат профиля (контура) в контролируемом сечении. Информационное поле о текущем профиле изделия, расположенного в поперечном положении относительно оси, формируется источником света выбранного спектра. В области видимого и граничащего с ним инфракрасного излучений на результаты формирования измерительной информации существенное влияние оказывают микронеровности рельефной поверхности, особенно ее экстремумы. Размытое (не четко очерченное) изображение грани свет-тень, а также рассеяние излучения на этом участке вводят неоднозначность считывания информации и спектральное рассогласование в информационной цепи преобразований оптико-электронного канала.

Оптоэлектронные структуры и технологии автоматизированного скопирования микропрофилей обеспечивают бесконтактность и высокую чувствительность; помехозащищенность и низкую восприимчивость внешних дестабилизирующих воздействий; высокую локальность и малую инерционность; высокое быстродействие и универсальность для скопирования поверхностей из любых материалов.

Оптоэлектронные структуры системно сочетаются с микропроцессорной и вычислительной техникой, что позволяет оптимизировать преобразовательный процесс на стадии обработки, хранения и документирования результатов.

Для способов лазерного скопирования важное значение имеют когерентность и интенсивность излучения, существенно влияющие на разрешающую способность и контрастность дифракционной картины, локализованной у границ изображения микропрофиля. При когерентном источнике излучения распределение энергии световых колебаний отображается в изображении точек микропрофиля [4, 5].

Распределение интенсивности света I_ϕ при дифракции на микропрофиле сечением d с учетом степени когерентности описывается выражением [3]:

$$I_\phi = I_0 \frac{\sin^2 \left[\left(\frac{\pi d}{\lambda} \right) \sin \varphi \right] \sin 2\pi E_k (x_1 - x_2) / \lambda}{\left[\left(\frac{\pi d}{\lambda} \right) \sin \varphi \right]^2 2\pi E_k (x_1 - x_2) / \lambda},$$

где I_0 – интенсивность света поля изображения; φ – угловая координата точек дифракционного распределения; x_1, x_2 – линейные координаты точек микропрофиля; λ – длина волны света; E_k – освещенность.

Для лучшего восприятия информации выбирается соотношение E_k/E_m , когда центральный дифракционный максимум E_m , образованный аперту-

рой конденсора, полностью закрывает входной зрачок приемника.

Триангуляционные методы бесконтактного контроля при сравнительно высокой точности сложны конструктивно, громоздки и дорогостоящи. Область их применения ограничена лабораторными условиями [5, 6].

Лазерные профилометры, реализующие метод светового сечения, обеспечивают бесконтактный контроль профиля с высокой точностью. Однако даже для тонкого луча лазерного источника из-за его расходимости и соизмеримости сечения луча с микронеровностями грани профиля формируется недостоверная измерительная информация о реальном профиле (координате контура), так как в программной обработке результатов сравниваются данные с некоторым абстрактным отображением эталона (образцового изделия или по чертежу) и случайных координат реального изделия.

В технических средствах контактно-бесконтактного сканирования чувствительный элемент датчика (адаптер) снимает координату профиля и преобразовывает ее в соответствующее механическое перемещение.

Посредством последующего измерительного преобразователя это перемещение преобразуется в сигнал другой физической природы. Но из-за инерционности и низкой помехозащищенности в условиях производства возможности таких профилометров ограничены [3, 5, 7].

Высокую чувствительность и точность в ограниченных диапазонах обеспечивают пневматические преобразователи. С приемлемой динамикой и стоимостью пневматические системы позволяют реализовывать схемы одно-, двух- и многосторонних измерений профилей, что делает пневматические средства контроля профилей в некоторой мере более универсальными, общедоступными и применимыми во взрыво- и пожароопасных производствах [1, 8, 9].

В общем случае структура преобразовательной цепи представляет собой совокупность отдельных элементов и устройств по выявлению, восприятию и формированию первичной информации об отклонениях координат контура и дальнейшему преобразованию и обработке уже сигналов. Используемый при этом волоконно-оптический канал является уникальной средой не только для дистанционной передачи, но и для одновременного помехозащищенного преобразования и отображения.

Для устройств пневмоэлектрических преобразований координаты [8] характерны низкая точность и производительность даже при бесконтактной профилометрии [3, 10–13].

В предложенном способе бесконтактной профилометрии при плавном ощупывании рельефа контролируемой поверхности одновременно воспринимается информация об отклонениях текущих координат поверхности геометрического тела и эталона (образец стандартного профиля, профиль по чертежу). Геометрическое тело и эталон контролируются одновременно в одной и той же системе координат. При совпадении координат профилей изделия и эталона в некоторых идентичных точках поверхностей положение элемента сравнения в следящей измерительной системе не меняется. В случае выхода отклонения координаты из зоны нечувствительности чувствительного элемента изменяется положение элемента сравнения в зависимости от того, как изменяется отклонение координат. Если координата элемента контура (профиля) изделия будет выходить из установленного поля допуска относительно эталона, элемент сравнения переместится на соответствующую величину. Если координата элемента изделия будет выше, то элемент сравнения сместится в сторону изделия. И, наоборот, при увеличении отклонения профиля в данной точке изделия относительно соответствующей эталонной элемент сравнения смещается в сторону эталона. Характер

и величина отклонений профилей и соответствующие им смещения элемента сравнения одновременно воспринимаются обоими измерительными преобразователями, выходные сигналы которых дифференциальной схемой сравнения преобразуются в оптическом или оптико-электронном вторичном преобразователе.

Представленная система и устройство следящего преобразования состоят из системно объединенных элементов различной физической природы (см. рисунок).

Профили изделия 1 и эталона 2 одновременно ощупываются чувствительными соплами 3 и 4, пневматически связанными с рабочей камерой 5 и копирующей камерой 6. В тоже время чувствительные сопла жестко связаны соответственно с разделительными гибкими мембранами 7 и 8, а также сильфонами 9 и 11. Положение разделительных мембран выражается в перемещении штоков 13 и 14, жестко связанных с мембранами и чувствительными соплами. Посредством входных дросселей (питание) 15 и дросселя противодавления 16 следящая система связана с пневматическим источником питания. За счет жестко связанной с корпусом 17 разделительной стенки 18 создается совмещенная пневматическая камера

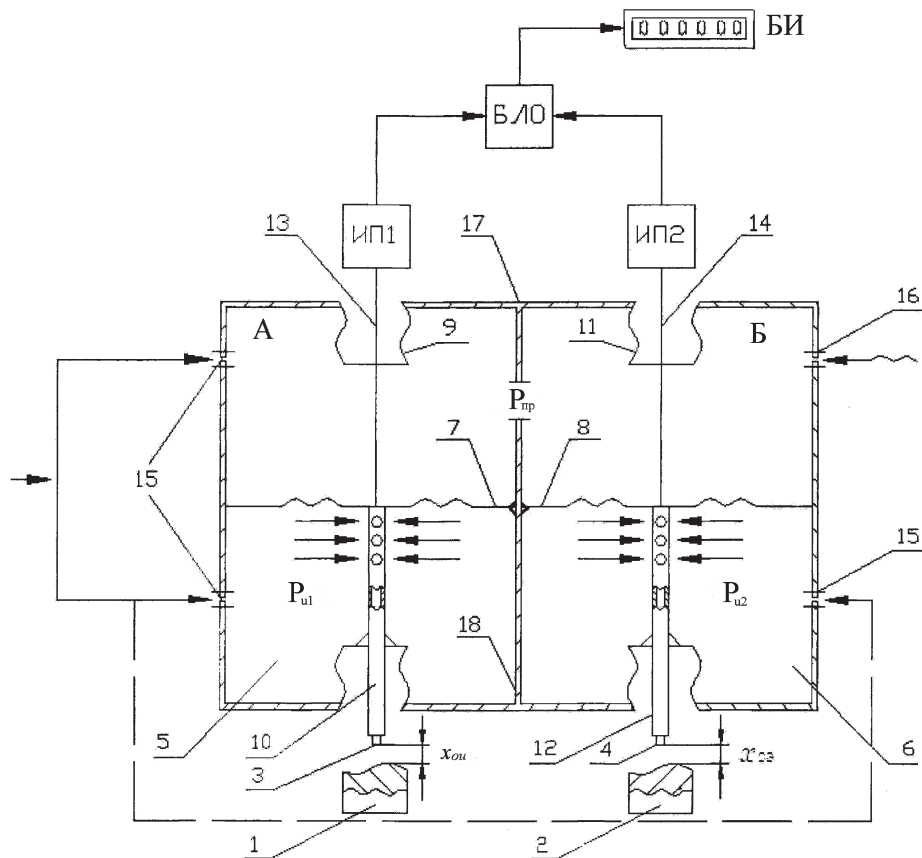


Схема комбинированной следящей профилометрии: 1 – элемент изделия; 2 – эталон; 3, 4 – чувствительные сопла; 5 – камера рабочая; 6 – камера копирующая; 7, 8 – мембраны гибкие; 9, 11 – сильфоны; 10, 12 – жесткие каналы пневматические; 13, 14 – штоки; 15 – дроссель питания; 16 – дроссель регулировочный; 17 – корпус; 18 – стенка разделительная

противодавления $P_{пр}$. В такой конструкции пневматическая следящая система обеспечивает некоторое равновесное положение при заданных зазорах измерительных сопел относительно предметных поверхностей изделия и эталона.

Процесс следящего преобразования строится следующим образом. Давление входного воздуха $P_{вх}$ одновременно воспринимается камерами 5 и 6, а также камерой A через дроссели 15. При этом разделительные гибкие мембраны 7 и 8, взаимодействуя с сильфонами 9, 10, 11 и 12, занимают некоторое промежуточное состояние, определяемое соотношением координат элементов контуров изделия 1 и эталона 2. Если координаты изделия и эталона соответствуют нормативным (допусковым) значениям, то пневматическая система в пределах своей чувствительности находится в статическом (равновесном) состоянии, что соответствует тому, что изделие по форме и размерам соответствует эталону.

В случае, когда координата элемента контура изделия меньше соответствующей координаты элемента эталона, зазор $x_{ои}$ увеличивается, а с ним возрастает и расход воздуха $P_{и1}$, который, проходя через отверстия в штоке, выходит через сопло 3. За счет избыточного давления и под действием разности давлений в камере 5 и камере противодавления мембрана смещается, а с ней перемещается и шток 13, растягивая верхний сильфон 9 и сжимая нижний сильфон.

С увеличением объема верхней камеры A нарушается равновесие в камерах A и B , что приводит к снижению давления в камере B и перемещению мембраны 8 со штоком в верхнее положение. При этом жестко связанный с соплом 4 шток сжимает сильфон 11 и шток 14 смещается вверх. Такое взаимодействие в элементах следящей системы происходит до тех пор, пока не сравняются зазоры между соплами, ощупывающими изделие 1 и эталон 2, т. е. $x_{ои} = x_{оэ}$. В таком положении выравниваются давление $P_{и1}$ и $P_{и2}$, мембраны занимают промежуточное равновесное состояние и по перемещению штоков 13 и 14 оценивается величина отклонения координаты элемента изделия относительно координаты элемента эталона.

В случае, когда координата элемента контура изделия больше эталонных параметров, соответственно зазор $x_{ои} < x_{оэ}$, расход воздуха через сопло 4 возрастает, давление $P_{и2}$ падает и противодавлением $P_{пр}$ мембрана 8 смещается вниз, воздух из

камеры A перетекает в камеру B . Такое перераспределение происходит до тех пор, пока не наступит равновесие в силах противодавления, давлений $P_{и1}$ и $P_{и2}$ и усилий сильфонов. В таком состоянии максимальное перемещение штоков 13 и 14, выраженное в выходных сигналах преобразователей ИП1 и ИП2, определяет величину верхнего отклонения координаты контура изделия относительно эталона. Блок логической обработки (БЛО) выходных сигналов преобразователей ИП1 и ИП2 выдает данные в численных значениях с привязкой к пространственным параметрам изделия на блоке индикации (БИ) после программной обработки и с документированием полученных результатов.

Пространственно-временная изменчивость взаимного положения микропрофиля и приемника копирующей системы характеризует процесс скопирования как динамический с его спецификой локальных связей и характеристик. Но и в этом случае система скопирования должна обеспечивать требуемую точность и достоверность независимо (или с учетом) от скорости продольных перемещений с возможными отклонениями в поперечном направлении.

Выводы

1. Пространственно-временная изменчивость создает предпосылки эффективной реализации операционных преобразований совокупности отклонений геометрических параметров поверхности в формирующемся признаковом пространстве относительно поля допусков.

2. Технологическая проявляемость и информационная выявляемость координатных изменений рельефа поверхности неразрывно связаны со спектрально-энергетическим взаимодействием внешних излучений с поверхностью и восприимчивостью адаптеров к формирующимся признакам первичных изменений рельефа.

3. Бесконтактные первичные и измерительные пневмооптические преобразователи максимально адаптированы к задачам и условиям мониторинга сложно-профильных поверхностей особенно протяженных геометрических тел с распределенными источниками информации.

4. Комбинированные способы и блочно-модульные структуры трансформации информативных излучений более эффективны в способах следящего сканирования и уравнивающего преобразования первичной информации с последующей оптико-электронной и микропроцессорной обработкой.

Литература

1. Структура бесконтактного контроля профилей сложноконтурных изделий / А. И. Потапов, А. П. Марков, В. Ф. Гоголинский и др. // Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий: Межвуз. сб. СПб.: Изд-во СЗТУ. 2007. С. 24–34.

2. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб. и доп. Л.: Энергия, 1975.
3. Оптоэлектронные измерительные преобразователи / Н. Е. Конохов, А. А. Плют, В. М. Шаповалов. Л.: Энергия, 1977.
4. Оптико-электронные средства размерного контроля технологических микрообъектов / В. К. Александров, Ю. Н. Биенко, В. Н. Ильин. Мн.: Наука и техника, 1988.
5. Оптоэлектронные средства контроля и измерения / В. К. Александров, Ю. Н. Биенко, В. Н. Ильин // Средства автоматизации измерений, контроля и управления / Под ред. В. А. Пилиповича и Н. Н. Анишкевича. Мн.: Наука и техника, 1984.
6. Активный контроль размеров / Под ред. С. С. Волосова. М.: Машиностроение, 1984.
7. Гоголинский В. Ф., Потапов А. И. Пневматический способ измерения поперечных размеров движущегося изделия и устройство для его осуществления: А. с. СССР № 1453170; Б. И. 1989. № 3.
8. Визуально-оптическая дефектоскопия и размерный контроль в литейном производстве / Е. И. Марукович и др. Мн.: Белорусская наука, 2007.
9. Гоголинский В. Ф. и др. Устройство для контроля диаметров изделий: А. с. № 1789852; Б. И. 1993. № 3.
10. Автоматизация контроля сечений и формы эластичных и сложноконтурных изделий / В. Ф. Гоголинский, А. А. Кеткович, Б. А. Чичигин // Вестн. МГТУ. 2006. № 2 (11). С. 62–65.
11. Информационная трансформация свойств поверхности в литье и металлургии / А. П. Марков, С. С. Сергеев, И. М. Строчкин и др. // Литье и металлургия. 2009. № 4 (53). С. 79–87.
12. Способ бесконтактного контроля профиля изделия и устройство для его осуществления: Пат. РБ / Е. И. Марукович, А. П. Марков, А. В. Коннов, В. Ф. Гоголинский и др. 2009.06.16.
13. Фотоэлектрические преобразователи информации / Под ред. Л. Н. Преснухина. М.: Машиностроение, 1974.