

На правах рукописи



**Фёдоров Евгений Михайлович**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДИАМЕТРА И ЭКСЦЕНТРИЧНОСТИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА.**

Специальность 05.11.13. – «Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Томск-2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук  
Гольдштейн Александр Ефремович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Смирнов Геннадий Васильевич

кандидат технических наук,  
Калганов Сергей Александрович

Ведущая организация: Федеральное государственное учреждение  
«Томский центр стандартизации,  
метрологии и сертификации» 634012,  
Косарева ул., д.17-а, г.Томск

Защита состоится 21 декабря 2010 года в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных д.7, институт неразрушающего контроля, зал заседаний 2-й этаж.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск ул. Белинского, д. 53.

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2010 года

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09,

кандидат технических наук, доцент



Б.Б. Винокуров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы. Кабели и провода это важнейшие изделия, без которых невозможно представить современную повседневную жизнь общества. Кабельная промышленность одна из ведущих и наиболее бурно развивающихся отраслей народного хозяйства. Номенклатура кабельных изделий очень разнообразна. При этом главным критерием при производстве кабельных изделий выступает их качество. Сведение выхода брака к минимуму достигается посредством совершенствования технологии контроля основных параметров изделия в процессе производства и автоматизацией технологических процессов.

Качество кабельных изделий характеризуется различными геометрическими и электрическими параметрами, как правило, связанными друг с другом. Для проводов, изолированных жил, кабелей круглого сечения одними из наиболее важных геометрических параметров являются наружный диаметр, овальность и эксцентricность. Измерение этих параметров должно происходить в режиме реального времени непосредственно в технологическом процессе. Различные технологические процессы изготовления кабельных и других протяжённых изделий включают в себя перемещение полуфабрикатов и готовой продукции со скоростями от 8 – 10 метров в минуту (эмалирование) до 1000 метров в минуту (волочение). Температура контролируемых объектов также имеет различные значения – от нескольких десятков до нескольких сотен градусов. Контролируемые изделия имеют поперечные размеры от долей миллиметра до нескольких десятков сантиметров и требуют измерения с различной точностью.

В настоящее время для контроля геометрических размеров проводов и кабелей разработан довольно широкий спектр приборов и устройств различных типов. Существующие зарубежные аналоги подобных устройств при хороших метрологических характеристиках по совокупности технических, экономических и эксплуатационных параметров не в полной мере удовлетворяют требованиям производства. Они обладают такими недостатками как:

- сложность применяемых технических решений, а соответственно высокая цена приобретения и обслуживания;
- наличие механически подвижных узлов, снижающих потенциальную надёжность;
- большой размер в продольном направлении и неразъёмность некоторых конструкций приборов накладывает ограничение на их использование.

В настоящее время к прибору для контроля геометрических параметров кабеля предъявляются следующие требования:

- отсутствие механического контакта измерителя с кабелем, что обеспечивает возможность установки измерителя сразу за экструдером изолирующего агрегата;
- измерение диаметра по двум координатам и более, с возможностью оценки овальности изготавливаемого изделия;
- низкая погрешность измерения не превышающая долей процента;

- высокое быстродействие (тысячные доли секунды), позволяющее проводить измерения на движущемся кабеле;
- малые погрешности, обусловленные поперечными перемещениями кабеля, всегда возникающими в процессе производства;
- наличие протоколов связи прибора с технологическим оборудованием для осуществления управления процессом производства;
- прибор должен быть нечувствительным к изменениям внешних факторов – температуры, влажности, давления, сетевых помех и др.;
- универсальность – возможность использования прибора на разных этапах производства и для разных типов изделий;
- надежность в реальных условиях эксплуатации при длительной много-сменной работе;
- простота обслуживания;
- низкая стоимость.

Задача измерения эксцентricности токоведущей жилы относительно центра изоляционного материала наиболее актуальна при производстве проводов и другой кабельной продукции, особенно высокочастотных проводов связи. Этот параметр очень критичен для данного вида продукции и непосредственно определяет её технические и эксплуатационные характеристики (частотные свойства, пропускная способность), а следовательно отражается на конечных качестве и цене готового изделия. Непрерывный контроль эксцентricности также позволяет снижать расход дорогостоящих изоляционных материалов (ПВХ, резина, полиамид и др. пластикаты) при производстве сигнальных и силовых проводов и кабелей. Необходимость измерения на выходе экструзионной головки (изоляция жилы имеет температуру  $\sim 130^{\circ}\text{C}$ ) и непрерывность технологического процесса не позволяют использовать для контроля контактные и разрушающие методы контроля эксцентricности. Ввиду высокой температуры оболочки кабеля и незавершенности на данной стадии процесса ее затвердевания, не могут быть использованы эффективные способы центрирования оболочки кабеля относительно продольной оси первичного измерительного преобразователя. Наиболее совершенный метод измерения указанных геометрических параметров кабеля реализован в разработках лидеров кабельного приборостроения: "Sikora Industrieelektronik" (Германия), "Beta Instr Co" (Великобритания), "Zumbach Electronic Automatic" (Швейцария). Препятствием для использования приборов зарубежных фирм на отечественных кабельных предприятиях являются высокая стоимость аппаратуры и повышенные требования к условиям ее применения в технологическом потоке изготовления кабеля.

Цель диссертационной работы – разработка методов и средств контроля «на проход» непосредственно в процессе изготовления на технологической линии диаметра, овальности кабелей и других круглых протяжённых изделий, а также эксцентricности одножильных круглых кабелей и проводов.

Постановка задачи. Для достижения указанной цели необходимо осуществить следующее.

- Анализ существующих методов и средств измерения диаметра и эксцентricности кабельных изделий в процессе их производства. Выявление их достоинств и недостатков.

- Разработка новых перспективных методов и средств измерения диаметра кабеля и других протяжённых круглых изделий. Техническая реализация этих методов, разработка их метрологического обеспечения.

- Разработка метода технологического контроля эксцентricности одножильных круглых кабелей и проводов на основе совмещения оптоэлектронных и индуктивных методов. Разработка конструкции совмещённого индуктивно-оптического преобразователя, алгоритма совместного преобразования сигналов оптического и индуктивного измерительных каналов.

Методы исследования. Основаны на теории измерений, теории погрешностей, численного анализа и методов компьютерного моделирования, дифференциальной геометрии и линейной алгебры, физической оптики, современных информационных технологиях MathLab 10, Exel, Origin 5.0. Программное обеспечение разработано на языке C++ в компиляторе Keil.

Научная новизна работы состоит в следующем.

- Предложен метод двухкоординатного проекционного оптического преобразования диаметра и овальности протяжённых изделий большого сечения, конструкция измерительного преобразователя и алгоритм преобразования сигналов измерительной информации, позволяющие измерять изделия больших и средних диаметров.

- Предложен метод двухкоординатного оптического преобразования диаметра и овальности протяжённых изделий в расходящемся пучке, конструкция измерительного преобразователя и алгоритм преобразования сигналов измерительной информации, позволяющие упростить оптическую схему, исключив из неё элементы линзовой и зеркальной оптики и механические сканирующие узлы.

- Предложен метод определения геометрических параметров двухкоординатных измерителей диаметра, построенных на базе оптической схемы с расходящимся пучком. Метод позволяет уменьшить погрешность приборов, а так же снизить трудоёмкость процесса юстировки при их серийном производстве.

- Предложен метод индуктивно-оптического преобразования диаметра и эксцентricности электрического кабеля, конструкция преобразователя, алгоритм преобразования сигналов измерительной информации и методика определения оптимальных геометрических параметров, позволяющие обеспечить линейность функции преобразования и малую погрешность измерения в широком диапазоне смещений электрического кабеля.

На защиту выносятся следующие научные положения.

1. Применение двухкоординатной проекционной оптической измерительной схемы позволяет бесконтактно в режиме реального времени контролировать диаметр и овальность протяжённых изделий на разных этапах их производства непосредственно на технологической линии. Измерительные системы

данного типа имеют следующие преимущества над аналогами: точность измерения подобных систем может достигать 25 мкм, диаметр измеряемых объектов может варьироваться в очень широких пределах от 5 до 200 мм и более. Возможны контроль геометрических параметров изделий получаемых методом экструзии с профилем отличным от круглого и применение в качестве осветителей различных источников света.

2. Применение предложенного оптического двухкоординатного метода измерения диаметра в расходящемся лазерном пучке обладает целым рядом преимуществ, связанных с отсутствием в конструкции элементов линзовой и зеркальной оптики. В частности, достижимая точность измерения таких приборов составляет доли микрометра и ограничена только дифракционными эффектами на границах тени, и разрешающей способностью используемых многоэлементных приёмников. Данный метод измерения применим для построения измерителей диаметра с шириной зоны измерения до 70 мм.

3. Для измерения эксцентricности и диаметра электрического кабеля предложена конструкция индуктивно-оптического преобразователя, в которой заложены три принципиальных отличия от известных устройств:

- используемый магнитный трансформаторный взаимоиндуктивный преобразователь, обладает линейной функцией преобразования поперечного смещения проводника в электрический сигнал, что позволяет отказаться от электрических приводов в автоматическом режиме центрующих блок датчиков относительно измеряемого объекта;
- двухкоординатная оптическая система с расходящимся лазерным пучком не содержит в себе элементов линзовой и зеркальной оптики, а также механических подвижных оптических элементов, что делает её компактной и потенциально более надёжной;
- использование оригинальных подходов в реализации индуктивно-оптического метода измерения позволило конструктивно скомпоновать оптические и индуктивные преобразователи в единый, компактный, неподвижный, разъёмный измерительный индуктивно-оптический моноблок.

Практическая значимость определяется прикладной направленностью, ориентированной на использование полученных результатов при проектировании высокоинформативных средств технологического контроля геометрических параметров кабельных изделий, таких как диаметр, овальность и эксцентricность. Помимо кабельной промышленности, рассмотренные в работе методы и средства измерения диаметра, могут быть использованы для непрерывного контроля при производстве других протяжённых изделий. Это могут быть различные профили, трубы, пищевые полиамидные оболочки, стальные канаты, натуральные и синтетические шнуры и волокна и т. п. Также кроме непрерывного контроля диаметра методы могут быть использованы для обнаружения локальных геометрических дефектов (утолщений и утонений) при производстве перечисленных видов изделий.

Разработанные в диссертации методы и средства технологического контроля диаметра и эксцентricности электрического кабеля ориентированы на решение практически важной и актуальной задачи, которая состоит в миними-

зации выпуска брака, улучшении качества производимых кабельных изделий, уменьшении затрат на материалы и сырьё, необходимые для производства, а соответственно уменьшении себестоимости продукции.

Внедрение результатов.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ООО «НИИ Эрмис», г. Томск. В частности, налажен серийный выпуск двухкоординатных проекционных и лазерных измерителей диаметра следующих моделей: «Цикада-3.7» (всего выпущено 30 шт.), «Цикада-4.7» (всего выпущено 10 шт.), «Цикада-2.7» (всего выпущено 40 шт.), «Цикада-1.7» (всего выпущено 5 шт.) и «Цикада-3.8» (всего выпущено 20 шт.). Перечисленное измерительное оборудование используется многими российскими кабельными заводами для непрерывного контроля диаметра кабельных изделий. Это такие предприятия как: ООО «Скамерж», г. Краснодар; ОАО «Рыбинсккабель», г. Рыбинск; ООО «Курганский кабельный завод», г. Курган; ОАО «Подольсккабель», г. Подольск; ЗАО «Завод Людиновокабель», г. Людинов; ОАО «Новгородский металлургический завод», г. Великий Новгород; ООО «Рыбинскэлектрокабель», г. Рыбинск; ООО «Аллюр», г. Великие Луки; ООО «Энергокабель», г. Электроугли; завод «Казэнергокабель» г. Павлодар, р. Казахстан; завод «Дурт-Пласт», г. Валч, Польша и многие другие предприятия России, а также ближнего и дальнего зарубежья.

Применение описанного в работе индуктивно-оптического преобразователя позволило на базе фирмы ООО «НИИ Эрмис» г. Томск совместно и кафедрой ИИТ ТПУ, разработать прибор для непрерывного контроля эксцентricности и диаметра электрического кабеля «Вектор-1.01». В настоящее время завершены его лабораторные и заводские испытания, и он проходит стадию подготовки к серийному производству.

Также результаты диссертационной работы используются в учебной и научной деятельности университета:

- при разработке оборудования учебно-научной лаборатории технологического контроля в производстве использованы технические решения, отдельные узлы и устройства, разработанные диссертантом при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ: измеритель диаметра и овальности кабеля «Цикада – 2.7», измеритель длины и скорости протяжённых изделий «Дельта – 1»;
- при разработке методического обеспечения лекционных, практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Технологический контроль в производстве» для студентов Института неразрушающего контроля и «Технологический контроль в кабельном производстве» для студентов энергетического института нашли отражение разработанные диссертантом новые методы и средства технологического контроля диаметра и эксцентricности кабельных изделий;
- при обучении и обеспечении НИР студентов элитного технического образования по направлению «Приборостроение» использованы разработанные диссертантом методы и средства контроля.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- выставке WIRE Russia 2003, Москва 2003 г.;
- выставке WIRE Russia 2004, Москва 2004 г.;
- выставке WIRE Russia 2005, Москва 2005 г.;
- Российской научно-технической конференции «Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения», г. Томск, 2004 г.;
- 12-й, 13-й и 14-й международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», г. Томск, 2005- 2007г.;
- научных семинарах кафедры информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета;
- научных семинарах, проводимых на базе предприятия кабельного приборостроения ООО «НИИ Эрмис»;
- В 2007 году по теме диссертации был выигран грант программы «УМНИК» (Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, из них – 1 патент РФ на изобретение, 5 статей в центральной печати и 4 статьи в сборниках научных трудов.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из 3-х глав и 2-х приложений, содержит 155 страниц, включая 59 иллюстраций, 3 таблицы и список литературы из 86 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены сведения о внедрении, апробации работы и публикациях по теме диссертации.

**В первой главе** приведён обзор существующих на данное время методов и средств контроля диаметра и эксцентricности электрического кабеля на проход непосредственно во время производства.

Все способы контроля размеров делятся на контактные, когда чувствительный элемент непосредственно соприкасается с измеряемым объектом, и бесконтактные, которые в свою очередь подразделяются на ёмкостные, ультразвуковые и оптические и т.д.

Указаны причины затруднений в применении на практике контактных, ёмкостных, ультразвуковых и др. методов контроля. Более подробно рассмотрены оптические методы измерения диаметра, которые применяют в своих разработках ведущие фирмы в области кабельного приборостроения, такие как: «Sikora Industrieelektronik» (Германия), «Zumbach Electronic Automatic» (Швейцария), ООО «ЭРМИС+» (Россия).

Анализ оптических методов измерения позволил выявить три наиболее распространенных оптических метода. Это метод измерения мощности потока излучения, метод со сканирующим узлом и теневой метод в квазипараллельном пучке. Все перечисленные методы, отличаются высоким быстродействием, ма-



лой погрешностью измерения, хорошей помехозащищенностью, и позволяют реализовать бесконтактный принцип получения первичной информации. Однако данные методы имеют существенные недостатки. Большие габаритные размеры в продольном направлении, необходимость использования широкоапертурной оптики, подвижных механических сканирующих узлов усложняет и удорожает конструкцию преобразователей, что определяет их низкие эксплуатационные характеристики и накладывает ограничения на область их применения.

Помимо анализа методов контроля диаметра кабеля в главе рассмотрены существующие методы измерения его эксцентricности, как разрушающие, которые выявляют брак уже после завершения процесса производства продукции, так и бесконтактные методы измерения, применяющиеся в режиме реального времени на проход непосредственно в процессе производства. К таким методам относятся ультразвуковые, рентгеновские и индуктивно-оптические. Ввиду высокой температуры оболочки кабеля и незавершенности на данной стадии процесса ее затвердевания, не могут быть использованы как контактные средства измерений, так и эффективные способы центрирования оболочки кабеля относительно продольной оси первичного измерительного преобразователя.

Основной недостаток применения ультразвуковых преобразователей для измерения эксцентricности заключается в том, что они, являясь иммерсионными. Это создаёт для изготовителей кабельной продукции дополнительные трудности с установкой и обслуживанием подобных систем.

Применение производителями кабельной продукции рентгеновских измерителей эксцентricности даёт хорошие результаты, однако подобные системы имеют очень высокую стоимость.

Суть индуктивнооптического метода заключается в совместном использовании оптической двухкоординатной системы для определения положения центра внешней оболочки кабельного изделия и взаимоиндуктивного магнитного преобразователя для измерения смещения центра токоведущей жилы. На рис. 1 изображено сечение изолированной жилы электрического кабеля, где расстояние от центра токоведущей жилы до центра оболочки кабеля (отрезок  $e$ ) и есть её эксцентricность, а отрезки  $e_x$  и  $e_y$  – проекции эксцентricности по соответствующим осям.

Высокие метрологические параметры приборов зарубежных изготовителей достигаются за счет использования достаточно сложных конструктивных и схемных решений. Препятствием для использования приборов зарубежных фирм на отечественных кабельных предприятиях являются высокая стоимость аппаратуры и повышенные требования к условиям ее применения в технологическом потоке изготовления кабеля.

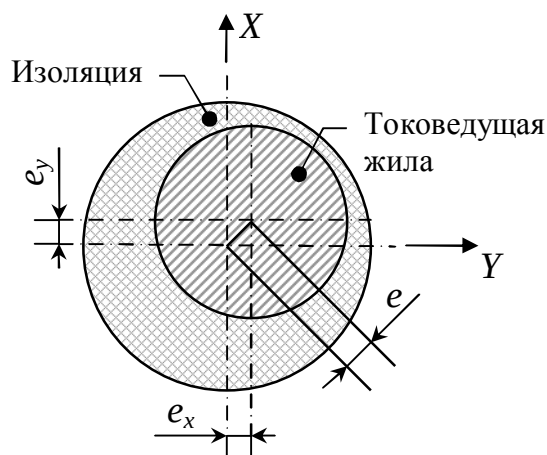


Рис. 1. Сечение контролируемой изолированной жилы электрического кабеля

**Вторая глава** посвящена разработке методов и средств измерения диаметра [1]. В частности, рассмотрен двухкоординатный оптический проекционный метод (рис.2), который имеет следующие принципиальные отличия от существующих аналогов:

Во-первых, предложенный метод основан на измерении многоэлементным линейным фотоприёмником поперечного размера изображения кабельного изделия, получаемого с помощью объектива. Для создания высокой контрастности изображения применена тыльная подсветка измеряемого объекта линейкой светодиодов. Оптическая схема прибора представлена на рис.2. Двухкоординатное измерение диаметра обеспечивается установкой в приборе двух одинаковых измерительных систем, измерительные оси которых ортогональны.

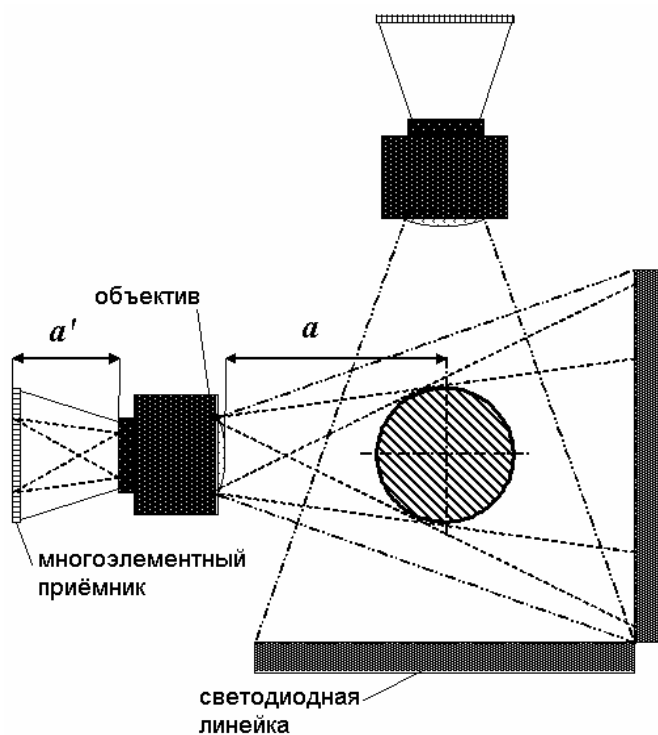


Рис 2. Оптический двухкоординатный проекционный метод измерения диаметра.

Во-вторых, из оптической схемы исключены широкоапертурные элементы линзовой или зеркальной оптики, вместо которых используется недорогой стандартный фотографический объектив, проецирующий изображение измеряемого объекта на плоскость фотоприёмника с известным масштабным коэффициентом. Это позволяет, используя фотоприёмники стандартной длины, измерять объекты с поперечными размерами 200 мм и более.

В-третьих, благодаря наличию двух ортогональных каналов измерения осуществляется отстройка от влияния поперечных смещений кабеля, что обеспечивает высокую точность измерения.

Для расчёта диаметра объекта по результатам измерений его проекций эмпирически была получена функция преобразования, которая учитывает его поперечные смещения. Многоэлементные фотоприёмники с проецируемыми на них изображениями измеряемого объекта в системе координат  $X-Y$  изображены на рисунке 3. Выражения для расчёта диаметров измеряемого объекта по соответствующим осям в такой двухкоординатной проекционной системе выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} D_x(C_y, D_{1x}) &= k_m P_x (A_x C_y + B_x) + [(d_x D_{1x} + e_x) C_y + (f_x D_{1x} + g_x)]; \\ D_y(C_x, D_{1y}) &= k_m P_y (A_y C_x + B_y) + [(d_y D_{1y} + e_y) C_x + (f_y D_{1y} + g_y)], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $D_x(C_y, D_{1x})$  и  $D_y(C_x, D_{1y})$  – результат измерения диаметра по соответствующим измерительным осям;  $k_m$  – масштабный множитель, определяемый типом используемого объектива;  $C_x, C_y$  – координаты центра проекций измеряемого объекта на многоэлементных приёмниках;  $P_x, P_y$  – линейные размеры этих про-

екций (рис. 3);  $A_i, B_i, d_i, e_i, f_i, g_i$  – постоянные коэффициенты находимые экспериментально индивидуально для каждой из измерительных осей  $X$  и  $Y$ . Значения  $D_{1x}$  и  $D_{1y}$  – диаметры, вычисляемые с использованием приближённых линейных функций преобразования имеющих следующий вид:

$$D_{1x}(C_y) = k_m D_x (a_x C_y + b_x); \quad D_{1y}(C_x) = k_m D_y (a_y C_x + b_y),$$

где  $a_i, b_i$  – как и в выражениях (1) константы, находимые экспериментально.

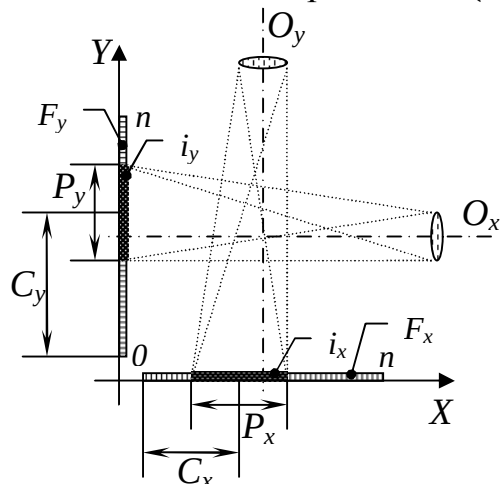


Рис. 3. Многоэлементные линейные фотоприёмники  $F_x$  и  $F_y$  оптического проекционного преобразователя в системе координат  $X$ - $Y$ . Точками условно показан ход лучей от объектива к фотоприёмнику.  $O_x, O_y$  – оптические оси соответствующих измерительных каналов;  $i_x, i_y$  – проекции измеряемого объекта,  $D_x, D_y$  – линейные размеры этих проекций,  $C_x, C_y$  – координаты их центра на многоэлементных линейных фотоприёмниках соответствующих измерительных осей.

Для получения описанной функции преобразования требуется большой массив экспериментальных данных, однако её использование позволяет получить требуемую погрешность прибора при поперечных смещениях изделия в широких пределах, во всём диапазоне измеряемых диаметров.

Применение предлагаемого технического решения при проектировании измерителя позволяет упростить оптическую систему и уменьшить габариты устройства. Отсутствие механических движущихся узлов увеличивает потенциальную надёжность измерителя и при существенном упрощении конструкции прибора в разы снижает его себестоимость при сохранении метрологических характеристик на уровне лучших зарубежных аналогов. На основе данного метода созданы двухкоординатные измерители диаметра «Цикада-3.72» [2] и «Цикада-4.72», «Цикада-4.2», применяемые для решения задачи технологического контроля диаметра и овальности изделий больших диаметров в диапазоне от 5 до 200 мм и более.

Помимо проекционного метода в главе описан оптический двухкоординатный метод измерения диаметра в расходящемся пучке. В основе приборов на основе этого метода заложены три принципиальных отличия от известных решений:

Во-первых, в качестве источника излучения применен инфракрасный полупроводниковый лазерный модуль, характеристики которого близки к характеристикам идеального точечного монохроматического источника, что обеспечивает чёткость границ измеряемой многоэлементным приёмником тени.

Во-вторых, из оптической схемы исключены элементы линзовой или зеркальной оптики, следовательно, отсутствуют связанные с ними aberrации, обуславливающие погрешность измерения.

В-третьих, для повышения достоверности измерения диаметра и для определения овальности, измерение диаметра осуществляется по двум ортого-

нальным осям, а также реализована совместная обработка данных двух измерительных каналов и их взаимная коррекция, чем устраняется погрешность, вызванная поперечными перемещениями контролируемого изделия.

Расчётная схема рассматриваемого двухкоординатного измерителя показана на рис. 4. Прибор содержит два измерительных канала, оси которых  $X$  и  $Y$  взаимно перпендикулярны. В каждом канале имеется точечный излучатель (лазерный полупроводниковый модуль), создающий в зоне измерения расходящийся световой поток и многоэлементный линейный фотоприемник, фиксирующий размер тени, отбрасываемой объектом. Контролируемый объект, имеющий форму сечения близкую к кругу, находится в рабочей зоне прибора, освещается двумя излучателями и образует две тени, воспринимаемые фотоприемниками измерительных каналов.

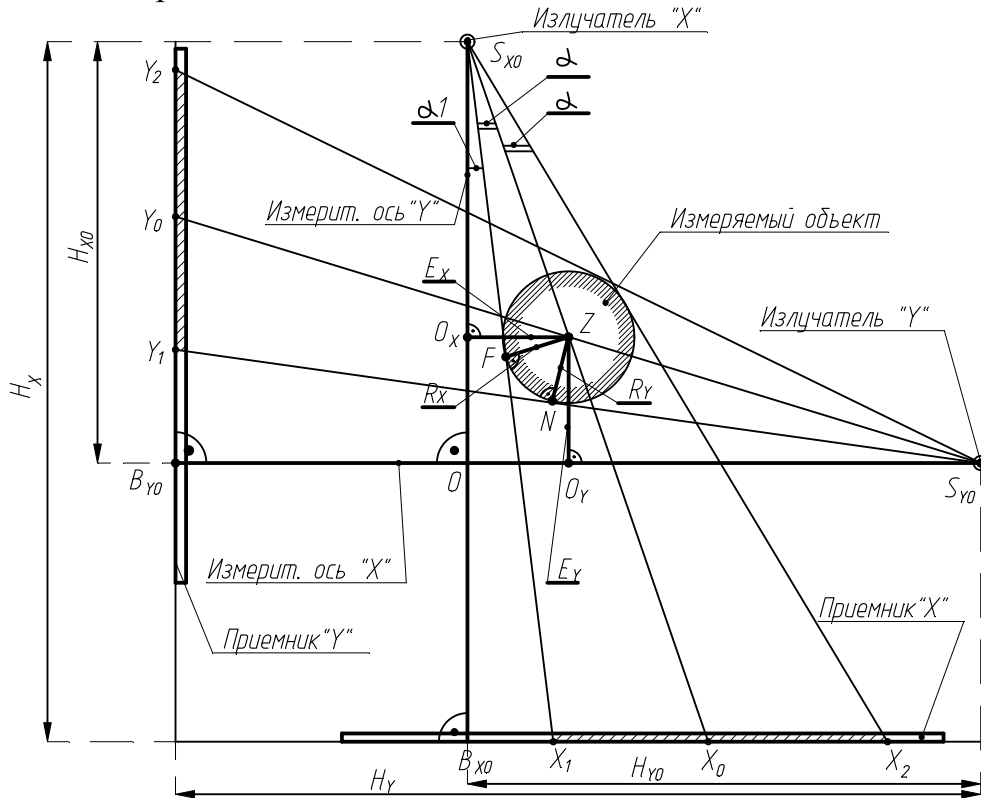


Рис. 4 Двухкоординатный метод измерения в расходящемся пучке.

В главе выведены функции преобразования для расчета диаметров  $D_X$  и  $D_Y$  (рис. 3) для каждой из осей в такой двухкоординатной оптической системе:

$$\begin{aligned} D_X &= 2\sqrt{E_X^2 + (H_{X0} - E_Y)^2} \sin \frac{1}{2} (\arctg \frac{X_2}{H_X} - \arctg \frac{X_1}{H_X}); \\ D_Y &= 2\sqrt{E_Y^2 + (H_{Y0} - E_X)^2} \sin \frac{1}{2} (\arctg \frac{Y_2}{H_Y} - \arctg \frac{Y_1}{H_Y}), \end{aligned} \quad (2)$$

где расстояния от центра объекта до соответствующих осей  $E_X$  и  $E_Y$  (рис. 3) определяются выражениями:

$$E_X = \frac{X_0 H_Y \left( H_{X0} - Y_0 \frac{H_{Y0}}{H_Y} \right)}{(H_X H_Y - X_0 Y_0)}; \quad E_Y = \frac{Y_0 H_X \left( H_{Y0} - X_0 \frac{H_{X0}}{H_X} \right)}{(H_X H_Y - X_0 Y_0)}. \quad (3)$$

Положения проекции центра объекта на соответствующих многоэлементных приёмниках  $X_0$  и  $Y_0$  (рис. 3) определяются выражениями:

$$X_0 = H_x \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{X_2}{H_x} + \operatorname{arctg} \frac{X_1}{H_x} \right); \quad Y_0 = H_y \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{Y_2}{H_y} + \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{H_y} \right), \quad (4)$$

где в свою очередь  $X_1$ ,  $Y_1$  и  $X_2$ ,  $Y_2$  положения начала и конца (рис. 3) теней объекта на соответствующих приёмниках

Так же в состав выражений (2-4) входят следующие геометрические параметры конструкции прибора (рис. 3):

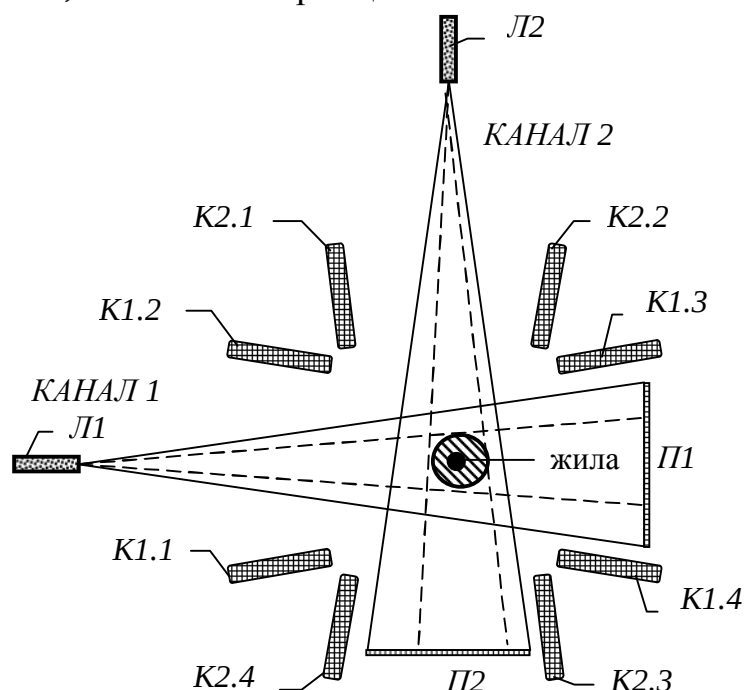
- расстояния  $H_x$  и  $H_y$  от центра излучателя до плоскости приемника каждого из каналов;
- расстояния  $H_{x0}$  и  $H_{y0}$  от центра излучателя до центра рабочей зоны, т. е. до точки (0), являющейся пересечением измерительных осей;
- начала координат, являющиеся «нулевыми» ячейками приемников, расположенными в точках  $B_{x0}$  и  $B_{y0}$ .

В главе также показана методика вычисления геометрических параметров [3,4] измерителей диаметра  $H_{x0}$ ,  $H_{y0}$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $B_{x0}$ ,  $B_{y0}$  кабельных изделий, базирующихся на теневом методе измерения в расходящемся лазерном пучке. Выявлена возможность упрощения процесса их вычисления без существенного влияния на погрешность измерения приборов, за счёт анализа вклада каждого параметра в результат расчёта диаметра по формулам (2-4).

На основе метода измерения в расходящемся пучке разработаны конструкции измерителей диаметра «Цикада-2.72» [5], «Цикада-1.72» и «Цикада-3.8».

В третьей главе предложен усовершенствованный индуктивно-оптический метод (рис. 5), который в отличие от метода, описанного в главе 1 применённого в устройствах аналогах, заложены 3 принципиальных отличия.

Рис. 5. Индуктивно-оптический преобразователь измерителя эксцентricности где  $K1.1 - K1.4$  катушки магнитного преобразователя измеряющего смещение токоведущей жилы по первому каналу  $K2.1 - K2.4$  тоже самое по второму каналу.  $Л1$  и  $П1$  лазер и соответственно приёмник излучения первого канала оптической измерительной системы, а  $Л2$  и  $П2$  второго канала.



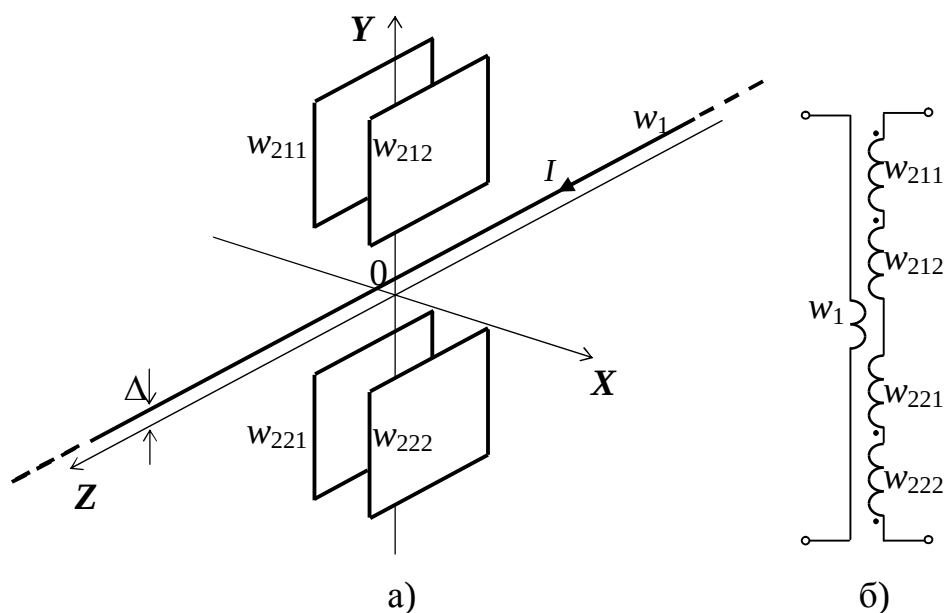


Рис. 6. Конструкция (а) и принципиальная электрическая схема (б) предлагаемого измерительного трансформаторного преобразователя:  $w_1$  – проводник с током (обмотка возбуждения);  $w_{211}$ ,  $w_{212}$ ,  $w_{221}$ ,  $w_{222}$  – секции измерительной обмотки

Во-первых, используемый магнитный трансформаторный взаимноиндуктивный преобразователь, обладает линейной функцией преобразования поперечного смещения проводника в электрический сигнал, позволяет отказаться от электрических приводов, которые в автоматическом режиме центруют блок преобразователей относительно измеряемого объекта.

Во-вторых, двухкоординатная оптическая система с расходящимся лазерным пучком не содержит в себе элементов линзовой и зеркальной оптики, а также механических подвижных оптических элементов, что делает её компактной и потенциально более надёжной.

В-третьих, использование оригинальных подходов в реализации индуктивнооптического метода измерения позволило конструктивно скомпоновать оптические и индуктивные датчики в единый, разъёмный, неподвижный, компактный измерительный моноблок.

Основной сферой использования предложенного трансформаторного измерительного преобразователя (рис. 6) является измерение эксцентricности жилы электрического кабеля (рис. 1). В отличие от преобразователей аналогичных устройств предложено более эффективное техническое решение, позволяющее достичь высоких метрологических параметров измерителя за счет выбора оптимальных конструкции и геометрических параметров трансформаторного измерительного преобразователя без применения механического привода, усложнения электронной схемы или функции преобразования первичной измерительной информации.

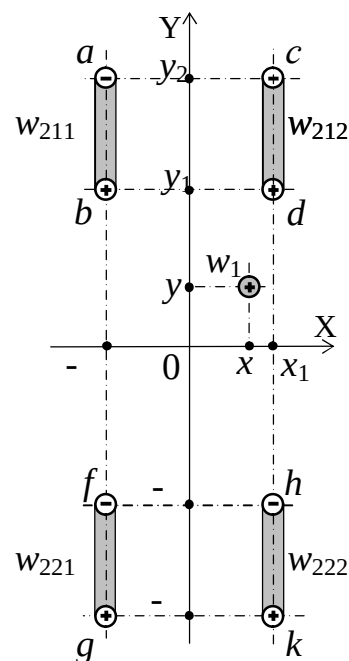


Рис. 7. Геометрия задачи (сечение преобразователя плоскостью XOY)

На рис. 6 показана конструкция предлагаемого измерительного преобразователя. Как и в существующих реобразователях функции обмотки возбуждения выполняет сам контролируемый проводник. Отличие предлагаемой конструкции заключается в том, что каждая измерительная обмотка, предназначенная для измерения координат оси проводника в одной из ортогональных плоскостей, имеет четыре последовательно соединенные прямоугольные секции.

На рис. 7 показано сечение предлагаемого преобразователя плоскостью XOY. Направление включения отдельных секций относительно контролируемого проводника отражено знаками «+» или «-».

Для прямоугольной секции обмотки с продольным размером  $l$  и расстояниями продольных участков витков от оси проводника  $r_1$  и  $r_2$  могут быть записаны выражения для магнитного потока  $\Phi_1(t)$  и ЭДС  $e_1(t)$ :

$$\begin{aligned}\Phi_1(t) &= \frac{\mu_0}{2\pi} i(t) l \ln \frac{r_2}{r_1}; \\ e_1(t) &= -w \frac{\mu_0}{2\pi} l \ln \frac{r_2}{r_1} \frac{d i(t)}{d t},\end{aligned}\tag{5}$$

где  $i(t)$  – закон изменения мгновенного значения электрического тока проводника.

В системе координат (рис. 7) с центром, совпадающим с геометрическим центром преобразователя, расстояния продольных участков витков всех четырех секций измерительной обмотки от оси контролируемого проводника определяются выражениями:

$$\begin{aligned}r_a &= \sqrt{(x+x_1)^2 + (y-y_2)^2}; & r_b &= \sqrt{(x+x_1)^2 + (y-y_1)^2}; \\ r_c &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_2)^2}; & r_d &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}; \\ r_f &= \sqrt{(x+x_1)^2 + (y+y_1)^2}; & r_g &= \sqrt{(x+x_1)^2 + (y+y_2)^2}; \\ r_h &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y+y_1)^2}; & r_k &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y+y_2)^2},\end{aligned}\tag{6}$$

где  $x$  и  $y$  – смещения оси проводника соответственно по осям OX и OY;  $x_1$  – расстояние от продольной плоскости симметрии преобразователя ZOY до плоскостей витков секций измерительной обмотки;  $y_1$  и  $y_2$  – расстояния от продольной плоскости симметрии преобразователя ZOX до продольных участков витков секций измерительной обмотки.

На основании (5) можно записать выражение, определяющее суммарную ЭДС  $e(t)$  всех секций измерительной обмотки:

$$e(t) = -w \frac{\mu_0}{2\pi} l \ln \frac{r_a r_c r_f r_h}{r_b r_d r_g r_k} \frac{d i(t)}{d t}.\tag{7}$$

В этом выражении можно выделить множитель  $K(x, y)$ , зависящий от координат оси контролируемого проводника (его смещения относительно оси преобразователя) и от координат осей продольных участков витков секций измерительной обмотки (поперечных геометрических размеров преобразователя):

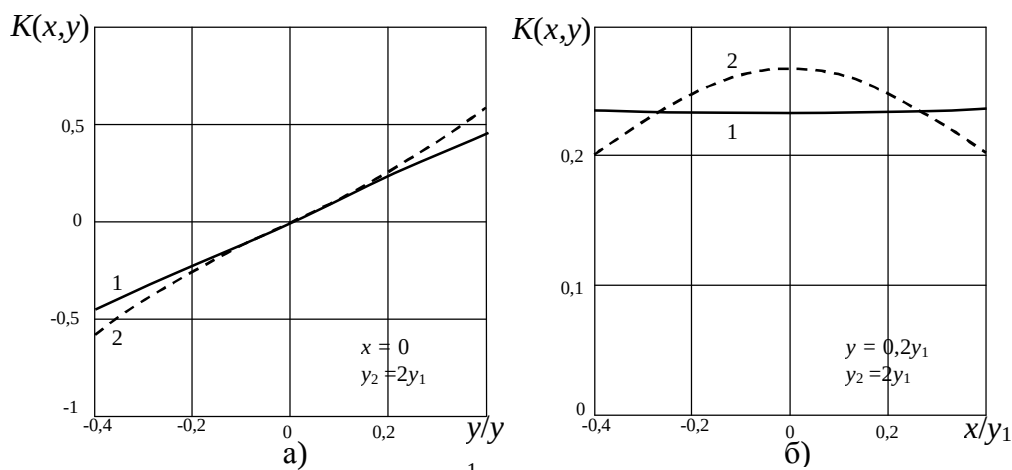


Рис. 8. Зависимость координатного множителя  $K(x,y)$  от изменения измеряемой координаты оси проводника  $y$  (а) и от изменения ортогональной координаты  $x$  (б) для предлагаемого преобразователя (1) и преобразователя-прототипа (2)

$$K(x, y) = \ln \frac{r_a r_c r_f r_h}{r_b r_d r_g r_k}. \quad (8)$$

Именно множитель  $K(x,y)$ , который будем называть в дальнейшем координатным множителем, определяет как характер функции преобразования, так и его зависимость от геометрических параметров преобразователя. Задача оптимизации, таким образом, сводится к определению геометрических параметров преобразователя, обеспечивающих независимость координатного множителя  $K(x,y)$  от изменения координаты  $x$  и линейную зависимость  $K(x,y)$  от измене-

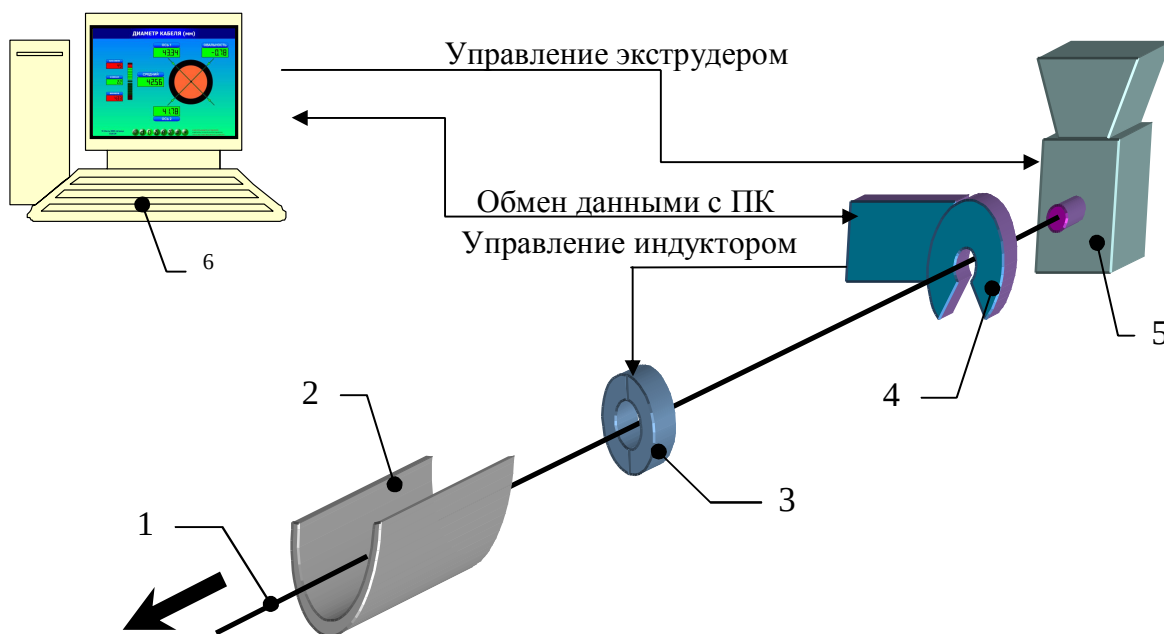


Рис 9. Участок технологической линии с установленным на ней измерителем эксцентricности. 1 – измеряемое изделие, 2 – охлаждающая ванна, 3 – индуктор, 4 – измерительная головка, 5 – экструдер, 6 – промышленный или персональный компьютер.

ния  $y$ . Математическими записями этих двух условий являются соответственно равенство нулю первой производной функции  $K(x,y)$  по переменной  $x$  и равенство нулю второй производной функции  $K(x,y)$  по переменной  $y$ :



$$\frac{dK(x, y)}{dx} = 0; \quad \frac{d^2 K(x, y)}{dy^2} = 0. \quad (9)$$

Анализ полученных результатов показывает, что оптимальное соотношение геометрических параметров  $x_1$  и  $y_1$  с точки зрения линейности функции преобразования совпадает для предлагаемого преобразователя с оптимальным соотношением этих же параметров с точки зрения независимости функции преобразования от смещения проводника в ортогональном измеряемому смещению направлении и определяется соотношением

$$x_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} y_1. \quad (10)$$

Данное соотношение является универсальным при выборе оптимальных геометрических параметров преобразователя.

Оптимальное соотношение геометрических параметров  $x$  и  $y$  с точки зрения линейности функции преобразования (рис.8,а) совпадает для предлагаемого преобразователя с оптимальным соотношением этих же параметров с точки зрения независимости функции преобразования от смещения проводника в ортогональном измеряемому смещению направлении (рис.8,б) [7,8]. Пунктирными линиями показаны аналогичные зависимости для преобразователя аналогичных устройств. Таким образом, получено аналитическое выражение для определения функции преобразования и методика определения оптимальных геометрических параметров преобразователя.

С учетом результатов проведенного анализа, была разработана конструкция измерителя диаметра и эксцентricности электрического кабеля «Вектор-1.01», свободная от присутствующих в устройствах прототипах недостатков. На рис. 9 изображён участок экструзионной технологической линии, с установленным на ней измерителем «Вектор-1.01». Измеритель состоит из трёх электронных устройств, конструктивно выполненных в обособленных корпусах – измерительной головки, индуктора, и персонального или промышленного компьютера [9,10].

В заключении представлены основные результаты работы, намечены перспективы дальнейшего развития.

В приложениях приведены документы, подтверждающие уровень внедрения описываемых в работе средств и методов контроля.

#### Основные результаты работы.

1. На основе анализа существующих методов и средств измерения диаметра электрического кабеля показано, что одними из эффективных методов контроля диаметра являются теневой в расходящемся пучке и проекционный метод, которые характеризуются малой погрешностью измерения, высоким быстродействием, хорошей помехоустойчивостью и простотой технической реализации. Анализ методов измерения эксцентricности одножильного кабеля показал, что наиболее эффективным в эксплуатации, простым и недорогим в реализации методом является индуктивно-оптический. Метод реализован с исполь-

зованием предложенных индуктивного и оптического преобразователей, обладающих целым рядом преимуществ перед аналогами.

2. Предложен и разработан оптический двухкоординатный проекционный метод измерения диаметра и овальности электроизоляционной оболочки электрического кабеля и конструкция оптического преобразователя, отличающегося компактностью, хорошим быстродействием и малой погрешностью измерения. Для метода разработаны алгоритмы преобразования сигналов первичной измерительной информации, позволяющие производить вычисление диаметра с заданной точностью.

3. Предложен и разработан оптический двухкоординатный метод измерения диаметра и овальности внешней оболочки кабеля в расходящемся лазерном пучке. Метод в силу отсутствия в оптической системе линзовых и зеркальных элементов, а также механических сканирующих узлов, обладает большей компактностью, малой погрешностью измерения, ограниченной исключительно разрешением применяемого многоэлементного приёмника, а также потенциально лучшей надёжностью. Разработаны также алгоритм преобразования первичной измерительной информации и конструкция измерительного преобразователя. Предложен способ отыскания геометрических параметров измерителей диаметра и овальности, базирующихся на описанном методе, упрощающий их калибровку при серийном производстве.

4. Предложен, разработан и реализован индуктивно-оптический метод измерения эксцентricности и диаметра одножильного электрического кабеля на основе совместного использования оптического метода измерения смещения внешней оболочки кабеля в расходящемся лазерном пучке и индуктивного трансформаторного метода измерения смещения токоведущей жилы. Предложенный к использованию индуктивный метод, в отличие от аналогов, благодаря особенностям реализации измерительного преобразователя и разработанной методике нахождения оптимальных геометрических параметров данного преобразователя обладает линейной функцией преобразования. Разработана разъёмная конструкция совмещённого индуктивно-оптического преобразователя, который позволяет вводить и выводить контролируемый кабель из зоны измерения, не останавливая технологический процесс, а также методика совместной обработки и отображения данных индуктивного и оптических измерительных каналов.

5. Для предложенных методов и средств контроля диаметра и эксцентricности кабельных изделий в процессе производства разработано метрологическое обеспечение, включающее в себя методики калибровки и поверки, а также средства и оборудование необходимые для их осуществления.

6. На основе предложенных оптических методов контроля внешней оболочки электрического кабеля разработаны, внедрены в серийное производство и поставлены для эксплуатации на многие заводы РФ, ближнего и дальнего зарубежья семейство приборов для технологического контроля диаметра кабельных изделий в процессе их производства. Применение предложенного индуктивно-оптического преобразователя позволило разработать и подготовить к производству измеритель эксцентricности и диаметра одножильного электрического

кабеля на проход, который успешно прошёл лабораторные и заводские испытания и в данный момент подготовлен к серийному производству.

По результатам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Фёдоров Е.М., Гольдштейн А.Е., Редько В.В. Методы и приборы оптического контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства // Ползуновский вестник 2010. № 2.
2. Фёдоров Е.М., Бесконтактный двухкоординатный измеритель протяжённых изделий больших диаметров в процессе их изготовления «ЦИКАДА-3.7» // Труды 13-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» том 1.
3. Фёдоров Е.М., Эдличко А.А. Вычисление геометрических параметров двухкоординатных измерителей диаметра протяжённых изделий // Известия ТПУ 2008. №2.
4. Фёдоров Е.М., Редько В.В., Вычисление геометрических параметров двухкоординатных измерителей диаметра протяжённых изделий, основанных на теневом методе измерения в расходящемся световом пучке // Труды 14-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» том 1.
5. Свендровский А.Р., Рябов Е.В., Фёдоров Е.М. Двухкоординатный лазерный измеритель диаметра «Цикада-2.72» // Сборник: Тезисов Докладов I всероссийской конференции Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения Томск, 2005.– С. 40–42.
6. Гольдштейн А.Е., Свендровский А.Р., Фёдоров Е.М., Индуктивно-оптический преобразователь измерителя эксцентricности электрического кабеля: пат. № 2300737 Рос. Федерация. № 2005135507; опубли. 15.11.05.
7. Гольдштейн А.Е., Фёдоров Е.М. Взаимоиндуктивный измерительный преобразователь поперечных перемещений прямолинейного проводника // Дефектоскопия, 2010, № 6, с. 41–49.
8. Goldshtein A.E. and Fedorov E.M. A Mutually Inductive Measuring Transducer of Transverse Displacements of a Rectilinear Conductor // RUSSIAN JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE TESTING Vol. 46 No. 6 2010.
9. Фёдоров Е.М., Гольдштейн А.Е., Свендровский А.Р., Редько В.В. Измеритель диаметра и эксцентricности электрического кабеля на основе индуктивнооптического метода // Известия ТПУ 2010. №2.
10. Фёдоров Е.М., Измеритель диаметра и эксцентricности электрического кабеля на основе индуктивно-оптического метода // Труды 12-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» том 1.

