

УДК 621.3.08:621.3.001.4:621.3:658.562

## ИЗМЕРИТЕЛЬ ДИАМЕТРА И ЭКСЦЕНТРИЧНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ НА ОСНОВЕ ИНДУКТИВНООПТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Е.М. Фёдоров, А.Е. Гольдштейн, А.Р. Свендровский\*, В.В. Редько

Томский политехнический университет

\*ООО «НИИ Эрмис», г. Томск

E-mail: evgeny\_fedorov@list.ru

Описан индуктивнооптический преобразователь для контроля на проход диаметра и эксцентрисности одножильного электрического кабеля непосредственно в процессе его производства на технологической линии. Предложен состав и техническая реализация измерительного прибора «Вектор-1.01» на его основе.

### Ключевые слова:

Эксцентрисность жилы, индуктивнооптический метод, контроль диаметра.

### Key words:

Eccentricities of wire, inductively optical method, diameter control.

### Введение

Задача измерения смещения токоведущей жилы относительно центра изоляционного материала остро стоит при производстве проводов и другой кабельной продукции, особенно высокочастотных и LAN проводов. Такой параметр, как эксцентрисность, очень критичен для этого вида продукции и непосредственно определяет её технические и эксплуатационные характеристики (частотные свойства, пропускающая способность) и, следовательно, отражается на качестве и цене готового изделия. Непрерывный контроль эксцентрисности также позволяет снижать расход дорогостоящих изоляционных материалов (поливинилхлорид, полиэтилен, полиамид и др. пластикаты) при производстве сигнальных и силовых проводов и кабелей. Необходимость измерения на выходе экструзионной головки (изоляция жилы имеет температуру  $\sim 130$  °С) и непрерывность технологического процесса не позволяют использовать для контроля контактные и разрушающие методы контроля эксцентрисности. На рис. 1 изображено сечение изолированной жилы электрического кабеля, где расстояние от центра токоведущей жилы до центра оболочки кабеля (отрезок  $e$ ) и есть её эксцентрисность, а отрезки  $e_x$  и  $e_y$  – проекции эксцентрисности по соответствующим осям.

Наиболее хорошо бесконтактный метод измерения данного параметра реализован фирмами, которые являются мировыми лидерами в разработке и производстве приборов контроля для кабельной промышленности, такими, как «Sikora Industrieelektronik» (Германия) [1], «Zumbach Electronic Automatic» (Швейцария), ООО «ЭРМИС+» (Россия).

Используемый в разработках [2] метод измерения поперечных перемещений проводника основан на возбуждении вокруг проводника переменного магнитного поля путем пропускания через проводник электрического тока (тока возбуждения) и зависимости от поперечных перемещений проводника сигнала дифференциального индукционного преобразователя.

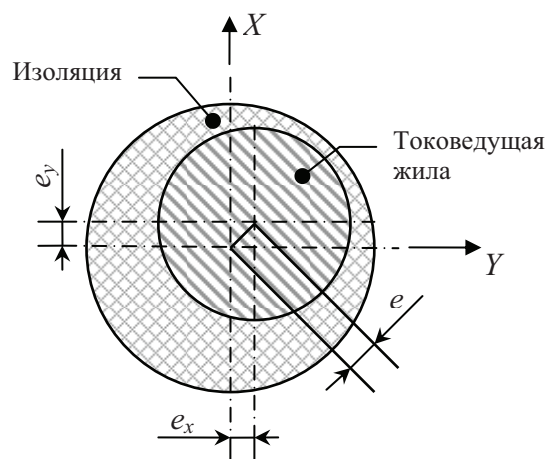


Рис. 1. Сечение контролируемой изолированной жилы электрического кабеля

Преобразователи, используемые в зарубежных разработках, обладают следующими недостатками. При смещении проводника по одной из осей:

- сигнал возникает не только в индукционном преобразователе, предназначенном для измерения смещения по этой оси, но и в ортогональном индукционном преобразователе;
- присутствует нелинейность функции преобразования смещения в электрический сигнал.

Теоретически указанные недостатки могут быть устранены путем сложной совместной вычислительной обработки сигналов обоих индукционных преобразователей. Однако алгоритм такой обработки должен корректироваться для каждого значения диаметра проводника, что на практике не реализуемо. В работе [2] для повышения точности измерения предлагается использовать механический привод, с помощью которого в процессе контроля осуществляется автоматическое центрирование проводника относительно оси преобразователя. Таким образом обеспечивается работа преобразователя в диапазоне поперечных смещений, в кото-

ром недостатки преобразователя прототипа практически не проявляются. Реализация данного технического решения в известных разработках хотя и позволила достичь высоких метрологических параметров, но во многом определила их высокую стоимость и низкие эксплуатационные параметры.

### Принцип измерения

В основе разработки лежит индуктивнооптический метод контроля эксцентричности электрического кабеля. Суть метода заключается в совместном использовании оптической двухкоординатной системы для определения положения центра, диаметра внешней оболочки кабельного изделия и трансформаторного взаимоиндуктивного магнитного преобразователя для измерения смещения центра токоведущей жилы. Совместно обрабатывая данные оптического и электромагнитного каналов, можно с достаточной точностью определять эксцентричность. На рис. 1, б, изображена схема измерителя эксцентричности, где  $K1.1$ – $K1.4$  и  $K2.1$ – $K2.4$  – катушки магнитных преобразователей, измеряющего смещение токоведущей жилы по первому и второму каналам;  $L1$ ;  $П1$  и  $L2$ ;  $П2$  – лазер и приёмник излучения первого и второго каналов оптической измерительной системы.

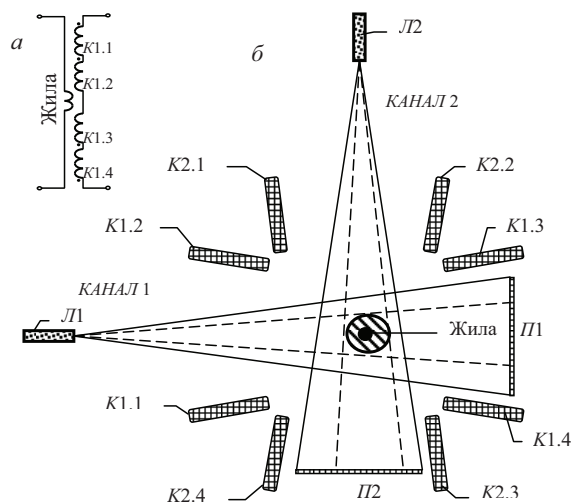


Рис. 2. Индуктивнооптический преобразователь: а) схема включения обмоток магнитного преобразователя одного из каналов; б) конструкция преобразователя

Отличие предлагаемой нами 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. Каждая из встречно включенных секций преобразователя, описанного в работе [2], заменена парой согласно включенных секций (рис. 2, а). Выбором оптимального соотношения геометрических параметров такого преобразователя могут быть достигнуты высокая линейность функции преобразования и независимость сигнала в обмотке, предназначенной для измерения смещения

по одной оси, от смещения по ортогональной оси в широком диапазоне измеряемых смещений [3].

Оптическая измерительная схема в зарубежных аналогах приборов такого типа реализована на методе измерения размеров тени в квазипараллельном пучке [4]. При разработке устройств контроля геометрических размеров это наиболее часто используемый метод, который может быть реализован как с многоэлементным преемником, так и со сканирующим узлом. Излучатель с помощью оптической системы создает в рабочей зоне, сквозь которую горизонтально движется измеряемый кабель, пучок света, близкий к параллельному. Тень кабеля падает на многоэлементный фотоприемник, ячейки которого расположены вертикально в линию. Число затемненных ячеек фотоприемника, помноженное на ширину одной ячейки, соответствует диаметру кабеля; также легко можно вычислить и положение центра кабеля.

Анализ измерителей, использующих теневой метод измерения в квазипараллельном световом потоке, показал, что основной вклад в погрешность при использовании данных схем вносит неидеальность оптической системы коллиматора, который преобразует свет от точечного источника в параллельный пучок. Наличие aberrаций и погрешность юстировки приводят к тому, что световой поток в рабочей зоне отличен от параллельного и при перемещениях измеряемого объекта в рабочей зоне, что довольно сильно влияет на точность измерения. Усугубляет ситуацию ещё и то, что измеритель должен устанавливаться в зоне экструсионной головки с температурой окружающего воздуха до  $90^\circ\text{C}$ . Применение описанных схем затруднительно из-за их громоздкости и сложности конструктивного совмещения с электромагнитной измерительной частью.

Для устранения вышеописанных недостатков была предложена оптическая схема измерителя (рис. 2, б), в которой точечные источники излучения расходящиеся пучки непосредственно на многоэлементные фотоприёмные линейки [5]. В качестве источников обычно используют полупроводниковые лазеры, излучение которых наиболее близко к точечному. Метод измерения диаметра и положения центра круглых протяженных изделий, использующий теневой метод измерения в расходящемся световом потоке, обладает целым рядом преимуществ, связанных с отсутствием в конструкции элементов линзовой и зеркальной оптики. В частности, достижимая точность измерения таких приборов составляет доли мкм и ограничена только дифракционными эффектами на границах тени и разрешающей способностью используемых многоэлементных приёмников. Измерение в расходящемся световом потоке вызывает изменение размеров тени измеряемого объекта при его перемещениях в зоне контроля. Последнее, требует использования сложных соотношений для расчета истинного диаметра объекта [6, 7].

Использование данного метода измерения внешнего диаметра и положения центра оболочки жилы позволяет более удачно, чем в устройствах прототипах совместить оптический и индуктивный измерительные каналы в единый измерительный моноблок (рис. 2, б), не прибегая к использованию системы механических приводов для центровки блока измерительных датчиков относительно измеряемой жилы. Немаловажным преимуществом предложенной нами конструкции является также то, что она является разъёмной в отличие от устройства прототипа. Это позволяет на любом этапе процесса производства на экструзионной линии свободно вводить измерительный прибор в зону измерения и также выводить его по мере необходимости без прерывания технологического процесса.

Таким образом, в основе предлагаемой конструкции индуктивно-оптического преобразователя [8] заложены три принципиальных отличия от конкурирующих измерительных систем зарубежного производства:

1. Используемый магнитный трансформаторный взаимоиндуктивный преобразователь обладает линейной функцией преобразования поперечного смещения проводника в электрический сигнал, позволяет отказаться от электрических приводов, в автоматическом режиме центрующих блок датчиков относительно измеряемого объекта.
2. Двухкоординатная оптическая система с расходящимся лазерным пучком не содержит элементов линзовой и зеркальной оптики, а также механических подвижных оптических элементов, что делает её компактной и потенциально более надёжной.

3. Использование оригинальных подходов в реализации индуктивно-оптического метода измерения позволило конструктивно скомпоновать оптические и индуктивные датчики в единый разъёмный, неподвижный, компактный измерительный моноблок.

#### Техническая реализация метода

С учетом результатов проведенного анализа была разработана конструкция измерителя диаметра и эксцентricности электрического кабеля «Вектор-1.01», свободная от недостатков, присутствующих в аналогичных устройствах. На рис. 3 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.

Сама измерительная головка устанавливается с помощью монтажных узлов на технологической линии изготовления кабеля, как правило, между экструдером и охлаждающей ванной (рис. 3) и производит измерения на горячем изделии непосредственно во время его движения. Через рабочую измерительную зону головки проходит контролируемый кабель. Головка содержит индуктивнооптический измерительный преобразователь и другие блоки, рис. 4.

Измерительная головка представляет собой законченное устройство и состоит из блоков, имеющих следующее назначение и функции (рис. 4). ИТП (X) и ИТП (Y) – индуктивные трансформаторные преобразователи каналов X и Y преобразуют поперечные смещения токоведущей жилы по двум

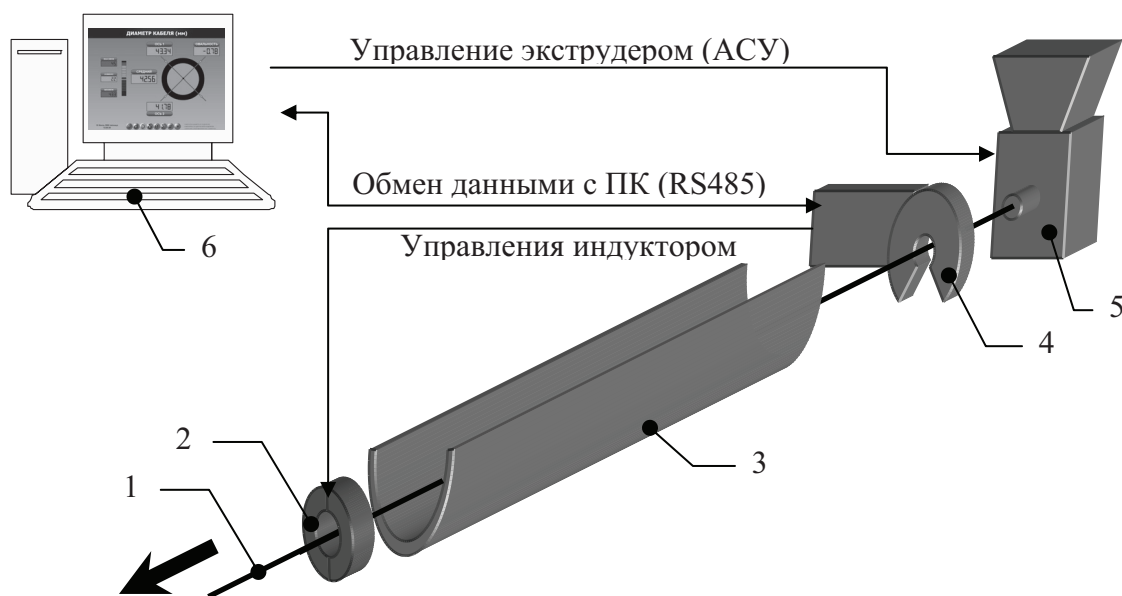


Рис. 3. Участок технологической линии с измерителем эксцентricности: 1) измеряемое изделие; 2) индуктор; 3) охлаждающая ванна; 4) измерительная головка; 5) экструдер; 6) промышленный или персональный компьютер



Рис. 4. Функциональная схема измерителя эксцентриситета и диаметра электрического кабеля

ортогональным осям в электрические сигналы  $u(X)$  и  $u(Y)$ , которые затем подаются в блок преобразования и усиления – БПУ, который содержит несколько усилительных каскадов и амплитудофазовый детектор. После усиления и детектирования нормированные сигналы  $u(X)$  и  $u(Y)$  через аналоговый мультиплексор – АМ подаются на блок аналого-цифрового преобразования АЦП. Помимо аналоговых электрических сигналов, характеризующих поперечное смещение жилы, блок БПУ генерирует сигнал  $\Sigma(I)$  – сумма токов, который характеризует величину тока, возбуждаемого в измеряемой жиле. Этот сигнал также оцифровывается блоком АЦП и в аналоговом виде для стабилизации тока возбуждения подаётся в блок индуктора БИ, который конструктивно обособлен от измерительной головки.

Оптические преобразователи ОП(X) и ОП(Y) преобразуют оптический сигнал в электрический, характеризующий поперечное смещение, диаметр и овальность внешней оболочки жилы. Оси оптических преобразователей X и Y ортогональны и совпадают с осями индуктивных преобразователей. В свою очередь каждый из них включает в себя соответствующий источник излучения ЛД – лазерный диод и приёмник излучения многоэлементный приёмник МП. Микроконтроллер МК1 осуществляет управление оптическими преобразователями. В частности, он генерирует последовательность цифровых импульсов, необходимую для запуска и

работы многоэлементных фотоприёмников, управляет лазерными диодами и считывает в цифровом виде информацию необходимую для вычисления диаметра и смещения оболочки жилы. Микроконтроллер МК2 посредством стандартной последовательной двунаправленной шины обмена данными SPI опрашивает блоки МК1 и АЦП, получая данные измерений от индуктивного и оптического каналов, затем производит необходимые первичные преобразования и передаёт данные измерений на промышленный или персональный компьютер – ПК. Связь с компьютером реализована по последовательному двунаправленному гальванически изолированному интерфейсу промышленного стандарта RS485.

Вторым блоком, входящим в состав измерителя «Вектор 1.01», является индуктор. Он устанавливается на технологической линии за охлаждающей ванной или непосредственно в нее. В контролируемом кабеле индуцируется синусоидальный ток частотой в десятки кГц и амплитудой в десятки мА. Амплитуда и частота сигнала определяется с одной стороны особенностями работы измерительного преобразователя, с другой стороны возможностью индуцировать ток в жиле кабельного изделия. Контуры протекания тока образуются между заземленным отдающим барабаном, находящимся в самом начале технологической линии и электрической емкостью изоляции кабеля, заземленной через охлаждающую ванну.

Последнее третье устройство измерительного комплекта это компьютер. Для компьютера, входящего в комплект поставки измерительного прибора, разработано программное обеспечение, которое производит окончательный расчёт измеряемых величин (эксцентрисности, диаметра, овальности). Также реализован пользовательский интерфейс, позволяющий оператору легко в режиме реального времени просматривать результаты измерений или накапливать архив результатов за выбранный промежуток времени, осуществлять допусковой контроль измеряемых величин, находить и вводить типы измеряемых изделий, при необходимости осуществлять ввод корректирующих поправок, производить диагностику измерительного оборудования и т. д. На рис. 5 приведён вид пользовательского интерфейса программы, отображающий процесс измерения прибором диаметра кабельного изделия.



Рис. 5. Пользовательский интерфейс оператора линии

Протокол, входящий в состав программного обеспечения, может осуществлять поддержку до 255 измерительных устройств, что позволяет на его

базе с использованием дополнительного измерительного оборудования (высоковольтных испытателей, измерителей диаметра, длины, скорости и ёмкости электрического кабеля) строить целые измерительные комплексы, позволяющие контролировать все параметры и этапы производства кабельной продукции, с возможностью частичной (на существующих технологических линиях) или с полной (на современных технологических линиях) автоматизацией процесса производства.

#### Заключение

Применение электромагнитной и оптической схем для измерения эксцентрисности и диаметра электрического кабеля позволило на базе фирмы «ЭРМИС+» (г. Томск) и кафедры информационно-измерительной техники ТПУ создать прибор «Вектор-1.01», который в отличие от зарубежных аналогов обладает большей компактностью, лучшими эксплуатационными характеристиками и заметно более низкой стоимостью. Нестандартный подход в реализации общей измерительной схемы позволил при использовании недорогой механики, оптики и электронных компонентов достичь метрологических характеристик не хуже, чем у зарубежных аналогов. Прибор имеет следующие технические и метрологические характеристики:

- абсолютная погрешность измерения диаметра и эксцентрисности – 1 мкм;
- минимальный/максимальный внешний диаметр измеряемого изделия – 0,1/5 мм;
- время однократного измерения – 10 мкс;
- количество измерений в секунду – до 300.

Завершены лабораторные и заводские испытания прибора для контроля диаметра и эксцентрисности электрического кабеля «Вектор-1.01», и он проходит подготовку к серийному производству.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sikora Industrieelektronik. 2010. URL: <http://www.sikora.com> (дата обращения: 26.01.2010).
2. Contactless system for measuring centricity and diameter: Pat. 03085354WO. EC. Publ. 16.10.2003.
3. Гольдштейн А.Е., Свендровский А.Р. Трансформаторный двухкоординатный измерительный преобразователь поперечных перемещений прямолинейного проводника // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 2. – С. 71–77.
4. Фролов Д.Н., Свендровский А.Р., Гольцеймер А.А., Гладышев Ю.Г. Опыт разработки устройства бесконтактного измерения диаметра кабельных изделий // Электротехника. – 1991. – № 3. – С. 26–28.
5. Свендровский А.Р., Рябов Е.В., Фёдоров Е.М. Двухкоординатный лазерный измеритель диаметра «Цикада-2.72» // Научно-

технические проблемы приборостроения и машиностроения: Сб. трудов I Всеросс. конф. – Томск, 2005. – С. 40–42.

6. Свендровский А.Р. Расчёт диаметра в бесконтактных двухкоординатных измерителях // Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения: Сб. трудов I Всеросс. конф. – Томск, 2005. – С. 31–33.
7. Фёдоров Е.М., Эдличко А.А. Вычисление геометрических параметров двухкоординатных измерителей диаметра протяженных изделий // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – № 2. – С. 18–21.
8. Индуктивно-оптический преобразователь измерителя эксцентрисности электрического кабеля: пат. № 2300737 Рос. Федерация. № 2005135507; опубл. 15.11.05.

Поступила 26.01.2010 г.