

## МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДИАМЕТРА И ОВАЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Погрешность алгоритма снижалась при обработке  $N$  строк

4. Центроидальный алгоритм со сложением координат источника излучения в нескольких строках (рисунок 5)

$$X_c = \left( \sum_{i=-p}^p X_i \right) / p,$$

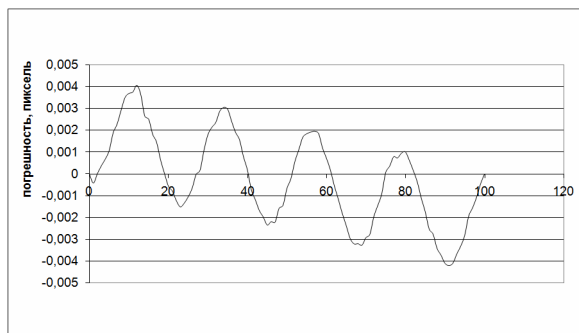


Рисунок 5 – Погрешность центроидального алгоритма со сложением амплитуд нескольких строк с учетом весовых коэффициентов при использовании 4000 строк, отношение сигнал/шум 160

где  $X_i = \frac{\sum_{k=-n}^n A_{x_{m-k}} \times X_{m-k}}{\sum_{k=-n}^n A_{x_{m-k}}}$ ;

$X_{m-k}$  - координата центра ячейки по оси X в строке  $i$ , амплитуда которой равна  $A_{x_{m-k}}$ ;  $n$  - количество ячеек, используемых для вычислений;  $p$  - количество строк.

УДК 620.179.1.082.5.05

## МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДИАМЕТРА И ОВАЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Е.М. Фёдоров, А.Е. Гольдштейн, В.В.Редько

Предложены оптические методы технологического контроля наружного диаметра электроизоляционной оболочки электрического кабеля, алгоритмы преобразования сигналов первичной измерительной информации, конструкции преобразователей.

**Ключевые слова:** контроль диаметра, проекционный метод измерения, метод измерения в расходящемся пучке.

Непрерывный контроль диаметра электроизоляционной оболочки электрического кабеля в процессе его производства позволяет обеспечить требуемую толщину изоли-

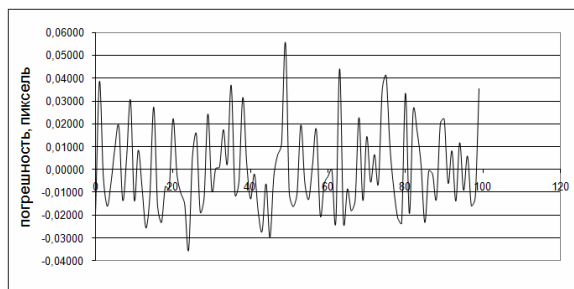


Рисунок 6 – Случайная составляющая результатов измерений для отношения сигнал/шум 3

### Выводы

Погрешность измерения координаты линии при отношении сигнал/шум 3 уменьшилась в  $\sqrt{p}$  раз [2] (рисунок 6).

Применение статистических методов обработки видеоинформации в приборах контроля координат излучения позволяет улучшить метрологические характеристики в широком диапазоне работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замятин, В.И. Моделирование приборов контроля перемещения источника излучения на фоточувствительной матрице/ В.И. Замятин, С.А. Отморский// Измерение, контроль, информатизация. – Б., 2010.
2. Замятин, В.И. Центроидальные алгоритмы контроля координаты точечного источника излучения на основе светочувствительной матрицы/ В.И. Замятин, С.А. Отморский// Измерение, контроль, информатизация. – Б., 2010.

Д.т.н., профессор **Замятин В.И.**; аспирант **Отморский С.А.**, тел. +7 913 087 58 59, [atomosk87@gmail.com](mailto:atomosk87@gmail.com) - Алтайский гостехуниверситет.

### РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

резины, и т.п.), а также даёт возможность автоматической регулировки диаметра при использовании измерителя в составе АСУ. 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. Для решения задачи контроля диаметра в таких условиях наиболее применимы оптические методы измерения.

В настоящее время для контроля геометрических размеров проводов, кабелей (главным образом диаметра) разработан широкий спектр оптоэлектронных приборов и устройств различных типов. Существующие зарубежные аналоги подобных устройств при хороших метрологических характеристиках обладают рядом серьёзных недостатков, которые накладывают ограничение на их использование. Сложность технических решений, применяемых для осуществления измерения, наличие механически подвижных узлов, и как следствие малая механическая прочность, а также высокая цена таких систем неприемлемы для отечественных кабельных предприятий. Отечественные разработки приборов для контроля наружного диаметра электроизоляционной оболочки электрического кабеля в настоящее время практически отсутствуют.

#### Проекционный метод

Наиболее широко используемым методом оптического контроля является теневой метод в квазипараллельном пучке [1]. Суть метода заключается в измерении многоэлементным линейным фотоприёмником тени, создаваемой кабелем, в параллельном световом потоке. Однако его применение для измерения больших диаметров затруднительно, так как требует использования высококачественной широкоапертурной, а следовательно дорогостоящей оптики. Отсутствие представленных на российском рынке многоэлементных приёмников соответствующей длины вынуждает использовать приёмники длиной до 30 мм, что делает реализацию описанного выше метода громоздкой и дорогостоящей.

Вместе с тем задача измерения больших диаметров от 60 до 500 мм до сих пор остаётся не решённой применительно к производству полимерных труб, силовых кабелей, профилей сложного сечения методом экструзии.

Для измерения изделий большого диа-

метра нами предложен бесконтактный проекционный двухкоординатный оптоэлектронный метод измерения. Метод основан на измерении многоэлементным линейным фотоприёмником поперечного размера изображения кабельного изделия, получаемого с помощью объектива [2]. Для создания высокой контрастности изображения используется подсветка измеряемого объекта с тыльной стороны линейкой светодиодов. Оптическая схема прибора представлена на рисунке 1.

Двухкоординатное измерение диаметра обеспечивается наличием в приборе двух одинаковых измерительных каналов (рисунок 1), оптические оси которых взаимно перпендикулярны.

В приборах, использующих проекционную схему измерения, диаметр вычисляется по сложному алгоритму. При перемещениях объекта в рабочей зоне размеры его изображений, проецируемых на многоэлементные приёмники, изменяются. Чтобы отследить эти изменения требуется двухкоординатное измерение.

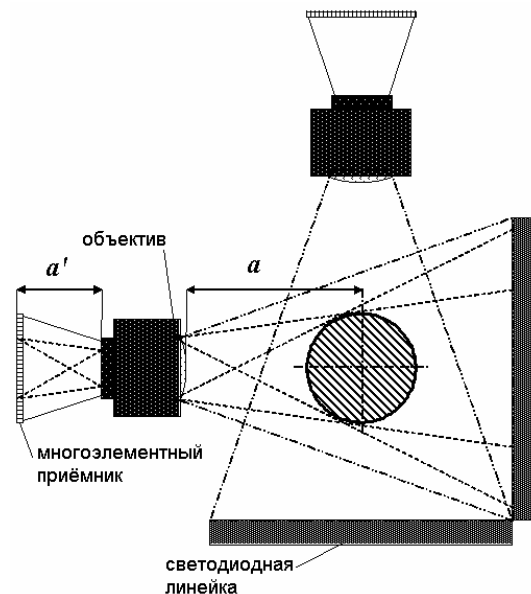


Рисунок 1 - Оптическая схема прибора:  $o_1$  и  $o_2$  - оптические оси соответственно первого и второго измерительных каналов

При перемещении измеряемого объекта перпендикулярно оптической оси любого измерительного канала его изображение, проецируемое на ПЗС приёмник этого канала, остаётся неизменным в довольно большом диапазоне смещений, что показано на рисунке 2. Практически все современные фотографические объективы исправлены по абerra-

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДИАМЕТРА И ОВАЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

циям, поэтому такими перемещениями, как правило, можно пренебречь.

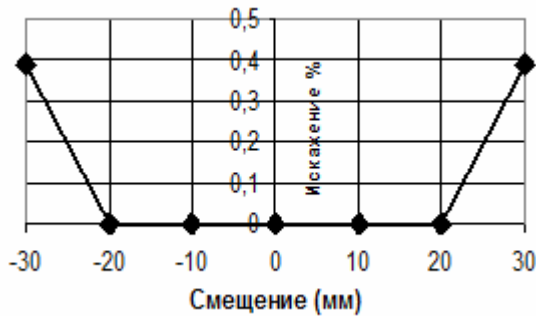


Рисунок 2 - Изменение размеров проецируемого изображения (искажение), в зависимости от перемещения объекта перпендикулярно измерительной оси: точка 0 – оптическая ось

При смещении контролируемого изделия вдоль одной из оптических осей соответствующего канала, размер проекции его изображения на ПЗС приёмник данного канала изменяется. Для преобразования измеренной проекции в значение диаметра требуется знать зависимость размера этой проекции в каждом измерительном канале от смещения измеряемого объекта вдоль оптической оси этого канала. Функцию преобразования первичной измерительной информации для расчёта диаметра в такой двухкоординатной системе невозможно вывести аналитически, так как при перемещении измеряемого объекта вдоль одной из измерительных осей происходит его выход из фокальной плоскости объектива, что влечёт за собой частичное размытие границ его изображения, проецируемого на ПЗС линейку. Кроме этого происходит изменение масштаба его отображения, поэтому выражение для расчёта диаметра в проекционной двухкоординатной измерительной системе можно получить только при экспериментальной калибровке прибора.

Исходными измеряемыми параметрами для обоих измерительных каналов в проекционной системе являются координаты фронта и спада границ изображения измеряемого объекта F и S, измеряемые соответствующим ПЗС приёмником. На рисунке 3 показан типичный видеосигнал с ПЗС линейки, который и представляет собой проекционное изображение измеряемого объекта.

Зная параметры F и S (рис.3), мы можем определить: размер проекции  $D^*$  объекта  $D^* = S - F$  по одному измерительному каналу и положение координаты центра объекта C по другому измерительному каналу  $C = \frac{S' + F'}{2}$ .

Здесь  $S'$  и  $F'$  координаты фронта и спада границ изображения измеряемого объекта для второго измерительного канала.

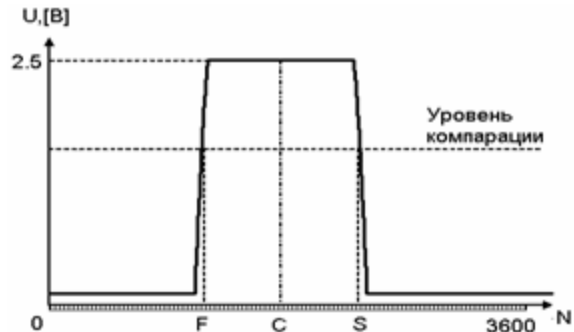


Рисунок 3 - Видеосигнал многоэлементного фотоприёмника – зависимость выходного напряжения  $U(V)$  от номера ячейки N

Для определения функции преобразования были получены зависимости размеров проекции измеряемого объекта по одному измерительному каналу от координат положения центра его проекции по другому измерительному каналу  $D^*(C)$  для нескольких эталонных калибров известного диаметра.

На рисунке 4 приведены типовые калибровочные кривые для калибров от 5 до 40 мм.

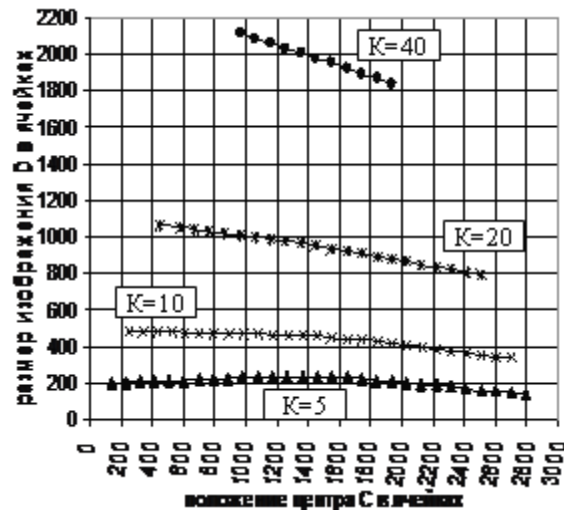


Рисунок 4 – Калибровочные кривые  $D^*(C)$ : K – диаметр калибра, мм

Как видно из графиков для каждого из диаметров зависимости существенно отличаются. Чтобы учесть изменение размеров проекций при перемещении измеряемого объекта и вычислить его реальный диаметр, используя калибровочные кривые, строим графики зависимости коэффициента преобразования  $b = D_k / D^*$  от положения центра проекции C ( $D_k$  – диаметр соответствующего эталонного калибра,  $D^*$  – размер проекции

### РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

объекта) для каждого из калибровочных этапов (рисунок 5).

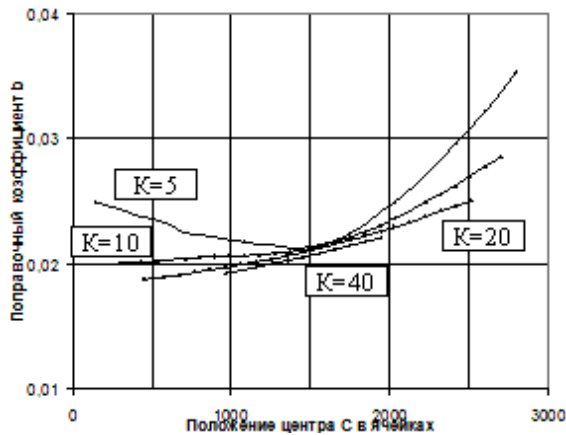


Рисунок 5 - Зависимость поправочного коэффициента  $b(C)$ :  $K$  – диаметр калибра в мм

Диаметр измеряемого объекта определяется как произведение размера проекции объекта  $D^*$  на коэффициент преобразования  $b$ . Как видно из графиков в предметной плоскости объектива, которая проходит через центр рабочей зоны измерителя, коэффициент преобразования одинаков для всех эталонных калибров и равен масштабному множителю  $k_m$ . Значение  $k_m$  определяется типом используемого объектива, а также положением предметной плоскости и плоскости изображения.

Определить диаметр в зависимости от положения измеряемого объекта в зоне измерения можно аппроксимировав каждую из кривых  $b(C)$  полиномом вида:

$$b(C) = x_1 C^3 + x_2 C^2 + x_3 C + x_4 \quad (1)$$

где  $x_1 \dots x_4$  – коэффициенты, которые меняются в зависимости от диаметра калибра, при помощи которого была снята соответствующая зависимость  $b(C)$ ,  $C$  – положение центра проекции,  $b$  – коэффициент преобразования.

Вышеописанная процедура калибровки довольно сложна и трудоёмка, так как ввиду нелинейного характера функции преобразования для получения требуемой погрешности прибора в 50 мкм, зависимости  $b(C)$  должны быть получены для эталонных калибров всего измерительного диапазона прибора с шагом диаметра в 0.5 мм. Также надо учесть, что для каждого типового прибора её надо проделать дважды, так как измерительная схема двухкоординатная. В случае серийного и малосерийного производства производить описанную калибровку для каждого прибора из партии нерационально и неприемлемо.

Поэтому был разработан упрощённый, пригодный для серийного производства вариант калибровки, который не требует использования специального оборудования – калибровочных двухкоординатных столов и большого набора эталонных калибров. Возможно также его использование в заводских условиях.

Вид функции преобразования первичной измерительной информации при упрощённом методе калибровки определяется типом решаемой задачи. В самом простом случае функция преобразования описывается линейной функцией:

$$D_{1X}(C) = k_m D^* (AC + B), \quad (2)$$

где  $D_{1X}(C)$  – результат измерения диаметра,  $A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты линейной функции, которые находятся экспериментально.

Для определения коэффициентов  $A$  и  $B$  требуется сравнительно небольшой массив данных  $[m \times n]$ , где  $m$  это число калибров, а  $n$  число местоположений калибров в зоне измерения. Представленная функция преобразования обеспечивает требуемую погрешность измерения только для больших диаметров (начиная с 60 мм) в малом (не более 5 мм), диапазоне смещений измеряемого объекта.

Для достижения более высоких метрологических характеристик используется более сложный вид функции преобразования, представляющей из себя сумму функции преобразования (2) и поправки, являющейся линейной функцией величины  $C$ . Такая функция преобразования имеет вид:

$$D_{2X}(C) = k_m D^* (AC + B) + (aC + b), \quad (3)$$

где  $D_{2X}(C)$  – результат измерения диаметра,  $a$  и  $b$  – коэффициенты линейной функции.

Определение постоянных коэффициентов функции преобразования (3) требует использования большего массива значений  $[m \times n]$ , однако обеспечивает требуемую погрешность в более широком диапазоне смещений измеряемого изделия (до 20 мм) не только для больших, но и для средних измеряемых диаметров от 20 мм.

Для получения функции преобразования для всего диапазона измеряемых диаметров, коэффициенты  $a$  и  $b$  описываются линейными функциями величины  $D_{1X}$ , определяемой выражением (2). Точная формула для расчёта диаметра измеряемого объекта выглядит следующим образом:

$$D_{3X}(C, D_{1X}) = k_m D^* (AC + B) + [(dD_{1X} + e)C + (fD_{1X} + g)], \quad (5)$$

где:  $D_{3X}(C, D_{1X})$  – результат измерения диаметра,  $D_{1X}$  – диаметр, вычисленный с использованием функции преобразования (2),  $d, e, f, g$  – коэффициенты линейных функций  $a(D_{1X})$  и  $b(D_{1X})$ .

Для получения описанной функции требуется большой массив экспериментальных данных  $[m \times n]$ , однако её использование позволяет получить требуемую погрешность прибора при поперечных смещениях изделия в широких пределах (до 40 мм), во всём диапазоне измеряемых диаметров от 4 до 60 мм.

Таким образом, предложенный метод двухкоординатного проекционного оптического измерения диаметра и овальности протяжённых изделий, конструкция измерительного преобразователя (рис.1) и алгоритм преобразования сигналов измерительной информации (5) позволяют производить контроль изделий больших и средних диаметров.

Метод измерения в расходящемся световом потоке

Анализ измерителей диаметра, использующих теневой метод измерения в параллельном световом потоке показал, что основными их недостатками при контроле кабеля диаметром от 0.1 до 40 мм являются:

абберации объектива, формирующего параллельный световой поток, что влечёт за собой снижение точности измерения, особенно для кабелей малого диаметра;

большие продольные размеры оптической системы, что делает затруднительным проектирование компактных двухкоординатных измерительных приборов.

Проекционный метод также малоприменим для контроля изделий малых диаметров из-за того, что именно в этом диапазоне обладает наибольшей нелинейностью функции преобразования (рисунок 5).

Целым рядом неоспоримых преимуществ, связанных с отсутствием в них элементов линзовой и зеркальной оптики, обладают бесконтактные двухкоординатные измерители диаметра круглых протяжённых изделий, использующие теневой метод измерения в расходящемся световом потоке. В частности, достижимая точность измерения таких приборов составляет доли микрометра и ограничена только дифракционными эффектами на границах тени.

Однако, работа 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.

Схема рассматриваемого двухкоординатного измерителя показана на рисунке 6.

Прибор содержит два измерительных канала, оси которых  $X$  и  $Y$  взаимно перпендикулярны. В каждом канале имеется точечный излучатель (лазер), создающий расходящийся световой поток и многоэлементный линейный фотоприемник, измеряющий размер тени объекта. Контролируемый объект, имеющий форму сечения близкую к кругу, находится в рабочей зоне прибора, освещается двумя излучателями и образует две тени, воспринимаемые фотоприемниками измерительных каналов.

В работе [3] выведены выражения для расчета диаметров  $D_X$  и  $D_Y$  для каждой из осей в двухкоординатной оптической системе с расходящимся пучком:

$$D_X = 2\sqrt{E_X^2 + (H_{X0} - E_Y)^2} \sin \frac{1}{2} \left( \arctg \frac{X_2}{H_X} - \arctg \frac{X_1}{H_X} \right),$$

$$D_Y = 2\sqrt{E_Y^2 + (H_{Y0} - E_X)^2} \sin \frac{1}{2} \left( \arctg \frac{Y_2}{H_Y} - \arctg \frac{Y_1}{H_Y} \right),$$
(6)

где расстояния от центра объекта до соответствующих осей  $E_X$  и  $E_Y$  равны:

$$E_X = \frac{X_0 H_Y \left( H_{X0} - Y_0 \frac{H_{Y0}}{H_Y} \right)}{(H_X H_Y - X_0 Y_0)},$$

$$E_Y = \frac{Y_0 H_X \left( H_{Y0} - X_0 \frac{H_{X0}}{H_X} \right)}{(H_X H_Y - X_0 Y_0)}.$$
(7)

Положения проекции центра объекта на соответствующих многоэлементных приёмниках  $X_0$  и  $Y_0$  равны:

$$X_0 = H_X \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left( \arctg \frac{X_2}{H_X} + \arctg \frac{X_1}{H_X} \right),$$

$$Y_0 = H_Y \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left( \arctg \frac{Y_2}{H_Y} + \arctg \frac{Y_1}{H_Y} \right),$$
(8)

где в свою очередь положения начала  $X1, Y1$  и конца  $X2, Y2$  теней объекта на соответствующих приёмниках равны:

$$X_1 = F_x - B_{x0},$$

$$Y_1 = F_y - B_{y0},$$

Фронты и спады теней соответствующих приёмников  $F_x, S_x$  и  $F_y, S_y$  собственно являются измеренными значениями необходимыми для расчёта диаметра по вышеприведённым выражениям.

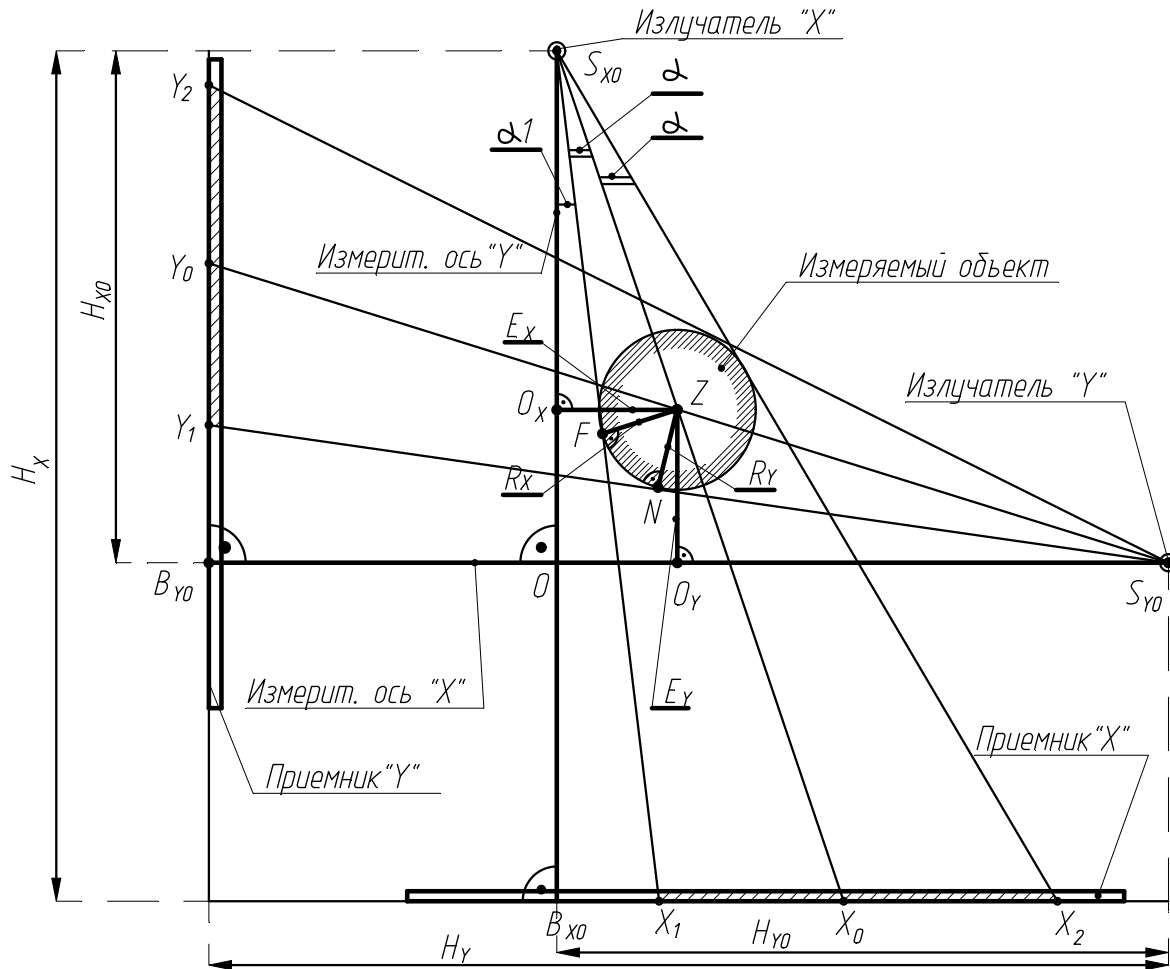


Рис. 6. Геометрия задачи.

В работе [3] при выводе выражений (6–9) делается допущение о том, что изначально известны следующие параметры конструкции прибора:

- 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 реальном измерительном приборе значения этих параметров далеки от конструктивных [4] из-за неточности изготовления деталей, неидеальности реальной оптической системы. Если в реальном приборе при расчёте диаметра использовать значения геометрических параметров равные конструктивным, то вычисленный диаметр не удовлетворяет требуемой погрешности. Измерить эти параметры прямыми методами с доста-

точной точностью технически невозможно. Таким образом, для достижения необходимой точности вычисления диаметра измеряемого объекта по формулам (6–9), мы должны решить обратную задачу, т. е., имея набор круглых аттестованных калибров с известными диаметрами, необходимо отыскать точные значения шести геометрических параметров  $H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}$ .

Для вычисления геометрических параметров для каждого конкретного измерителя можно составить систему из шести уравнений, используя три аттестованных круглых калибра с известными диаметрами  $D_1, D_2, D_3$ . Для упрощения записи уравнений, выражения (6–9), в них входящие, обозначены как  $f_i(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0})$  при  $i=1-6$ . Причём каждому уравнению соответствуют свои уникальные измеренные значения фронта и спада  $F_x, S_x$  и  $F_y, S_y$  по соответствующим измерительным осям. Уравнения являются независимыми друг от друга, однако точного аналитического или численного решения такой сис-

темы не существует из-за того, что реальная оптическая система отлична от идеальной.

$$\left. \begin{aligned} D_{1_x} &= f_1(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{1_y} &= f_2(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{2_x} &= f_3(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{2_y} &= f_4(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{3_x} &= f_5(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{3_y} &= f_6(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \end{aligned} \right\} (10)$$

Каждое из уравнений системы (10) можно заменить соответствующим неравенством вида:  $D_i - p \leq f_i(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \leq D_i + p$ , где  $p$  это максимальная допустимая погрешность прибора, для которого осуществляется поиск геометрических параметров. Таким образом, система уравнений преобразуется в систему неравенств, решая которую численными методами, можно отыскать совокупность значений геометрических параметров, которые удовлетворяют требуемой максимальной погрешности прибора при вычислении диаметра круглых объектов по выражениям (6–9).

Учитывая сложность и громоздкость уравнений, входящих в систему, а также количество неизвестных переменных в ней, даже на современной компьютерной технике задача поиска численными методами значений удовлетворяющих системе очень трудоемка, занимает много времени. Поэтому этот метод поиска значений неприемлем для серийного выпуска приборов.

Для упрощения способа отыскания необходимых геометрических параметров было оценено влияние каждого из них на значение вычисленного диаметра. Для этого были построены зависимости расчётного диаметра для каждой из осей  $X$  и  $Y$ , поочерёдно от каждого из геометрических параметров  $H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}$ . При этом значение остальных параметров принимались равными конструктивным. Изменение параметров  $H_{x0}, H_x$  в пределах  $\pm 5$  мм, а  $B_{y0} \pm 2,5$  мм разницы от заложенных конструктивно значений расчётный диаметр меняется на сотни мкм, что на порядок больше допустимой погрешности приборов такого типа. При изменении в таких же пределах соответственно параметров  $H_{y0}, H_y$  и  $B_{x0}$  расчётный диаметр изменяется на единицы мкм, что в свою очередь на порядок меньше допустимой погрешности подобных измерительных приборов. Видно, что влияние последней тройки параметров на конечный результат на два порядка менее

выражено, чем первой. Это даёт нам возможность принять их значения, равными конструктивным, и в дальнейшем считать известными величинами. При анализе влияния геометрических параметров на расчётный диаметр по оси  $Y$  получается зеркальная ситуация, т. е. за константы напротив можно принять параметры  $H_{x0}, H_x, B_{y0}$ . Таким образом, диаметр по оси  $X$  является функцией параметров  $H_{x0}, H_x, B_{y0}$ , а диаметр по оси  $Y$  функцией параметров  $H_{y0}, H_y, B_{x0}$ . Т. к. диаметры по разным осям зависят от разных геометрических параметров, то системы неравенств для вычисления этих параметров можно решать независимо для каждой из измерительных осей, а систему уравнений (10) возможно упростить и записать в виде двух независимых систем неравенств:

$$\text{для координаты } X \quad \{Dx_i - p \leq f_i(H_{x0}, H_x, B_{y0}) \leq Dx_i + p\}, \quad (11)$$

$$\text{для координаты } Y \quad \{Dy_i - p \leq f_i(H_{y0}, H_y, B_{x0}) \leq Dy_i + p\}, \quad (12)$$

где  $i=1-3$  для обеих систем.

Такое допущение существенно, на три порядка сокращает объём необходимых вычислений и упрощает систему (10), а соответственно и задачу по поиску численными методами геометрических параметров, при которых погрешность измерения прибора меньше максимально допустимой погрешности  $p$ .

Так как системы уравнений (11, 12) также как и система (10) не имеют аналитического решения, то для нахождения искоемых значений используются численные методы. Они позволяют с точностью до 1 мкм определять геометрические параметры конкретного измерительного прибора.

Предложенный метод двухкоординатного оптического измерения диаметра и овальности протяжённых изделий в расходящемся лазерном пучке, конструкция измерительного преобразователя и алгоритм преобразования сигналов измерительной информации, позволяют упростить оптическую схему, исключив из неё элементы линзовой и зеркальной оптики, а так же механические сканирующие узлы. Использование полученных описанным способом значений  $H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}$  при вычислении диаметра с применением выражений (1–9) с учётом упрощений (11, 12), позволяет достичь требуемой погрешности (1...10 мкм) измерительных приборов, использующих теневой метод измерения в расходящемся световом потоке [5], и обеспечить

### РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

их высокие метрологические характеристики (таблица 1).

Таблица 1. технические и метрологические характеристики измерителей диаметра серии «Цикада»

Тип измерителя >>> Параметр	Цикада-1.7	Цикада-2.72	Цикада-3.8	Цикада-3.72	Цикада-4.71
диапазон измерения диаметра (мм)	0.1...5	0.3...10	4...60	4...60	20...120
Абсолютная погрешность измерения (мкм)	1	10	40	40	60
возможность измерения овальности	да				
метод измерения	двухкоординатный теневой в расходящемся световом пучке			Двухкоординатный проекционный	
максимальная скорость движения изделия в зоне измерения (м/мин)	1800			800	
количество измерений в 1 секунду не менее	200			100	
время наработки на отказ (тыс. ч.)	50				

#### Заключение

Применение описанных в данной работе оптических методов преобразования первичной информации, а также конструкций преобразователей позволило спроектировать серию приборов для измерения диаметра электрического кабеля.

В отличие от зарубежных аналогов данные приборы обладают лучшей компактностью, эксплуатационными характеристиками и заметно более низкой стоимостью. Также использование нестандартных подходов в реализации общих измерительных схем позволило достичь метрологических характеристик в широком диапазоне измеряемых диаметров не хуже чем у зарубежных аналогов. Приборы имеют высокие технические и метрологические характеристики.

В настоящее время измерители диаметра серии «Цикада» выпускаются серийно предприятием ООО «Эрмис+» г. Томск.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов, Д.Н. Опыт разработки устройства бесконтактного измерения диаметра кабельных изделий // Д.Н. Фролов, А.Р. Свендровский, А.А. Гольцеймер, Ю.Г.Гладышев.- Электротехника. -1991. -№ 3. -С. 26-28.
2. Фёдоров, Е. М. Бесконтактный двухкоординатный измеритель протяжённых изделий боль-

ших диаметров в процессе их изготовления «Цикада-3.7». // Е. М. Фёдоров. - Труды 13-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии». – Томск, 2008. -С. 246.

3. Свендровский, А.Р. Расчёт диаметра в бесконтактных двухкоординатных измерителях // А.Р. Свендровский. - В сборнике: Тезисы Докладов всероссийской конференции Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения. - Томск, 2005. -С. 31-33.
4. Фёдоров, Е.М. Вычисление геометрических параметров двухкоординатных измерителей диаметра протяжённых изделий. // Е.М. Фёдоров, А.А. Эдличко. - Известия ТПУ. -2008. -№2.
5. Свендровский, А.Р. Двухкоординатный лазерный измеритель диаметра «Цикада-2.72» // А.Р. Свендровский, Е.В. Рябов, Е.М. Фёдоров В сборнике: Тезисы Докладов I всероссийской конференции Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения. -Томск, 2005. -С. 40-42.

Ассистент **Фёдоров Е.М.**, e-mail: [evgeny\\_fyodorov@list.ru](mailto:evgeny_fyodorov@list.ru); д.т.н., профессор **Гольдштейн А.Е.**, тел. (3822) 41-89-11, e-mail: [algol@iit.b10.tpu.edu.ru](mailto:algol@iit.b10.tpu.edu.ru); к.т.н., доцент, **Редько В.В.**, e-mail: [ultratone@rambler.ru](mailto:ultratone@rambler.ru), Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра информационно-измерительной техники (г. Томск)