

*А. Н. Демин, В. И. Смыслов, А. Т. Клементьев*

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА  
НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ С КУБИЧЕСКОЙ  
СИММЕТРИЕЙ  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  И  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$**

*A. N. Demin, V. I. Smyslov, A. T. Klement'ev*

**METROLOGICAL ANALYSIS OF FIBER-OPTIC ELECTRIC  
CURRENT SENSORS BASED ON CRYSTALS  
WITH CUBIC SYMMETRY  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  AND  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$**

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается актуальный вопрос создания волоконно-оптических датчиков электрического тока (ВОДТ). ВОДТ по сравнению с другими датчиками тока обладают рядом преимуществ, что вызывает к ним значительный практический интерес и уже обеспечивает их применение. Объектом исследования являются ВОДТ на основе кристаллов с кубической симметрией  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ . Предметом исследования являются метрологические характеристики таких ВОДТ. Целью работы является анализ метрологических характеристик с точки зрения минимизации погрешностей датчиков и выработка рекомендаций по их снижению. *Материалы и методы.* Последовательно рассмотрены структурная и функциональная схемы однопроходного ВОДТ на кристаллах с кубической симметрией  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ , а также его метрологическая модель. Такая метрологическая модель, разработанная на основе входящих в ВОДТ функциональных элементов, погрешностей изготовления отдельных элементов и узлов ВОДТ, различных внутренних и внешних влияющих факторов, взаимосвязей и взаимовлияния всего вышеуказанного, позволила предложить и проанализировать реальную функцию преобразования ВОДТ. *Результаты.* Проведенный метрологический анализ показал, что на результат измерения влияет ряд факторов, которые проявляются в виде аддитивной и мультипликативной погрешностей. При этом факторы, связанные с несовершенством технологии изготовления ВОДТ, как правило, могут быть учтены при расшифровке результатов измерений или минимизированы путем использования специальных конструктивно-технологических приемов при проектировании и изготовлении ВОДТ. Самой существенной по величине погрешностью, которую достаточно трудно устранить, является дополнительная температурная погрешность от влияния температуры внешней среды. *Выводы.* На основе проведенного метрологического анализа предложен путь реализации ВОДТ с минимально возможной для такого типа датчиков погрешностью измерения. Указано, что наибольший вклад в суммарную погрешность измерения вносит дополнительная температурная погрешность от влияния температуры внешней среды. Предложены технические приемы ее уменьшения.

**Abstract.** *Background.* The article considers a topical issue of creating optical fiber sensors of electric current (FSEC). FSEC compared with other current sensors have several advantages, which causes them considerable practical interest and provide their application. Object of research are FSEC on the basis of crystals with cubic symmetry  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  and  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ . The subject of research is the metrological characteristics of such FSEC. The aim of this work is the analysis of metrological characteristics from the point of view of minimizing sensor errors and develop recommendations for their reduction. *Materials and methods.* Consistently examined the structural and functional scheme of the single-pass FSEC on crystals with cubic symmetry  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  and  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ , as well as its measurement model. Such metrological model developed on the basis of outside FSEC functional elements, the manufacturing errors of individual ele-

ments and nodes of FSEC, various internal and external influencing factors, interrelations and mutual influence of all the above, allowed us to propose and analyze a real function of converting FSEC. *Results.* Metrological analysis showed that the measurement result is affected by several factors, which manifest themselves in the form of additive and multiplicative errors. However, the factors related to imperfect manufacturing techniques, FSEC as a rule, can be taken into account when interpreting the results of measurements or minimized by the use of special design-technological methods in the design and manufacture of FSEC. The most significant largest error, which is quite difficult to resolve, is the additional temperature error from the influence of external temperature. *Conclusions.* Based on metrological analysis a way to implement FSEC with the lowest possible for this type of sensor measurement noise. Indicated that the largest contribution to the total measurement error introduces additional temperature error from the influence of external temperature. Proposed techniques for its reduction.

**Ключевые слова:** электрический ток, волоконно-оптический датчик, структурная схема, функциональная схема, метрологическая модель, погрешность измерения.

**Key words:** electric current, fiber optic sensor, structural diagram, a functional diagram, measurement model, measurement error.

Волоконно-оптические датчики электрического тока (ВОДТ) находят в настоящее время все более широкое применение в измерительной технике благодаря целому ряду преимуществ перед традиционными методами измерений и датчиками [1, 2]. К их преимуществам относятся пассивность чувствительного элемента (отсутствие электропитания), дистанционность измерений (расстояние от точки измерений до регистрирующей аппаратуры может составлять сотни метров), гальваническая развязка, высокая чувствительность и быстродействие, малый вес и габариты при высокой помехозащищенности от внешних воздействий. Эти качества ВОДТ важны при разработке и создании информационно-измерительных систем различного назначения.

Для создания ВОДТ для измерения электрического тока в проводнике с электрическим током используются в основном три известных физических эффекта: эффект Фарадея, эффект магнитострикции и эффект смещения проводника с током в магнитном поле под действием силы Лоренца [3–5].

При создании информационно-измерительных систем с большим динамическим диапазоном, высоким рабочим напряжением, минимальной инерционностью и массово-габаритными характеристиками наибольшее применение нашли ВОДТ на основе эффекта Фарадея в оптически активных кристаллах с кубической симметрией, в частности  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ . Используются три типичные оптические схемы чувствительных элементов (ЧЭ) ВОДТ: проходная схема, когда излучение проходит через кристалл один раз; отражательная схема, когда излучение проходит через кристалл дважды – туда и обратно, и многопроходная схема, в которой луч света несколько раз проходит через кристалл, что позволяет повысить чувствительность ВОДТ за счет увеличения длины оптического пути. С учетом простоты реализации, минимально достижимых габаритов и оптимальных в совокупности технических характеристик наибольшее распространение нашла «проходная» схема, которая приведена на рис. 1.

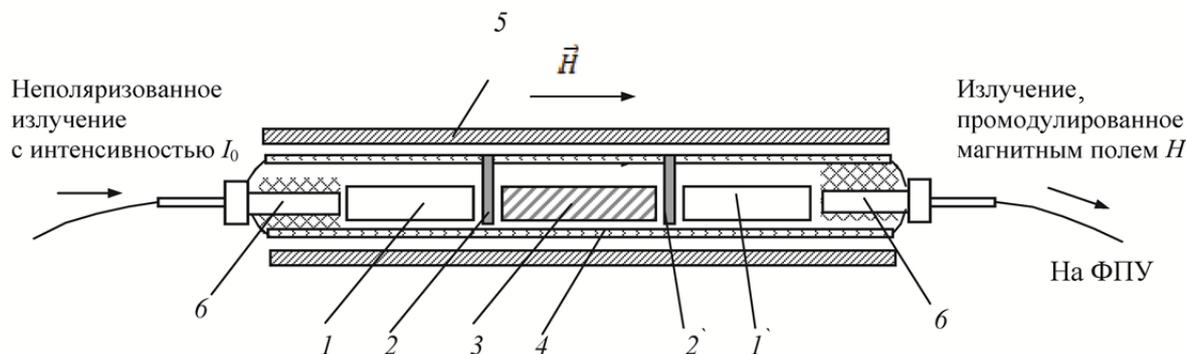


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента однопроходного типа:

1 – коллиматоры; 2 – поляризатор; 3 – кристалл  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ; 4 – стеклянная оправа; 5 – защитная кварцевая трубка; 6 – керамический наконечник волоконно-оптического коннектора

В такой схеме поступающее по волокну на вход ЧЭ излучение коллимируется градиентной линзой (коллиматором), преобразуется в линейно-поляризованное с помощью входного поляризатора, проходит через кристалл  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  и далее, проходя через выходной поляризатор, с помощью градиентной линзы (второго коллиматора) вводится в выходное оптическое волокно, подключенное к входу фотоприемного устройства (ФПУ).

Второй поляризатор, устанавливаемый после кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  на его выходе, выполняет роль анализатора, позволяющего преобразовать поворот плоскости поляризации света в изменение амплитуды (или интенсивности) света на выходе ЧЭ. Угол между осями входного и выходного поляризаторов выбирается таким образом, чтобы получить максимальный коэффициент преобразования поляризационной модуляции на входе ФПУ. В отсутствие магнитного поля свет проходит через ЧЭ, не изменяя направления вектора поляризации, интенсивность света на входе ФПУ является постоянной и определяется углом между осями поляризаторов: при определенных углах (скрещенные поляризаторы) она может быть равна 0. При наложении на кристалл магнитного поля  $\vec{H}$  направление поляризации света изменяется, что приводит к изменению интенсивности света на выходе ЧЭ. Таким образом, с помощью магнитного поля осуществляется модуляция света, проходящего через ЧЭ.

При проектировании любого ВОДТ необходимо проводить тщательный метрологический анализ и принимать соответствующие решения по снижению возможных погрешностей [6–8].

Проанализируем с указанной точки зрения ВОДТ с «проходной» схемой.

На рис. 2, 3 приведены структурная и функциональная схемы такого датчика соответственно.

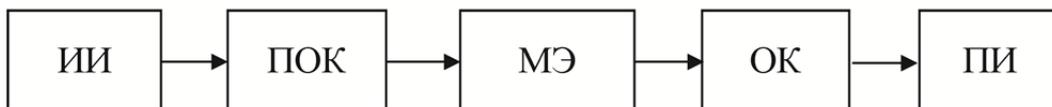


Рис. 2. Структурная схема ВОДТ:

ИИ – источник излучения; ПОК – подводящий оптический канал (подводящее оптическое волокно + коллиматор + поляризатор);

МЭ – модулирующий элемент (кристалл  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ); ОК – отводящий оптический канал (поляризатор + коллиматор + отводящее оптическое волокно);

ПИ – приемник оптического излучения

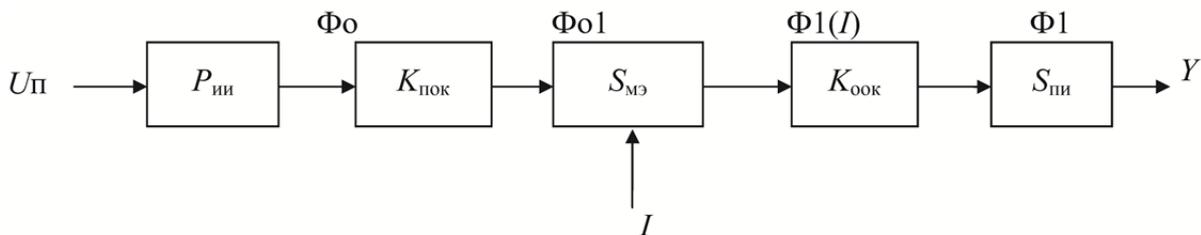


Рис. 3. Функциональная схема ВОДТ

Функция преобразования будет иметь вид

$$Y = P_{\text{ИИ}} K_{\text{ПОК}} S_{\text{МЭ}} K_{\text{ОК}} S_{\text{ПИ}} I,$$

где  $Y_n$  – номинальное значение выходной величины;  $I$  – величина измеряемого электрического тока;  $P_{\text{ИИ}}$  – мощность светового потока источника излучения;  $K_{\text{ПОК}}$  – коэффициент передачи подводящего оптического канала «подводящее оптическое волокно – коллиматор – поляризатор»;  $S_{\text{МЭ}}$  – чувствительность модулирующего элемента (кристалл  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ );  $K_{\text{ОК}}$  – коэффициент передачи отводящего оптического канала «поляризатор – коллиматор – отводящее оптическое волокно»;  $S_{\text{ПИ}}$  – чувствительность ПИ.

В реальных условиях на результат измерений влияют внешние помехи и влияющие факторы  $\xi_i$ , погрешность изготовления  $q_i$  отдельных структурных элементов и узлов, а также помехи  $v_i$ , возникающие в самом датчике.

Соответственно реальная функция преобразования должна учитывать влияние перечисленных факторов на результат измерения и будет иметь для ВОДТ с оптическим выходом следующий вид:

$$Yp = Y(I, \xi_i, q_i, v_i). \quad (1)$$

Погрешность преобразования определится как

$$\Delta Y = Y - Yp. \quad (2)$$

На рис. 4 приведена метрологическая модель ВОДТ, где приняты следующие обозначения:  $\Delta 1$  – погрешность юстировки ИИ относительно ПОК;  $\Delta 2, \Delta 4$  – погрешности из-за неточности начальной установки ПОК и ООК относительно МЭ;  $\Delta 3$  – погрешность из-за неточности юстировки ПОК и ООК относительно друг друга;  $\Delta_{MЭ}$  – погрешность из-за неточности изготовления модулирующего элемента (кристалла  $V_{12}GeO_{20}$ );  $\Delta 5$  – погрешность юстировки ООК относительно ПИ;  $\Delta 7$  – погрешность спектрального согласования ИИ и ПИ;  $\Delta_{LMЭ}$  – погрешность линейности функции преобразования модулирующего элемента (кристалла  $V_{12}GeO_{20}$ );  $\delta S_{MЭ}$  – погрешность чувствительности МЭ, обусловленная изменением ее параметров при изменении температуры окружающей среды, механических воздействий и т.п.;  $\delta K_{ПОК}, \delta K_{ООК}$  – погрешности, обусловленные изменением светопропускания ПОК и ООК при изгибах волоконно-оптического кабеля, механических воздействий и т.п.;  $\delta S_{ИИ}$  – погрешность, обусловленная изменением мощности и диаграммы излучения ИИ при изменении температуры окружающей среды, напряжения питания и т.п.;  $\delta S_{ПИ}$  – погрешность от изменения интегральной токовой чувствительности ПИ при изменении температуры окружающей среды, напряжения питания и т.п.;  $\delta \eta(\lambda)$  – погрешность спектрального согласования ИИ и ПИ при изменении температуры.

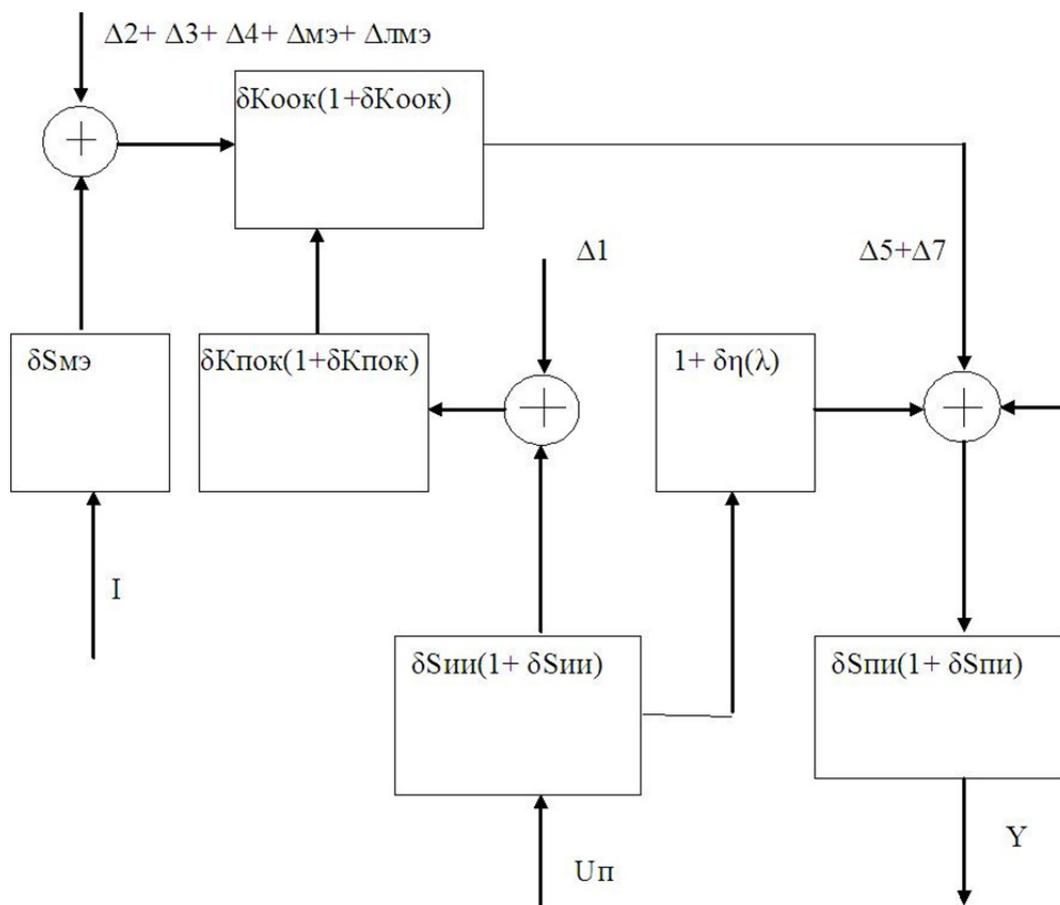


Рис. 4. Метрологическая модель ВОДТ

В соответствии с метрологической моделью ВОДТ реальная функция преобразования будет иметь следующий вид:

$$Y_p = S_{MЭ}(1 + \delta S_{MЭ}) S_{ИИ}(1 + \delta S_{ИИ}) [(\Delta 1 + K_{П\text{ОК}})(1 + \delta K_{П\text{ОК}})] \times \\ \times [(\Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{MЭ} + \Delta_{ЛМЭ} + K_{O\text{ОК}})] \times [(1 + \delta \eta(\lambda))] \times [(\Delta 2 + \Delta 3 + S_{П\text{И}})(1 + \delta S_{П\text{И}})] \times I. \quad (3)$$

Погрешность преобразования с учетом  $\Delta Y = Y_p - Y_n$  определится следующим образом:

$$\Delta Y = K_{П\text{ОК}}\Delta 1 + K_{O\text{ОК}}(\Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{MЭ} + \Delta_{ЛМЭ}) + S_{П\text{И}}(\Delta 5 + \Delta 7) + \\ + (\delta K_{П\text{ОК}})K_{П\text{ОК}} + [\delta \eta(\lambda)] \times \eta(\lambda) + [\delta S_{MЭ} + \delta K_{O\text{ОК}} + \delta S_{П\text{И}}] \times I. \quad (4)$$

Мультипликативная составляющая погрешности равна

$$\delta_y = \sqrt{\delta I_{ИИ}^2 + \delta K_{П\text{ОК}}^2 + \delta K_{O\text{ОК}}^2 + \delta \eta^2(\lambda) + \delta S_{П\text{И}}^2}, \quad (5)$$

аддитивная составляющая погрешности:

$$\Delta y = K_{П\text{ОК}}\Delta 1 + K_{O\text{ОК}}(\Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{MЭ} + \Delta_{ЛМЭ}) + S_{П\text{И}}(\Delta 5 + \Delta 7). \quad (6)$$

Аддитивная и нелинейная составляющие погрешности не влияют на результат измерения, если в нормативно-техническую документацию (ТУ, ТО) вносится градуировочная характеристика ИП, смещенная вдоль оси ординат относительно номинальной функции преобразования на величину аддитивной погрешности. Если в документацию внесена номинальная функция преобразования в виде аналитической зависимости, то необходимо учитывать данные погрешности, например, при обработке результатов измерений с целью их исключения.

Большую погрешность  $\Delta 1$  (до 10 %) могут внести радиальные рассогласования ИИ и ПОК. Продольные и угловые рассогласования, как правило, вносят незначительную погрешность (не более 1 %).

Погрешности  $\Delta 2$ – $\Delta 4$  в значительной степени зависят от конструктивного исполнения измерительного преобразователя (ИП). В процессе проектирования необходимо предусмотреть такие конструктивно-технологические и схмотехнические решения, которые позволят снизить указанные погрешности. Ввиду того, что в каждом конкретном случае конструкции ИП могут отличаться друг от друга, то и способы снижения их в каждом случае различны [9].

Погрешность  $\Delta 5$  практически равна нулю, так как площадь торца жгута ООК значительно меньше площади приемной светочувствительной площадки ПИ.

Погрешности  $\Delta 1$ – $\Delta 4$  могут быть существенно снижены в процессе сборки ИП точной юстировкой элементов конструкции.

Погрешность спектрального согласования источника и приемника излучения  $\Delta 7$  может быть полностью исключена, если диапазон длины волны излучения источника излучения соответствует диапазону спектральной чувствительности приемника излучения.

Погрешность  $\Delta_{MЭ}$  из-за неточности изготовления МЭ также может быть значима, как перечисленные выше погрешности. Уменьшить данную погрешность возможно конструктивным путем, применяя совершенную технологию изготовления МЭ [9, 10].

Мультипликативные погрешности  $\delta K_{П\text{ОК}}$ ,  $\delta K_{O\text{ОК}}$ , обусловленные изменением светопропускания ПОК и ООК при изгибах волоконно-оптического кабеля, воздействии ударов, вибрации, линейного ускорения и т.д., практически исключаются, если все волокна расположены в одном жгуте и испытывают одинаковые внешние воздействия: климатические и механические. При этом указанное справедливо, если изгиб волокна не превышает некоторого критического значения (не менее 10 диаметров волокна). В противном случае изгибы волокна ведут к существенному снижению интенсивности оптического сигнала, поступающего или в зону измерения, или на ПИ, сравнимому с минимальным уровнем информативного сигнала. Поэтому при изготовлении и эксплуатации ВОДТ необходимо принять все возможные конструктивно-технологические меры для исключения неинформативных изгибов волоконно-оптического кабеля [4, 5].

Мультипликативные погрешности  $\delta K_{ИИ}$ ,  $\delta S_{П\text{И}}$  при изменении параметров окружающей среды могут достигать 30 %, если не принять соответствующих мер. Но так как они носят систематический характер, то могут быть исключены тем или иным способом. Для снижения этих погрешностей используют различные схмотехнические решения: дифференциальное исполнение измерительной схемы датчика, введение дополнительных схем коррекции и т.п.

Погрешность преобразования без учета погрешностей, которыми можно пренебречь, будет определяться выражением

$$\Delta Y = K_{\text{Оок}}(\Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{\text{МЭ}} + \Delta_{\text{ЛМЭ}}) + \delta S_{\text{МЭ}} I, \quad (7)$$

а реальная функция преобразования запишется

$$Y_p = S_{\text{МЭ}}(1 + \delta S_{\text{МЭ}}) S_{\text{ИИ}} K_{\text{Пов}} K_{\text{д}} (1 + \delta S_{\text{д}}) U_{\text{П}} [(K_{\text{Оок}} + \Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4 + \Delta_{\text{МЭ}} + \Delta_{\text{ЛМЭ}}) S_{\text{ПИ}}]. \quad (8)$$

Остаются неисключенными погрешности  $\Delta 2$ – $\Delta 4$ ,  $\Delta_{\text{МЭ}}$ , которые, как указано выше, можно снизить конструктивно-технологическим путем, что ведет к некоторому удорожанию ВОДТ.

Особо следует отметить влияние температуры на чувствительный элемент и измерительный тракт ВОДТ тока в целом через величины  $\delta S_{\text{МЭ}}$ ,  $S_{\text{ПИ}}$ . Для уменьшения температурной погрешности следует использовать дополнительные технические приемы:

– термостатирование модулирующего элемента и, возможно, других элементов ВОДТ, которые являются менее чувствительными к влиянию температуры;

– введение компенсации выходного сигнала датчика на основе измерения температуры МЭ с помощью специального малогабаритного малоинерционного термометра и введения сигнала компенсации в выходной сигнал датчика;

– применение температурной компенсации МЭ путем подбора оптимального угла между осями максимального пропускания поляризатора и анализатора чувствительного элемента

### Заключение

Метрологический анализ ВОДТ показал, что на результат измерения электрических токов с помощью ВОДТ влияет ряд различных факторов, которые проявляются в виде аддитивной и мультипликативной составляющей.

При этом факторы, связанные с несовершенством технологии изготовления ВОДТ, как правило, могут быть учтены при расшифровке результатов измерений или минимизированы путем использования специальных конструктивно-технологических приемов при проектировании и изготовлении ВОДТ.

Самой существенной по величине погрешностью, которую крайне трудно устранить вышеуказанным путем, является дополнительная погрешность, обусловленная влиянием факторов внешней среды, которые приводят к изменению характеристик тракта ВОДТ. Среди таких параметров в первую очередь следует указать влияние изменения температуры внешней среды.

Для уменьшения указанной погрешности следует целенаправленно использовать дополнительные технические приемы, например термостатирование модулирующего элемента, что должно позволить существенно снизить дополнительную погрешность измерения ВОДТ.

### Список литературы

1. Окоси, Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики / Э. Удд. – М. : Техносфера, 2008. – 520 с.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2006. – 592 с.
4. Бурков, В. Д. Экоинформатика: Алгоритмы, методы и технологии : моногр. / В. Д. Бурков, В. Ф. Крапивин. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 431 с.
5. Яворский, Б. М. Справочник по физике : 2-е изд., перераб. / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1985. – 385 с.
6. Бурков, В. Д. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники / В. Д. Бурков, Г. А. Иванов. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. – 332 с.
7. Пивкин, А. Г. Обобщенный подход к метрологическому анализу волоконно-оптических датчиков / Е. А. Бадеева, А. В. Гориш, А. Г. Пивкин // Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг : науч. тр. – Вып. 6. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2003. – С. 255–257.
8. Бабаев, О. Г. Методика исследования магнитооптического эффекта в кристаллах BSO для датчика магнитного поля / О. Г. Бабаев, С. А. Матюнин, Г. И. Леонович // Фотон-экспресс. – 2013. – № 6. – С. 66–67.
9. Бурков, В. Д. Теория, расчет и проектирование волоконно-оптических приборов и систем : практикум / В. Д. Бурков, В. Т. Потапов. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2011. – 82 с.
10. Отработка технологических параметров и режимов изготовления волоконно-оптических световодов методом регрессионного анализа : учебно-метод. пособие / В. Д. Бурков, В. А. Беяков, Д. А. Голодушкин, А. И. Кофанов, Д. Г. Сырейщиков. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2013. – 102 с.

**Демин Андрей Николаевич**

инженер,  
Московский государственный университет леса  
(Россия, Московская обл., г. Мытищи-5,  
ул. 1-я Институтская, 1)  
E-mail:vladismyslov@yandex.ru

**Demin Andrey Nikolaevich**

engineer,  
Moscow State Forest University  
(1st Institutskaya street, 1, Mytishi,  
Moscow region, Russia)

**Смыслов Владимир Иванович**

кандидат технических наук,  
начальник отделения,  
Научно-производственное объединение  
измерительной техники  
(Россия, Московская область, г. Королев,  
ул. Пионерская, 2)  
E-mail:vladismyslov@yandex.ru

**Smyslov Vladimir Ivanovich**

candidate of technical sciences, head of department,  
Scientific and Production Association  
Measuring Technique  
(2 Pionerskaya street, Korolev, Moscow region, Russia)

**Клементьев Алексей Терентьевич,**

кандидат технических наук,  
ведущий специалист,  
Научно-производственное объединение  
измерительной техники  
(Россия, Московская область, г. Королев,  
ул. Пионерская, 2)  
E-mail:vladismyslov@yandex.ru

**Klement'ev Aleksey Terent'evich**

candidate of technical sciences,  
leading specialist,  
Scientific and Production Association  
Measuring Technique  
(2 Pionerskaya street, Korolev, Moscow region, Russia)

УДК 687.586.5

**Демин, А. Н.**

**Метрологический анализ волоконно-оптических датчиков электрического тока на основе кристаллов с кубической симметрией  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  / А. Н. Демин, В. И. Смыслов, А. Т. Клементьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 28–34.**