

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ С КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ И $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

В.Д. БУРКОВ, *проф. МГУЛ, д-р техн. наук*⁽¹⁾,

А.Н. ДЕМИН, *аспирант МГУЛ*⁽¹⁾,

Н.А. ХАРИТОНОВ, *ст. науч. сотрудник МГУЛ, канд. техн. наук*⁽¹⁾

burkov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»

141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

В настоящее время для измерения электрических токов все более широкое применение получают волоконно-оптические датчики электрического тока (ВОДТ). Из существующих оптических схем таких датчиков на активных кристаллах с кубической симметрией $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ предпочтительной является оптическая схема однопроходного типа. Данная схема при относительной простоте реализации позволяет эффективно оптимизировать габаритно-весовые характеристики в сочетании с достаточно высокими в целом метрологическими характеристиками. Однако такие датчики без дополнительных усовершенствований могут обладать существенной температурной погрешностью измерения, достигающей до 10–25 % в диапазоне температур 0–100 °С. Для ее исследования и корректировки необходимо применение специальной программно-аппаратной установки. Сформулированы методические и инструментальные требования к такой установке. Показано, что для исследования температурных характеристик датчиков с суммарной допустимой погрешностью порядка 0,2 % в диапазоне температур 0–100 °С необходимо иметь стабильность параметров установки (температуры, магнитного поля, соответствующего протекающему электрическому току, выходного сигнала фотоприемника) по крайней мере, не хуже чем 10^{-4} в течение всего времени проведения измерения, которое продолжается 1,4–1,5 часа. Предложено конструктивное решение установки с измерением коэффициентов преобразования чувствительных элементов ВОДТ и их температурных зависимостей с регистрацией и обработкой информации в режиме реального времени трех величин: полезного сигнала с фотоприемника, пропорционального интенсивности падающего на него излучения измерения; величине электрического тока в соленоиде с протекающим электрическим током; напряжения на датчике температуры. Подтверждено, что методика и установка позволяют проводить измерение дрейфов коэффициента преобразования чувствительного элемента датчиков с точностью 0,1 % в диапазоне температур до 100 °С. Проведенные измерения и исследования температурных зависимостей коэффициента преобразования чувствительного элемента ВОДТ на основе кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ показали, что теоретически и практически достижимой является дополнительная температурная погрешность 0,4 %.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик тока, измерительный стенд, основная погрешность, дополнительная погрешность, температурная нестабильность.

В настоящее время для измерения электрических токов все более широкое применение получают волоконно-оптические датчики электрического тока (ВОДТ) [1]. Из существующих оптических схем таких датчиков на активных кристаллах с кубической симметрией $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ предпочтительной с точки зрения минимизации габаритно-весовых характеристик является схема однопроходного типа. Данная схема, которая при относительной простоте реализации позволяет наиболее просто оптимизировать требования по минимально весовым характеристикам в сочетании с достаточно высокими метрологическими характеристиками [1–5].

Однако, как показала практика, однопроходные датчики без дополни-

тельных усовершенствований обладают достаточно высокой дополнительной температурной погрешностью измерения, достигающей до 10–25 % в диапазоне температур 0–100 °С [6–8].

Для того, чтобы производить экспериментальную оценку температурных дрейфов таких датчиков, необходимо использование специальной методики и аппаратуры.

Методика измерения температурных дрейфов

Согласно [8,9,10], величина температурного дрейфа коэффициента преобразования ВОДТ (или коэффициента модуляции), которые необходимо будет измерять для определения температурных характеристик,

составляют величину порядка 0,2 % от величины изменения полезного сигнала в диапазоне температур 0–100°C. Поэтому для обеспечения требуемой точности измерений необходимо иметь стабильность всех измеряемых величин (температуры, магнитного поля, соответствующего протекающему электрическому току, выходного сигнала фотоприемника) по крайней мере, не хуже чем 10^{-4} в течение всего времени проведения измерения, которое продолжается 1,4–1,5 часа. Очевидно, что даже в лабораторных условиях обеспечить такие условия достаточно трудно и, кроме этого, дорого. В связи с этим предлагается методика измерений и установка, позволяющие получить необходимые точности измерений путем одновременной регистрации всех сигналов и соответствующей обработки.

Методика проведения

Для измерения коэффициентов преобразования чувствительных элементов ВОДТ и их температурных зависимостей нужно одновременно с необходимой точностью регистрировать три величины:

- полезный сигнал с фотоприемника, пропорциональный интенсивности падающего на него излучения измерения;
- величину электрического тока в соленоиде, создающем магнитное поле;
- напряжение на датчике температуры.

Интенсивность света, проходящего через чувствительный элемент и падающего на фотоприемное устройство, представляется в виде [6, 10]

$$I = \frac{1}{2} I_0 [1 - SH] = \frac{1}{2} I_0 (1 - m),$$

где I_0 – амплитудное значение протекающего электрического тока

I – измеряемое значение протекающего электрического тока,

$m = SH$ – глубина модуляции света магнитным полем $H = H_0 \cos \omega t$,

S – коэффициент преобразования чувствительного элемента

$$\left(S = \frac{dI}{dH} \right)_{H=0}.$$

Фактически для измерения S необходимо измерять глубину модуляции m и величину амплитуды магнитного поля H_0 при определенных температурах.

При изменении переменных магнитных полей напряжение сигнала на выходе фотоприемника $U_c \sim I = 0,5 I_0 (1 + SH_0 \cos \omega t)$. После выделения переменной составляющей $U_{\sim} \sim 0,5 I_0 SH_0 \cos \omega t$. Следовательно,

$$S(t) \sim \frac{2U_{\sim}(t)}{I_0 H_0(t)}.$$

Очевидно, производя запись серии данных $U_{\sim}(t)$, $H_0(t)$ и температуры t , можно точно определить относительные изменения ΔS от температуры. Если мощность излучения в тракте достаточно велика (отношение сигнал/шум на фотоприемнике $> 10^3$), то основным источником погрешности при измерениях являются флуктуации мощности излучения источника. Флуктуации источника должны быть минимальными. Таким требованиям в настоящее время наиболее полно удовлетворяют полупроводниковые суперлюминисцентные светодиоды, обеспечивающие ввод в многомодовое волокно световой мощности до 10^{-3} Вт при относительной стабильности не хуже, чем 10^{-4} Вт.

Таким образом, методика измерения коэффициента преобразования ВОДТ в зависимости от температуры основывается на одновременном измерении 3 сигналов: сигнала с фотоприемного устройства; сигнала, пропорционального величине магнитного поля; сигнала температурного датчика.

Эти сигналы должны записываться в память и заноситься в ЭВМ с помощью специального интерфейса в течение всего периода измерений. После окончания измерений на ЭВМ проводится обработка их результатов. Точность (погрешность) измерений должна составлять 0,1 %.

Описание автоматизированной установки для проверки температурных характеристик ВОДТ

Для проведения экспериментов по описанной методике была разработана установка, блок-схема которой приведена на рис. 1.

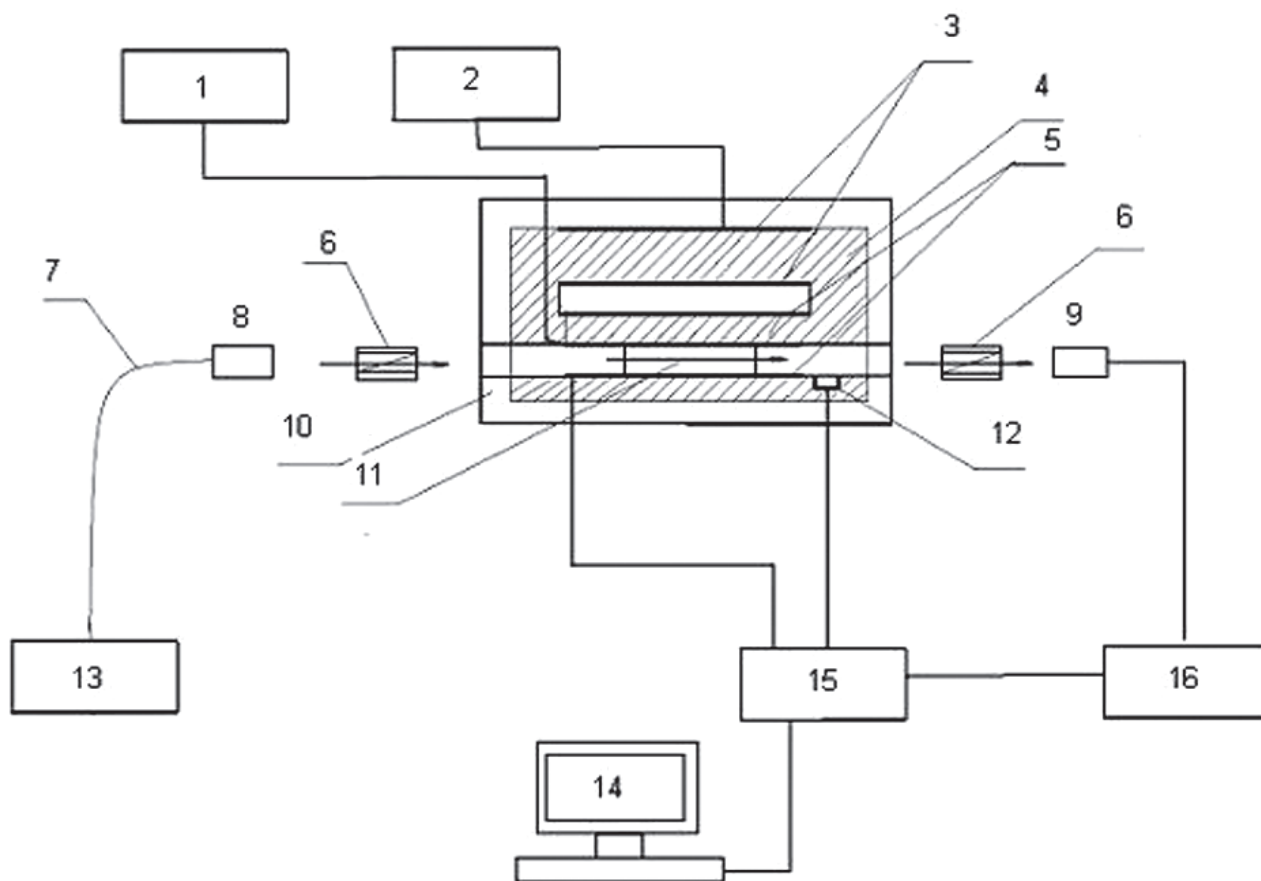


Рис. 1. Автоматизированная установка для проверки температурных характеристик ВОДТ

Fig. 1. An automated system for checking the temperature characteristics of water

При проведении измерений чувствительный элемент (ЧЭ) 11 ВОДТ размещается в оправе 4 из немагнитного материала, являющейся также теплопроводом.

На плечо оправы 4, заключающее в себе ЧЭ 11, намотан соленоид 5. Магнитное поле в соленоиде 5 создается при помощи генератора переменного тока 1. На другом плече оправы/теплопровода смонтирован нагревательный элемент 3, представляющий собой вольфрамовую спираль. Нагревательный элемент позволяет менять температуру системы от комнатной до $+110^{\circ}\text{C}$. Для питания нагревателя используется источник постоянного тока 2. Для измерения температуры используется миниатюрный датчик 12 температуры. С целью обеспечения равномерности прогрева вся система заключена в теплоизолирующий кожух 10. Оптическая часть установки состоит из отрезка многомодового световода 7 с диаметром ведущей жилы 65 мкм, входного коллиматора 8,

представляющего собой короткофокусную линзу, закрепленную на трехкоординатной юстировке, двух призмённых поляризаторов 6, закрепленных на угловых юстировках, исследуемого кристалла 11, фотоприемника 9 и источника излучения 13. Входной торец световода снабжен оптическим разъемом стандарта ST, что позволяет подключать различные источники излучения.

При проведении измерений были использованы три источника излучения: полупроводниковый лазер из комплекта ОМКЗ-76, He-Ne лазер и полупроводниковый светодиод с внутренней стабилизацией мощности излучения по обратной связи. Видимое излучение He-Ne лазера также использовалось для юстировки оптической схемы. Излучение на выходе системы регистрировалось при помощи измерителя оптической мощности 9 или дополнительного фотоприемника. Сигнал с измерителя оптической мощности подавался на усили-

тель 16 и далее был выведен на компьютер 14 через интерфейс связи с компьютером 15. С помощью интерфейса 15 на компьютер 14 также подаются сигнал датчика температуры 12 и сигнал величины тока в соленоиде 5.

Погрешности измерения коэффициента магнитооптической модуляции в данной схеме определяются стабильностью мощности излучения источника, флуктуациями потерь в оптическом тракте и флуктуациями чувствительности фотоприемного устройства. При этом очевидно, что основным источником являются флуктуации и дрей-

фы мощности источника излучения, так как в нормальных условиях они существенно превышают флуктуации потерь в тракте и флуктуации чувствительности фотоприемника. Кроме этого, на результаты измерений могут влиять флуктуации и дрейфы в канале измерения температуры, а также дрейфы величины электрического тока модулирующего соленоида, определяющего величину магнитного поля.

С целью исключения дрейфов и флуктуации в этих каналах был разработан и включен в установку блок 15 интерфейса сопряжения с персональным компьютером. Блок интерфейса сопряжения автоматически, с интервалом в 20 секунд производил измерения сигналов по трем каналам (сигнал с фотоприемника, сигнал пропорциональный величине тока в соленоиде и сигнал с датчика температуры), длительность цикла измерения всех трех сигналов составляла – 150 мс. Полученные данные затем преобразовывались в цифровой вид и сохранялись в памяти прибора. По окончании измерений данные вводились в компьютер через стандартный интерфейс RS-232. Дальнейшая обработка файла данных производилась с помощью пакета математических программ MathCad.

Создание интерфейса сопряжения позволило автоматизировать процесс измерений и повысить их точность и достоверность.

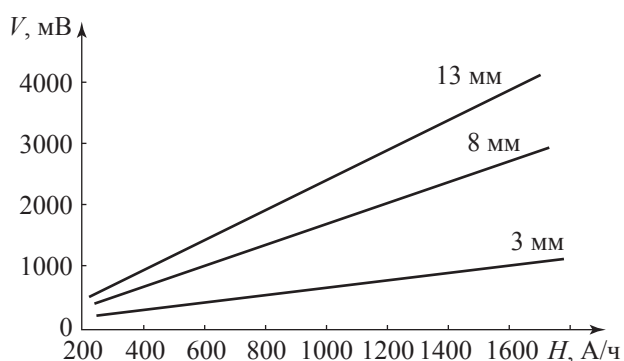


Рис. 2. Зависимость напряжения на выходе фотоприемного устройства от напряженности магнитного поля в соленоиде для кристаллов длиной $L = 3$ мм, $L = 8$ мм, $L = 13$ мм

Fig. 2. Dependence of the voltage at the output from the photodetector of the magnetic field in the solenoid for crystal length $L = 3$ mm, $L = 8$ mm, $L = 13$ mm

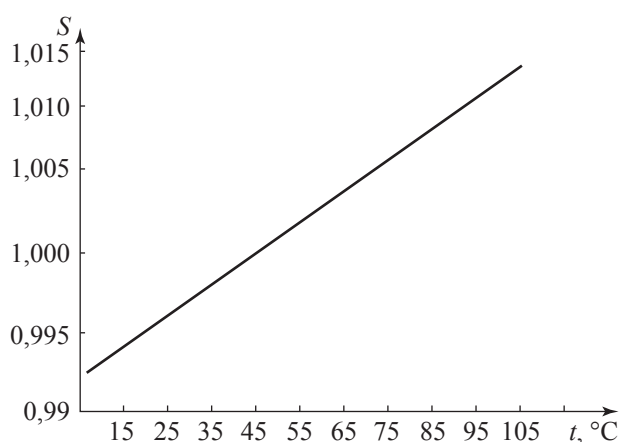


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования от температуры для значения угла $\Theta L + \alpha = 45^\circ$ и $L = 3$ мм

Fig. 3. The dependence of the conversion ratio from the temperature values of the angle $\Theta L + \alpha = 45^\circ$ and $L = 3$ mm

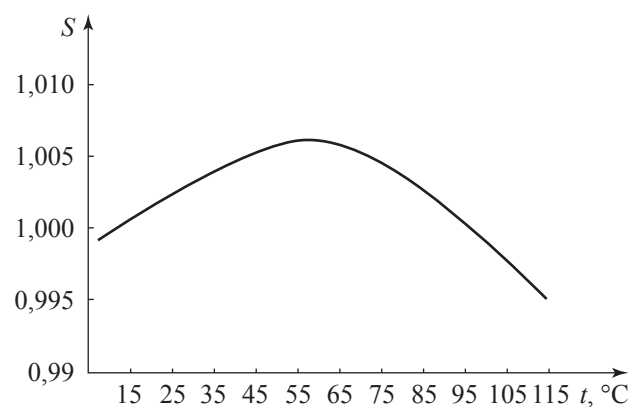


Рис. 4. Зависимость коэффициента преобразования от температуры для значения угла $\Theta L + \alpha = 45^\circ - 5^\circ$ и $L = 8$ мм

Fig. 4. Dependence of the conversion of the temperature coefficient for the angle $\Theta L + \alpha = 45^\circ - 5^\circ$ and $L = 8$ mm

Результаты измерений температурной погрешности ЧЭ ВОДТ

На рис. 2 представлены зависимости напряжения на выходе фотоприемного устройства от напряженности магнитного поля для кристаллов длиной $L = 3$ мм, $L = 8$ мм, $L = 13$ мм. Напряженность магнитного поля получена по формуле $H = n i$, где $n = N/l$ – количество витков на единицу длины, i – ток в соленоиде. Данная формула применима для случая, когда длина соленоида больше его диаметра.

Как видно из графиков, для всех трех длин кристаллов зависимости представляют собой прямые.

На рис. 3 приведена температурная характеристика ЧЭ, поляризаторы которого сориентированы так, что $\Theta L + \alpha = 45^\circ$, что соответствует максимальному значению коэффициента преобразования для выбранной длины кристалла чувствительного элемента. В этом случае температурный дрейф коэффициента преобразования определяется только температурной зависимостью константы Верде материала и составляет 1,5 % на 100 °С.

Зависимость на рис. 4 получена при угле $\Theta L + \alpha = 45^\circ - 5^\circ$. В этом случае температурные дрейфы константы Верде и коэффициент оптической активности почти компенсируют друг друга. Температурный дрейф коэффициента преобразования составляет порядка 0,4 % на 100 °С.

Заключение

1. В настоящее время для измерения электрических токов в связи с наличием уникальных свойств всё более широкое применение получают волоконно-оптические датчики электрического тока на активных кристаллах с кубической симметрией $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

2. Одной из наиболее перспективных оптических схем датчиков является однопроводная схема. Однако она обладает достаточно высокой температурной нестабильностью. Для ее исследования и корректировки необходимо применение спе-

циальных аппаратно-программных средств с последующим использованием дополнительных технических приемов в конструкции датчика.

3. Для исследования температурной погрешности таких датчиков предложены методика и установка, которые позволяют проводить измерение дрейфов коэффициента преобразования чувствительного элемента датчиков с точностью 0,1 % в диапазоне температур от 20 до 120 °С.

4. Проведенные измерения и исследования температурных зависимостей коэффициента преобразования ЧЭ ВОДТ на основе кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ показали, что теоретически и практически достижимой является дополнительная температурная погрешность 0,4 %.

Библиографический список

1. Бурков, В.Д. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники / В.Д. Бурков, Г.А. Иванов. – М.: МГУЛ, 2008. – 232 с.
2. Фрайден, Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.
3. Бурков, В.Д. Анализ и выбор оптимальной системы волоконно-оптического датчика электрического тока / В.Д. Бурков, Н.А. Харитонов, А.Н. Демин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – № 2. – 2014. – С. 127–133.
4. Бурков, В.Д. Миниатюрный волоконно-оптический датчик электрического тока / В.Д. Бурков, А.Н. Демин // Сб. научных статей аспирантов и докторантов МГУЛ, 2013. – С. 31.–39.
5. Бурков, В.Д. Экоинформатика: Алгоритмы, методы и технологии: монография / В.Д. Бурков, В.Ф. Крапивин. – М.: МГУЛ, 2009. – 428с.
6. Бурков, В.Д. Теория, расчет и проектирование приборов и систем: лабораторный практикум / В.Д. Бурков, В.Т. Потапов, Т.В. Потапов и др. – М.: МГУЛ, 2010. – 88 с.
7. 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. – № 6 – 2013. – С. 66–67.
8. Потапов, Т.В. Экспериментальное исследование температурной стабильности датчиков магнитного поля на основе кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ / Т.В. Потапов // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – № 11. – С. 26–31.
9. Бурков, В.Д. Лабораторный комплекс «Математическое моделирование чувствительного элемента волоконно-оптического датчика магнитного поля и электрического тока» / В.Д. Бурков, В.Т. Потапов, С.И. Чумаченко и др. // Свидетельство ОФАП об отраслевой регистрации разработки МГУЛ № 2562 от 17.06.2003.
10. Бурков, В.Д. Теория, расчет и проектирование волоконно-оптических приборов и систем: практикум / В.Д. Бурков, В.Т. Потапов. – М.: МГУЛ, 2011. – 55 с.

METHOD AND APPARATUS FOR CONTROL OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF FIBER-OPTICAL SENSORS OF ELECTRIC CURRENT ON THE BASIS OF CRYSTALS WITH CUBIC SYMMETRY $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ AND $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

Burkov V.D., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Damin A.N., pg. MSFU ⁽¹⁾; Kharitonov N.A., MSFU, Ph. D. (Tech.)⁽¹⁾

burkov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University, MSFU, 1, 1st Institutskaya st., Mytishi-5, Moscow reg., 141005, Russia

At the present time for measurement of electric currents, the increasing application receive fiber-optic sensors of electric current (VADT). Existing optical schemes of these sensors are in an active crystals with cubic symmetry $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ preferred is an optical diagram of a single-pass type. This scheme with relative ease of implementation allows to efficiently optimize the dimensions and weight characteristics combined with a fairly high overall metrological characteristics. However, such sensors without additional enhancements can be of significant temperature measurement error of up to 10–25 % in the temperature range 0–100 °C. For her research and adjustments necessary to use special hardware and software installation. The methodological and instrumental requirements for such an installation. It is shown that to study the temperature characteristics of the sensors with a total allowable error of about 0.2 % in the temperature range 0–100°C, it is necessary to have stability of the setup parameters (temperature, magnetic field, corresponding to flowing electric current, the output signal of the photodetector) at least not worse than 10⁻⁴ during the whole time of the measurement, which lasts from 1.4 to 1.5 hours. Proposed constructive solution of the installation with the measurement of conversion factors are sensitive elements of VOGT and their temperature dependence with the registration and processing of information in real time of the three values: the desired signal from the photodetector proportional to the intensity of the incident radiation measurement; the value of the electric current in the solenoid is flowing with electric current; the voltage on the temperature sensor. It is confirmed that the method and installation allow measurement drifts of the conversion factor of the sensing element of sensors with 0.1 % accuracy in the temperature range up to 100 °C. Measurements and study the temperature dependency of the conversion factor of the sensitive element of VOT on the basis of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ crystals showed that it is theoretically and practically achievable is an additional temperature error of 0.4 %.

Keywords: fiber-optic current sensor, measuring stand, basic error, an additional error of temperature instability.

References

1. Burkov, V.D., Ivanov G.A. *Nauchnye osnovy sozdaniya ustroystv i sistem volokonno-opticheskoy tekhniki* [Scientific basis for the creation of devices and systems fiber-optic equipment]. Moscow, MSFU, 2008. 232 p.
2. Friden J. *Modern sensors..* Moscow, Technosphere, 2006. 592 p.
3. Burkov V.D., Kharitonov N.A., Damin A.N. *Analiz i vybor optimal'noy sistemy volokonno-opticheskogo datchika elektricheskogo toka* [Analysis and selection of optimal system of fiber-optic electric current sensor]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik.– No. 2. 2014. pp. 127-133.
4. Burkov, V.D., Damin A.N. *Miniatyurnyy volokonno-opticheskiy datchik elektricheskogo toka* [Miniature fiber-optic electric current sensor]. Proc. scientific articles of postgraduates and doctoral candidates of Economics, 2013. pp. 31-39.
5. Burkov V.D., Krapivin V.F. *Ekoinformatika: Algoritmy, metody i tekhnologii* [Ecoinformatics: Algorithms, methods and technologies]. Moscow: MSFU, 2009. 428 p.
6. Burkov V.D., Potapov V.T., Potapov T.V., Udalov M.E. *Teoriya, raschet i proektirovanie priborov i sistem* [The theory, calculation and design of devices and systems]. Moscow: MSFU, 2010. 88 p.
7. Babaev O.G., Matyunin S.A., Leonovich G.I. *Metodika issledovaniya magnitoopticheskogo effekta v kristallakh BSO dlya datchika magnitnogo polya* [Method of investigation the magneto-optic effect in BSO crystals for magnetic field sensor]. Photon-Express. No. 6. 2013. pp. 66-67.
8. Potapov T.V. *Eksperimental'noe issledovanie temperaturnoy stabil'nosti datchikov magnitnogo polya na osnove kristallov Bi12SiO20* [Experimental study of temperature stability of magnetic field sensors on the basis of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals]. Technical physics Letters. V. 24, No. 11. 1998. pp. 26-31.
9. Burkov V.D., Potapov V.T., Chumachenko S.I., Udalov M.E. *Laboratornyy kompleks «Matematicheskoe modelirovanie chuvstvitel'nogo elementa volokonno-opticheskogo datchika magnitnogo polya i elektricheskogo toka»* [Laboratory complex «Mathematical modeling of the sensitive element of fiber optic magnetic field sensor and electrical current»]. Certificate of patent registration of a design MSFU No. 2562 dated 17.06.2003.
10. Burkov V.D., Potapov V.T. *Teoriya, raschet i proektirovanie volokonno-opticheskikh priborov i sistem: praktikum* [The theory, calculation and design of optical fiber devices and systems: workshop]. Moscow, MSFU, 2011. 55 p.