

А. Н. Демин, В. И. Смыслов, Т. В. Потанов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОСНОВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОСНОВЕ
ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ В $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ И $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$**

A. N. Demin, V. I. Smyslov, T. V. Potapov

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE BASIC ERROR
OF MEASUREMENT OF FIBER-OPTIC ELECTRIC
CURRENT SENSOR BASED ON FARADAY EFFECT
IN $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ AND $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассматривается актуальный вопрос экспериментального определения основной погрешности 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 обеспечивают 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 является основная погрешность измерения таких ВОДТ. Цель работы – экспериментальный анализ градуировочной характеристики и основной погрешности измерения ВОДТ. *Материалы и методы.* Рассмотрена структурная схема однопроходного ВОДТ на кристаллах с кубической симметрией $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. Предложена методика и схема калибровки ВОДТ, позволяющая осуществлять построение характеристики преобразования датчика и производить анализ составляющих его основной погрешности. При калибровке ВОДТ помещается в длинный соленоид, в котором при протекании тока создается однородное магнитное поле, пропорциональное току. Величина тока в соленоиде задается и регулируется по заданной программе с помощью компьютера. Магнитное поле соленоида, пропорциональное току, измеряется ВОДТ. Его сигнал через аналого-цифровой преобразователь вводится в компьютер, где сравнивается с заданным значением тока. *Результаты.* Проведенный анализ градуировочной характеристики и составляющих его основной погрешности измерения показал, что характеристика датчика является линейной. Случайные ошибки измерения ВОДТ обусловлены шумами всего измерительного канала ВОДТ: флуктуациями мощности источника излучения, шумами фотоприемного устройства, флуктуациями потерь мощности излучения в оптических волокнах и соединителях, межмодовыми шумами, возникающими в процессе распространения света в волокне. Эти шумы приводят к ограничению точности измерений. На точность измерений также влияют погрешности средств градуировки, среди которых самой существенной является погрешность квантования аналого-цифрового преобразователя. Плотность вероятности распределения измеренных значений ВОДТ токов по ансамблю независимых значений удовлетворительно описываются по законам Гаусса. *Выводы.* Предложена методика и схема экспериментальных исследований основной погрешности волоконно-оптического датчика электрического тока на основе эффекта Фарадея в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, которые позволяют про-

водить построение градуировочной характеристики и исследование основной погрешности ВОДТ. Проанализированы причины возникновения и количественные величины составляющих основной погрешности измерений ВОДТ на основе эффекта Фарадея в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. Проведенный анализ погрешностей показал, что указанные датчики могут обеспечить основную относительную погрешность измерения электрического тока, не превышающую $\pm 1\%$. Для снижения основной погрешности измерения ВОДТ необходимо применять специальные дополнительные меры, относящиеся как к конструктивным, так и к технологическим приемам уменьшения основной погрешности.

A b s t r a c t. *Background.* Experimental studies of the basic error of measurement of fiber-optic electric current sensor based on the Faraday effect in $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. *Relevance and purpose.* The article deals with the topical issue of experimental determination of basic error of fiber-optic sensors of electric current (VADT). VOGT, compared to other current sensors have several advantages, which causes them considerable practical interest and are already providing their use. The object of the study are VOT 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 basic error of measurement of such VOT. The aim of this work is the experimental analysis of the calibration characteristics and the basic error of measurement, VOT. *Materials and methods.* Structural diagram of single-pass, VOD for crystals with cubic symmetry $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. The proposed method and scheme of calibration VOGT, allowing for the construction of the conversion characteristic of the sensor and to analyze the components of his basic error. During calibration, VOGT placed in a long solenoid, in which the flow of current creates a homogeneous magnetic field proportional to the current. The magnitude of the current in the solenoid is set and regulated for a given program using the computer. The magnetic field of the solenoid proportional to the current, measured, VOGT. Its signal via analog-to-digital Converter is entered into the computer, where it is compared with a predetermined current value. *Results.* The analysis of the calibration characteristics and its constituent basic error of measurement showed that the response of the sensor is linear. Random measurement errors, VOGT due to noise of the entire measurement channel, VOD: fluctuations of the source power of the radiation noise of a photodetector, a fluctuation of power losses of radiation in optical fibers and connectors, lgmodule noise arising in the process of light propagation in the fiber. These noises reduce accuracy of measurement. On the accuracy of measurements also affect the error of the calibration means, among which the most significant is the quantization error of the ADC. The probability density distribution of the measured values of the currents VOGT ensemble of independent values satisfactorily describe the laws of Gauss. *Conclusions.* The proposed method and scheme of experimental investigations the basic error of fiber-optic electric current sensor based on the Faraday effect in $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, which enables the construction of calibration characteristics and a study of the basic error of VOT. The causes of and quantity components of the basic error of measurement, VADT based on the Faraday effect in $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. The analysis of errors showed that these sensors can provide the basic relative error of measurement of electric current, not exceeding $\pm 1\%$. To reduce the basic error of measurement, VODT necessary to use special additional measures related both to the constructive and technological methods of reducing the basic error.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрический ток, волоконно-оптический датчик, схема калибровки, основная погрешность измерения.

К e y w o r d s: electric current, fiber optic sensor, circuit calibration, the main error of the measurement.

В настоящее время все большее применение получают волоконно-оптические датчики (ВОД) электрического тока и магнитного поля на основе эффекта Фарадея. Такие датчики представляют собой измерительную систему, включающую в себя источник света (полупроводниковый лазер или светодиод), фотоприемное устройство (ФПУ), передающие волоконно-оптические кабели (ВОК) и, наконец, сам чувствительный элемент (ЧЭ) или первичный пре-

образователь, выполненный из магнитооптического материала (в частности, из $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ или $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) и преобразующий электрический ток и создаваемое им магнитное поле в изменение мощности светового потока, поступающей на фотоприемник [1–3]. Кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ обладают целым рядом свойств, которые делают их одним из лучших материалов для применений в ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока. Кубическая структура таких кристаллов обуславливает изотропность диэлектрической проницаемости и, как следствие, отсутствие естественного линейного двулучепреломления (ЛДП) и температурной зависимости коэффициента преобразования, присущих другим материалам. Отсутствие ЛДП снимает жесткие ограничения на апертуры световых пучков, что позволяет легко согласовывать чувствительные элементы с различными типами стандартных волокон и другими оптическими элементами. Такие ВОД ввиду их миниатюрности, помехозащищенности, отсутствия электрического питания в зоне измерений и ряда других присущих им свойств являются весьма перспективными для дистанционных бесконтактных измерений и контроля магнитных полей и токов в труднодоступных местах, например, в энергетических установках, испытательных стендах, соленоидах и т.д. [4–7]. Очевидно, для практических применений необходимо знать ограничения, которые обуславливаются погрешностями измерений и проводить предварительную калибровку ВОД.

Схема ВОД датчика электрического тока приведена на рис. 1. По сравнению с традиционными, например трансформаторными, датчиками, в которых измеряемый электрический ток непосредственно преобразуется в электрическую величину (напряжение, ток), ВОД имеют свои особенности, связанные с преобразованием измеряемого тока в оптический сигнал и обратно в электрический и требуют своего подхода в процессе их анализа. В данной работе приводятся результаты анализа основной погрешности измерений ВОД электрического тока с миниатюрным чувствительным элементом на основе $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и его калибровки в соленоиде. Схема ВОД приведена на рис. 1, а схема калибровки – на рис. 2.

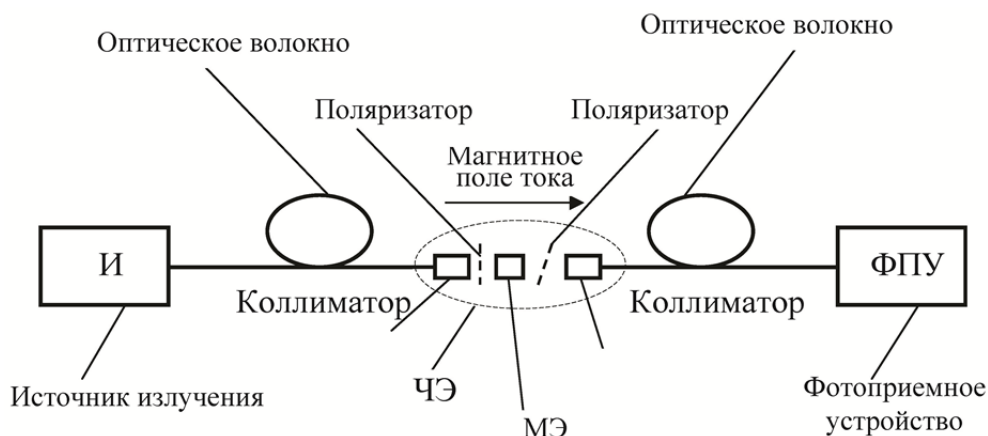


Рис. 1. ВОД электрического тока;
МЭ – магниточувствительный оптический элемент

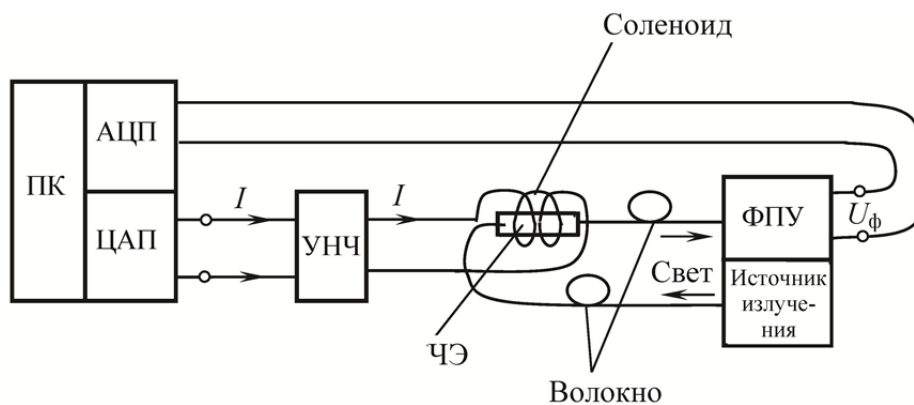


Рис. 2. Схема калибровки ВОД электрического тока

Электрический ток измеряется путем измерения напряженности магнитного поля, создаваемого проводником с током. В процессе измерений ВОД выходной величиной, несущей информацию о токе, является напряжение U_ϕ на выходе фотоприемного устройства, величина которого однозначно связана с величиной тока и пропорциональна величине измеряемого тока.

Зная или предварительно установив этот коэффициент пропорциональности, можно сравнивать задаваемое значение тока в соленоиде с измеряемым с помощью ВОД тока по значениям U_ϕ , что позволяет осуществлять его калибровку и анализировать погрешности ВОД.

Чувствительный элемент ВОД (кристалл $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ с коллимирующей оптикой и поляризаторами) располагается в длинном соленоиде, в котором при протекании тока создается однородное магнитное поле, пропорциональное току. Ток в соленоиде задается и регулируется по заданной программе. Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) под управлением компьютера генерирует переменный ток заданной частоты и формы, который усиливается усилителем низкой частоты (УНЧ) до необходимой величины. Максимальное значение тока может составлять не более 2 А и ограничивается мощностью УНЧ. Магнитное поле соленоида, пропорциональное току, измеряется ВОД. Полученный сигнал U_ϕ через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) поступает в компьютер, где сравнивается с заданным значением тока. Для определения точности измерений и калибровки ВОД необходимо проанализировать и определить ошибки, которые могут иметь место в процессе измерений. Случайные ошибки в схеме на рис. 2 обусловлены шумами всего измерительного канала ВОД, а именно: флуктуациями мощности источника излучения, шумами фотоприемного устройства, флуктуациями потерь мощности излучения в оптических волокнах и соединителях, межмодовыми шумами, возникающими

в процессе распространения света в волокне. Эти шумы ограничивают чувствительность ВОД и, в итоге, точность измерений.

В схеме калибровки ВОД (рис. 2) могут присутствовать также случайные ошибки, обусловленные погрешностями квантования АЦП, максимальная величина которых может составлять половину интервала квантования. Кроме этого, на точность измерений и достоверность результатов калибровки ВОД могут влиять и систематические ошибки, возникающие при преобразовании и обработке данных в АЦП вследствие ограниченности его характеристик. Однако этих ошибок удастся избежать за счет выбора АЦП. В данном случае для сбора и анализа данных применяется 12-разрядная плата АЦП типа LA1.5PCI, способная работать в диапазоне ± 50 мВ с разрешением 12 мкВ. Так как вносимая АЦП LA1.5PCI погрешность не превышает 1МЗР [8], считаем, что первые 11 бит значений сигналов верны и тогда погрешность измерений составит не более ± 25 мкВ в диапазоне сигналов ± 50 мВ. При этом во всем диапазоне измерения токов ток в соленоиде линейно преобразуется в напряжение на выходе ФПУ.

При проведении калибровки ВОД в катушке (см. рис. 2) задается величина переменного тока заранее выбранной частоты. Измерения проводились на частоте 87 Гц при величинах тока до 2 А с интервалами 0,2 А. Ограничение по величине тока связано с ограниченной мощностью УНЧ.

На рис. 3 приведены результаты измерений напряжения U_ϕ на выходе фотоприемника датчика при величине тока в катушке 2 А. По оси ординат отложены значения U_ϕ выходного напряжения фотоприемника, соответствующие величине тока 2 А, измеренные в течение 5 с с интервалом 100 мс, а по оси абсцисс – время и количество отсчетов U_ϕ .

Обработка этих результатов показывает, что плотность вероятности распределения измеренных значений U_ϕ по ансамблю независимых значений удовлетворительно описывается по законам Гаусса (рис. 4).

Среднее квадратичное отклонение σ (квадратный корень из дисперсии U_ϕ) кривой на рис. 3 составляет $\sigma \approx 0,07$ мВ. Тогда погрешность измерений ΔU_ϕ определяется, как 3σ и равна $\Delta U_\phi = \pm 0,21$ мВ.

На рис. 5 приведены результаты измерений различных значений токов в соленоиде в пределах от 0 до 2 А с интервалом в 200 мА.

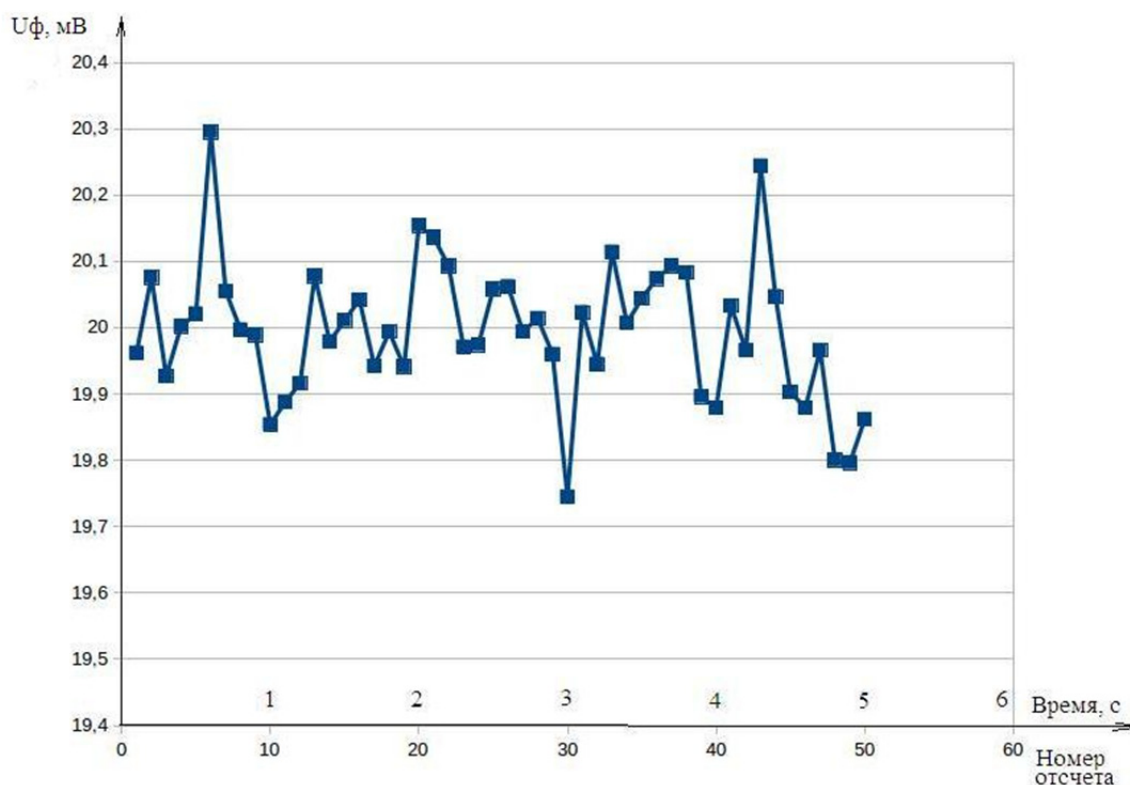


Рис. 3. Результаты измерений U_ϕ при величине тока в катушке 2 А

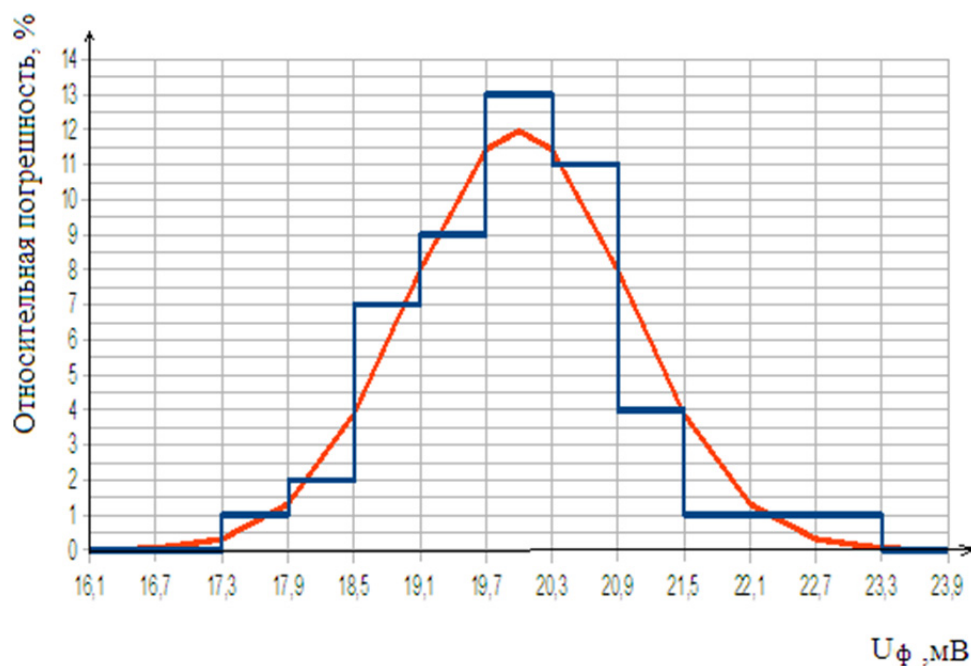


Рис. 4. Распределение плотности вероятности U_ϕ

Как видно из кривой на рис. 5, при значениях тока в катушке равных и более 1 А ВОД начинает фиксировать флуктуации тока в соленоиде, составляющие примерно 1 % от максимального значения равного 2 А. Эти флуктуации, по-видимому, связаны с нестабильностями тока в соленоиде, обусловленными шумами УНЧ.

Полученное в результате измерений значение основной погрешности в 1 % для практического применения не всегда является достаточным. Для ее уменьшения необходимо применять дополнительные конструктивно-технологические решения [9, 10].

Результаты измерения

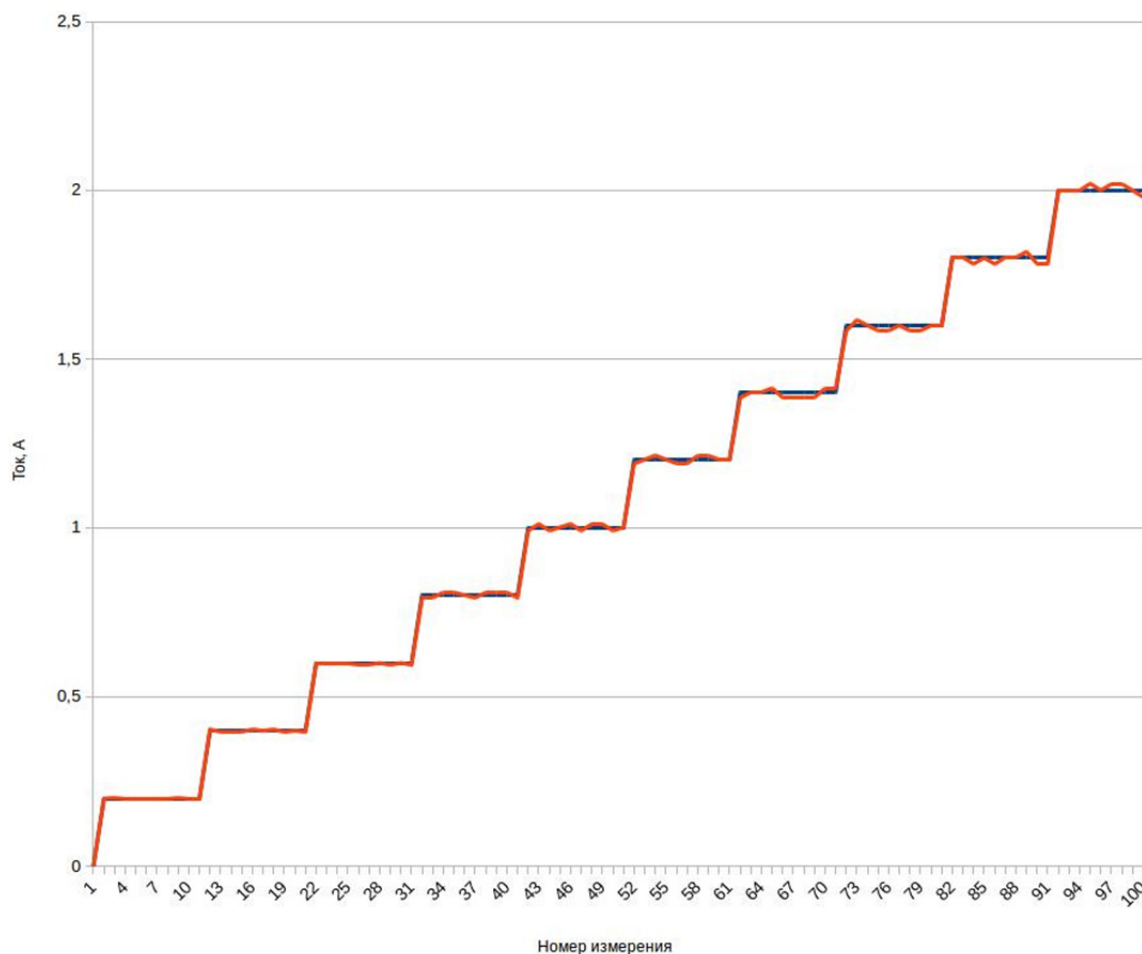


Рис. 5. Результаты измерений различных значений токов в соленоиде в пределах от 0 до 2 А

Заключение

1. Предложена методика и схема экспериментальных исследований основной погрешности волоконно-оптического датчика электрического тока на основе эффекта Фарадея в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, которые позволяют проводить построение градуировочной характеристики и исследование основной погрешности ВОД тока при значениях электрических токов до 2 А.

2. Проанализированы причины возникновения и количественные величины составляющих основной погрешности измерений ВОД тока на основе эффекта Фарадея в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. Проведенный анализ погрешностей показал, что указанные датчики могут обеспечить основную относительную погрешность измерения электрического тока, не превышающую $\pm 1\%$.

3. Для снижения основной погрешности измерения ВОД электрического тока необходимо применять специальные дополнительные меры, относящиеся как к конструктивным, так и к технологическим приемам ее уменьшения основной погрешности.

Список литературы

1. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики / Э. Удд. – М. : Техносфера, 2008. – 520 с.
2. Фрайден, Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2006. – 592 с.
3. Волоконно-оптические датчики магнитного поля и электрического тока на основе эффекта Фарадея в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ / А. В. Кухта, А. М. Мамедов, В. Т. Потапов, Т. В. Потапов, М. Е. Удалов // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, № 3. – С. 368–376.

4. Бурков, В. Д. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники : моногр. / В. Д. Бурков, Г. А. Иванов. – М. : Изд-во ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. – 232 с.
5. Бурков, В. Д. Экоинформатика: Алгоритмы, методы и технологии : моногр. / В. Д. Бурков, В. Ф. Крапивин. – М. : Изд-во ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 431 с.
6. Бурков, В. Д. Анализ и выбор оптимальной системы волоконно-оптического датчика электрического тока / В. Д. Бурков, Н. А. Харитонов, А. Н. Демин // Вестник московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2014. – № 2. – С. 225–257.
7. Бурков, В. Д. Миниатюрный волоконно-оптический датчик электрического тока / В. Д. Бурков, А. Н. Демин // Сборник аспирантов и докторантов МГУЛ. – М. : Изд-во ГОУ ВПО МГУЛ, 2013. – С. 34–38.
8. Универсальная плата АЦП для IBM PC/AT совместим компьютер ЛА-1.5 РСІ. Руководство пользователя ВКФУ. 411619.060РП. – М., 2001. – 43 с.
9. Бурков, В. Д. Теория, расчет и проектирование волоконно-оптических приборов и систем : практикум / В. Д. Бурков, В. Т. Потапов. – М. : Изд-во ГОУ ВПО МГУЛ, 2011. – 82 с.
10. Отработка технологических параметров и режимов изготовления волоконно-оптических световодов методом регрессионного анализа : учеб.-метод. пособие / В. Д. Бурков, В. А. Беляков, Д. А. Голодушкин, А. И. Кофанов, Д. Г. Сырейщиков. – М. : Изд-во ГОУ ВПО МГУЛ, 2013. – 102 с.

Демин Андрей Николаевич

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

Demin Andrey Nikolaevich

engineer,
Moscow State Forest University
(1 First Institutskaia st., Mytishchi,
Moscow region, Russia)

Смыслов Владимир Иванович

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

Smyslov Vladimir Ivanovich

candidate of technical sciences,
head of department,
Scientific-Production Association
Measuring Equipment
(2 Pionerskaya st., Korolev, Moscow region, Russia)

Потапов Тимофей Владимирович

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Институт радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова РАН
(Фрязинский филиал)
(Россия, Московская область,
г. Фрязино, пл. Введенского 1)
E-mail: vladismyslov@yandex.ru

Potapov Timofei Vladimirovich

candidate of physical and mathematical sciences,
senior researcher,
Institute of Radio engineering and Electronics
named after V. A. Kotelnikov of RAS (Fryazino branch)
(1 Vvedenskogo sq., Fryazino, Moscow region, Russia)

УДК 687.586.5

Демин, А. Н.

Экспериментальные исследования основной погрешности измерений волоконно-оптического датчика электрического тока на основе эффекта Фарадея в $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ / А. Н. Демин, В. И. Смыслов, Т. В. Потапов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 3 (17). – С. 47–53.