

8. *Пат. 6364524* США МПК G01J5/00 High speed infrared radiation thermometer, system, and method / Markham James; заявитель и патентообладатель Advanced Fuel Research Inc. – Заявл. 09.04.99 ; опубл. 02.04.02.

9. *Пат. 6585410* США МПК G01J5/52; G01J5/62; G01J5/52 Radiant temperature nulling radiometer / Ryan Robert; заявитель и патентообладатель NASA. – Заявл. 03.05.01 ; опубл. 01.07.03.

10. *Bertranda, Ph.* Pyrometry applications in thermal plasma processing / Ph. Bertranda, M. Ignatieva, G. Flamanta, I. Smurov // Vacuum. – 2000. – Vol. 56, № 1. – P. 71–76.

11. *Doubenskaia, M.* Optical monitoring of Nd:YAG laser cladding / M. Doubenskaia, Ph. Bertrand, I. Smurov // Thin Solid Films. – 2004. – Vol. 453–454. – P. 477–485.

УДК 681.51.011

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

М.А. Ураксеев, Н.А. Авдонина

Проведено исследование применения магнитооптических преобразователей в оптических информационно-измерительных системах (ИИС) контроля электрического тока и магнитного поля с применением магнитооптического элемента Фарадея. Представлены преимущества магнитооптических преобразователей.

Ключевые слова: *магнитооптический преобразователь, информационно-измерительная система (ИИС), технические характеристики, метод измерения, оптическая измерительная техника, одномодовое оптическое волокно, световод, линейно поляризованный световой луч, сила тока, магнитное поле, магнитооптическая постоянная Верде.*

Key words: *magneto-optic converter, information-measuring system (IMS), technical features, metod of the measurement, optical measuring technology, single mode optical fiber, light conductor, linear polarized light ray, electric current, magnetic field, magneto-optic constant Verde.*

Человечеству на всем протяжении своего развития свойственна неутолимая жажда познания себя и окружающей Вселенной. Научные наблюдения и эксперименты проводились с незапамятных времен, и инструменты, использовавшиеся для этого, существуют уже тысячелетия. Тем не менее во второй половине XX в. развитие измерительных технологий и в связи с этим теории управления было очень стремительным.

В настоящее время прогресс в автоматизации технологических процессов лимитируется качеством измерительных систем, в частности, интерфейсом промышленного оборудования [1, с. 27]. Для любого нового устройства важно, чтобы эксплуатационные характеристики были правильно определены и, самое главное, были стабильны. Часто именно эта задача становится наиболее сложной для решения при осуществлении промышленного выпуска преобразователей новейших конструкций, осуществляющих измерение текущего значения координаты, скорости потока, влажности, ускорения, уровня жидкости, температуры, давления, электрического тока и магнитного поля. К тому же некоторые области применения современных преобразователей требуют значительно лучших технических характеристик в связи с жесткой ценовой политикой рынка, для которого они предназначены. В таблице представлены допустимые цены и другие желательные параметры преобразователей для основных областей применения [1, с. 28].

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Таблица

Преобразователи, доступные в некоторых основных областях

	Бытовые нужды	Промыш- ленность	Медицина	Автомоби- лестроение	Экология
Допустимая цена (\$)	1	500	Одноразовые 10, многоразо- вые 250	5	Одноразовые 10, многоразо- вые 250
Допустимая ошибка, %	10,0	0,1–5,0	0,1–2,0	1,0–5,0	1,0–10,0
Среднее время меж- ду отказами (часов)	10^3 в тече- ние 10 лет периодиче- ской экс- плуатации	10^5 в тече- ние 10 лет непрерыв- ной экс- плуатации	Одноразовые 150 в течение 1 недели не- прерывной экс- плуатации, многоразовые $5 \cdot 10^3$ в течение 5 лет периоди- ческой экс- плуатации	$1,5 \cdot 10^4$ в течение 10 лет перио- дической эксплуата- ции	Одноразовые 150 в течение 1 недели не- прерывной эксплуатации, многоразовые 10^4 в течение 10 лет перио- дической экс- плуатации
Темпера- турный диа- пазон (0 °С)	-20...400	-200...1500	Одноразовые 10...50, много- разовые 0...250	-30...400	-50...100
Быстродей- ствие (с)	1	0,1–10	1	10^{-3} –1,0	100

Информационно-измерительные системы

В последние десятилетия стали широко использоваться ИИС и информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС).

В соответствии с ГОСТом 8.437-81 [2] ИИС – совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки в целях представления потребителю в требуемом виде либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации. ИИС, предназначенные для измерения, обработки и выдачи информации, носят название измерительных систем (ИС). ИС могут быть одноканальными и многоканальными.

Составной частью ИИС и ИИУС являются первичные измерительные преобразователи – элементарные устройства, осуществляющие преобразования одной физической величины в другую, удобную для дальнейших преобразований или обработки. В дальнейшем термин «первичный преобразователь» для упрощения будем обозначать просто «преобразователь». Принятый на Западе термин «сенсор» более соответствует понятию «датчик», который имеет более сложную структуру по сравнению с преобразователем. Например, это каскадное включение преобразователя с усилителем или следующая структура: преобразователь – усилитель – аналогово-цифровой преобразователь.

Структурная схема ИИС в виде простейшей ее разновидности – одноканальной измерительной системы (ИС) – представлена на рис. 1.

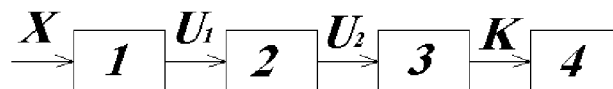


Рис. 1. Одноканальная ИИС:

1 – первичный преобразователь; 2 – усилитель напряжения U_1 в U_2 ; 3 – аналогово-цифровой преобразователь, преобразующий аналоговое напряжение U_2 в цифровой сигнал K ; 4 – жидкокристаллический индикатор, осуществляющий отображение измеряемой величины X

Важность измерения высоких напряжений и больших токов

Современные энергонасыщенные производства и научные исследования требуют измерений высоких и сверхвысоких напряжений (до 10 МВ) и больших токов (до 1...2 МА). Напряжение и токи при этом могут быть постоянными, переменными и импульсными с длительностью импульсов от долей микросекунд до нескольких десятков миллисекунд. Электролизные ванны для производства алюминия питаются постоянным напряжением 1000 В и потребляют ток до 200...500 кА. Огромные объемы электроэнергии требуют и производства меди, марганца, цинка, стали, хлора. Кроме того, в этой отрасли промышленности для управления электрохимическими процессами необходимы высокоточные датчики постоянного тока (с погрешностью измерения до 0,1 %). При внедрении оптимизированных процессов промышленные предприятия вынуждены экономить электроэнергию и контролировать ее фактический расход. Особую важность этот вопрос приобретает в сегодняшних сложных экономических условиях, когда ошибка на 0,1 % в измерении тока 500 кА означает ошибку на 0,5 МВт – этого достаточно для снабжения дорогой электроэнергией 1000 жилых домов.

Быстрое развитие линий электропередач и электрофизических устройств высокого и сверхвысокого напряжений не только обусловило появление новых методов измерений, не требующих создания дорогостоящих и громоздких изоляционных устройств, но и столкнулось с предъявлением жестких требований к метрологическим характеристикам преобразователей физических величин.

Оптические измерительные системы

Для автоматизации и повышения производительности труда, миниатюризации и повышения качества продукции, а также для безопасности работы человека во вредных средах требуются самые различные измерительные системы, осуществляющие дистанционное измерение контролируемых величин. В науке также необходимы новые средства и способы измерений. Все эти и многие другие потребности могут быть удовлетворены при помощи оптической измерительной техники. Следует отметить некоторые особенности и возможности таких измерений, где средством переноса информации служит свет:

1) измерения неконтактные, объект не разрушается, что позволяет вести непрерывный контроль;

2) для связи между приборами и объектами используют оптические волокна, очень привлекательным достоинством которых является абсолютная нечувствительность их к электромагнитным помехам любого происхождения и любой интенсивности, особенно если преобразователи необходимо размещать на значительном удалении (сотни километров) от пунктов сбора и обработки информации;

3) световые волны имеют много параметров – амплитуду, частоту, фазу, поляризацию, моду, когерентность, которые можно использовать при обработке информации;

4) оптические приборы позволяют перейти от локальных измерений к наблюдению сразу за всем объектом;

5) возможны измерения в микроскопических образцах;

6) применимы новые высокоэффективные способы обработки информации: преобразования Фурье, пространственная фильтрация, голография [3, с. 155].

Важными, а иногда и определяющими являются требования безопасной работы приборов в условиях повышенной электро-, взрыво- и пожаробезопасности.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Развитие измерений с использованием оптики сопровождается появлением различных оптоэлектронных и магнитооптических приборов. В последние годы увеличилось число работ по созданию новых высокоэффективных магнитооптических преобразователей (МОП). Работы в этой области уже давно ведут такие известные компании, как KDD (ФРГ), Toshiba (Япония), Verbatim (США), IBM (США) и многие др. [4, с. 264–265]. В этих устройствах в качестве чувствительных используются магнитооптические элементы, в основе действия которых лежит магнитооптический эффект, основанный на изменении оптических свойств вещества в зависимости от его намагниченности или от силы приложенного к нему магнитного поля. Под оптическими свойствами следует понимать отражение, пропускание, поляризацию света и другие явления.

Магнитооптические преобразователи

Ниже описаны некоторые эффективные магнитооптические преобразователи электрических величин.

На рис. 2 приведено устройство для измерения сверхбольших токов [5] – силы тока до 10^6 А в электрофизических установках – устойчивое к наводкам паразитных токов. Для этого в конструкции устройства содержится n МОП 1 с чувствительными элементами в виде протяженного световода из магнитооптического материала, причем положение оптического входа каждого из n световодов преобразователей совпадает с оптическим выходом соседнего световода таким образом, что они образуют замкнутый односвязный контур, охватывающий только токопровод с измеряемым током. Выходы МОП соединены с соответствующими им входами измерительно-вычислительного блока 2.

Число n выбирается из условия:

$$n > VI_{max}/\pi,$$

где V – постоянная Верде материала световода; I_{max} – максимальный измеряемый ток.

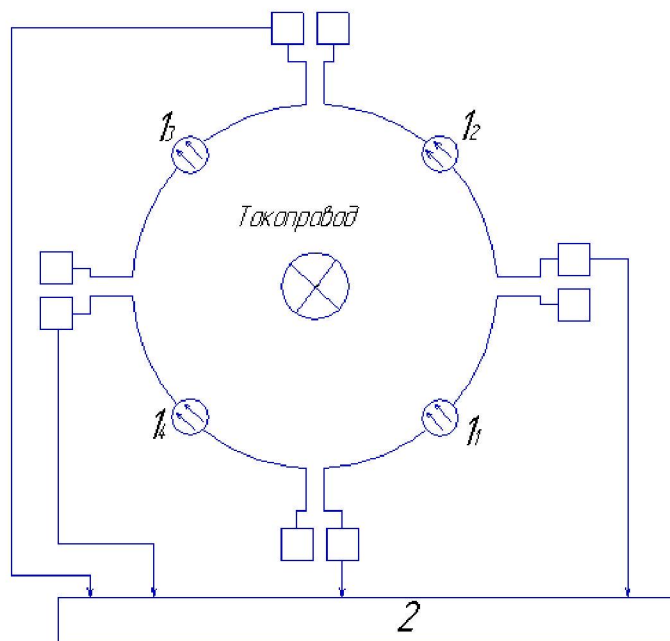


Рис. 2. Устройство для измерения сверхбольших токов

Измерительно-вычислительный блок выполнен с возможностью реализации функции:

$$I = 1/2V \sum \arcsin(U_{out k}),$$

где I – измеряемый ток; $U_{out k}$ – выходной сигнал с k -го магнитооптического датчика.

В качестве МОП 1 можно взять, например, волоконно-оптический преобразователь тока, состоящий из источника излучения света, поляризатора, оптического волокна в качестве чувствительного элемента, призмы Волластона, двух фотодиодов и дифференциальной

электронной схемы. В качестве измерительно-вычислительного блока можно взять, например, устройство преобразования информации, состоящее из нескольких аналого-цифровых преобразователей и программируемого контроллера.

На рис. 3 показано устройство для измерения переменного электрического тока [6]. Недостатками многих устройств измерения переменного электрического тока является невысокая точность и стабильность измерений в реальных условиях эксплуатации, связанных с неконтролируемым изменением состояния поляризации светового сигнала в процессе измерений, в частности, в результате воздействия внешних факторов (температуры, вибраций и т.д.)

Для повышения точности и стабильности измерений в условиях реальной эксплуатации путем уменьшения искажения формы сигнала поляризованный световой луч пропускают через магнитооптический чувствительный элемент в виде закрученного вдоль направления распространения излучения одномодового оптического волокна. На выходе чувствительного элемента определяют азимутальный угол и угол эллиптичности поляризации светового сигнала. Дополнительно определяют двулучепреломление в выходном фиксирующем соединителе оптического волокна, с его использованием находят состояние поляризации светового сигнала в конце волокна перед выходным фиксирующим соединителем. Формируют измерительный сигнал с учетом угла ориентации между парами и двулучепреломления в выходном фиксирующем соединителе и по нему находят измеряемую величину.

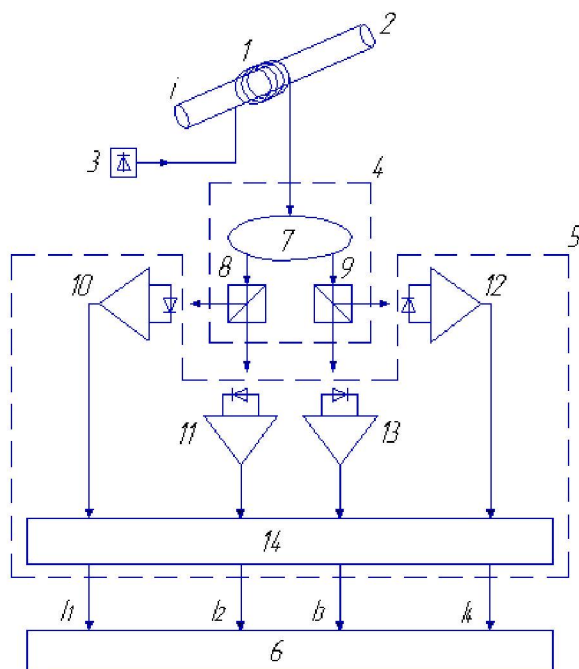


Рис. 3. Устройство для измерения переменного электрического тока:

V – константа Верде материала; H_1 – составляющая магнитного поля вдоль направления распространения света; i – переменный электрический ток; I_1, I_2, I_3, I_4 – нормированные по интенсивности электрические сигналы; \rightarrow – направления передачи светового и электрического сигналов; 10–13 – фотоэлектрические преобразователи, 14 – фильтр нижних частот для выделения переменных составляющих сигналов

Измеряемый электрический ток i создает вокруг проводника переменного электрического тока 2 магнитное поле. При прохождении линейно поляризованного света от источника излучения с помощью средства 3 ввода в волокно поляризованного светового сигнала через находящийся в этом поле магнитооптический материал длиной l (чувствительный элемент 7) происходит вращение его плоскости поляризации на угол $\alpha = V \int H_1 dl$, т.е. изменяется азимутальный угол ϕ направления поляризации.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

При выборе в качестве чувствительного элемента l оптического волокна, образующего n витков вокруг проводника 2, угол поворота плоскости поляризации света на выходе волокна составит $\alpha = Vni$.

Далее световой сигнал, прошедший коллимирующую линзу 7, подают на поляризационные делители 8 и 9 средства 4. При использовании одного поляризационного делителя, как правило, установленного под углом 45° к направлению поляризации падающего света, световой сигнал делится на пару взаимно ортогональных линейно поляризованных составляющих. В идеальном случае (при отсутствии двойных лучепреломлений) эти составляющие преобразуются в узле 5 в нормированные по интенсивности электрические сигналы $l_1 = l_0 \cos^2(\alpha + 45^\circ)$ и $l_2 = l_0 \sin^2(\alpha + 45^\circ)$. Здесь сигнал l_0 соответствует интенсивности света на входе поляризационного делителя. Производя в блоке 6 операции деления разности интенсивностей на их сумму, можно сформировать измерительный сигнал, зависящий только от угла поворота плоскости поляризации, а значит, и от величины измеряемого тока $I = (l_1 - l_2)/(l_1 + l_2) = \sin(2\alpha) = \sin(2Vni)$, и по нему найти измеряемую величину $I = \arcsin(l/2Vn)$.

Предложенный способ измерения переменного электрического тока с помощью данного устройства может найти широкое применение в области электрических измерений, в частности, в измерительной технике высоких напряжений, в области релейной защиты и автоматики.

На рис. 4 приведено магнитооптическое устройство для измерения силы тока [7]. От двух лазерных источников света $CD1$ и $CD2$ световые лучи 1 и 2 попеременно поляризуются ортогонально друг к другу при помощи светоделителя 3 через коллиматоры 4 и 6, соединенные между собой оптическим волокном 5, световой поток через магнитооптический датчик тока 7 (9 – проводник с током, 8 – изоляция проводника) попадает в анализатор 10. Далее световые лучи через коллиматоры 11 и 12, а также многомодовые волокна 13 и 14 подводятся к светодетекторам DA и DB , от которых через определенные временные интервалы отводятся первый и второй сигналы световой мощности S_{a1} , S_{a2} и S_{b1} , S_{b2} . С помощью формирующего устройства 16, расположенного в блоке управления и обработки информации 15, рассчитывается сила тока I согласно полученным от магнитного датчика величинам:

$$I = [S_{a1}S_{b2} / (S_{a2}S_{b1}) - 1] / (8V),$$

где V – магнитооптическая постоянная Верде.

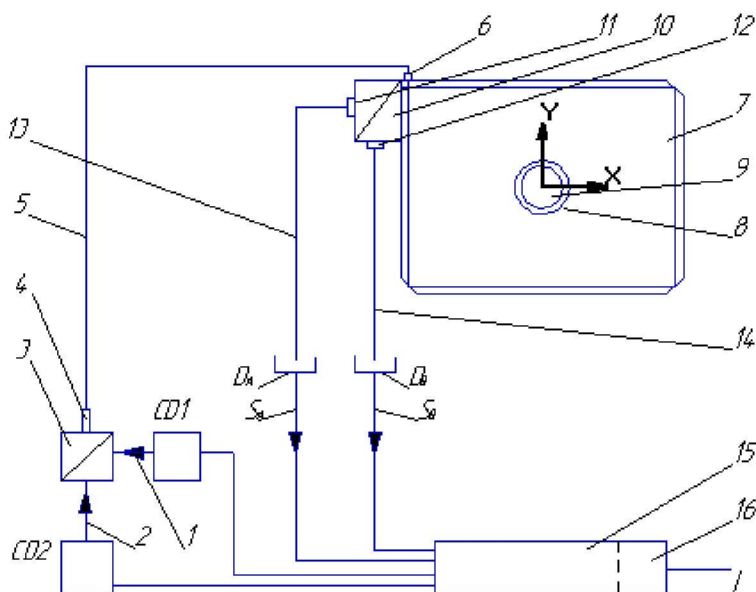


Рис. 4. Магнитооптическое устройство для измерения силы тока

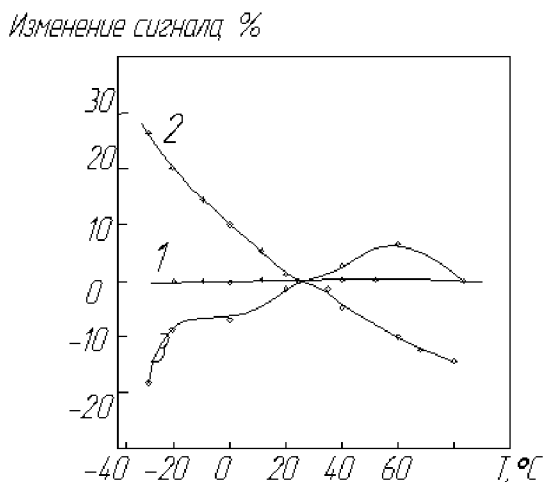


Рис. 5. Температурная зависимость изменения выходного сигнала магнитооптического датчика на основе трех типов магнитооптических материалов: 1 – диаманитное стекло SF-6, 2 – парамагнитное стекло FR-5, 3 – феррит-гранат Y3Fe5O12

В качестве магнитооптических материалов, используемых в МОП тока, диаманитные стекла (кривая 1) типа флинт-глас (SE-6) практически нечувствительны к температурным колебаниям по сравнению с пара- и ферромагнетиками (кривые 2 и 3, рис. 5). Поэтому, несмотря на малое значение постоянной Верде для измерений больших токов, диаманитные стекла предпочтительнее других материалов. К тому же имеется возможность использования таких устройств в качестве измерителей магнитного поля. Ко всему прочему при работе не требуется дополнительной компенсации силы света для лазерных источников света CD1 и CD2.

Библиографический список

1. *Джексон, Р. Г.* Новейшие датчики / Р. Г. Джексон ; пер. с англ. под ред. В. В. Лучинина. – М. : Техносфера, 2007. – 384 с.
2. *ГОСТ 8. 437-81.* Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – Введ. 1982-01-07. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 38 с.
3. *Гонда, С.* Оптоэлектроника в вопросах и ответах / С. Гонда, Д. Сэко ; пер. с яп. З. А. Кругляка – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1989. – 184 с.
4. *Рандошкин, В. В.* Прикладная магнитооптика / Владимир Рандошкин, Андрей Червоненкис – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 403 с.
5. *Патент 2120128* Российская Федерация, МПК G01R19/00, G01R33/032. Устройство для измерения сверхбольших токов // Казачков Ю. П.; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт импульсной техники. – № 97110903/09 ; заявл. 26.06.97 ; опубл. 10.10.98.
6. *Пат. 2281516* Российская Федерация, МПК G01R15/24, G01R 33/032. Способ измерения переменного электрического тока и устройство для его осуществления / Ловчий И. Л., Вицинский С. А., Вицинская Т. Г. ; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем. – № 2004123707/28 ; заявл. 2004.08.02 ; опубл. 2006.08.10.
7. *Пат. Великобритании № 434210* Способ магнитооптического измерения и магнитооптическое токоизмерительное устройство // Изобретения стран мира. – 1997. – № 3.