



# ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕАЛИЗАЦИИ.

## ЧАСТЬ II

В. П. Губин<sup>1,2</sup>, Н. И. Старостин<sup>1,2</sup>, Я. В. Пржиялковский<sup>1,2</sup>, С. К. Моршнева<sup>1,2</sup>, А. И. Сазонов<sup>1,2</sup>, С. Ю. Отрохов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН г. Фрязино; Московская обл.  
<sup>2</sup>АО "Профотек", г. Москва

Электромагнитные трансформаторы, работающие на принципе электромагнитной индукции, традиционно используются в силовой электроэнергетике при измерении электрического тока. Но, к сожалению, высоковольтная изоляция классических трансформаторов не обладает достаточной надежностью при напряжениях порядка 110–750 кВ, и такие трансформаторы склонны к созданию взрыво- и пожароопасных ситуаций. В первой части обзора обсуждались физические принципы оптического метода измерения тока на основе эффекта Фарадея. Их технической реализации в виде волоконно-оптических трансформаторов электрического тока посвящена вторая часть обзора.

## 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Классические трансформаторы не обладают достаточной надежностью при напряжениях порядка 110–750 кВ и склонны к созданию взрыво- и пожароопасных ситуаций [1]. Поэтому активно развивается волоконно-оптический метод измерения тока с использованием эффекта Фарадея в оптическом волоконном световоде [2–4]. Основная часть рынка волоконно-оптических трансформаторов тока представлена мировыми лидерами General Electric (GE), ABB и Artech. В России только компания "Профотек" производит подобные приборы. Их физические основы были рассмотрены в первой части обзора [5–8]. Рассмотрим техническую реализацию волоконно-оптических трансформаторов тока.

# FIBER-OPTIC ELECTRIC CURRENT TRANSFORMERS: PHYSICAL BASES AND TECHNICAL IMPLEMENTATION.

## PART II

V. P. Gubin<sup>1,2</sup>, N. I. Starostin<sup>1,2</sup>, Ya. V. Przhiyalkovskiy<sup>1,2</sup>,  
S. K. Morshnev<sup>1,2</sup>, A. I. Sazonov<sup>1,2</sup>, S. Yu. Otrokhov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Fryazino branch of the V. A. Kotelnikov Institute of  
Radio Engineering and Electronics, RAS Fryazino;  
Moscow region.  
<sup>2</sup>JSC "Profotech", Moscow

Electromagnetic transformers are traditionally used in power electric engineering for electric current measuring. But, unfortunately, the high-voltage insulation of classical transformers does not have sufficient reliability at voltages 110–750 kV, and such transformers are prone to creating explosive and fire-dangerous situations. In the first part of the review, the physical principle of the optical method of current measuring based on the Faraday effect were discussed. The second part of the review is devoted to the technical implementation of this method.

## 2. TECHNICAL IMPLEMENTATION OF FIBER-OPTIC CURRENT TRANSFORMERS

The classical transformers does not have sufficient reliability at voltages 110–750 kV, and they are prone to creating explosive and fire-dangerous situations [1]. So a fiber-optic method for measuring current using the Faraday effect in an optical fiber has been actively developing [2–4]. The main part of the market of fiber-optic current transformers (FOCT) is represented by such leading global companies as General Electric (GE), ABB, Artech. In Russia, only "Profotech" manufactures such devices. Their operating principles were considered in the first part of the review [5–8]. Let's look at the technical implementation of fiber-optic current transformers.

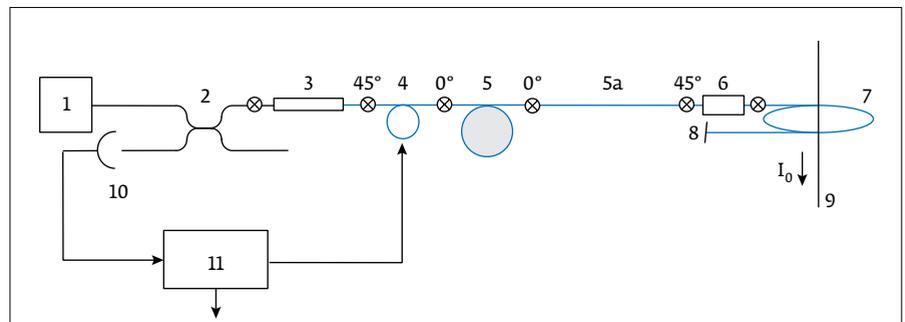
### 2.1. FOCT measuring fiber interferometer

As follows from the first part of the review, optical measurement of the current is reduced to measuring the Faraday phase shift  $\Delta\varphi_F$  between orthogonal circularly (elliptically) polarized waves or the angle of rotation  $\theta_F$

## 2.1. Измерительный волоконный интерферометр ВОТТ

Как следует из первой части обзора, измерение тока оптическим методом сводится к измерению фазового сдвига Фарадея  $\Delta\varphi_F$  между ортогональными циркулярно (эллиптически) поляризованными волнами или угла поворота  $\theta_F$  плоскости поляризации линейно поляризованного света. В современных электронно-оптических трансформаторах тока наиболее часто используются интерферометрический метод измерения  $\Delta\varphi_F$ . Ниже рассматривается один из вариантов широко применяемой схемы цельноволоконного измерительного интерферометра (линейный интерферометр Саньяка) (рис. 3) [9].

Схема работает следующим образом. Излучение волоконного низкокогерентного суперлюминесцентного источника 1 распространяется по ответвителю 2 и волоконному поляризатору 3. Поляризатор 3 преобразует излучение в линейно поляризованное. Далее поляризованное излучение попадает в волоконный модулятор двулучепреломления (ДЛП) 4. Модулятор ДЛП представляет собой световод, сохраняющий линейную поляризацию излучения (РМ световод), намотанный с определенным натяжением на пьезоцилиндр. Переменное электрическое поле, приложенное к пьезоцилиндру, модулирует натяжение РМ световода и, соответственно, его двулучепреломление. Благодаря ориентации плоскости пропускания поляризатора под  $45^\circ$  к осям ДЛП входного световода модулятора в волокне формируются две когерентные ортогональные линейно поляризованные волны (x и y поляризационные моды) интерферометра с равной интенсивностью – рабочие волны интерферометра. Модулятор обеспечивает синусоидальную модуляцию разности фаз рабочих волн. Наличие модулятора позволяет применить для измерения электрического тока широко используемый в волоконной гироскопии модуляционный метод (об особенностях и преимуществах этого метода см. ниже). Так как модулятор является взаимным элементом, то для получения требуемой фазовой модуляции между световыми волнами, распространяющимися через модулятор в прямом и обратном направлении, вводится временная задержка на половину



**Рис. 3.** Волоконный интерферометр для измерения тока: 1 – волоконный источник излучения, 2 – волоконный направленный ответвитель, 3 – волоконный поляризатор, 4 – пьезоволоконный модулятор, 5 – РМ волоконная линия задержки, 5а – РМ волоконная соединительная линия, 6 – волоконная четвертьволновая пластинка, 7 – волоконный чувствительный контур, 8 – зеркало, 9 – провод с током, 10 – фотоприемник, 11 – электронный блок (сварки помечены крестиками, число над сваркой показывает угол ориентации осей ДЛП).

**Fig. 3.** The fiber interferometer for current measuring: 1– fiber source of radiation, 2 – fiber directional coupler, 3– fiber polarizer, 4 – piezo-fiber modulator, 5 – polarization maintaining fiber delay line, 5а – polarization maintaining fiber connecting bus, 6 – quarter-wave plate, 7–fiber sensing coil, 8– mirror, 9–current bus, 10 – photodetector, 11– electronic module (criss-crosses are fiber splices, number over splice is the angle of an birefringence axes orientation)

of the plane of polarization of linearly polarized light. In modern electron-optical current transformers, the interferometric method is most often used. Below we consider one of the variants of the widely used scheme of a all-fiber measuring interferometer (linear Sagnac interferometer) (Fig. 3) [9].

The scheme operates as follows. The radiation of a low-coherent fiber superluminescent source 1 is propagated through the coupler 2 and the fiber polarizer 3. The polarizer 3 converts unpolarized radiation into the linear polarized one. Next, the linear polarized radiation enters the fiber birefringence modulator 4. The birefringence modulator is a fiber that maintains linear polarization of the radiation (PM fiber) wound with a certain tension on the piezoceramic cylinder. The alternating voltage applied to the piezoceramic cylinder leads to the PM fiber tension modulation and, accordingly, fiber's birefringence modulation. Due to the  $45^\circ$  alignment between the polarizer transmission axis and birefringence axes of the modulator input fiber, two coherent orthogonal linearly polarized waves (x and y polarization modes) of the interferometer with equal intensity are formed. The modulator provides a harmonic modulation of the waves phase shift. The presence of a modulator makes it possible to apply the modulation detection method widely used in fiber gyroscopy (see the features and advantages of this method below). Since the modulator is a reciprocal optical element, to obtain the required phase modulation between the light waves



периода управляющего модуляционного сигнала. Данная задержка определяется временем распространения света по протяженной РМ волоконной линии (линия задержки 5 и соединительная линия 5а). Волны с ортогональными линейными поляризациями, пройдя элементы 5 и 5а поступают на вход четвертьволновой пластинки.

Будучи исходно когерентными, линейно поляризованные волны низкокогерентного излучения, распространяясь по сильно анизотропному световоду линии задержки и соединительной линии, деполаризуются (теряют когерентность). В результате деполаризации низкокогерентного света на значительном протяжении волоконного оптического тракта снижается влияние ряда нежелательных факторов на точность интерферометра. Пластика  $\lambda/4$  конвертирует эти некогерентные линейно поляризованные волны в ортогональные циркулярно поляризованные волны, которые, пройдя через чувствительный к магнитному полю spun-световод (чувствительный контур 8), отражаются от зеркала на его конце и распространяются в обратном направлении. При зеркальном отражении поляризация каждой из волн преобразуется в ортогональную (лево-циркулярная волна преобразуется в право-циркулярную и наоборот). После обратного прохода пластинки  $\lambda/4$  волны вновь преобразуются в линейно поляризованные, но ортогональные исходным ( $x$  поляризованная волна, распространяющаяся в прямом направлении, становится  $y$  волной, распространяющейся в обратном направлении по РМ волоконной линии, и наоборот). Конверсия поляризационных состояний излучения в ортогональные исходным при обратном проходе после отражения приводит к тому, что когерентность волн восстанавливается и фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  между линейно поляризованными волнами, приходящими к поляризатору, оказывается равным нулю для взаимных эффектов и удвоенным для невзаимного эффекта Фарадея.

После обхода оптической схемы в прямом и обратном направлениях, прошедшие через поляризатор волны интерферируют. В зависимости от фазового сдвига  $\Delta\varphi$  между волнами изменяется мощность света, детектируемого фотоприемником. В общем случае зависимость мощности света от фазового сдвига  $\Delta\varphi$  (выходная характеристика интерферометра) может быть представлена в виде:

$$P(\Delta\varphi) = P_0 [1 + K \cos(\Delta\varphi)]. \quad (9)$$

Здесь – интенсивность света на входе,  $K \approx 1$  – видность (контраст) интерференционной картины, а фазовый сдвиг между волнами  $\Delta\varphi$  в случае рас-

propagating through the modulator in the forward and reverse directions, a time delay is introduced by half the period of the modulation control signal. This delay is determined by the time of propagation of light through a long PM fiber line (delay line 5 and connecting line 5a). The waves with orthogonal linear polarizations, passing elements 5 and 5a, are then enter the quarter-wave plate.

Being initially coherent, linearly polarized waves of low-coherent radiation, propagating through a highly anisotropic fiber of the delay line and the connecting line, are depolarized (lose coherence). As a result of the depolarization of low-coherent light over a considerable length of the fiber optic path, the influence of a number of undesirable factors on the accuracy of the interferometer is reduced. The  $\lambda/4$  plate converts these incoherent linearly polarized waves into orthogonal circularly polarized waves, which after passing through a spun-optical fiber (sensitive circuit 8) sensitive to a magnetic field are reflected from the mirror at fiber's end and propagate in the reverse direction. After mirror reflection, the polarization of each wave is converted into an orthogonal one (the left-circular polarization is converted into a right-circular polarization and vice versa). After the reverse passing the  $\lambda/4$  plate, waves are again converted to linearly polarized ones, but orthogonal to the original ( $x$  polarized wave propagating in the forward direction becomes  $y$  polarized wave propagating in the opposite direction along the PM fiber line, and vice versa). Conversion of the polarization states of the radiation to orthogonal to the initial ones during the reverse pass leads to the waves coherence restoration and the phase shift  $\Delta\varphi$  between the linearly polarized waves arriving to the polarizer turns out to be zero for reciprocal effects and doubled for the nonreciprocal Faraday effect.

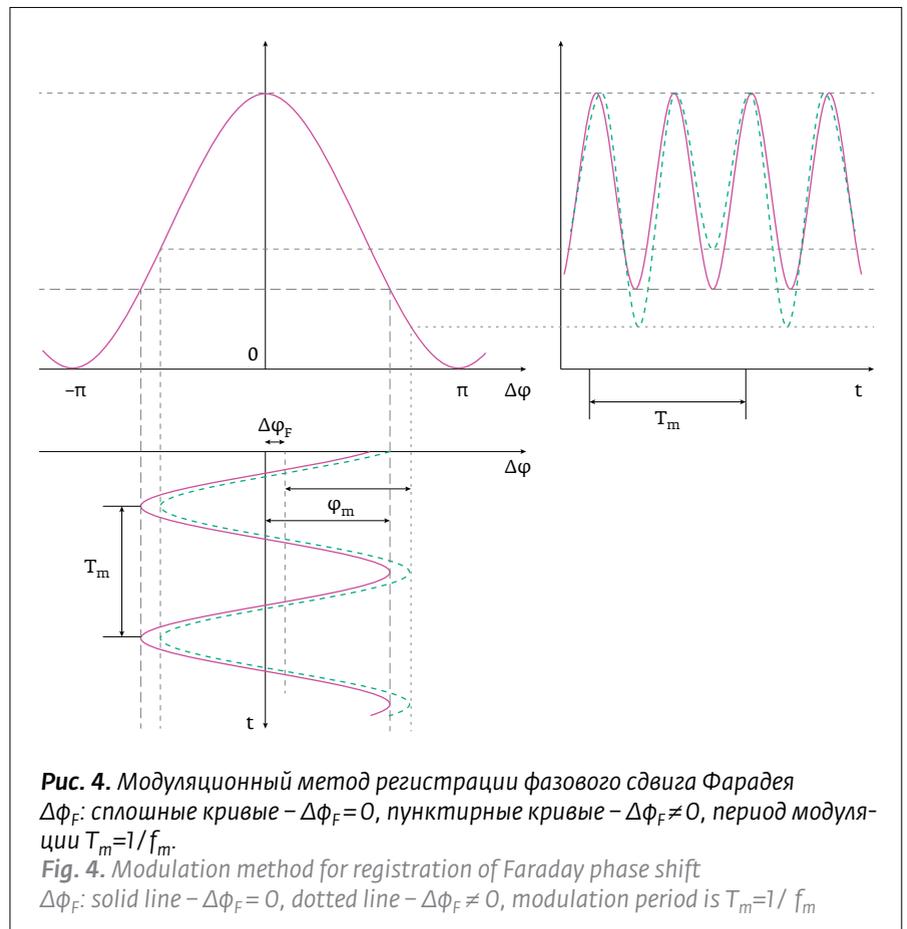
After propagation along the optical scheme in the forward and reverse directions the waves that pass through the polarizer interfere. Depending on the phase shift  $\Delta\varphi$  between the waves, the power of the light detected by the photodetector changes. In the general case, the dependence of the light power on the phase shift  $\Delta\varphi$  (output characteristic of the interferometer) can be represented as:

$$P(\Delta\varphi) = P_0 [1 + K \cos(\Delta\varphi)]. \quad (9)$$

Here  $P_0$  is the light intensity at the input,  $K \approx 1$  is the visibility (contrast) of the interference pattern, and the phase shift  $\Delta\varphi$  between the waves is  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_F + \varphi_m \cos(2\pi f_m t)$ , where  $f_m$  is the modulation frequency,  $\varphi_m$  is the amplitude of the modulation of the phase difference of the waves,  $\Delta\varphi_F = 4VNI$ , where  $V$

смагриваемого интерферометра равен  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_F + \varphi_m \cos(2\pi f_m t)$ , где  $f_m$  – частота модуляции,  $\varphi_m$  – амплитуда модуляции разности фаз волн,  $\Delta\varphi_F = 4VNI$ . Соотношение (9) является основой для вычисления тока модуляционным методом. Оно также используется в безмодуляторных схемах, в которых  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_F + \Delta\varphi_0$ , где  $\Delta\varphi_0$  – начальный фазовый сдвиг выбора рабочей точки.

При наличии гармонической фазовой модуляции выходной сигнал  $P(t)$  (9) интерферометра во времени представляет собой сумму гармоник частоты модуляции (рис. 4). Причем в отсутствии протекающего тока ( $\Delta\varphi_F = 0$ ) в выходном сигнале присутствуют только четные гармоники, с преобладанием второй гармоники (на рисунке функции  $\Delta\varphi(t)$  и  $P(t)$  представлены сплошными линиями). Если же  $\Delta\varphi_F$  не равен нулю, в сигнале появляются также нечетные гармоники, с преобладанием первой гармоники (функции  $\Delta\varphi(t)$  и  $P(t)$  показаны пунктирными линиями). При этом амплитуды гармоник зависят от измеряемого сдвига Фарадея  $\Delta\varphi_F$ . Величина фазового сдвига  $\Delta\varphi_F$  вычисляется из отношения амплитуд гармоник, далее используя (6а), вычисляют измеряемый ток. Данный модуляционный метод обеспечивает высокую точность и независимость от вариаций параметров оптической схемы (мощность источника излучения, амплитуда модуляции) и влияния низкочастотных шумов электроники.



is the Verdet constant,  $N$  – the number of fiber turns in the sensing coil,  $I$  – measured current. Relation (9) is the basis for calculating the current by the modulation method. It is also used in modulation-free schemes where  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_F + \Delta\varphi_0$ , here  $\Delta\varphi_0$  is the initial phase shift of the operating point selection.

If there is harmonic phase modulation, the output signal  $P(t)$  (9) of the interferometer is the sum of harmonics of the modulation frequency (see. Fig. 4). In the absence of flowing current ( $\Delta\varphi_F = 0$ ), only even



Важную роль в достижении высокой точности современных ВОТТ играет применение низкокогерентного источника излучения. Обычно используют суперлюминесцентные источники излучения (волоконные или полупроводниковые) на длине волны 1,55 мкм или 1,3 мкм, с шириной спектральной линии не менее 20 нм. При использовании низкокогерентного излучения резко снижаются нелинейные эффекты в волокне (например эффект Керра), уменьшается нежелательная связь ортогонально поляризованных волн на неоднородностях оптической схемы (в частности, обусловленных деформациями защитной оболочки волокна [10]), снижаются помехи от паразитных отражений в схеме. В рассматриваемой оптической схеме нежелательная связь ортогональных поляризованных рабочих волн и влияние помех из-за паразитных отражений эффективно снижается вследствие деполяризации (потере когерентности) волн при прохождении расстояния, превышающего длину деполяризации  $L_d$ . В случае волоконного суперлюминесцентного источника ( $\lambda=1550$  мкм и  $\Delta\lambda=20$  нм) согласно (8)  $L_d \sim 5$  м для стандартного spun-световода ( $L_b=10$  мм,  $L_s=3$  мм) и  $L_d=L_b(\lambda/\Delta\lambda) \sim 0,3$  м для типового РМ световода ( $L_b=3$  мм).

## 2.2. Другие реализации ВОТТ

Рассмотренная выше отражательная оптическая схема с модуляцией основана на измерении фазового сдвига Фарадея с использованием всей выходной характеристики интерферометра. Такие схемы называют схемой с открытым контуром. Она имеет точность, достаточную для учета потребляемой электроэнергии (класс точности 0,2 s). Вместе с тем, схема требует повышенного внимания к линейности выходной характеристики, а ее динамический диапазон сверху ограничен фазовыми сдвигами  $\pm\pi/2$  вследствие периодичности характеристики. Для повышения линейности и расширения диапазона необходимо применять более сложные алгоритмы обработки сигнала.

Наиболее высокую точность и широкий динамический диапазон обеспечивают компенсационные схемы, в которых производится зануление фарадеевского фазового сдвига с помощью дополнительного чувствительного контура, включенного последовательно с измерительным контуром. В дополнительном контуре создается магнитное поле от компенсирующего тока, который вырабатывается в электронном блоке и является выходом ВОТТ. Компенсационные схемы называют схемами с закрытым контуром.

Возможны также безмодуляторные отражательные схемы ВОТТ с использованием фарадеевского

harmonics are present in the output signal, with the predominance of the second harmonic (in the figure, the functions  $\Delta\varphi(t)$  and  $P(t)$  are represented by solid lines). If  $\Delta\varphi_F$  is not equal to zero, odd harmonics also appear in the signal, with the predominance of the first harmonic (the functions  $\Delta\varphi(t)$  and  $P(t)$  are shown by dotted lines). In this case, the amplitudes of the harmonics depend on the measured Faraday shift  $\Delta\varphi_F$ . The magnitude of the phase shift  $\Delta\varphi_F$  is calculated from the ratio of the amplitudes of the harmonics, then the current can be calculated using (6a). This modulation method provides high accuracy and independence to the variations of optical elements parameters (power of the radiation source, modulation amplitude) and the influence of low-frequency noise of electronics.

An important role in achieving the high accuracy of modern FOCT is played by the usage of a low-coherent radiation source. Usually, superluminescent optical radiation sources (fiber or semiconductor) are used at a wavelength of 1.55 microns or 1.3 microns, with a spectral width of at least 20 nm. When using low-coherent radiation, nonlinear effects in the fiber (e.g., the Kerr effect) are significantly reduced, the unwanted coupling of orthogonally polarized waves on the fiber inhomogeneities (in particular, due to the deformations of the fiber coating [10]) is reduced, and interference from parasitic reflections in the scheme is reduced due to the depolarization (loss of coherence) of the waves when the distance exceeds the depolarization length  $L_d$ . In the case of a fiber superluminescent source ( $\lambda=1550$  nm and  $\Delta\lambda=20$  nm) according to (8)  $L_d \sim 5$  m for a standard spun fiber ( $L_b=10$  mm,  $L_s=3$  mm) and  $L_d=L_b(\lambda/\Delta\lambda) \sim 0,3$  m for a typical PM fiber ( $L_b=3$  mm).

## 2.2. Other FOCT applications

The optical scheme of reflective interferometer with modulation considered above is based on measuring the Faraday phase shift using the entire output characteristic of the interferometer. Such scheme are referred to as the open-loop scheme. They possess an accuracy sufficient for metering of electricity consumption (accuracy class of 0,2s). At the same time, the scheme requires increased attention to the linearity of the output characteristic, and its dynamic range from above is limited by phase shifts  $\pm\pi/2$  due to the periodicity of the characteristic. To increase linearity and expand the range, it is necessary to apply more sophisticated signal processing algorithms.

The highest accuracy and wide dynamic range are provided by compensation schemes, where the Faraday phase shift is zeroed using an additional sensitive coil connected in series with the measuring circuit.



ротатора для формирования рабочей точки в середине характеристики интерферометра  $P(\Delta\varphi)$ . Ротатор может быть как дискретный (алюминиево-иттриевый гранат), так и волоконный (на spun-световоде). Такие схемы менее точные в сравнении с модуляторными, однако они являются более широкополосными.

Наиболее простой является однопроходная схема ВОТТ, не требующая ротатора. В этой схеме реализуется прямое измерение поворота плоскости поляризации света в магниточувствительном световоде, расположенном между двумя поляризаторами. Недостатком схемы является относительно низкая точность, которая однако достаточна для применений защиты энергетического оборудования (высоковольтных линий) при коротких замыканиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВОТТ на магнитооптическом эффекте Фарадея в оптическом световоде представляет собой новое высокоточное устройство для измерения как постоянного, так и переменного электрического тока. Измеряемые токи находятся в диапазоне от единиц ампер до сотен килоампер. Основными областями применения ВОТТ (как в России, так и за рубежом) в настоящее

In the additional coil, a magnetic field is created by the compensating current, which is produced in the electronic unit and is the output of FOCT. Compensation schemes are referred to as the closed-loop schemes.

The non-modulator FOCT reflection schemes are also possible using the Faraday rotator to form a operation point in the middle of the characteristic of the interferometer  $P(\Delta\varphi)$ . The rotator can be either discrete (yttrium aluminum garnet) or fiber (on a spun fiber). Such schemes are less accurate than the modulator schemes, but they are more broadband.

The simplest scheme is the one-pass FOCT scheme which does not require a rotator. In this scheme, a direct measurement of the rotation of the plane of polarization of light in a magnetically sensitive optical fiber located between two polarizers is implemented. The disadvantage of the scheme is a relatively low accuracy, which is however sufficient for the protection of power equipment (high voltage lines).

## CONCLUSION

FOCTs based on the magneto-optical Faraday effect in an optical fiber are a new high-precision device for

## II РОССИЙСКО-КИТАЙСКИЙ ФОРУМ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ИННОВАЦИЙ

В рамках выставки China Machinery Fair 2018 30.10–01.11.2018 в ЦВК "Экспоцентр", Москва прошел Российско-китайский форум Машиностроения и Инноваций. 30 октября Русско-Азиатский Союз промышленников и предпринимателей организовал Пленарное заседание форума на тему "Новые векторы промышленного сотрудничества России и Китая". Звучали доклады-предложения с российской стороны о благоприятном инвестиционном климате в России, о налоговых и кредитных льготах для китайских инвесторов в случае принятия решения о локализации их производства в России, о перспективах российско-китайского трансфера технологий.

Со стороны китайских представителей были показаны успехи китайских компаний машиностроительной отрасли. Су Цзымэн, Председатель Китайской ассоциации строительного машиностроения (ССМА), в своем докладе информировал об очень впечатляющих цифрах: из 50 ведущих мировых компаний в области машиностроения 15 компаний принадлежат Китаю, а компания Huzhou Construction Machinery Group занимает 6 место среди лидеров отрасли.

Син Минь, Генеральный секретарь Ассоциации производителей двигателей внутреннего сгорания Китая Association (CICEIA) рассказал об изменении схемы отрасли, в которой сделан упор на крупный транспорт (трактора, катки, подъемные краны), поделился опытом успешного сотрудничества с КАМАЗом. Сказал, что в Ассоциации считают создание транспортных средств локомотивом развития экономики страны, имеющим большой экспортный потенциал, так как транспорт нужен и на дорогах, и в условиях бездорожья. Он прогнозирует, что к 2030 году 60% всех производимых двигателей внутреннего сгорания будут приходиться на сельскохозяйственные машины.

Китайские представители довольно откровенно говорили о том, что в лице российских представителей они ищут партнеров, обладающих достаточными ресурсами и известными брендами, для освоения рынков третьих стран. А на этих рынках вперед прорываются машины строительной техники и машины для сельского хозяйства.

Чужеродными на фоне этих выступлений выглядели приглашенные доклады представителей из высокотехнологических отраслей – фотоники

и радиоэлектроники. Президент Лазерной ассоциации Иван Борисович Ковш сделал отличный доклад об использовании лазерных технологий в промышленности и о совместной работе с Лазерной ассоциацией провинции Хубей. Михаил Фельдман из ЦНИИ "Электроника" лаконично представил аналитический обзор современного уровня развития радиоэлектронной промышленности в России и результаты рейтинга ведущих предприятий этой отрасли.

Однако, если говорить честно, аудитория была не подготовлена к принятию этой информации. Даже учитывая, что в Европе в большинстве промышленных операций сварки, наплавки и резки металла используется лазерное излучение, а вся начинка современного транспорта напичкана электронными компонентами, эти области остались за пределами интересов и присутствующих российских организаторов промышленности, и китайских участников форума. Вопрос составления повестки пленарного заседания и приглашения заинтересованных лиц, является функцией организаторов, и он явно не был решен до конца.

*Н. Истомина, АО "РИЦ "ТЕХНОСФЕРА"*



время является высоковольтная электроэнергетика (110–750 кВ) и цветная металлургия (контроль технологического процесса получения цветных металлов).

Чувствительным элементом ВОТТ является волоконный контур, охватывающий шину с током, а измерение тока сводится к измерению индуцируемого магнитным полем тока фазового сдвига Фарадея между ортогональными циркулярно поляризованными световыми волнами. Для регистрации фазового сдвига Фарадея, как правило, используется линейный интерферометр Саньяка (отражательный интерферометр) и модуляционный метод.

Высокая точность измерений современных ВОТТ достигается выполнением ряда специальных требований. В частности, обязательным условием является замкнутый волоконный контур, что в соответствии с фундаментальным физическим законом – теоремой о циркуляции вектора напряженности магнитного поля обеспечивает отсутствие влияния внешних токовых шин и формы чувствительного контура на результат измерения. Использование низкокогерентного излучения позволяет минимизировать паразитные эффекты, приводящие к появлению дополнительного сигнала, не отличимого от полезного. Важную роль при этом играет депolarизация низкокогерентного излучения в оптическом тракте. Отмеченные подходы позволяют реализовать ВОТТ с наивысшими для практического применения классами точности (0.2s, 0.1), что в совокупности с практическими преимуществами (безопасность эксплуатации, меньшие затраты на монтаж и обслуживание, и т. д.) делает данный прибор реальной альтернативой традиционным трансформаторам тока.

measuring both direct and alternating electric current. Measured current range is from amperes to hundreds of kiloamperes. Currently, the main areas of FOCT application (both in Russia and abroad) are high-voltage electric power industry (110–750 kV) and non-ferrous metallurgy (control of the technological process for producing non-ferrous metals).

The FOCT sensing element is a fiber coil enclosing a bus with current, and measuring the current is reduced to measuring the Faraday phase shift between orthogonal circularly polarized light waves induced by the magnetic field. Usually, a linear Sagnac interferometer (reflective interferometer) with a modulation detection method are used to register the Faraday phase shift.

High accuracy of measurements of modern FOCT is achieved by fulfilling a number of special requirements. In particular, the necessary condition is a closed fiber loop, which, in accordance with the fundamental physical law, the theorem on the circulation of the magnetic field strength vector, ensures that external current bus and the shape of the sensitive loop do not affect the measurement result. The use of low-coherent radiation allows to minimize the parasitic effects leading to the appearance of an additional signal indistinguishable from the useful one. An important role is played by the depolarization of low-coherence radiation in the optical path. The noted approaches allow implementing FOCT with the highest accuracy classes (0.2s, 0.1) for practical use, which together with practical advantages (safety of operation, less installation and maintenance costs, etc.) makes this device a real alternative to traditional current transformers.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гречухин В. Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем. Вестник ИГЭУ. 2006; 4:1–9.  
**Grechuhin V. N.** Elektronnyye transformatory toka i napryazheniya. Sostoyaniye, perspektivy razvitiya i vnedreniya na ORU 110–750 kV stancij i podstancij energosistem. Vestnik IGEU. 2006; 4:1–9.
2. **Laming R. I., Payne D. N.** Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers. Journal of Lightwave Technology. 1989; 7(12): 2084–2094.
3. **Blake J., Tantaswadi P., R. T. De Carvalho.** In-line Sagnac interferometer current sensor. IEEE Transaction on Power Delivery. 1996; 11(1): 116–121.
4. **Губин В. П., Исаев В. А., Моршнева С. К., Сазонов А. И., Старостин Н. И., Чаморовский Ю. К., Усов А. И.** Использование волоконных световодов типа Spun в датчиках тока. Квантовая электроника. 2006; 36(3): 287–291.  
**Gubin V. P., Isaev V. A., Morshnev S. K., Sazonov A. I., Starostin N. I., Chamarovskij Yu. K., Usov A. I.** Ispol'zovanie volokonnyh svetovodov tipa Spun v datchikah toka. Kvantovaya elektronika. 2006; 36(3): 287–291.
5. **Bohnert K., Gabus P., Kostovic J., Brändle H.** Optical fiber sensors for the electric power industry. Optics and Laser in Engineering. 2005; 43: 511–526.
6. **Starostin N. I., Ryabko M. V., Chamarovskij Yu. K., Gubin V. P., Sazonov A. I., Morshnev S. K., Korotkov N. M.** Interferometric Fiber-Optic Electric Current Sensor for Industrial Application. Key Engineering Materials. 2010; 437: 314–318.
7. **Пржиялковский Я. В., Моршнева С. К., Старостин Н. И., Губин В. П.** Распространение широкополосного оптического излучения в spun-волокне с высоким двулучепреломлением. Квантовая электроника. 2013; 43(2):167–173.  
**Przhiyalkovskij Ya. V., Morshnev S. K., Starostin N. I., Gubin V. P.** Rasprostraneniye shirokopolosnogo opticheskogo izlucheniya v spun-voлокне s vysokim dvulucheprelomleniem. Kvantovaya elektronika. 2013; 43(2):167–173.

8. Моршнеv С. К., Чаморовский Ю. К., Воробьев И. Л. Фазовая задержка поляризационных мод в упруго закрученных spun-волокнах. Квантовая электроника. 2011; т. 41(5), с. 469–474.  
Morshnev S. K., Chamorovskij Yu. K., Vorob'ev I. L. Fazovaya zaderzhka polarizacionnyh mod v uprugozakruchennyh spun-voloknah. Kvantovaya elektronika. 2011; 41(5): 469–474.
9. Frosio G., Dändliker R. Reciprocal reflection interferometer for a fiber optic faraday current sensor. Appl. Opt. 1994; 33(25): 6111–6122.
10. Моршнеv С. К., Губин В. П., Старостин Н. И., Пржиялковский Я. В., Сазонов А. И. Влияние защитного покрытия на случайные вариации двухлучепреломления в анизотропных оптических волокнах при изменении их температуры. Квантовая электроника. 2016; 46(10): 911–918.  
Morshnev S. K., Gubin V. P., Starostin N. I., Przhialkovskij Ya. V., Sazonov A. I. Vliyaniye zashchitnogo pokrytiya na sluchajnyye variacii dvulucheprelomleniya v anizotropnyh opticheskikh voloknah pri izmenenii ih temperatury. Kvantovaya elektronika. 2016; 46(10): 911–918.

## FLAMN-19 "ОСНОВЫ ЛАЗЕРНЫХ $\mu$ - И НАНОТЕХНОЛОГИЙ"

30 июня – 4 июля 2019 года в Санкт-Петербурге пройдет международный симпозиум FLAMN-19. Уже ставшая традиционной встреча специалистов-лазерщиков на этот раз посвящается 50-летию Всесоюзной конференции по взаимодействию оптического излучения с веществом. Мероприятие охватывает направления, определенные ранее конференциями LAMN (лазерные микро- и нанотехнологии) и LMI (лазерное взаимодействие), которые были организованы в Ленинграде (СССР) в середине 60-х годов прошлого века. Также прибавилась быстро растущая область

исследований, разработок и производства – "Laser  $\mu$ -Технологии". На симпозиуме будет рассмотрен широкий спектр тем в лазерной  $\mu$ -п обработке: от физических основ различных процессов и их экспериментальных исследований к разработке и реализации промышленного оборудования.

FLAMN-19 будет включать в себя два основных раздела: "Лазерные микро- и нанотехнологии" и "Взаимодействие с лазером"; и специальные научные мероприятия:

- конференция "Интенсивные лазерные действия в биологии и медицине",

- конференция молодых ученых, инженеров и студентов "Интенсивные лазерные действия и приложения",
- конференция "Фотофизика наномасштабных систем",
- конференция "Фемтосекундное взаимодействие и технологии лазерного взаимодействия",
- семинар "Микроструктурирование поверхности лазера",
- семинар "Промышленные волоконные лазерные приложения".

Г. Одицова, <https://flamn.ifmo.ru>



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 2800 руб.

### Справочник по лазерной сварке

Редактор оригинального издания С. Катаяма

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 704 с. + 32 с. цв. вклейки ISBN 978-5-94836-420-9

Среди технологий, предназначенных для обработки материалов лазером, особо выделяется лазерная сварка, включившая в себя последние достижения в разработке лазерных устройств. Для ее правильного применения и использования требуется ясное понимание физических механизмов и явлений, сопровождающих лазерную сварку. Поэтому в книге рассмотрены разнообразные лазерные или гибридные процессы сварки, сварка различных видов материалов, приведено описание металлургических, химических и механических аспектов сварки. Справочник разделен на четыре части. В разделе I рассмотрены базовые принципы физических процессов сварки и раскрыты причины появления дефектов. Раздел II посвящен конкретным технологиям, рассмотрена лазерная сварка различных

материалов. В разделе III представлены методы численного моделирования процесса лазерной сварки, описана процедура калибровки инструментов в роботизированной сварке. В разделе IV рассмотрены конкретные значения рабочих параметров и условий сварки в промышленных применениях. Книга адресована студентам, инженерам, ученым, преподавателям и станет важной и полезной для всех, кто интересуется лазерной сваркой – от новичков до специалистов и экспертов.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: [knigi@technosphere.ru](mailto:knigi@technosphere.ru); [sales@technosphere.ru](mailto:sales@technosphere.ru)