

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТОКА

Старикова Н.С.¹, Григорьев М.Г.¹

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: Mishatpu@mail.ru

Прецизионные методы и приборы для измерения силы тока являются одними из основных направлений развития современной техники в области эффективного энергопотребления. Однако на данном этапе развития не существует мало габаритных инструментов, позволяющих проводить измерение силы тока с прецизионной точностью и без разрыва цепи. В данном исследовании рассмотрен эффект Фарадея и предложена общая конструкция простого волоконно-оптического датчика тока (ВОДТ). Представлена установка, разрабатываемая в лаборатории №63 Института Неразрушающего Контроля Национального Исследовательского Томского Политехнического Университета, её функциональная схема и основные характеристики. Произведены необходимые измерения и проведен анализ погрешности. Исследование показало, что измерение силы тока с помощью ВОДТ является точным, что подтверждает эффективность предлагаемой методики.

Ключевые слова: эффект Фарадея; плоскость поляризации; постоянная Верде.

FIBER OPTIC CURRENT SENSOR

Starikova N.S.¹, Grigoriev M.G.¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Avenue,30), e-mail: Mishatpu@mail.ru

Current measuring high-precision methods and devices are one of the most important modern engineering development lines in optimal energy consumption sphere. However, there are a few small-sized instruments which allow conducting precision measurements without breaking the circuit. This paper presents information about conducted Faraday Effect research and general construction of the simple fiber optic current sensor (FOCS). Researched sensor conception is used in prototype which is developing by team of laboratory number 63 of National Research Tomsk Polytechnic University Nondestructive Testing Institute. Required tests and accuracy analysis were conducted. Research results confirm that fiber optic current sensors provide high-precision measurement and proposed methodic is effective.

Keywords: effect of Faraday; the plane of polarization; the Verde constant.

Ресурсоэффективное энергопотребление это одно из основных путей развития современных технологий. Актуальность данного направления деятельности вызывает огромный интерес к прецизионным способам и приборам по измерению основных характеристик транспортирующих, генерирующих, распределяющих и электрических устройств. Величина электрического тока, протекающего через токопроводящие элементы устройства, является одним из этих параметров

Весомым недостатком, используемых в современных системах измерения тока, является характеристика первичного преобразователя — высоковольтного трансформатора тока. Он требует трудоемкого и регулярного обслуживания, его погрешность напрямую зависит от режима нагрузки и она имеет свойство накапливаться. А также для анализирования сигнала с первичного преобразователя используется электросчетчик, на показания которого сильно влияет качество электроэнергии. В роли замены первичного преобразователя, можно рассматривать распространившиеся датчики, основанные на

эффекте Холла, которые позволяют измерять постоянный ток, а также имеют на много более высокую точность, нежели трансформаторы тока. Но в целом, общим недостатком трансформаторов и датчиков, основанных на эффекте Холла, является присутствие эффекта насыщения, что сильно ограничивает диапазон измеряемых токов.

Эффект Фарадея

Волоконно-оптические датчики тока проектируются на основе эффекта Фарадея. Магнитооптический эффект, в результате которого в процессе распространения линейно поляризованного света, находящегося в магнитном поле, через оптически неактивное вещество, наблюдается изменение угла плоскости поляризации света называется эффект Фарадея (рис. 1).

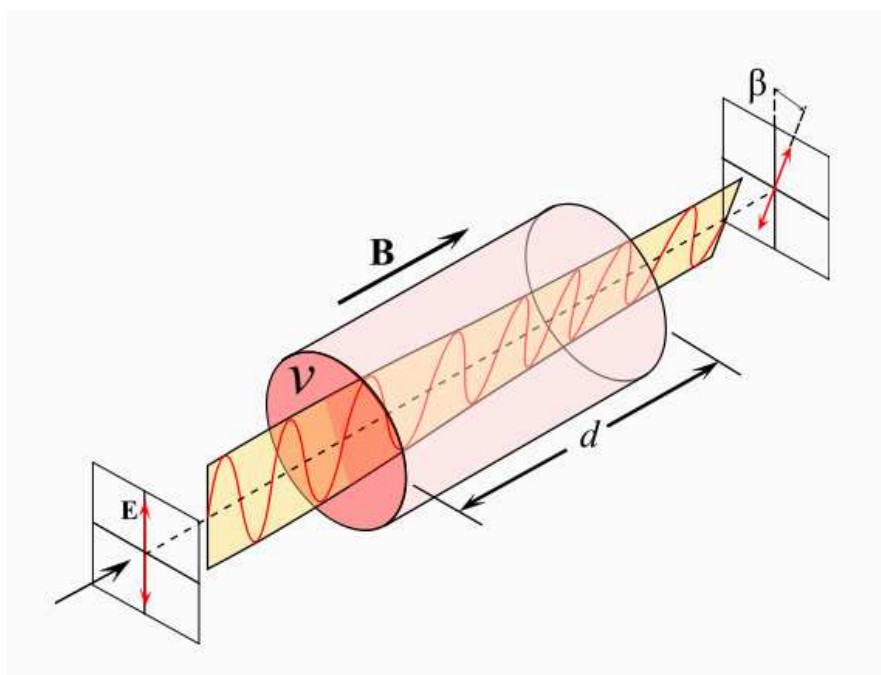


Рис. 1. Изменение угла плоскости поляризации света

Эффект Фарадея применяется в волоконно-оптических датчиках тока [3], поскольку существует огромное кол-во стекол, зеркал и оптических волокон, в которых эффект достаточно хорошо проявляется [4]. Эти оптические составляющие имеют высокую постоянную Верде (физическая величина, характеризующая магнитное вращение плоскости поляризации в веществе) [1, 2], которая связывает угол поворота плоскости линейно поляризованного света $\Delta\Phi$, прошедшего через оптический контур и значение интеграла напряженности магнитного поля H , взятого по всей длине оптического контура L , :

$$\Delta\Phi = V \int_0^L H \cdot dl$$

Этот угол $\Delta\Phi$ также равен невязимному сдвигу по фазе циркулярно поляризованной волны, проходящей через оптоволоконный контур. Для право циркулярной волны $\Delta\Phi$ положителен, для лево циркулярной - отрицателен.

Конструкция ВОДТ

Одним из простых вариантов ВОДТ на основе эффекте Фарадея является поляриметрический датчик представленный на рисунке 2. В нем сила тока, в проводящем элементе, ставится в соответствие с углом поворота плоскости поляризации света, который прошел замкнутый контур, сквозь который пущен токоведущий элемент.

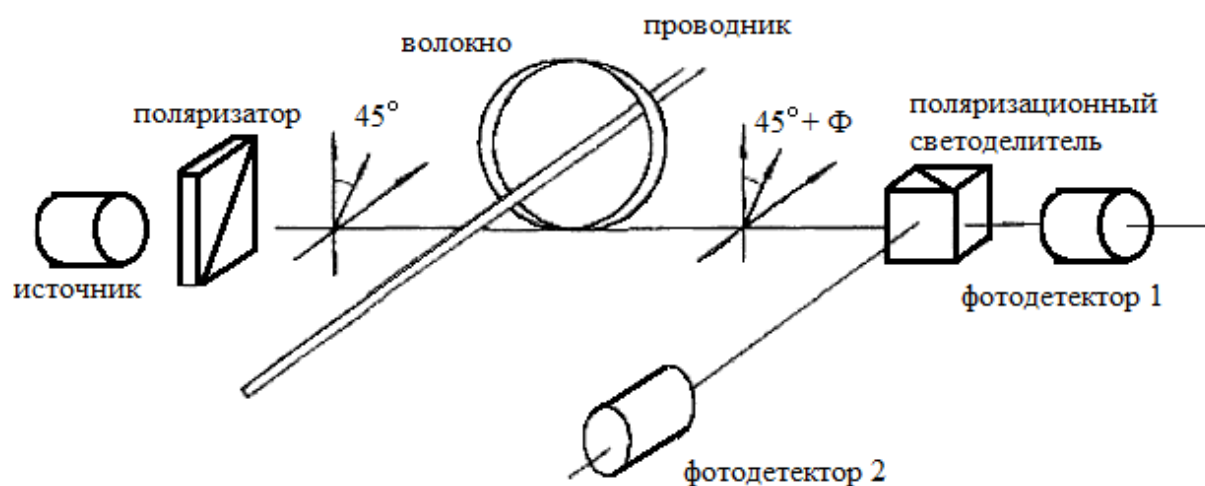


Рис. 2. Конструкция поляриметрического ВОДТ

Линейно-поляризованная волна из источника пройдя через поляризатор направляется в оптоволоконно, которое обернуто вокруг проводника, в котором течет ток. В роли чувствительного элемента было использовано стандартное одномодовое оптоволоконно сверхвысокого качества. Количество оборотов оптоволоконна вокруг проводящей жилы зависит от диапазона измеряемых токов. В моменты прохода плоскости поляризации волны по контуру, она изменяется на угол $\Delta\Phi$, который является следствием, образующегося магнитным полем, циркулярного двулучепреломления. Линейная поляризация при этом рассматривается как результат некоторой суперпозиции волн с поляризацией с противоположным крутящим моментом. Затем, волна раскладывается с помощью поляризационного светоделителя, повернутого на 45° относительно входного поляризатора, на две ортогональные поляризации. Каждая из которых направляется на соответствующий фотодетектор. Таким образом, измеренные интенсивности света Int_1 и Int_2 при довольно малых потерях в данной системе зависят от угла $\Delta\Phi$:

$$Int_1 = Int_0 \cos^2(45^\circ + \Delta\Phi)$$

$$Int_2 = Int_0 \sin^2(45^\circ + \Delta\Phi)$$

где Int_0 - интенсивность входного света.

Поскольку волоконный контур в замкнутом состоянии, угол $\Delta\Phi$ равен:

$$\Delta\Phi = VNI$$

Это уравнение соответствует одномодовому оптическому волокну в приближении, когда постоянные Верде сердечника и оболочки не очень отличаются, иначе угол $\Delta\Phi$ определяется зависимо от этих постоянных, а также от показателей преломления центральной части и оболочки оптоволокна [5].

Создание лабораторной установки для ВОДТ

Для тестирования разработанного образца ВОДТ нужно создать аппарат, симулирующий в лабораторных условиях перемещение по токопроводящей жиле высокой силы тока и косвенно измерить ее. Также необходимо разработать аппаратный комплекс по изучению продольного электрооптического эффекта Фарадея [6]. Было решено создать установку с расчетом на возможность проверки в ней источника магнитного поля независимым способом.

Схема установки показана на рисунке 3.

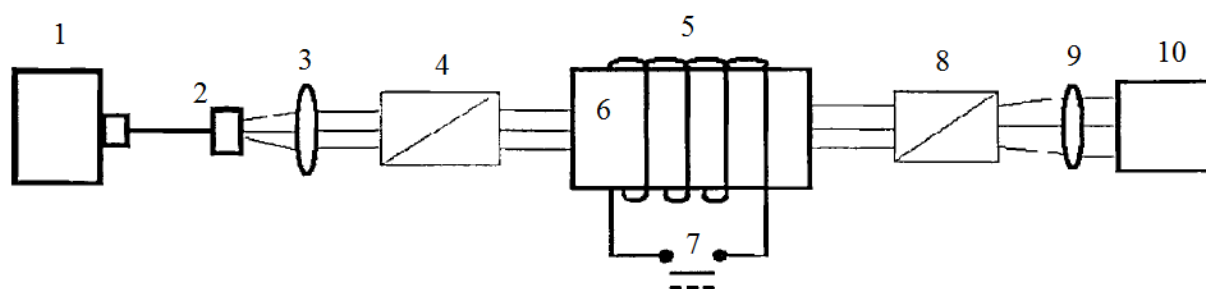


Рис. 3. Принципиальная схема комплекса

Источником излучения является гелий – неоновый лазер 1, свет которого имеет длину волны равную 635 нм. Это излучение входит в патч корд 2, на конце которого располагается коллиматор 3. Затем, практически параллельные пучки света попадают на поляризатор 4, который пропускает только одну форму поляризации. После этого свет проходит сквозь исследуемое стекло 6, находящееся в магнитном поле. Поле практически однородно и направлено вдоль распространения света. Катушка с током 5 является источником магнитного поля. Источник постоянного напряжения 7 обеспечивает ток в катушке. Затем излучение проходит сквозь анализатор 8, расположенный во вращающейся раме со шкалой углов, далее через коллиматор 9 и затем регистрируется фотоприемником 10.

Измерение постоянной Верде проводится следующим образом. Разрабатываются два режима процесса работы установки: без тока (режим 1) и с током (режим 2). Интенсивность света, пропущенного через оба поляризатора, по закону Малюса, напрямую зависит от угла α (угол между осями пропускания поляризаторов друг относительно друга):

$$I_{nt} = \frac{1}{2} I_{nt0} \cos^2 \alpha$$

Это равенство справедливо при первом режиме. Во втором режиме магнитное поле создает дополнительный сдвиг поляризованного излучения на $\Delta\alpha$. В этом режиме равенство выглядит так:

$$Int = \frac{1}{2} Int_0 \cos^2(\alpha + \Delta\alpha)$$

С помощью экспериментальной установки проводится измерение интенсивности света Int в зависимости от углов между осями двух поляризаторов в разных режимах (ток отсутствует, ток пущен). На основе измеренных значений, построим две кривые и аппроксимируем их функциями вида $\psi = const \cdot \cos^2(\alpha + k_1)$ (для режима 1) и $\psi = const \cdot \cos^2(\alpha + k_2)$ (для режима 2).

Промежуток между кривыми по X координате (ось углов) и есть $\Delta\alpha$, этот угол, на который изменяется плоскость поляризации во время воздействия магнитного поля, определяется как разность между коэффициентами k_1 , и k_2

Постоянная Верде находится по формуле:

$$B = \mu_0 \frac{I \cdot N}{L_{кат}}$$

где I – ток в катушке

$N = 4000$ – кол-во витков в катушке

$L_{кат} = 8$ см – толщина стекла

В установке используется ток силой 1,5 Ампера, поддерживаемый с помощью прецизионного мультиметра Rigol DM3051 с погрешностью (0.01% + 0.7 мА) для используемого диапазона. Вычислен модуль индукции магнитного поля в Теслах и получена напряженность магнитного поля в Эрстедах:

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1.5 \cdot 4000}{0.08} \approx 0.0942 \text{ Тл}$$

На основании экспериментальных данных, произведен расчет и усреднение величины угла поворота плоскости поляризации, полученные точки и аппроксимирующие кривые показаны на рисунке 4:

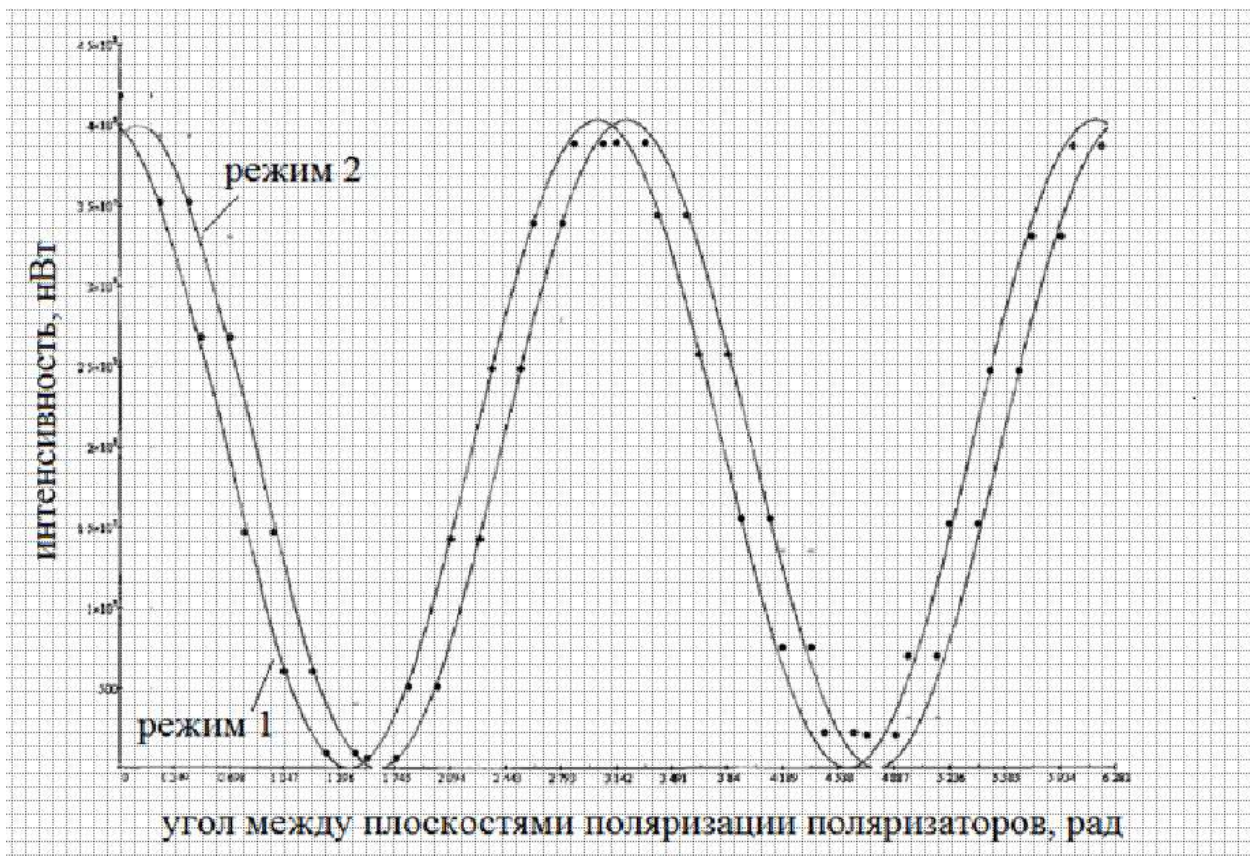


Рис. 4. Аппроксимирующие кривые в 2-ух режимах

По рисунку видно что $\Delta\alpha = 0.18 \text{ рад} = 10.313^\circ$.

Постоянная Верде V находится следующим образом:

$$V = \frac{\Delta\varphi \cdot 60}{H \cdot L_{\text{КАТ}}} = \frac{10,313 \cdot 60}{942 \cdot 8} = 0,082 \frac{\text{мин}}{\text{Э} \cdot \text{см}}$$

Известно, что постоянная Верде для используемого магнитоактивного стекла равна $0,0819 \frac{\text{мин}}{\text{Э} \cdot \text{см}}$, а это свидетельствует о правильном расчете параметров предложенной установки, и позволяет использовать ее для симуляции высоких токов при испытаниях ВОДТ.

Результаты

Для получения угла $\Delta\Phi$, при этом независимо от интенсивности Int_0 , в процессе которой нет стабильности во времени, выходной сигнал S высчитывается как зависимость:

$$S = \frac{Int_1 - Int_2}{Int_1 + Int_2} = \sin(2 \cdot \Delta\Phi)$$

В результате измерения, ток, создаваемый в установке, пошагово изменялся в доступном для источника питания диапазоне, а данные с макета измерителя тока и

амперметра ($\pm 0,01\% \pm 7$ е.м.р) записывалась на компьютер с частотой 2500 Гц. Результаты испытания макета измерителя тока представлены на рис. 5.



Рис. 5. Результаты испытания макета измерителя тока

На представленном графике видна лишь одна прямая, ввиду наложения кривых с макета и амперметра. Для приблизительной оценки погрешности макета рассматриваются отсчеты, в которых сила тока была постоянна, и по ним видно, что в исследуемом диапазоне (от -1.2 кА до +1.2 кА) абсолютная погрешность не превышает 2 А, а относительная погрешность меньше 0.1%.

В результате, представленный макет позволяет показать работу измерителя, созданного по предложенной конструкции на основе созданных и исследованных составляющих частей, а предложенный метод помогает минимизировать некоторое влияние магнитных полей на проведенные измерения.

Список литературы

1. Валиев У.В., Лукина М.М., Саидов К.С. О природе эффекта Фарадея в редкоземельном ортоалюминате $TbAlO_3$ // Физика твердого тела. – 1999. – №11. – С. 2047 – 2052.
2. Козлов С.Н., Зотеев А.В. Колебания и волны. Волновая оптика.: учебное пособие. М.: КноРус, 2006. – 212 с.
3. Мешковский И.К., Старостин Н.М. Волоконно-оптические датчики тока // Электронные компоненты. – 2006. – №11. – С. 76 – 77.

4. Некрашевич Е., Стригалева В.Е., Тараканов С.А. Закрытая схема обработки сигнала в волоконно-оптическом датчике тока // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2014. – №65. – С. 10 – 15.
5. Соколов А., Яцеев В., Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // Lightwave. Russian Edition. – 2006. – № 4. – С. 44 - 46.
6. Р.В.Баженов, Электроника.- Ростов-на-Дону: Феникс, 2007.-187с.

Рецензенты:

Агафонников В.Ф., д.т.н., профессор кафедры конструирования узлов и деталей РЭС Томского университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск;

Ким В.Л., д.т.н., профессор кафедры вычислительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.