

Т.М. Левина, Н.Н. Лунева

(филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета
в г. Салавате; e-mail: tattin76@mail.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКРО-, ВЗРЫВОБЕЗОПАСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Приведён обзор искро-, взрывобезопасных устройств, основанных на магнитооптическом эффекте Фарадея. Разработана математическая модель искро-, взрывобезопасного преобразователя магнитного поля.

Ключевые слова: искро-, взрывобезопасные устройства, магнитооптика, эффект Фарадея, математическая модель.

T.M. Levina, N.N. Luneva

APPLICATION OF SPARK, EXPLOSION-PROOF CONVERTERS OF MAGNETIC FIELD

An overview of spark, explosion-proof devices based on magneto-optical Faraday effect. A mathematical model of spark, explosion-proof converter of magnetic field was developed.

Key words: spark, explosion-proof devices, magneto-optical, Faraday effect, mathematical model.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 12 февраля 2015 г.

Решение проблемы обеспечения техносферной безопасности за счет контроля и диагностики износа (старения) оборудования промышленных предприятий неразрывно связано с применением современных устройств, отвечающих требованиям искро-, взрывобезопасности и работоспособности в сложных производственных условиях. Современные искро-, взрывобезопасные устройства должны определять техническое состояние высоковольтного оборудования, предупреждать аварии, повышать эффективность внеплановых и уменьшать число необоснованных планово-предупредительных ремонтов оборудования, а также оценивать остаточный ресурс, в первую очередь, того высоковольтного оборудования, которое отработало свой нормативный срок.

Искро-, взрывобезопасные устройства *на основе волоконной оптики* позволяют решать эти задачи.

Качество искро-, взрывобезопасных устройств зависит от характеристик его компонентов и, в первую очередь, от характеристик чувствительных элементов устройства.

При этом также очень важны такие характеристики, как точность, быстродействие, малые габариты, надежность, чувствительность и другие.

В общем комплексе оборудования промышленных предприятий немалую долю (40-60 %) занимает высоковольтное оборудование, для контроля и диагностики износа (старения) которого в последние годы широкое развитие получили *искро-, взрывобезопасные преобразователи магнитного поля (ИВПМП)* в силу ряда присущих им достоинств: высокое быстродействие (10^{-9} с),

точность (погрешность до 0,1 %), надежность и т.д. Особое место среди них занимают ИВПМП, основанные на магнитооптическом эффекте Фарадея в оптическом волокне, так как их применение, взамен магнитных преобразователей на эффекте Холла, позволяет резко уменьшить габариты и массу преобразователей в десятки раз.

Вопросам теории, расчёта и конструирования ИВПМП посвящены труды отечественных и зарубежных учёных [1-3]. Однако в этих работах не в полной мере отражены исследования, включающие принципы построения, математическое моделирование, основные характеристики для ИВПМП.

Эти исследования особенно необходимы для создания ИВПМП с улучшенными характеристиками (высокая точность, быстродействие, чувствительность).

При определении магнитной величины, наряду с величинами, характеризующими магнитное поле, приходится измерять и магнитный момент (для характеристики постоянных магнитов), мощность, расходуемую при намагничивании материала и др. Поэтому необходимо провести анализ методов и средств измерений применительно к определенным магнитным характеристикам.

В результате проведенного анализа научно-технической и патентной литературы для построения ИВПМП можно сделать вывод, что в основном область магнитных измерений базируется на трех эталонах – магнитного потока, магнитной индукции, напряжённости и магнитного момента.

Для систематизации ИВПМП как магнитоизмерительных приборов, выработки критериев оценки метрологических и эксплуатационных характеристик используются различные квалификационные признаки. Во многих источниках приводится классификация магнитоизмерительных приборов по назначению, условиям эксплуатации, способу выполняемых измерений, функциональной связи выходного сигнала с измеряемой величиной, степени информативности (скалярная, векторная и тензорная величины).

Наиболее распространённой следует считать классификацию по принципу использования в преобразователях того или иного физического явления. Такое деление, свидетельствует о разносторонней природе магнетизма, одновременно позволяет провести более четкую оценку точностных показателей конкретного вида преобразования, показать возможности его использования в различных магнитоизмерительных устройствах и системах. В соответствии с данной классификацией различают преобразователи, приведенные в табл. 1.

Из приведённой классификации наибольший интерес представляют магнитооптические преобразователи, принцип работы которых применяется в ИВПМП [4].

Принцип работы *магнитооптического преобразователя (МОП)* основан на использовании магнитооптических эффектов в специфических доменных структурах, перестраиваемых под воздействием внешних полей (тепловых, магнитных и т.д.).

Классификация магнитоизмерительных преобразователей

Индукционные	Магнито-механические	Гальвано-магнитные	Квантовые	Магнито-оптические
Стационарные измерительные катушки, вращающиеся и вибрирующие катушки, пьезострикционные, электрострикционные, ферроиндукционные, ферроиндуктивные	Магнитометрические, электродинамические, магнитострикционные	Холла, магниторезистивные	ЯМР, ЭПР, ФМР, плазменные	Поляризационные, двойного преломления, спектральные

МОП используют также способы, которыми можно разделить или отфильтровать световые волны в соответствии с их поляризацией.

Поляризация с использованием стеклянной пластинки

Поляризацию света можно получить с использованием оптической поверхности. Когда неполяризованный пучок пересекает оптическую поверхность раздела двух сред под косым углом, происходит частичная поляризация отраженной и преломленной волн.

Поляризация за счёт двулучепреломления

Оптически активные вещества имеют различные показатели преломления для различных ориентаций поляризации. Это свойство является двулучепреломлением.

Поляризация за счёт селективного поглощения

Поляризацию можно также получить с использованием дихроичных веществ, то есть селективного поглощения одной из ортогональных поляризаций неполяризованной световой волны.

Свет, распространяющийся по оптическому волокну, может претерпевать изменение поляризации вследствие различных внешних воздействий, что используется при создании сенсоров.

Магнитооптический эффект Фарадея (1845 г.) заключается в том, что под воздействием магнитного поля, вектор напряжённости которого совпадает с направлением света, наблюдается поворот плоскости поляризации света, проходящего через вещество.

Если изготовить кольцо из множества витков оптического волокна и намотать на это кольцо провод, то, пропустив электрический ток, можно получить преобразователь магнитного поля, обладающий высокой чувствительностью. При этом угол вращения плоскости поляризации

$$\varphi = V N_f N_i I, \quad (1)$$

где I – сила электрического тока;

N_f – число витков кольца из оптического волокна;

N_i – число пересечений электрического тока с витками волокна.

На рис. 1 приведена блок-схема МОП. Световые лучи передаются от источника света (обычно светодиода) в светочувствительную часть датчика по многомодовому оптическому волокну.

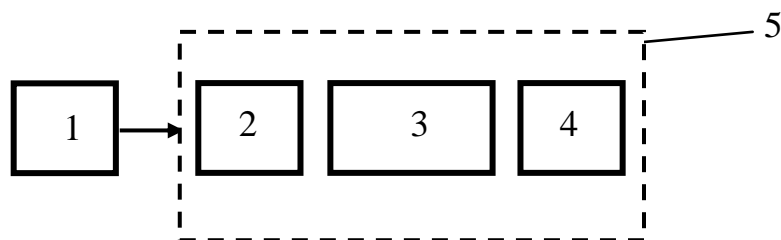


Рис. 1. Блок-схема магнитооптический преобразователь на основе эффекта Фарадея:
1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – элемент Фарадея;
4 – анализатор; 5 – чувствительная часть.

Для компенсации дрейфа измеряемого сигнала при переменном магнитном поле можно использовать преобразование "переменный ток – постоянный ток" [5].

Рассмотрим использование оптического волокна в устройстве интеллектуального преобразователя магнитного поля и электрического тока (рис. 2) [8].

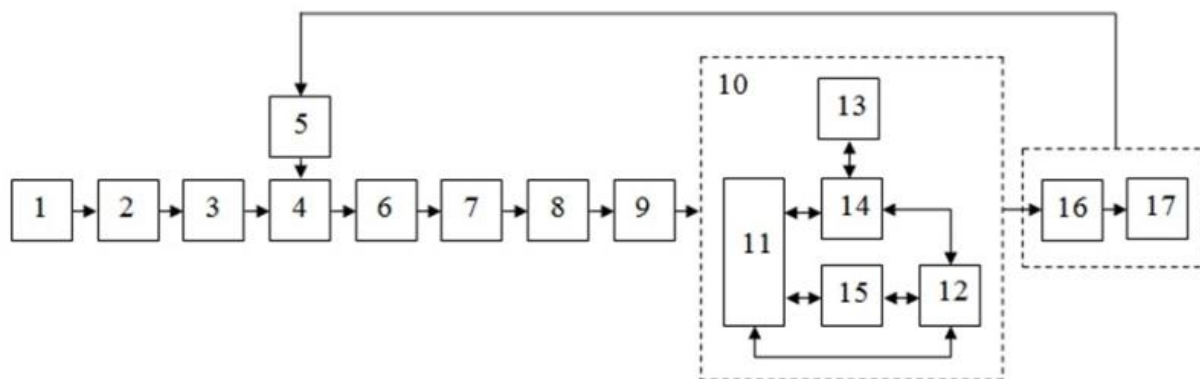


Рис. 2. Блок-схема интеллектуального преобразователя магнитного поля и электрического тока

Устройство содержит лазерный диод 1, соединительное оптическое волокно 2, поляризатор 3, чувствительный элемент (виток оптического волокна) 4, проводник с током, создающий магнитное поле 5, анализатор 6, фотодиод 7, операционный усилитель 8, аналого-цифровой преобразователь 9, нейронный датчик 10, анализатор данных реального времени 11, среду интеллектуальной измерительной системы 12, интеллектуальный преобразователь 13, человеко-машинный интерфейс 14, управление (реагирующая часть) 15, управляющее устройство 16, жидкокристаллический индикатор 17.

Для качественного и надёжного устройства важную роль имеют статические и динамические характеристики.

При исследовании данных характеристик рассмотрим математическую модель ИВПМП, позволяющую рассчитать зависимость интенсивности оптического излучения на выходе чувствительного элемента от напряжённости внешнего магнитного поля, ослабляющих свойств материала и типа оптического волокна.

Современные кварцевые оптические волокна являются диамагнитными материалами, которые имеют уникальную возможность использования их в качестве чувствительных элементов приборов.

В условиях, когда магнитное поле отсутствует, интенсивность светового излучения, вышедшая из анализатора:

$$J_4 = J_2 \cos^2 \gamma, \quad (2)$$

где J_2 – интенсивность света за поляризатором;

γ – угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора (угол скрещивания), который устанавливается предварительно при настройке прибора в пределах от 0° до 90° .

Плоскость поляризации линейно поляризованного света под действием внешнего магнитного поля дополнительно поворачивается на угол (формула 1). Зависимость постоянной Верде от длины волны можно определить следующим образом.

Необходимо в оптической системе чувствительного элемента учесть действие внешнего поля, которое во много раз больше напряжённости магнитного поля электромагнитной волны.

Для получения зависимости показателя преломления какого-либо вещества от частоты падающего на него света необходимо найти вектор поляризации P этого вещества, создаваемый полем световой волны E .

Вычислим вектор электростатической индукции $D = E + 4\pi P$ и определим $\varepsilon = \frac{D}{E}$. Используем основное соотношение электромагнитной теории света $n = \sqrt{\varepsilon}$, получим силу Лоренца, записанную в виде:

$$F_l = q \left[E + \frac{1}{c} [v \cdot H_{внеш}] \right]. \quad (3)$$

В случае ограничения оптическим диапазоном спектра (инфракрасные, видимые и ультрафиолетовые лучи), даже при очень малой плотности вещества содержится громадное количество излучающих атомов, и можно предположить, что поляризация вещества в поле световой волны определяется соотношением

$$P = Nqr, \quad (4)$$

где N – число молекул в единице объёма; произведение электрического заряда q на радиус-вектор r – электрический момент диполя.

Считаем, что "на входе" в вещество ($z = 0$) имеются две волны, поляризованные по кругу:

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \cos \omega t; \\ E_y &= \pm E_0 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (5)$$

Влияние направления поля на распространение поляризованной волны можно рассмотреть с учётом правого и левого вращений:

$$\begin{aligned} E_x + iE_y &= E_0 e^{(i\omega t)} \quad (\text{правое вращение}), \\ E_x - iE_y &= E_0 e^{(-i\omega t)} \quad (\text{левое вращение}), \end{aligned}$$

Используя формулу поляризации среды (4) и выражение

$$n^2 = \varepsilon = 1 + \frac{4\pi P}{E},$$

найдём

$$n_{\pm}^2 = 1 + \frac{4\pi N \cdot q^2 / m}{(\omega_0^2 - \omega^2) \pm q \cdot \omega \cdot H_{\text{внеш}} / (mc)}. \quad (6)$$

Для волны, распространяющейся в исследуемой среде, существуют два значения показателя преломления $n_{\text{лев}}$ и $n_{\text{пр}}$, так как в оптически активном веществе скорость распространения волны с правым вращением отлична от скорости распространения волны с левым вращением. Выражение (6) запишется в виде:

$$n_{\text{лев}} - n_{\text{пр}} = \frac{4\pi N q^3}{nm^2 c^2} \frac{H_{\text{внеш}} \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}. \quad (7)$$

Используя формулу вращения плоскости поляризации, связывающую разность показателей преломления с углом поворота φ плоскости поляризации для волны, прошедшей путь l в исследуемой среде, находим

$$\varphi_F = \frac{\omega}{2c} (n_{\text{лев}} - n_{\text{пр}}) l = \frac{2\pi N q^3}{nm^2 c^2} \frac{\omega^2 l H_{\text{внеш}}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}, \quad (8)$$

где

$$\frac{2\pi N q^3}{nm^2 c^2} \frac{\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} = V.$$

При $\omega \ll \omega_0$ (электронные полосы поглощения лежат в ультрафиолетовой области спектра) можно пренебречь ω^2 в знаменателе последнего выражения, тогда получаем зависимость постоянной Верде от частоты $\rho \cong \omega^2 \cong 1/\lambda^2$. Окончательно постоянную Верде можно найти по формуле

$$V = \frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega}. \quad (9)$$

Используя формулу (1), запишем выражение (2) в виде:

$$J = J_4 = J_2 \cos^2 \left[\gamma + \left(\frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right) \cdot H_{\text{внеш}} \cdot (2\pi rN) \right]. \quad (10)$$

Формулой (10) описывается амплитудная модуляция линейно поляризованного света контролируемым магнитным полем, созданным электрическим током.

Интенсивность света, падающего на поляризатор J_2 (рис. 2) определяется вектором Умова-Пойтинга.

Интенсивность света, вышедшего из анализатора:

$$J = \frac{1}{2} J_0 \cdot e^{(-\alpha l)} \cdot \cos^2 \left[\gamma + \left(\frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right) \cdot H_{\text{внеш}} \cdot (2\pi rN) \right], \quad (11)$$

где $\alpha = 2\omega k/c = (4\pi/\lambda)k$ – коэффициент ослабления.

Выражение (11) дано без учёта потерь интенсивности светового потока на отражение от поверхностей оптоволоконна, а также в предположении $\alpha = \text{const}$ на расстоянии l_1 от источника света.

Для построения ИВПМП, предназначенного для измерения переменного тока, наиболее целесообразно выполнить систему с учётом $\gamma = 45^\circ$.

Потери света при отражении от поверхностей оптоволоконна при прохождении через оптическую систему ИВПМП и поглощение в поляризаторах неизбежны в реальной системе, поэтому чтобы учесть эти потери необходимо в формулу (11) ввести коэффициент g :

$$g = 2\chi_{\text{отр}} + 2q_{\text{пол}}, \quad (12)$$

где $\chi_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения поляризатора;

$q_{\text{пол}}$ – коэффициент поглощения поляризатора.

На движение света в оптоволоконне будет влиять сердцевина или внутренняя поверхность световода, которая имеет высокий показатель преломления и определяется числовой апертурой:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (13)$$

которая является ещё одним важным параметром.

Оптический луч распространяется в оптоволоконне, испытывая многократное полное отражение от границы раздела сердцевины и оболочки. Однако из этого не следует, что угол может быть практически произвольным. Наоборот, угол распространения луча является особенным, характеристическим углом.

Следовательно, формула (11) примет вид:

$$J = \frac{1}{2} J_0 \cdot e^{(-\alpha l)} \cdot g \cdot NA \cdot \left(\cos^2 \left[\gamma + \left(\frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right) \cdot H_{\text{внеш}} \cdot (2\pi rN) \right] \right). \quad (14)$$

Используя формулу мгновенного значения H для дальней зоны, запишем формулу (14) в виде:

$$J = \frac{1}{2} J_0 \cdot e^{(-\alpha l)} \cdot g \cdot NA \cdot \left(\cos^2 \left[\gamma + \left(\frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right) \cdot \left(\frac{I_m dl \sin \Theta}{2R} \right) \cdot (2\pi rN) \right] \right). \quad (15)$$

Полученное выражение (15) представляет собой математическую модель ИВПМП – зависимость интенсивности оптического излучения на выходе чувствительного элемента от напряжённости внешнего магнитного поля проводника с электрическим током, ослабляющих свойств материала и типа [9].

На основании выражения (15) можно проводить моделирование по определению наибольших влияний на величину интенсивности излучения ИВПМП и определения статических и динамических характеристик устройства.

Литература

1. *Джексон Р.Г.* Новейшие датчики / Пер. с англ. под ред. В.В. Лучинина. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
2. *Окосу Т., Оцу М., Нисихара Х., Хататэ К.* Волоконно-оптические датчики / Пер. с яп. Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд., 1991. 255 с.
3. *Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугодииков А.П., Поспелов В.И.* Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Спецвыпуск "Фотон-Экспресс" – Наука. 2005. № 6. С. 128-140.
4. *Ураксеев М.А., Левина Т.М.* Волоконно-оптические датчики магнитного поля и электрического тока // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 9. С. 42-44.
5. *Ураксеев М.А., Левина Т.М.* Волоконно-оптические датчики электрического тока и магнитного поля как средства повышения уровня безопасности, объектов нефтегазового комплекса // Экологические системы и приборы – 2008. -№ 3. С. 8-12.
6. *Ураксеев М.А., Левина Т.М., Гатауллин И.В.* Информационно-измерительное устройство контроля электрического тока и магнитного поля / Пат. 62712 РФ, G01R29/00.
7. *Левина Т.М., Ураксеев М.А., Баширов М.Г.* Волоконно-оптическое устройство контроля электрического тока, температуры и давления / Пат. 127480 РФ, G01R 33/032.
8. *Шамаев Ф.Ф., Левина Т.М.* Интеллектуальный преобразователь магнитного поля и электрического тока на эффекте Фарадея / Пат. 2013126495/11 РФ, G01R 33/032.
9. *Ураксеев М.А., Левина Т.М.* Математическое моделирование оптоволоконных приборов и систем на магнитооптическом эффекте фарадея // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 6 (133).