

2. **Bradski G., Kaehler A.** Learning Open CV. Boston: O'Reilly Media. 2008.
3. **Brown D.** Decentering distortion of lenses // PE&RS. 1966. N. 32(3) P. 444—462.
4. **Brown D.** Close range camera calibration // PE&RS. 1971. N. 37(8) P. 855—855.
5. **Pratt W. K.** Digital Color Image Coding and Transmission. California: University of Southern California, 1971.
6. **Zhang Z.** A flexible new technique for camera calibration // TPAMI. 2000. N. 22(11). P. 1330—1334.
7. **Калинкина Д., Ватолин Д.** Проблема подавления шума на изображениях и видео и различные подходы к её решению. Компьютерная графика и мультимедиа. 2005. № 3 (2). [Электрон. ресурс] <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/74> (дата обращения: 12.02.2015)
8. **Лукьяница А. А., Шишкин А. Г.** Цифровая обработка видеоизображений. М.: Ай-Эс-Эс Пресс, 2009.
9. **Шальнов Е., Кононов В., Конушин В.** Алгоритм вычитания фона, основанный на поблочных классификаторах // Мат. XXI междунар. конф. по компьютерной графике и мультимедии. М., 2011. С. 278—283.

10. **Св-во гос. рег. прог. для ЭВМ 2015615551 РФ.** Программа комплексной компенсации погрешностей оптико-электронных систем контроля геометрических параметров / Абакумов И. И., Кульчицкий А. А., Бойков А. В. // Реестр программ для ЭВМ. 2015. № 7.

11. **МИ 2174—91.** ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения. 1993.

12. **Абакумов И. И., Кульчицкий А. А.** Алгоритмический способ компенсации погрешностей автоматизированной оптико-электронной системы контроля геометрических параметров объектов // Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: труды II Междунар. научн.-практ. конф. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет Горный, 2014. Т. II, 2014. С. 104—108.

Дата принятия: 14.04.2016.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.586.59

Моделирование характеристик магнитооптического преобразователя перемещения

С. А. МАТЮНИН, М. В. СТЕПАНОВ, О. Г. БАБАЕВ

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия, e-mail: st_maxim@mail.ru

Рассмотрены принципы построения магнитооптических преобразователей перемещений на основе эффекта Фарадея. Приведены результаты математического моделирования характеристик рассматриваемых преобразователей перемещений. Показано практическое применение полученных данных.

Ключевые слова: преобразователь перемещения, эффект Фарадея, магнитопровод, позиционная характеристика.

The design principles of magneto-optical displacement transducers based on Faraday effect are considered. The results of mathematical modeling of fiber-optic differential displacement transducer characteristics are shown. The results of the practical application of data obtained from modeling are presented.

Key words: displacement transducer, Faraday effect, magnetic conductor, positional characteristic.

Качественные и технико-экономические показатели производственных процессов зависят, прежде всего, от контроля и точности соблюдения технологических режимов. При автоматизации пожаро- и взрывоопасных производств требуется большой ассортимент взрывозащищенных первичных преобразователей различных физических величин. В последние годы широкое распространение получили волоконно-оптические преобразователи, в том числе волоконно-оптические преобразователи перемещения с закрытым оптическим каналом, как не имеющие электрического питания и принципиально взрывобезопасные [1].

Принципы построения преобразователей перемещения на основе эффекта Фарадея. Структурная схема волоконно-оптического дифференциального преобразователя перемещения (ВОДПП) на основе магнитооптического эффекта приведена на рис. 1. Рассматриваемый в данной работе ВОДПП состоит из двух чувствительных элементов (ЧЭ), входящих в состав первичного преобразователя ПП, и двух электронных преобразователей ЭП1, ЭП2. Каждый ЧЭ содержит магнитооптический элемент (МОЭ) и прилегающие элементы магнитопровода 6. Световой поток Φ_0 от источника 3 с круговой поляризацией (светодиод, лазер) проходит через

оптическое волокно 7, сохраняющее поляризацию, поляризатор 4, МОЭ. В МОЭ под воздействием магнитного поля, сформированного постоянным магнитом 5 и магнитопроводом 6, происходит поворот плоскости поляризации на угол φ . Далее световой поток распространяется через анализатор 2, который выделяет две ортогональные составляющие Φ_1 , Φ_2 , поступающие через волокно 7 на фотоприемные устройства 1, 8. В этом случае световые потоки, поступающие на фотоприемные устройства 1, 8 определяются выражениями [2]:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1(x) &= \alpha \Phi_0 e^{-ch} \left[(1-k) \sin^2 \left(\Phi_{\text{пр}} + \varphi_0 (H_{\text{ср}}(x)) \right) + k \right]; \\ \Phi_2(x) &= \alpha \Phi_0 e^{-ch} \left[(1-k) \sin^2 \left(\Phi_{\text{пр}} - \varphi_0 (H_{\text{ср}}(x)) \right) + k \right]; \\ \Phi_1''(x) &= \alpha \Phi_0 e^{-ch} \left[(1-k) \sin^2 \left(\Phi_{\text{пр}} + \varphi_0 (H_{\text{ср}}''(x)) \right) + k \right]; \\ \Phi_2''(x) &= \alpha \Phi_0 e^{-ch} \left[(1-k) \sin^2 \left(\Phi_{\text{пр}} - \varphi_0 (H_{\text{ср}}''(x)) \right) + k \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где α — коэффициент, учитывающий оптические потери в поляризаторе и анализаторе, а также потери на отражение; Φ_0 — световой поток падающего на поляризатор излучения; c — коэффициент оптического поглощения магнитооптической среды; h — толщина МОЭ; k — коэффициент, учитывающий неполноту погасания в системе поляризатор — магнитооптический материал — анализатор; $\Phi_{\text{пр}}$ — угловое отклонение от положения погасания в системе поляризатор — анализатор; φ_0 — угол установки между поляризатором и анализатором; $H_{\text{ср}}(x)$ — среднее значение напряжённости магнитного поля; здесь и далее двойной верхний апостроф относится к элементам ЭП2.

Выходной сигнал $Y_{\text{вых}}(x)$ ВОДПП определяется следующим образом:

$$Y_{\text{вых}}(x) = Y''(x) - Y(x), \quad (2)$$

где

$$Y(x) = [Y_1(x) - Y_2(x)] / [Y_1(x) + Y_2(x)],$$

$$Y''(x) = [Y_1''(x) - Y_2''(x)] / [Y_1''(x) + Y_2''(x)]$$

— выходные сигналы ЭП1, ЭП2, соответственно; $Y_1(x) = K_I \Phi_1(x)$, $Y_2(x) = K_I \Phi_2(x)$, $Y_1''(x) = K_I \Phi_1''(x)$, $Y_2''(x) = K_I \Phi_2''(x)$ — сигналы на выходах ЧЭ; K_I — коэффициент, учитывающий преобразование световых потоков Φ_1 , Φ_2 ЧЭ в электрический сигнал.

Средние значения напряжённости магнитного поля $H_{\text{ср}}(x)$, $H_{\text{ср}}''(x)$ в месте расположения МОЭ можно найти как

$$H_{\text{ср}}(x) = H_S(x) / S; \quad H_{\text{ср}}''(x) = H_S''(x) / S, \quad (3)$$

где $H_S(x) = \int_S \overline{H(x)} \cdot \overline{1_n} dS$; $H_S''(x) = \int_S \overline{H''(x)} \cdot \overline{1_n} dS$, $\overline{1_n}$ — единичный вектор нормали к поверхности интегрирования; S — площадь поверхности МОЭ. $\overline{H(x)}$, $\overline{H''(x)}$ — напряжённости магнитного поля в направлении единичного вектора $\overline{1_n}$.

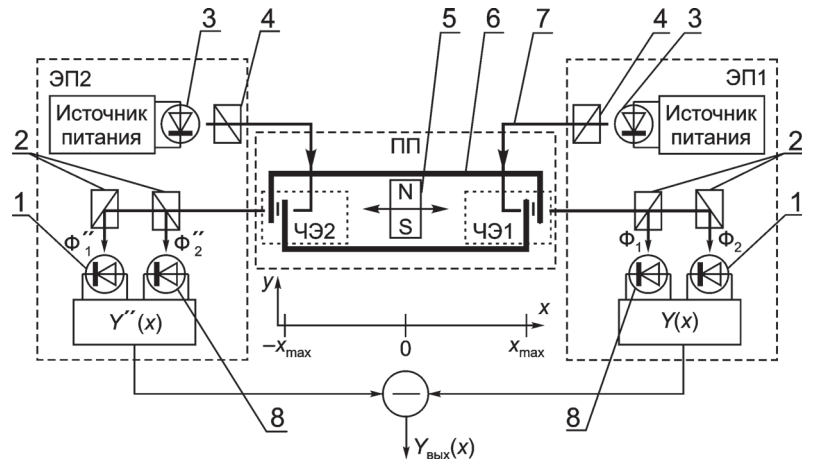


Рис. 1. Структурная схема ВОДПП на основе магнитооптического эффекта: 1 — фотоприёмное устройство; 2 — анализатор; 3 — источник света с круговой поляризацией; 4 — поляризатор; 5 — постоянный магнит; 6 — магнитопровод; 7 — оптическое волокно, сохраняющее поляризацию; 8 — фотоприёмное устройство; ЭП1, ЭП2 — электронные преобразователи 1, 2; ПП — первичный преобразователь; ЧЭ1, ЧЭ2 — чувствительные элементы 1, 2

Тогда из (2) с учётом (1), (3) можно определить выходной сигнал $Y_{\text{вых}}(x)$ ВОДПП.

Согласно (1), (2) позиционная характеристика (ПХ) ВОДПП нелинейная. Запишем абсолютное отклонение ПХ:

$$\Delta(x) = Y_{\text{л}}(x) - Y_{\text{вых}}(x),$$

где $Y_{\text{л}}(x) = C_0(A_I) + C_1(A_I)x$ — линейная аппроксимация ПХ, $C_0(A_I)$, $C_1(A_I)$ коэффициенты аппроксимации; A_I — конструктивные параметры ВОДПП (толщина магнитопровода 6 (см. рис. 1), ширина воздушного зазора между магнитом 5 и магнитопроводом 6, угол φ_0).

В этом случае задачу синтеза конструкции ВОДПП по критерию минимальной погрешности нелинейности ПХ с учётом (4) можно сформулировать в виде

$$\delta(x) = \frac{|Y_{\text{вых}}(x) - (C_0(A_I) + C_1(A_I)x)|}{\max |Y_{\text{вых}}(x)|} \rightarrow \min; \quad (4)$$

$$C_0(A_I) \in [C_{0 \min}, C_{0 \max}]; \quad C_1(A_I) \in [C_{1 \min}, C_{1 \max}],$$

где $\delta(x)$ — относительная погрешность нелинейности ПХ.

Математическая модель магнитопроводящей системы ВОДПП. Моделирование характеристик ВОДПП при заданных параметрах A_I проводили с использованием программного пакета ANSYS15 методом расчёта распределения магнитного поля как в магнитном сердечнике (с учётом кривой намагничивания материала сердечника), так и в окружающем пространстве. При этом расчёт одного варианта реализации ВОДПП занимал порядка 10 ч. Параметры компьютера: процессор Core 2 Duo 2,33 ГГц, ОЗУ 4 Гб, жёсткий диск объёмом 400 Гб, GeForce 8600GT 512 Мб. Таким образом, оптимизация конструкции ВОДПП по критерию минимальной погрешности нелинейности с использованием указанного программного пакета требует много времени и мощных вычислительных средств.

В целях экономии времени и вычислительных ресурсов была разработана упрощённая математическая модель ВОДПП, которую можно анализировать с использованием программного продукта MS Excel.

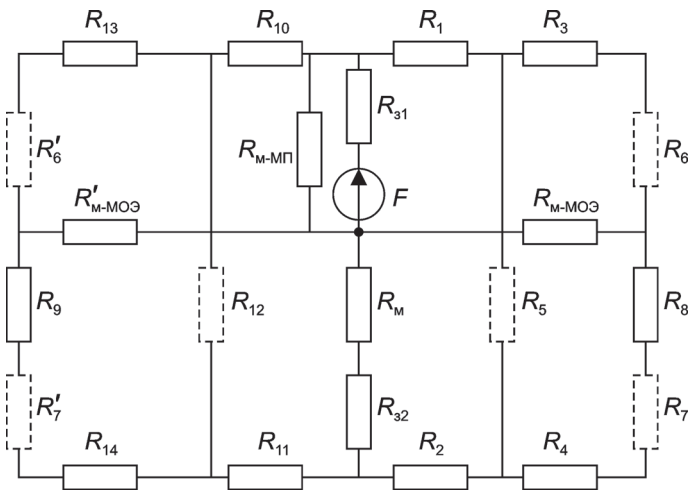


Рис. 2. Эквивалентная схема магнитопроводящей системы ВОДПП

Для расчёта магнитной цепи и нахождения напряжённости магнитного поля в месте установления МОЭ используем закон полного тока $\oint Hdl = 0$. [3, 4]. Разобьём магнитную цепь на участки так, чтобы в пределах каждого из них площадь поперечного сечения и магнитная среда были одинаковыми. Тогда можно считать, что магнитный поток проходит по каждому участку магнитопровода вдоль его средней линии. При этом индукция в пределах каждого участка будет постоянной, а следовательно, постоянной будет и напряжённость магнитного поля. Конфигурацию и размеры магнитопровода представим в виде эквивалентной схемы (рис. 2).

Эквивалентная схема состоит из следующих компонентов: R_1, R_2, R_3, R_4 — магнитные сопротивления элементов магнитопровода, определяемые как $R_i = R_{0i} \pm l_i(x)/(\mu\mu_0 S_c)$, где $i = 1, \dots, 4$; $l_i(x)$ — длина i -го элемента магнитопровода как функция текущего значения перемещения, S_c — площадь поперечного сечения магнитопровода, R_{0i} — магнитные сопротивления элементов магнитопровода, соответствующее $x = 0$; μ — магнитная проницаемость магнитопровода; $R_{10}, R_{11}, R_{13}, R_{14}$ — магнитные сопротивления элементов магнитопровода, определяемые как $R_i = R_{0i} \pm (x_{\max} - l_i(x))/(\mu\mu_0 S)$, где $x_{\max}$ — максимальное перемещение; R_6, R_7 — магнитные сопротивления элементов магнитопровода, определяемые как $R_{6,7} = l/(\mu\mu_0 S)$; R_{31}, R_{32} — магнитные сопротивления воздушных зазоров магнит—магнитопровод; R_M — магнитное сопротивление магнита; R_5, R_{12} — магнитные сопротивления между параллельными поверхностями магнитопровода; R_8, R_9 — магнитное сопротивление воздушных промежутков в местах установки чувствительных элементов; $R'_{M-МОЭ}, R_{M-МОЭ}$ — магнитные сопротивления воздушных промежутков между магнитом и МОЭ; $R_{M-МП}$ — магнитное сопротивление между магнитопроводом и поперечными гранями магнита; F — магнитодвижущая сигнала постоянного магнита.

Диапазоны изменений магнитных сопротивлений для магнитопровода 6 (см. рис. 1) реальной конструкции ВОДПП, приведены в таблице.

Номинальные значения магнитных сопротивлений

Магнитное сопротивление	Значение, А/Вб
R_1	0—4,18·10 ⁷
R_2	0—4,18·10 ⁷
R_3	0—4,18·10 ⁷
R_4	0—4,18·10 ⁷
R_5	1,8·10 ⁹
R_6	1,25·10 ⁶
R_7	1,25·10 ⁶
R_8	5,05·10 ⁶
R_9	5,05·10 ⁶
$R_{M-МП}$	2,8·10 ⁹ —4,82·10 ⁹
R_{10}	0—4,18·10 ⁷
R_{11}	0—4,18·10 ⁷
R_{12}	1,8·10 ⁹
R_{13}	0—4,18·10 ⁷
R_{14}	0—4,18·10 ⁷
R_M	41
R_{31}	1,24·10 ⁹
R_{32}	1,24·10 ⁹
$R_{M-МОЭ}$	3,42·10 ¹⁰ —9,95·10 ⁸
$R'_{M-МОЭ}$	9,95·10 ⁸ —3,42·10 ¹⁰

На основании анализа магнитных сопротивлений эквивалентная схема магнитопроводящей системы ВОДПП может быть существенно упрощена (магнитные сопротивления, которыми можно пренебречь, обозначены на рис. 2 пунктирными линиями): магнитные сопротивления R_6, R_7, R'_6, R'_7 на 2 порядка меньше сопротивлений R_3, R_4, R_{13}, R_{14} и, следовательно, ими можно пренебречь; магнитные сопротивления R_5, R_{12} на порядок больше, чем сопротивления, подключенные параллельно им, и, следовательно, шунтирующим влиянием сопротивлений R_5, R_{12} также можно пренебречь. Согласно расчётам погрешности моделирования при этом увеличивается не более чем на 4 %.

Для учёта изменения магнитного потенциала по длине магнитопровода и определения напряжённости магнитного поля в воздушном зазоре МОЭ по упрощённой эквивалентной схеме магнитопровода была определена зависимость полного сопротивления магнитной системы $R_\Sigma(x)$ от перемещения магнита x :

$$R_\Sigma(x) = R'R''/[R' + R''], \quad (5)$$

$$R' = R_8 + \frac{R_{M-МОЭ} \left[\frac{(R_M + R_{31,2})R_{M-МП}}{R_M + R_{31,2} + R_{M-МП}} + R_{1-4} \right]}{R_{M-МОЭ} + \left[\frac{(R_M + R_{31,2})R_{M-МП}}{R_M + R_{31,2} + R_{M-МП}} + R_{1-4} \right]},$$

где $R_{1-4} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$; $R_{31,2} = R_{31} + R_{32}$; $R_{10-14} = R_{10} + R_{11} + R_{13} + R_{14}$. Все составляющие правой части выражения (6) являются функцией перемещения x , но в целях упрощения выражения эта зависимость не приведена.

Определив полную магнитную проводимость $\Lambda_{\Sigma}(x)=1/R_{\Sigma}(x)$, по методике, изложенной в [1, 3], получены зависимости напряжённости магнитного поля $H_{cp}(x)$, $H''_{cp}(x)$ от положения постоянного магнита и по выражению (2) — ПХ ВОДПП.

Результаты моделирования. В результате моделирования по упрощённой модели получены: позиционная зависимость магнитной проводимости $\Lambda_{\Sigma}(x)$, ПХ ВОДПП, координатная зависимость приведённой погрешности нелинейности $\delta(x)$ ПХ ВОДПП (рис. 3).

Достигнуто сокращение времени анализа характеристики ВОДПП по упрощённой модели более чем в 250 раз, что позволило достаточно быстро провести анализ влияния ряда конструктивных параметров ВОДПП на его чувствительность и линейность ПХ, а также оптимизировать магнитопроводящую систему ВОДПП по критерию (5).

В результате проведённого анализа выявлено, что на максимальную приведённую погрешность нелинейности $\delta_{max}(x)$ ПХ ВОДПП существенное влияние оказывает угол установки между поляризатором и анализатором φ_0 (рис. 4).

Кроме того, при моделировании характеристик ВОДПП было выявлено влияние угла φ_0 на диапазон перемещения x_{max} . Например, зависимость x_{max} от угла φ_0 при ограничении погрешности нелинейности δ_{max} ПХ на уровне 5 % приведена на рис. 4. Там же представлена зависимость чувствительности C_1 ВОДПП от угла φ_0 .

Толщина стенок магнитопровода h_m также оказывает существенное влияние на характеристики ВОДПП. В частности, максимальная погрешность нелинейности δ_{max} ПХ уменьшается с уменьшением толщины магнитопровода. Однако при малых толщинах δ_{max} резко увеличивается, что связано с насыщением магнитопровода.

Заключение. Проведённые результаты моделирования подтверждают возможность применения упрощённой эквивалентной схемы магнитопроводящей системы при разработке и оптимизации ВОДПП. При этом отклонения от результатов моделирования, полученных в программной среде ANSYS 15, не превышают 4,5 %. Результаты моделирования показали существенное влияние на погрешность нелинейности ПХ угла установки поляризатора и анализатора и толщины стенок магнитопровода. Представленные в статье результаты были использованы при разработке и изготовлении ВОДПП.

Характеристики ВОДПП

Длина волоконно-оптического кабеля	10 м
Ход подвижного штока	0—50 мм
Класс точности	0,5
Рабочая температура	0...+50 °С
Температура хранения	−40...+85 °С
Материал корпуса	Алюминий/пластик

Отклонение экспериментальных характеристик разработанного ВОДПП от результатов моделирования, проведённого с использованием пакета MS Excel, не превышает 7 %.

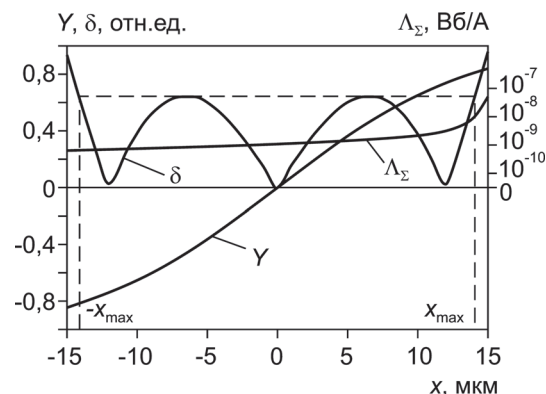


Рис. 3. Графики зависимости магнитной проводимости $\Lambda_{\Sigma}(x)$ от перемещения магнита, позиционной характеристики ВОДПП $Y(x)$, распределения приведённой погрешности нелинейности $\delta(x)$ ПХ ВОДПП по диапазону перемещения

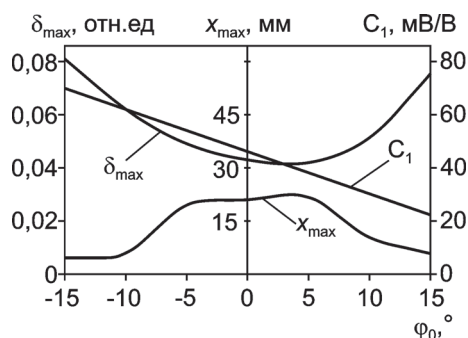


Рис. 4. Зависимости максимальной приведённой погрешности нелинейности δ_{max} ПХ ВОДПП, максимального диапазона перемещения x_{max} и чувствительности C_1 от угла установки поляризатора и анализатора φ_0

Литература

1. Гармаш В. Б., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н., Неугодников А. П., Поспелов В. И. Возможности, задачи и перспективы волоконно-измерительных систем в современном приборостроении // Спецвыпуск «ФОТОН-ЭКСПРЕСС». 2005. № 6. С. 128—140.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Учеб. пособие для вузов. Т. IV. Оптика. М.: Физматлит, 2006.
3. Альтман А. Б., Верниковский Э. И., Герберг А. Н., Гладышев П. А., Грацианов Ю. А., Зейн Е. Н., Кавалерова Л. А., Пятин Ю. М., Сакатунов Ю. С., Сергеев В. Г., Скоков А. Д., Сухоруков Р. Ю., Чернявская А. М. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. М.: Энергия, 1980.
4. Ураксеев М. А., Авдоница Н. А. Математическая модель магнитооптического преобразователя для автоматизированных технологических процессов // Вестник УГАТУ. 2009. № 2 (35). С. 69—73.

Дата принятия: 28.09.2015.