

## Линеаризация позиционной характеристики волоконно-оптического преобразователя на основе магнитооптического эффекта

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

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Россия, Самара, e-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru

Рассмотрены принципы линеаризации позиционной характеристики магнитооптических преобразователей перемещений. Проведено математическое моделирование позиционной характеристики, приведены результаты экспериментальных исследований опытных образцов преобразователей перемещения.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический преобразователь перемещения, магнитооптический эффект, линейная позиционная характеристика.

The principles of positional characteristic linearization of magneto-optical displacement transducer are considered. The results of mathematical modeling of fiber-optic displacement sensor characteristics are shown. The results of experimental investigations of displacement transducers patterns are presented.

**Key words:** fiber optical displacement transducer, magneto-optical effect, linear positional characteristic.

Перемещение является важным информативным параметром многих физических процессов. Задача измерения перемещения решается разнообразными измерительными приборами, важным классом которых являются датчики перемещения. Во многих отраслях промышленности существует необходимость в бесконтактном (без механического контакта с объектом контроля) и безэлектрическом (без электрического питания чувствительного элемента датчика) измерениях перемещений контролируемого объекта. Эта задача может быть реализована с помощью волоконно-оптического преобразователя перемещения (ВОПП) на основе магнитооптического эффекта [1—3]. Структурная схема ВОПП на основе магнитооптического эффекта приведена на рис. 1. Данный преобразователь состоит из чувствительного элемента (ЧЭ) и электронного преобразователя ЭП. Световой поток  $\Phi_0$  от источника 6 (светодиода, лазера, питаемых от источника питания 7) с круговой поляризацией проходит через поляризатор 5, оптическое волокно 4 и магнитооптический элемент 11 (МОЭ), выполненный в виде эпитаксиальных структур на кристалле железо-иттриевого граната [3]. В МОЭ под воздействием магнитного поля, сформированного постоянным магнитом 2 и магнитопроводами 1, 3, происходит поворот плоскости поляризации светового потока на угол  $\varphi$ , пропорциональный напряжённости магнитного поля. Далее световой поток последовательно проходит через оптическое волокно 4, анализатор 10 и поступает на фотоприёмное устройство 9, выходной сигнал которого подаётся на усилительное устройство 8. В итоге выходной сигнал усилительного устройства 8 пропорционален напряжённости магнитного поля в МОЭ, а значит и перемещению постоянного магнита 2, связанного с объектом контроля [3].

Однако такие ВОПП имеют существенно нелинейные позиционные характеристики (ПХ) (зависимость выходного

сигнала преобразователя от перемещения объекта контроля). При изменении зазора между магнитопроводом и постоянным магнитом всего на 7 мм сигнал фотоприёмного устройства изменяется по гиперболическому закону на 20 дБ (в 100 раз) [3].

**Линеаризации позиционной характеристики.** Задача линеаризации ПХ может быть решена несколькими способами: конструкторским, схемотехническим, алгоритмическим.

В настоящей работе рассмотрен конструкторский способ линеаризации ПХ, суть которого заключается в следующем. Пусть между подвижной частью (постоянным магнитом) и МОЭ размещается магнитопровод, выполненный таким об-

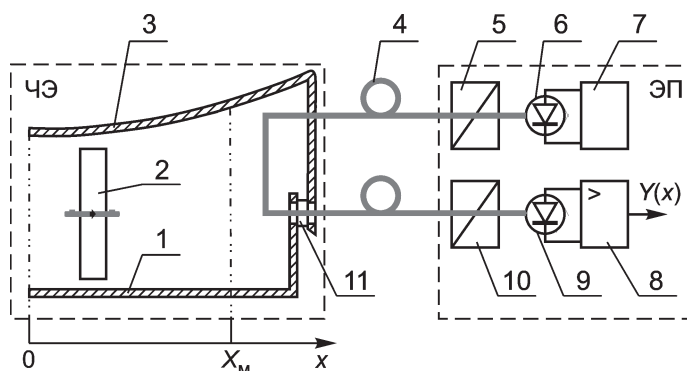


Рис. 1. Структурная схема ВОПП на основе магнитооптического эффекта:

ЧЭ — чувствительный элемент; ЭП — электронный преобразователь; 1, 3 — магнитопровод; 2 — постоянный магнит; 4 — оптическое волокно; 5 — поляризатор; 6 — источник света с круговой поляризацией; 7 — источник питания; 8 — усилительное устройство; 9 — фотоприёмное устройство; 10 — анализатор; 11 — магнитооптический элемент

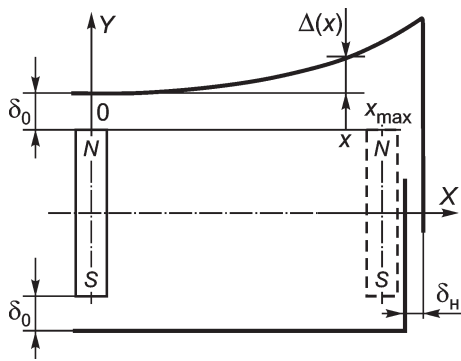


Рис. 2. Схема компоновки магнитной части ВОПП

разом, чтобы полученный воздушный зазор изменялся по некоторому закону  $\Delta(x)$ . В этом случае при перемещении постоянного магнита вследствие изменения воздушного зазора между постоянным магнитом и магнитопроводом  $\Delta(x)$  изменяется магнитное сопротивление воздушного зазора и, соответственно, магнитный поток, проходящий через МОЭ. Тогда линеаризация ПХ ВОПП возможна при выборе соответствующего закона изменения воздушного зазора  $\Delta(x)$ . Некоторые идеи подобного подхода применительно к электромагнитным функциональным преобразователям изложены в [4].

Схема компоновки магнитной части (одного канала) ВОПП на основе магнитооптического эффекта приведена на рис. 2, где  $\delta_0$  — начальный (конструктивный) воздушный зазор;  $\delta_n$  — воздушный зазор для установки МОЭ;  $\Delta(x)$  — закон изменения воздушного зазора магнит—магнитопровод;  $x$  — текущая координата;  $x_{\max}$  — максимальное перемещение подвижной части ЧЭ.

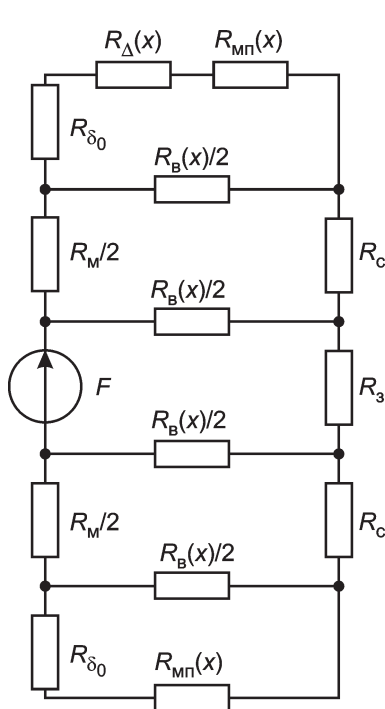


Рис. 3. Эквивалентная схема магнитной части ЧЭ

Для определения требуемого закона  $\Delta(x)$  составим по методике [5] эквивалентную схему магнитной части одного канала ВОПП (рис. 3). На рис. 3 приведены компоненты:  $R_{\text{мп}}(x)$  — магнитное сопротивление горизонтальных элементов магнитопровода;  $R_m$  — магнитное сопротивление магнита (на эквивалентной схеме разделено на две равные составляющие  $R_m/2$ );  $R_B(x)$  — магнитные сопротивления воздушных промежутков между магнитом и МОЭ (на эквивалентной схеме разделено на две равные составляющие  $R_B(x)/2$ );  $R_3$  — суммарное магнитное сопротивление МОЭ и воздушных зазоров между МОЭ и магнитопроводом;  $R_{\delta_0}$  — магнитные сопро-

тивления воздушных зазоров магнит—магнитопровод в точке  $x = 0$ ;  $R_{\Delta}(x)$  — магнитное сопротивление воздушного зазора, соответствующее закону изменения воздушного зазора  $\Delta(x)$ ;  $R_c$  — магнитные сопротивления вертикальных элементов магнитопровода;  $F$  — магнитодвижущая сила постоянного магнита.

Численный анализ возможных значений магнитных сопротивлений для реальных конструкций ВОПП показывает, что:  $R_c \ll R_3$ ;  $R_c \ll R_{\delta_0}$ ;  $R_{\text{мп}} \ll R_3$ ;  $R_{\text{мп}} \ll R_{\delta_0}$ ;  $R_m \ll R_{\delta_0}$ . С учётом этого допущения рассматриваемая эквивалентная схема может быть упрощена. В этом случае полное магнитное сопротивление  $R_{\Sigma}$  найдём из выражения:

$$R_{\Sigma} = R_3 + [(R_{\delta_0} + R_{\Delta}(x))R_B(x)] / (2(R_{\delta_0} + R_{\Delta}(x)) + R_B(x)) + [R_{\delta_0} R_B(x) / (2R_{\delta_0} + R_B(x))].$$

Тогда напряжённость магнитного поля [6] в зазоре установки МОЭ определим как

$$H_3(x) = FR_3 / (\delta_n R_{\Sigma}),$$

где  $\delta_n$  — воздушный зазор, необходимый для установки МОЭ.

Сигнал на выходе фотоприёмного устройства электронного преобразователя [3] ВОПП рассчитаем по формуле

$$U_{\text{фп}}(x) = kI_0 \sin^2(BIH_3(x) + \varphi_0) = kI_0 \sin^2([BFR_3 l / (R_{\Sigma} \delta_n)] + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий преобразование светового потока в электрический сигнал фотоприёмником и усилителем фототока;  $I_0$  — интенсивность оптического излучения на входе оптической системы ЧЭ;  $B$  — постоянная Верде;  $l$  — длина МОЭ;  $\varphi_0$  — угол между поляризатором и анализатором.

Представим позиционную характеристику ВОПП в линейном виде:

$$U_{\text{фп}} = U_0 + U_1 x, \quad (2)$$

где  $U_0$ ,  $U_1$  — коэффициенты линейной аппроксимации ПХ.

Приравняв (1) к (2), получим уравнение для нахождения закона изменения воздушного зазора  $\Delta(x)$ :

$$kI_0 \sin^2([BFR_3 l / (R_{\Sigma} \delta_n)] + \varphi_0) = U_0 + U_1 x. \quad (3)$$

Выразим из (3)  $R_{\Sigma}$  и получим выражение для  $R_{\Delta}(x)$ :

$$R_{\Delta}(x) = R_{\delta_0} R_B(x) - \Omega(x) (2R_{\delta_0} + R_B(x)) / (2\Omega(x) - R_B(x)),$$

где  $\Omega(x) = [BFR_3 l / (\arccos [(2(U_0 + U_1 x) / (kI_0)) - 1] - \varphi_0)] - R_3 - [R_{\delta_0} R_B(x) / (2R_{\delta_0} + R_B(x))]$ .

Сопротивление  $R_{\Delta}(x)$  воздушного участка цепи между магнитопроводом и постоянным магнитом можно определить из выражения (без учёта полей выпучивания) [6]:

$$R_{\Delta}(x) = \Delta(x) / (2\pi\mu_0 r_m^2),$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $r_m$  — радиус магнита.

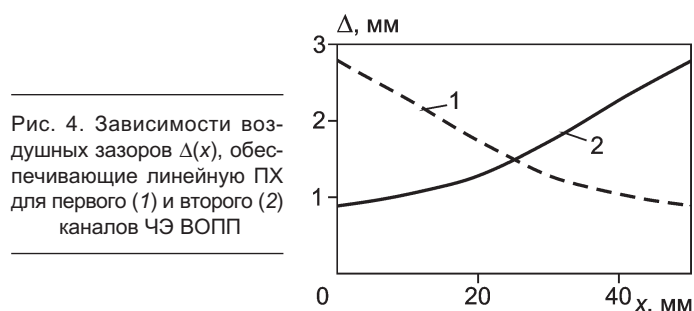


Рис. 4. Зависимости воздушных зазоров  $\Delta(x)$ , обеспечивающие линейную ПХ для первого (1) и второго (2) каналов ЧЭ ВОПП

Закон  $\Delta(x)$ , обеспечивающий линейность ПХ, определим как  $\Delta(x) = [R_{\delta_0} R_B(x) - \Omega(x)(2R_{\delta_0} + R_B(x)) / (2\Omega(x) - R_B(x))] 2\pi\mu_0 r_M^2$ .

**Результаты моделирования.** Для моделирования зададим параметры ВОПП: крутизна ПХ  $U_1 = 20$  В/м; постоянная составляющая  $U_0 = 0,9$  В; размеры магнита — диаметр 2,5 мм, длина 6 мм; магнитодвижущая сила магнита  $F = 30$  А; длина МОЭ  $R_3 = 1,0$  мм; постоянная Верде  $B = 6,75$  рад/А; конструктивный зазор  $\delta_0 = 0,8$  мм; размеры магнитопровода: ширина — 2 мм, толщина — 0,3 мм; материал магнитопровода — сталь марки 16Х; максимальное перемещение постоянного магнита  $x_{\max} = 50$  мм.

#### Характеристики ВОПП

| Параметр                                                                           | Значение                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Длина волоконно-оптического кабеля, м                                              | 10                                                         |
| Ход подвижного штока, мм                                                           | 0...50                                                     |
| Основная приведённая погрешность ВОПП, %                                           | 0,2                                                        |
| Нелинейность ПХ (при максимальном перемещении подвижного штока 50 мм), не более, % | 2,75 (одноканальный ВОПП)<br>0,32 (дифференциальный ВОПП)  |
| Габаритные размеры подвижного магнита (диаметр, длина), мм                         | 2,5; 6                                                     |
| Габаритные размеры ЧЭ (диаметр, длина), мм                                         | 4; 30                                                      |
| Габаритные размеры дифференциального первичного преобразователя, мм                | 65×10×10                                                   |
| Выходной сигнал вторичного преобразователя                                         | Аналоговый: 0—5 В<br>Цифровой: последовательный SPI 16 бит |
| Габаритные размеры вторичного (электронного) преобразователя, мм                   | 72×87×60                                                   |
| Рабочая температура, °С                                                            | –30... +50                                                 |
| Температура хранения, °С                                                           | –40...+85                                                  |

Вычислим значения магнитных сопротивлений по методике, изложенной в [5, 6], и согласно (3) определим зависимость  $\Delta(x)$ , (рис. 4, кривая 2).

По результатам проведённого моделирования были разработаны образцы ВОПП, экспериментальные исследования которых показали, что относительная нелинейность их ПХ (при максимальном перемещении подвижного штока на 50 мм) не превышает 2,75 %.

Для реализации дифференциальной конструкции в ЧЭ необходимо ввести второй измерительный канал. Зависимость  $\Delta(x)$ , обеспечивающая линейность ПХ второго канала, представлена на рис. 4. Это позволит дополнительно снизить относительную нелинейность позиционной характеристики ВОПП почти в 8 раз (по сравнению с недифференциальной конструкцией) до 0,32 % (экспериментально полученные результаты).

Дальнейшая линеаризация ПХ ВОПП возможна алгоритмическим путём. Основные характеристики экспериментальных образцов ВОПП приведены в таблице.

**Закключение.** Проведенное моделирование и экспериментальные исследования образцов ВОПП подтверждают возможность линеаризации ПХ ВОПП конструкторским способом. При этом нелинейность ПХ (при максимальном перемещении подвижного штока 50 мм) не превышает 2,75 % для одноканального ВОПП и 0,32 % для дифференциального ВОПП.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор: прикладные исследования и экспериментальные работы RFMEF157816X0209).

#### Л и т е р а т у р а

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. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007.
3. Matyunin S. A., Fedotov Yu. A., Babaev O. G., Wirchenko M. K., Gusev M. Yu., Neustroev N. St. Fiber-optical sensors based on mono-crystal films of garnet ferrites for mechatronic systems // Proc. Engineering. 2015. No. 106. P. 202—209.
4. Конюхов Н. Е. Электромеханические функциональные преобразователи. М.: Машиностроение, 1977.
5. Буль О. Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. М.: Академия, 2005.
6. Постоянные магниты: Справ. пособие. М.: Энергия, 1980.

Дата принятия: 05.09.2016.