

УДК 681.78

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ СФЕРИЧЕСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ  
НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОРШНЯ  
В ЦИЛИНДРЕ КЛАПАНА**

**А.А. Горбачёв, Е.Н. Кулешова**

Рассмотрен расчет погрешности, вносимой формой сферического отражателя в измерение линейных перемещений поршня в цилиндре клапана. Проведен анализ данной погрешности, выявлены зависимости этой погрешности от радиуса отражателя. Установлено, что данная погрешность составляет 0,15 мм, что значительно влияет на точность результата измерения перемещения. Предложен способ компенсации выявленной погрешности на программном уровне.

**Ключевые слова:** измерение линейных перемещений поршня, оптико-электронная система, сферический отражатель, линейные перемещения.

**Введение**

Часто возникает необходимость проверки работоспособности подвижных элементов оборудования, например, поршня в цилиндре клапанов различного назначения, золотника в вентиле и т.д. Обычно подвижные элементы располагаются в труднодоступных местах, и проконтролировать их работу контактным способом во время движения не представляется возможным. В таких ситуациях на помощь приходят оптико-электронные приборы и системы. Они позволяют наблюдать в реальном времени за протекающими процессами, автоматизировать процесс снятия данных, реализовать оперативное и точное измерение бесконтактным способом и повысить достоверность получаемых данных [1, 2].

Основной задачей, решаемой при создании такого рода систем, является уменьшение погрешности прибора, которая составляет десятые, а в некоторых случаях и сотые доли миллиметра (диапазон контролируемых поперечных смещений поршней клапанов или золотников вентилях при этом составляет десятки миллиметров). Другая задача, которую необходимо решить, – это создание измерительной системы при ограниченных габаритных размерах.

**Оптико-электронная система измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана**

Для решения задачи измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана на кафедре оптико-электронных приборов и систем в СПбГУ ИТМО была разработана оптико-электронная система [3]. Такая система позволяет контролировать перемещения в диапазоне  $\pm 5$  мм с погрешностью 0,05 мм.

Система представляет собой видеоблок, который состоит из источников излучения (ИИ), приемника оптического излучения (ПОИ) и оптической системы (рис. 1).

Принцип работы такой системы заключается в следующем: ИИ создают первичное изображение на контрольной метке (КМ), жестко закрепленной на поршне, вторичное изображение формируется оптической системой на ПОИ. Блок обработки, подключенный к видеоблоку, производит анализ совокупности изображений КМ и расчет ее перемещения, скорости и ускорения, т.е. определяет перемещение, скорость и ускорение поршня.

КМ может быть двух типов – активного и пассивного. КМ активного типа представляет собой источник излучения – полупроводниковый излучающий диод (ПИД) [4] или лазер. Изображение источника строится на ПОИ видеоблока. Напряжение питания можно подводить как от аккумуляторных батарей, так и от специального блока питания. Ограниченные габаритные размеры КМ и использование аккумуляторных батарей приводит к усложнению конструкции самой КМ. К тому же время работы источника от аккумуляторных батарей мало по сравнению с общим циклом измерений. Использование КМ с блоком питания усложняет ее монтаж на поршень клапана. Кроме этого, в процессе измерений провода могут переломиться, что не позволит зафиксировать положение КМ с поршнем.

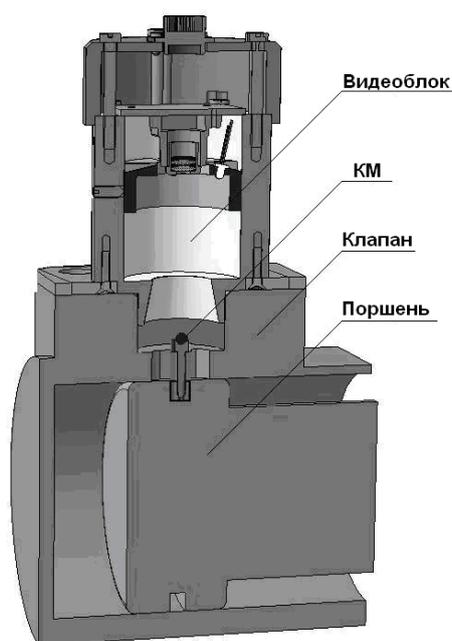


Рис. 1. Внешний вид опико-электронной системы для измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана

Перечисленные недостатки КМ активного типа предполагают использование для системы контроля положения поршня в цилиндре клапана КМ пассивного типа (сферический или тетраэдрический отражатели). Тетраэдрический отражатель представляет собой призму в виде тетраэдра, закрепленную в держателе. Однако проведенные эксперименты показали, что использование подсветки для КМ такого вида не позволяет создать необходимую освещенность на приемнике оптического излучения видеоблока для фиксации перемещения поршня.

КМ в виде сферического отражателя работает подобно выпуклому сферическому зеркалу. Система, работающая с использованием КМ подобного типа, описана в [5]. При том же источнике излучения КМ в виде металлического сферического отражателя создает достаточную освещенность. В этом случае необходимо учитывать возникающую при использовании подобной КМ погрешность.

### Лабораторный стенд

Создан лабораторный стенд и проведены эксперименты с использованием ПИД и КМ в виде сферического отражателя (рис. 2). Ниже приведены результаты экспериментального исследования.

На рис. 3 видно, что показания перемещения отличаются для КМ пассивного типа и ПИД, хотя задаваемое с помощью подвижки перемещение в обоих случаях одинаково. Следовательно, помимо погрешностей, присутствующих в обоих случаях, при использовании КМ пассивного типа возникает дополнительная погрешность. При задаваемом смещении 10 мм эта погрешность составляет 0,15 мм (87 пикселей), что, безусловно, влияет на результат измерений перемещений объекта. Таким образом, в случае использования КМ пассивного типа в виде сферического отражателя необходимо учитывать возникающую при использовании подобной КМ погрешность.

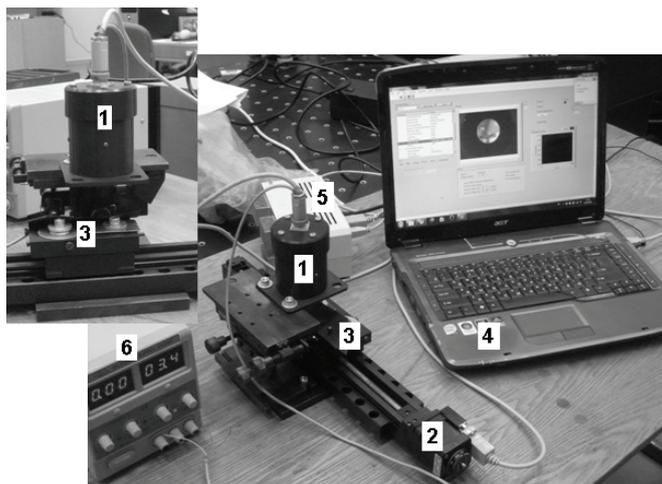


Рис. 2. Лабораторный стенд: 1 – ОЭС измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана; 2 – электрическая подвижка, имитирующая перемещения поршня; 3 – КМ; 4 – блок обработки и питания ОЭС; 5 – блок питания подвижки; 6 – блок питания ПИД в ОЭС

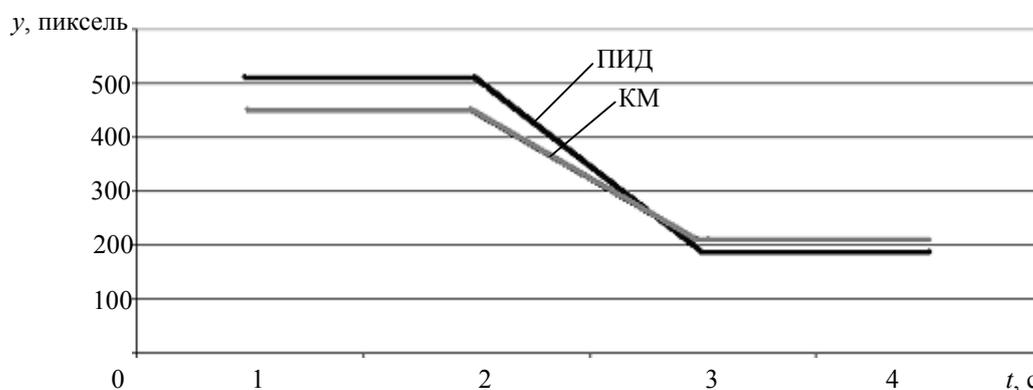


Рис. 3. Графики перемещения объекта, полученные с помощью ПИД и КМ

### Влияние формы сферического отражателя на точность измерения перемещений поршня в цилиндре клапана

КМ в виде сферического отражателя работает подобно выпуклому сферическому зеркалу. Определим величину влияния сферического отражателя на погрешность измерения перемещения поршня в клапане. Рассмотрим сечение шарика плоскостью (рис. 4), содержащей оптическую ось (ОС)  $AO_1$  и ось излучения ИИ  $BO_1$ , направленного на КМ. В точке  $A$  располагается передняя главная плоскость объектива. В точке  $B$  установлен ИИ. Перемещение КМ происходит в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка. Величины  $l, d$  определяются на этапах конструирования и юстировки системы.

Далее рассмотрим два положения КМ в сечения  $\omega$  (рис. 4), отличающихся друг от друга на величину перемещения объекта  $y$  (величина перемещения отсчитывается от центра КМ в первом положении до центра КМ во втором положении, рис. 5).

На рис. 5: отрезки  $O_1D_1$  и  $O_2D_2$  равны радиусу КМ;  $y^*$  – истинное перемещение КМ;  $y$  – измеренное значение перемещения; точка  $B_1$  соответствует изображению точки  $B$  в первом положении КМ; точка  $B_2$  – во втором положении КМ.

Используя формулу выпуклого сферического зеркала, определим расстояние  $B_2D_2$  до изображения ИИ в смещенном положении:

$$MO_2 = O_1O_2 \frac{B_2O_2}{BO_2}, \quad B_2O_2 = D_2O_2 - D_2B_2, \quad \frac{2}{D_2O_2} = \frac{1}{D_2B_2} + \frac{1}{BD_2}, \quad D_2B_2 = \frac{D_2O_2 \cdot BD_2}{2BD_2 - D_2O_2}.$$

Далее найдем величину  $\Delta y$ , которая определяет погрешность измерения перемещения, вносимую сферическим отражателем:

$$B_2O_2 = D_2O_2 \frac{BD_2 - D_2O_2}{2BD_2 - D_2O_2}, \quad BO_2 = \sqrt{O_1O_2^2 + BO_1^2}, \quad B_2O_2 = D_2O_2 \frac{BO_2 - 2D_2O_2}{2BO_2 - 3D_2O_2}.$$

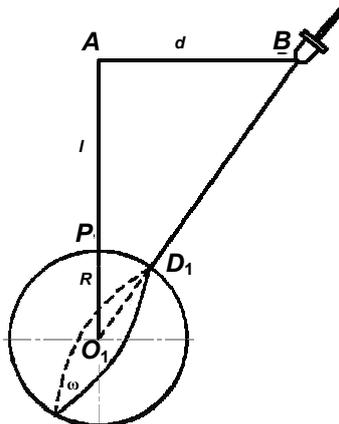


Рис. 4. Упрощенное изображение КМ и ИИ

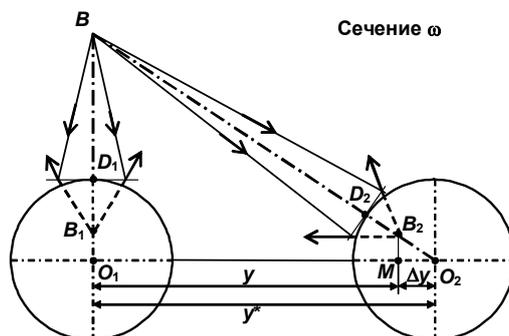


Рис. 5. Смещение КМ в сечении ω

В соответствии с обозначениями, принятыми на рис. 4 и рис. 5, запишем:

$$\Delta y = y^* - y, \quad \Delta y = y \cdot R \frac{\sqrt{y^2 + (l+R)^2 + d^2} - 2R}{2\sqrt{y^2 + (l+R)^2 + d^2} - 3R} \cdot \frac{1}{\sqrt{y^2 + (l+R)^2 + d^2}}.$$

Величина погрешности измерения перемещения КМ  $\Delta y$  при различных значениях радиуса КМ представлена на рис. 6. Из рис. 6 видно, что с увеличением радиуса КМ погрешность измерения перемещения возрастает. При ограниченном диапазоне перемещения зависимость погрешности от радиуса сферического отражателя носит линейный характер.

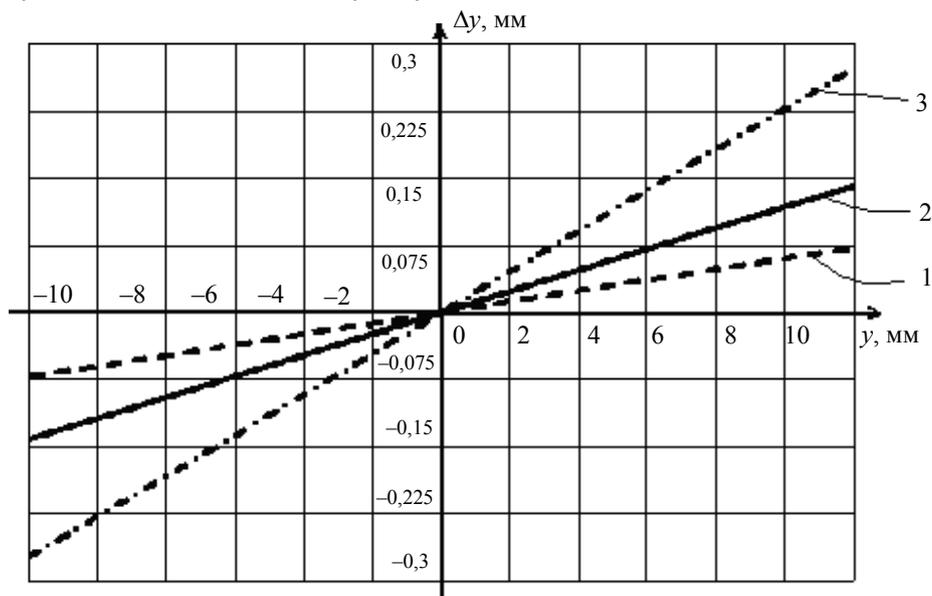


Рис. 6. Расчетная зависимость величины погрешности измерения  $\Delta y$  от величины измеренного перемещения  $y$  при различных значениях радиуса КМ  $R$ : 1 –  $R = 1$  мм; 2 –  $R = 2$  мм; 3 –  $R = 4$  мм

Исходя из конструкции клапана, радиус КМ составляет 2 мм. Из графика видно, что при радиусе КМ  $R = 2$  мм и при измеренном перемещении 9,7 мм погрешность, вносимая формой отражателя, составляет 0,1 мм, а погрешность данной системы, заявленная в технических требованиях, не должна превышать 0,05 мм. Таким образом, полученную погрешность нужно учесть. Снижения погрешности можно достичь путем компенсации. Компенсацию данной погрешности следует выполнять с помощью программы в блоке обработки. Следует ввести поправочный коэффициент, который в зависимости от параметров системы будет автоматически корректировать результат измерений. На рис. 7 представлены усредненные результаты эксперимента после введения поправочного коэффициента. Как видно, разность в определении перемещения объекта с помощью ПИД и пассивной КМ сократилась.

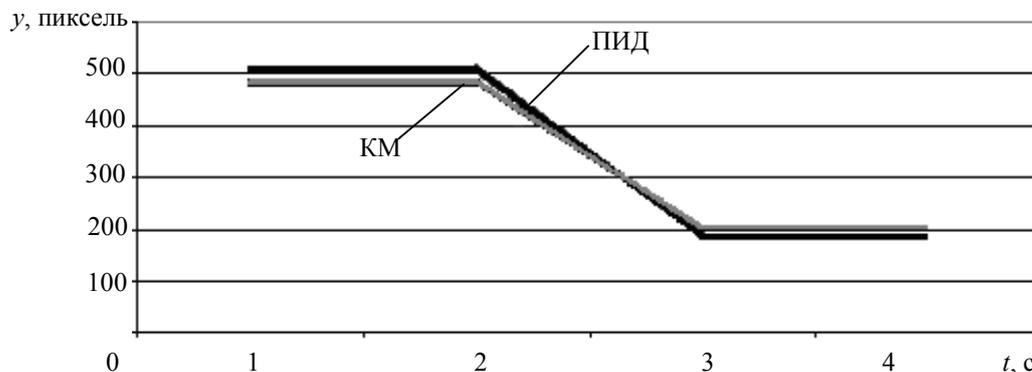


Рис. 7. Графики перемещения объекта, полученные с помощью КМ и ПИД с учетом введенного поправочного коэффициента

Зная конструктивные и оптические параметры системы, можно вычислить величину поправочного коэффициента при использовании сферического отражателя.

#### Заключение

Вносимая сферическим отражателем погрешность влияет на общую погрешность измерения перемещения поршня в цилиндре клапана. При ограниченном диапазоне перемещения зависимость погрешности от радиуса сферического отражателя носит линейный характер. Предложен способ компенсации данной погрешности с помощью поправочного коэффициента, вводимого в программу обработки изображений, используемую для измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках аналитической ведомственной ЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы».

#### Литература

1. Анисимов А.Г., Коротаев В.В., Кулешова Е.Н. О возможности адаптации теории распределенных измерительных систем к оптико-электронным системам // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – № 7. – С. 86.
2. Горбачев А.А., Коняхин И.А., Мусяков В.Л., Тимофеев А.Н. Исследование особенностей построения инвариантных оптико-электронных систем с единым матричным полем анализа // Оптический журнал. – 2007. – Т. 72. – № 12. – С. 24–29.
3. Кулешова Е.Н. Оптико-электронная система контроля линейного перемещения поршня клапана на основе анализа совокупности изображений // Сборник трудов конференции молодых ученых. Вып. 1. Оптехника и оптическое приборостроение. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2009. – С. 334–337.
4. Алеев А.М., Араканцев К.Г., Тимофеев А.Н., Ершова К.Б., Петуховский В.В., Петуховский С.В., Холин А.Е. Оптико-электронная система контроля положения железнодорожного пути относительно реперных меток / Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 9. – С. 18–22.
5. Устройство для измерения малых перемещений. РФ, патент RU 2165070. МПК G 01 B 11/00. Автор: Петров Е.Н. (RU). Номер заявки 99109451/28. Дата публикации – 10.04.2001.

**Горбачёв Алексей Александрович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, gorbachyov@grv.ifmo.ru

**Кулешова Екатерина Николаевна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, enkuleshova@mail.ru