

УДК 531.714.2

*А. А. Трофимов, Б. В. Цыпин***ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
С ЦИФРОВЫМ ВЫХОДОМ***A. A. Trofimov, B. V. Tsy-pin***THE SENSOR OF ANGULAR MOVEMENTS
WITH THE DIGITAL OUTPUT**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Предметом исследования является трансформаторный датчик угловых перемещений с цифровым выходом, целью – разработка и исследование трансформаторного датчика угловых перемещений, работающего в жестких условиях эксплуатации с заданными метрологическими и эксплуатационными характеристиками. *Материалы и методы.* Разработана схема замещения и математическая модель датчика угловых перемещений, позволившая вывести выражение для расчета выходной ЭДС секций измерительной обмотки трансформаторного датчика. Предложена структурная схема вторичного преобразователя, предназначенного для преобразования выходных сигналов с датчика в цифровой последовательный код. *Результаты.* Выведены основные выражения для расчета ЭДС секций измерительной обмотки трансформаторного датчика в зависимости от перемещения сердечника, позволившие на этапе проектирования определить чувствительность и характер выходного сигнала. *Выводы.* Полученные технические и эксплуатационные характеристики в сочетании с простотой и технологичностью конструкции позволяют применять разработанный датчик в измерительных и управляющих системах.

A b s t r a c t. *Background.* The subject of this study is to transformer rotary encoder with digital output. The aim is the development and research of transformer angular displacement sensor operating in harsh conditions with the specified metrological and performance. *Materials and methods.* A equivalent circuit and mathematical model of rotary encoder, which allows to derive an expression for the calculation output emf sections measuring winding transformer sensor. The structural scheme secondary converter designed to convert the sensor output signals to a digital serial code. *Results.* Derived basic expression for calculating the emf transformer winding sections measuring sensor according to the movement of the core, which allowed the design phase to determine the sensitivity and the nature output signal. *Conclusions.* The resulting technical and operational characteristics, combined with ease of manufacturability and design allow the use of a sensor designed for measurement and control systems.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик перемещений, взаимная индуктивность, вторичный преобразователь, статор, ротор, микроконтроллер.

К e y w o r d s: motion sensor, mutual inductance, the secondary transducer, a stator, a rotor, a microcontroller.

Эффективность развития и эксплуатации современных автоматизированных систем контроля и управления различными технологическими процессами во многом определяется технико-экономическими характеристиками первичных средств сбора и обработки информации, среди которых значительный удельный вес имеют датчики угловых перемещений [1–4].

Информация с датчиков о контролируемых процессах поступает в автоматизированные системы управления, и ее достоверность определяется метрологическими и надежностными

характеристиками датчиков. При этом к датчикам угловых перемещений предъявляется широкий комплекс метрологических и эксплуатационных требований, зачастую противоречащих, а иногда и исключающих друг друга.

Одним из основных требований является сохранение высоких метрологических характеристик при воздействии жестких дестабилизирующих факторов: механических ударов, вибраций, линейных ускорений, влажности, широкого диапазона воздействующих температур. Другим немаловажным требованием является наличие минимальных габаритных размеров и массы датчика [5, 6].

Для решения этой задачи разработан взаимдуктивный датчик перемещений, отличающийся малыми габаритными размерами и высокой точностью при работе в жестких условиях эксплуатации. Основные элементы конструкции датчика представлены на рис. 1.

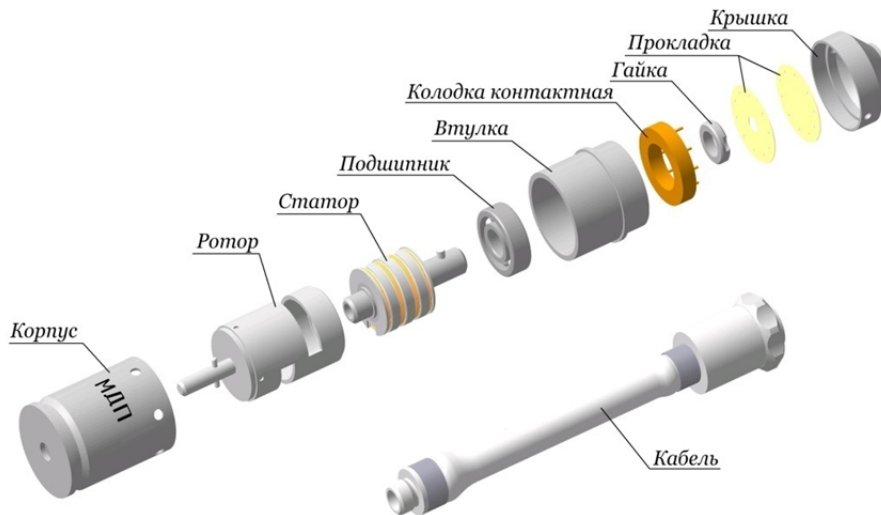


Рис. 1. Основные элементы датчика угловых перемещений

По принципу преобразования датчик является дифференциальным трансформатором. Датчик состоит из корпуса, статора, в кольцевых проточках которого расположены обмотки возбуждения и считывания, ротора с перфорированными окнами и кабельной перемычки, оканчивающейся разъемом. Выводы обмоток припаяны к штырям контактной колодки. Ротор располагается снаружи статора. Статор закреплен в отверстии корпуса, ротор установлен на подшипниках качения.

Для уменьшения составляющей дополнительной погрешности от воздействия температуры, вибрации, ударов, линейных ускорений необходимо найти функцию преобразования датчика и определить параметры, которые могут повлиять на метрологические и надежность характеристики датчика в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов. Для решения поставленной задачи составим схему замещения трансформаторного датчика угловых перемещений, приведенную на рис. 2.

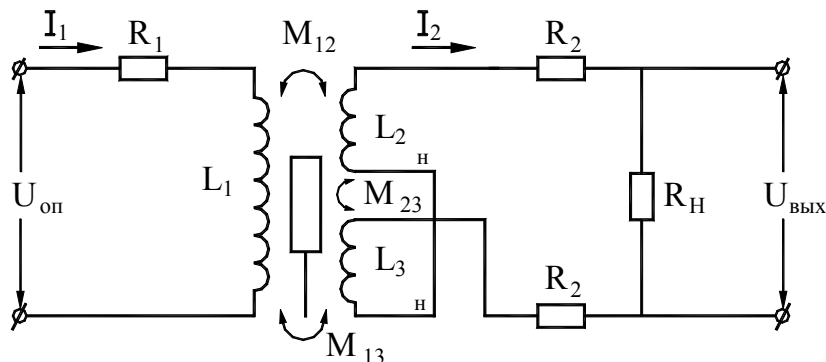


Рис. 2. Схема замещения трансформаторного датчика угловых перемещений

На схеме замещения приняты следующие обозначения: R_1 – активное сопротивление обмотки питания; R_2 – активное сопротивление секции измерительной обмотки; $U_{\text{оп}}$ – напряжение, поступающее на обмотку питания; L_1 – индуктивность обмотки питания; M_{12} и M_{13} – взаимные индуктивности соответственно верхней и нижней секций измерительной обмотки и обмотки питания; M_{23} – взаимные индуктивности секций измерительной обмотки; L_2 и L_3 – индуктивности соответственно верхней и нижней секций измерительной обмотки; R_n – сопротивление нагрузки; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение.

Уравнения Кирхгофа для цепи первичной обмотки имеют вид

$$U_{\text{оп}} = (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega (M_{12} - M_{13})I_2, \quad (1)$$

где $M_{12} = k\sqrt{L_1L_2}$; $M_{13} = k\sqrt{L_1L_3}$; k – коэффициент связи катушек, показывающий, какая доля потока, созданного током в контуре, пронизывает соседний контур.

Для цепи вторичной обмотки имеем

$$[2R_2 + R_n + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]I_2 - j\omega (M_{12} - M_{13})I_1 = 0, \quad (2)$$

где $M_{23} = k\sqrt{L_2L_3}$

Выражение для тока нагрузки имеет следующий вид:

$$I_2 = \frac{j\omega U_{\text{оп}} (M_{12} - M_{13})}{\omega^2 (M_{12} - M_{13})^2 + (R_1 + j\omega L_1)[2R_2 + R_n + j\omega(L_2 + L_3 - 2M_{23})]}. \quad (3)$$

Выходное напряжение трансформаторного датчика угловых перемещений равно

$$U_{\text{вых}} = I_2 R_n = \frac{j\omega U_{\text{оп}} R_n (M_{12} - M_{13})}{\omega^2 \cdot (M_{12} - M_{13})^2 + (R_1 + j\omega L_1)[2R_2 + R_n + j\omega(L_2 + L_3 - 2M_{23})]}. \quad (4)$$

Угол сдвига фазы выходного напряжения относительно напряжения питания равен

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega [R_1(L_2 + L_3 - 2M_{23}) + L_1(2R_2 + R_n)]}{R_1(2R_2 + R_n) + \omega^2 (M_{12} - M_{13})^2 - \omega^2 L_1 [L_2 + L_3 - 2M_{23}]}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) характеризуют выходное напряжение трансформаторного датчика угловых перемещений для определенного положения сердечника. Из уравнения (4) видно, что для достижения линейного выходного напряжения датчика необходимо, чтобы при перемещении якоря индуктивность первичной обмотки L_1 и величина $(L_2 + L_3 - 2M_{23})$ оставались неизменными, а разность взаимных индуктивностей $(M_{12} - M_{13})$ изменялась линейно в зависимости от величины перемещения якоря.

Для дифференциального трансформатора, имеющего линейную характеристику преобразования при $R_n \rightarrow \infty$ большинством членов уравнений (4) и (5) можно пренебречь [7–10].

Выходное напряжение с датчика будет определяться выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{j\omega U_{\text{оп}} (M_{12} - M_{13})}{R_1 + j\omega L_1}. \quad (6)$$

Значение угла сдвига фазы будет определяться как

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega L_1}{R_1}. \quad (7)$$

ЭДС секций вторичной обмотки трансформаторного датчика в соответствии с [2] определяется следующими выражениями:

$$E_1 = \omega M_o \frac{U_{\text{оп}}}{Z_{\text{оп}}} \left(1 - \frac{mx}{M_o} \right); \quad (8)$$

$$E_2 = \omega M_0 \frac{U_{\text{оп}}}{Z_{\text{оп}}} \left(1 - \frac{mx}{M_0} \right), \quad (9)$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота напряжения питания; M_0 – взаимная индуктивность секции вторичной обмотки и первичной обмотки при расположении сердечника на нейтрали трансформаторного датчика; $Z_{\text{оп}}$ – полное сопротивление первичной обмотки (обмотки питания); x – перемещение сердечника относительно электрической нейтрали датчика; m – изменение взаимной индуктивности секции вторичной обмотки и первичной обмотки.

Выражая величины E_1 и E_2 в долях выходной ЭДС, приходящейся на единицу перемещения якоря, получим

$$E_1 = aU_{\text{оп}} \left(1 - \frac{ex}{a} \right) = E_0 \left(1 - \frac{ex}{a} \right); \quad (10)$$

$$E_2 = aU_{\text{оп}} \left(1 + \frac{ex}{a} \right) = E_0 \left(1 + \frac{ex}{a} \right), \quad (11)$$

где E_0 – ЭДС на зажимах секций вторичной обмотки при расположении якоря в электрической нейтрали датчика; e – изменение вторичной ЭДС, приходящееся на единицу перемещения сердечника

$$a = \frac{\omega_0 M_0}{z_{\text{оп}}} = \frac{E_0}{E_{\text{оп}}}. \quad (12)$$

Значение выходной ЭДС датчика при встречном включении вторичной обмотки определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = E_2 - E_1 = 2E_0 \frac{e}{a} x. \quad (13)$$

В полученном выражении, в отличие от выражения (7), значение выходной ЭДС датчика непосредственно связано с перемещением сердечника.

Для дальнейшей обработки выходной сигнал через кабельную перемычку поступает во вторичный преобразователь. Структурная схема вторичного преобразователя приведена на рис. 3.

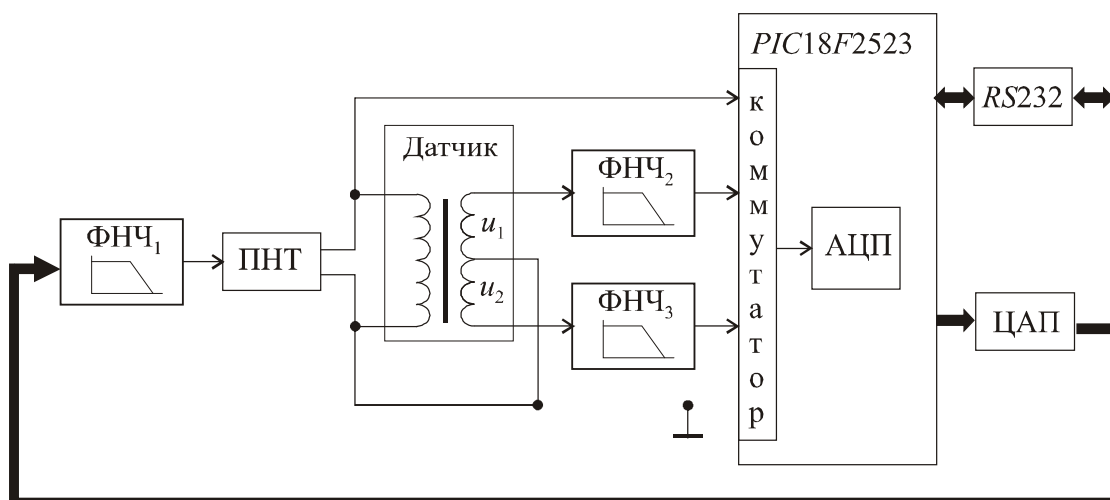


Рис. 3. Структурная схема вторичного преобразователя для датчика угловых перемещений

Преобразователь реализован на микроконтроллере *PIC18F2523*, в состав которого входит 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь с входным коммутатором. Обмотка воз-

буждения датчика питается от источника синусоидального тока с частотой 7 КГц, в состав которого входят 8-разрядный цифроаналоговый преобразователь, фильтр нижней частоты (ФНЧ₁) и преобразователь напряжение–ток (ПНТ). Цифроаналоговый преобразователь управляется микроконтроллером.

Напряжения u_1 и u_2 обмоток считывания датчика через фильтры нижней частоты ФНЧ₂ и ФНЧ₃ подаются на вход АЦП. Измерение амплитуд напряжений производится в моменты максимума сигналов. Оцифрованные значения амплитуд напряжений u_1 и u_2 используются для расчета кода перемещения N по формуле

$$N = \left(\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \cdot k_1 + k_2 \right) \cdot k_t, \quad (14)$$

где k_1, k_2 – нормирующие коэффициенты; k_t – поправочный температурный коэффициент.

Значения нормирующих и поправочного коэффициентов определяются в процессе настройки датчика и хранятся в памяти микроконтроллера. Для введения температурных поправок один раз в минуту производится измерение омического сопротивления обмотки возбуждения датчика, которое изменяется в зависимости от рабочей температуры. Для этого по команде микроконтроллера источник питания обмотки возбуждения датчика в течение 10 мс вырабатывает постоянный ток силой в 1 мА. Падение напряжения на первичной обмотке, зависящее от температуры, оцифровывается, и в зависимости от полученного результата задается значение k_t .

Связь датчика с внешней аппаратурой производится по интерфейсу RS232. В зависимости от внешних сигналов управления возможно изменение формата выходного кода – в относительных единицах или в единицах перемещения – и изменение периодичности проведения температурной коррекции.

Основные технические характеристики датчика приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики датчика угловых перемещений

Наименование	Значение
Диапазон измерений, град	0–160
Основная приведенная погрешность, %, не более	0,2
Выходной сигнал	последовательный двоичный код
Рабочая температура, °С	от минус 60 до 100
Масса датчика, кг	0,1
Масса вторичного преобразователя, кг	0,3
Вибрация, g	40
Частота, Гц	5–5000

Из приведенных в табл. 1 характеристик можно сделать вывод, что применение новой технологичной малогабаритной конструкции и использование микропроцессорной обработки сигнала позволило создать датчик угловых перемещений с цифровым выходом, имеющий расширенный диапазон измерений и меньшее значение основной погрешности по сравнению с ранее разработанными.

Список литературы

1. Дмитриенко, А. Г. Вихретоковые чувствительные элементы для бесконтактных датчиков перемещений / А. Г. Дмитриенко, А. А. Трофимов, Д. И. Нефедьев // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 1. – С. 4–10.
2. Баринов, Н. И. Датчики углового положения для внутритрубного профилемера / Н. И. Баринов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2004. – № 2. – С. 37–39.
3. Баринов, Н. И. Датчик углового положения лопаток направляющих аппаратов компрессора / Н. И. Баринов, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – 2004. – № 5. – С. 43–45.

4. Трофимов, А. А. Датчик угловых перемещений / А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 13–14.
5. Дмитриенко, А. Г. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники / А. Г. Дмитриенко, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – 2010. – № 10. – С. 18–21.
6. Трофимов, А. А. Датчик угловых перемещений для системы контроля параметров шасси / А. А. Трофимов, В. Н. Новиков, С. Ф. Горбунов // Датчики и системы. – 2008. – № 7. – С. 55–58.
7. Шидлович, Л. Х. Дифференциальные трансформаторы и их применение / Л. Х. Шидлович. – М., 1966.
8. Трофимов, А. А. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений / А. А. Трофимов, Н. Д. Конаков // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 8–10.
9. Гаврилов, В. А. Система измерения линейных перемещений / В. А. Гаврилов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 44–46.
10. Дмитриенко, А. Г. Математическая модель, расчет и оптимизация взаимоиндуктивных датчиков линейных перемещений / А. Г. Дмитриенко, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов, В. Л. Кирьянов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 16–19.

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Trofimov Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cypin@yandex.ru

Tsy-pin Boris Vul'fovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of rocket-space
and aviation instrument,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 531.714.2

Трофимов, А. А.

Датчик угловых перемещений с цифровым выходом / А. А. Трофимов, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 29–34.