

УДК 681.2.08
doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-9

БЕСКОНТАКТНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А. А. Трофимов¹, У. С. Чихрина², Д. В. Попченков³, Д. А. Гулиева⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ alex.t1978@mail.ru, ² chikhulyana@yandex.ru, ³ popchenkov79@mail.ru, ⁴ dashuliy2308@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время постоянно растут потребности в совершенных средствах измерения и контроля, в том числе и в датчиках перемещений, обладающих высокой точностью и быстродействием, возможностью работать в сложных условиях окружающей среды (большие перепады температур, агрессивные окружающие среды, механические нагрузки, повышенная влажность, большие давления и т.д.). Целью исследования является разработка бесконтактной системы измерения виброперемещений на основе вихретокового датчика. *Материалы и методы.* При решении поставленных задач использованы методы натуральных испытаний. *Результаты.* Проведена проверка работоспособности и снятие градуировочных характеристик разработанной системы при повышенном и пониженном напряжениях питания, при различных материалах якоря. А также подтверждена работоспособность системы в условиях воздействия повышенной и пониженной температуры окружающей среды.

Ключевые слова: датчик перемещений, блок электроники, вихревые токи, градуировочная характеристика

Для цитирования: Трофимов А. А., Чихрина У. С., Попченков Д. В., Гулиева Д. А. Бесконтактная система измерения виброперемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 74–79. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-9

NON-CONTACT SYSTEM FOR MEASURING VIBRATION DISPLACEMENTS

A.A. Trofimov¹, U.S. Chikhrina², D.V. Popchenkov³, D.A. Gulieva⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia
¹ alex.t1978@mail.ru, ² chikhulyana@yandex.ru, ³ popchenkov79@mail.ru, ⁴ dashuliy2308@yandex.ru

Abstract. *Background.* Currently, there is a constantly growing need for advanced measuring and control tools, including displacement sensors with high accuracy and speed, the ability to operate in difficult environmental conditions (large temperature differences, aggressive environments, mechanical loads, high humidity, high pressures, etc.). The aim of the study is to develop a contactless vibration displacement measurement system based on an eddy current sensor. *Materials and methods.* In solving the tasks, full-scale testing methods were used. *Results.* The operability of the developed system was tested and calibration characteristics were taken at high and low supply voltages, with different anchor materials. The operability of the system under conditions of exposure to high and low ambient temperatures was also confirmed.

Keywords: displacement sensor, electronic unit, eddy currents, calibration characteristic

For citation: Trofimov A.A., Chikhrina U.S., Popchenkov D.V., Gulieva D.A. Non-contact system for measuring vibration displacements. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):74–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-9

Бесконтактная измерительная система предназначена для измерений относительного смещения деталей машин. Такие системы особенно подходят для измерений относительной вибрации и положения оси валов машин, например, в паровых и газовых турбинах, генераторах переменного тока, турбокомпрессорах и центробежных насосах [1, 2].

Способ измерения, используемый в бесконтактной системе, основан на эффекте вихревых токов [3, 4]. Используя его, можно измерять расстояние между подвижным (вибрирующим) объектом и преобразователем. Последний устанавливается на другом объекте, стационарном и обычно не вибрирующем. Бесконтактная система обеспечивает сигнал, прямо пропорциональный относительному смещению между объектом и преобразователем.

Этот способ отличается от способа, используемого «сейсмическими» приборами, например, акселерометрами и преобразователями скорости. У них выходной сигнал пропорционален абсолютному перемещению объекта, на котором они установлены.

Бесконтактный способ широко применяется для контроля различных типов вращающихся механизмов. Основные области применения:

1) контроль осевого перемещения вала или ротора станка – можно использовать для измерения относительного расширения вала или состояния (степени износа) упорных подшипников. Это соответствует статическому измерению;

2) контроль относительной вибрации вала машины в радиальном направлении. Радиальные вибрации вызываются эксцентриситетом вала, присутствием дисбаланса ротора или резонансом. Это соответствует динамическому измерению.

Разработанная бесконтактная система виброперемещений состоит из бесконтактного датчика виброперемещений и блока электроники (БЭ).

Бесконтактный датчик перемещений состоит из корпуса 1 (рис. 1), на внешнем диаметре которого нарезана резьба M10×1, двух шестигранных гаек 2, кабельной перемычки 3, оканчивающейся мини-разъемом 4. Внутри корпуса 1 расположен чувствительный элемент, состоящий из ферритовой чашки и катушки.

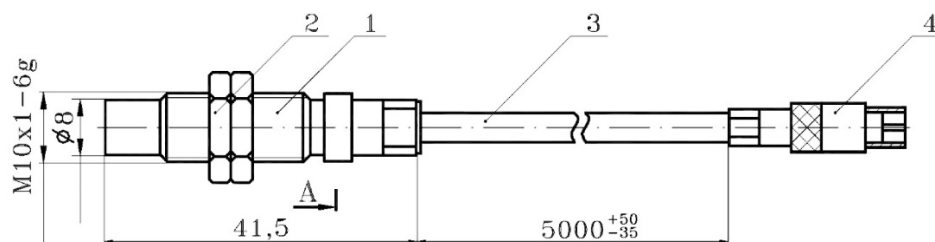


Рис. 1. Общий вид бесконтактного датчика виброперемещений

Обмотка датчика является частью колебательного контура генератора, который вырабатывает переменное напряжение частотой 566 кГц с изменяющейся амплитудой от 0,5 до 2 В.

Блок электроники состоит из алюминиевого корпуса с крышкой и расположенной внутри корпуса печатной платой. На корпусе БЭ расположены: коаксиальный малогабаритный разъем для подключения датчика и колодка для подключения цепей питания и цепи выхода.

Система работает следующим образом. При перемещении токопроводящего элемента (якоря) из материала типа Ст20 на расстоянии от 0 до 4,3 мм от торца датчика происходит изменение значения индуктивности катушки чувствительного элемента [5, 6]. При изменении индуктивности изменяется добротность колебательного контура и, как следствие, амплитуда синусоидального сигнала на выходе генератора БЭ. Изменяющийся синусоидальный сигнал является информационным сигналом о расстоянии до измеряемого объекта. Далее синусоидальный сигнал детектируется и подвергается обработке в усилительно-преобразующем тракте БЭ, на выходе которого появляется постоянное напряжение, изменяющееся в функции измеряемого расстояния.

Проверка работоспособности и снятие градуировочной характеристики проводились в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.

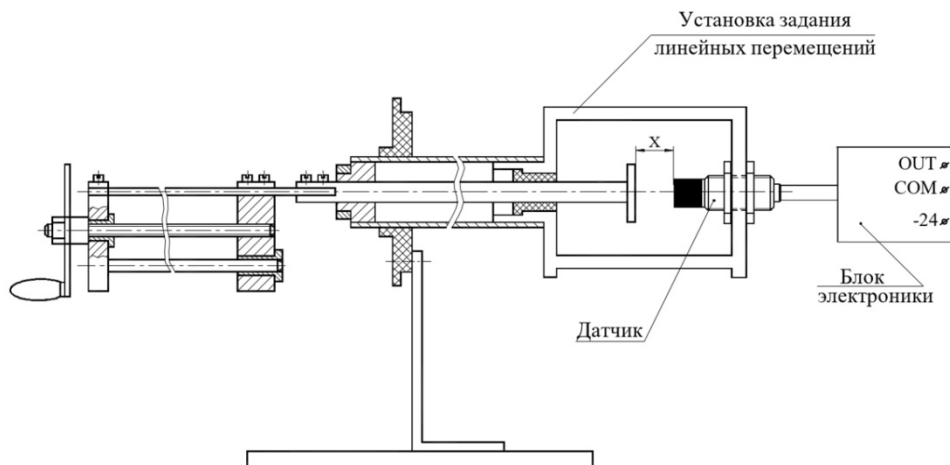


Рис. 2. Схема установки датчика

Конструктивно ЭРИ в БЭ расположены на многослойной плате с плотной разводкой печатных проводников и плотным размещением ЭРИ.

Проверка тока потребления проводилась в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.

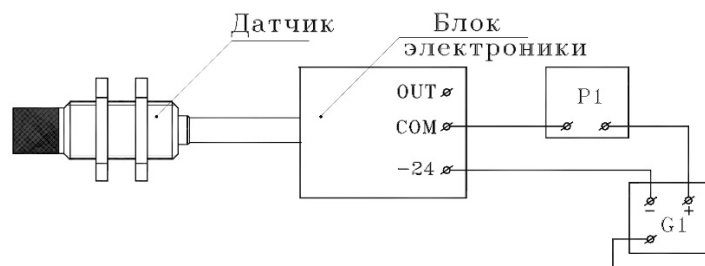


Рис. 3. Схема проверки тока потребления:

G – источник питания постоянного тока Б5–45; $P1$ – прибор комбинированный Ц4353

Исследование технических, технологических и конструктивных характеристик системы

Результаты исследований показали, что система может работать с любыми электропроводящими материалами (медь, алюминий, сталь, бронза и т.д.), из которых изготовлены якоря. В зависимости от материала якоря изменяется градуировочная характеристика системы.

В ходе проведенных исследований выявлены следующие особенности.

Конструктивно система выполнена в исполнении, позволяющем проводить механическое соединение и разъединение датчика и блока электроники.

В датчике применена технология обжатия втулки кабельной перемычки в виде шестигранника в месте выхода ее из корпуса для повышения механической надежности датчика и упрощения конструкции.

Диапазон измерения 4,3 мм, сопоставимый с диаметром чувствительного элемента (катушки) датчика ($\varnothing 5$ мм), достигается за счет использования в составе системы схемы линеаризации выходной характеристики.

Следует отметить простоту конструкции датчика, поэтому для изготовления деталей и его сборки не требуется сложной оснастки, а также малые габаритные размеры.

БЭ имеет малые габаритно-весовые характеристики ($V \approx 140$ см³). К особенностям выполненных конструктивно-технологических решений в БЭ следует отнести плотную компоновку ЭРИ на многослойной плате и плотную разводку печатных проводников, также схемно-техническое решение по линеаризации выходной характеристики системы.

Датчик системы имеет герметичное исполнение в части защиты от проникновения воды и пыли. Система позволяет проводить бесконтактное измерение перемещений, что не приводит к отбору мощности у перемещающегося объекта.

Результаты проверки работоспособности и снятие градуировочных характеристик при повышенном 28,8 В, при 24 В и при пониженном 20,8 В напряжениях питания приведены на рис. 4.

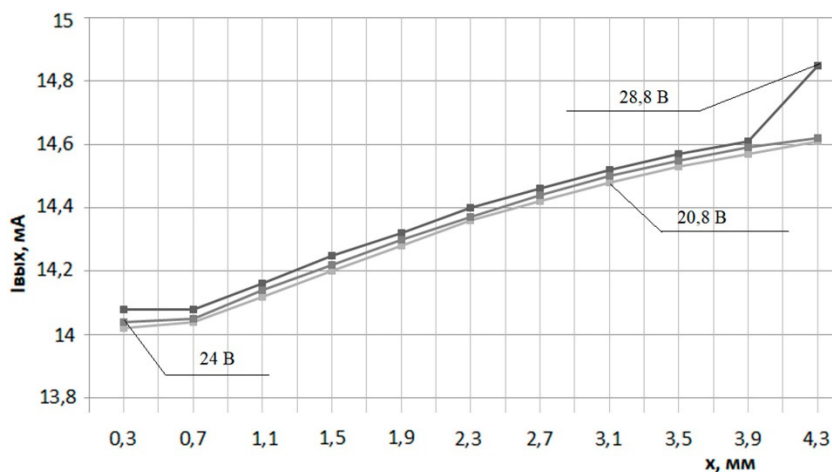


Рис. 4. Значение выходного сигнала при напряжении питания 28,8; 24; 20,8 В

Результаты снятия градуировочных характеристик системы при различных материалах якоря (медь, алюминий) приведены на рис. 5.

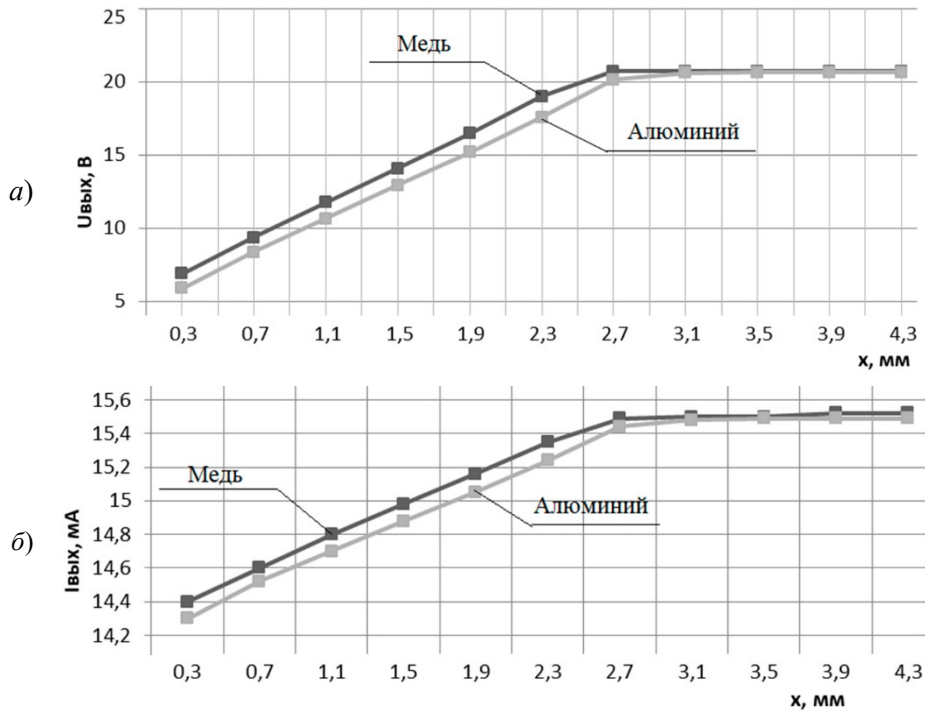


Рис. 5. Градуировочные характеристики системы при различных материалах якоря:
 а – градуировочная характеристика «перемещение – напряжение»;
 б – градуировочная характеристика «перемещение – ток»

Результаты проверки работоспособности системы в условиях воздействия повышенной и пониженной температуры окружающей среды приведены на рис. 6.

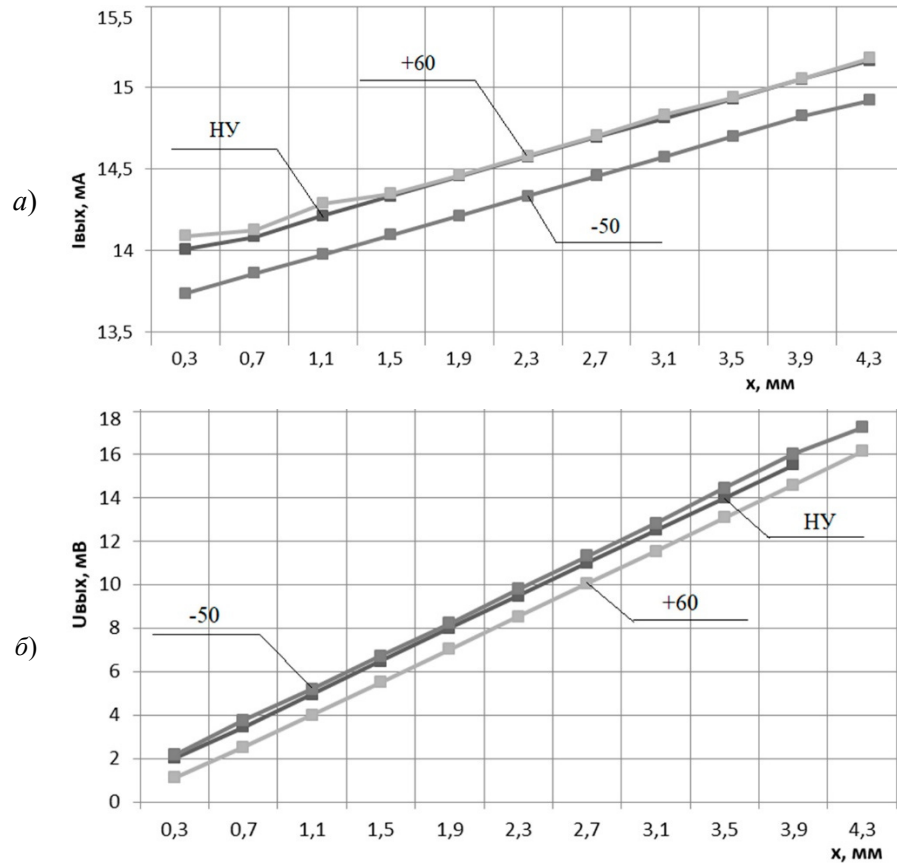


Рис. 6. Градуировочные характеристики системы в условиях воздействия повышенной и пониженной температуры окружающей среды:
 а – градуировочная характеристика «перемещение – ток»;
 б – градуировочная характеристика «перемещение – напряжение»

Основные технические характеристики системы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики разработанной системы

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений, мм	4 (от 0,3 до 4,3 мм)
Диаметр катушки, мм	6
Чувствительность, мВ/мкм	4
Длина кабельной перемычки датчика, м	5
Выходной сигнал системы:	
– ток, мА	15–20
– напряжение, В	1,2–17,2
Масса, кг	0,290
Ток потребления, А	$15 \cdot 10^{-3}$
Основная погрешность, % (без учета погрешности аппроксимации)	1,14
Погрешность аппроксимации, %	7,5
Частотный диапазон измерений, Гц	более 1000
Напряжение питания В,	от 20,4 до 28,8
при этом максимальный ток, потребляемый системой, не превышает, мА	15
Система работоспособна при изменении температуры окружающей среды, °С	от минус 50 до +60
Дополнительная погрешность от воздействия температуры окружающей среды, %	5,67
Габаритные размеры датчика, мм	M10×41,5
Габаритные размеры блока электроники, мм	78×53×35

Заключение

Бесконтактная система измерения виброперемещений работоспособна при изменении напряжения питания от 20,4 до 28,8 В, при этом максимальный ток, потребляемый датчиком, не превышает 15 мА. Система может работать с любыми электропроводящими материалами (медь, алюминий, сталь, бронза и т.д.). В зависимости от материала ответчика изменяется ее градуировочная характеристика. Максимальное значение дополнительной погрешности от воздействия температуры окружающей среды составило 5,67 % в диапазоне от минус 50 до +60 °С.

Список литературы

1. Гаврилов В. А., Трофимов А. А. Система измерения линейных перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 44–46.
2. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18.
3. Дмитриенко А. Г., Нефедьев Д. И., Трофимов А. А. Вихретоковые чувствительные элементы для бесконтактных датчиков перемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 1. С. 4–9.
4. Ураксеев М. А., Кагарманов В. Н. Распределение магнитных потоков в электромагнитных датчиках перемещений // Датчики и системы. 2003. № 1. С. 33–36.
5. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : монография. Пенза, 2009.
6. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.

References

1. Gavrilov V.A., Trofimov A.A. A system for measuring linear displacements. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):44–46. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of developing unified sensor designs for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;(10):18. (In Russ.)
3. Dmitrienko A.G., Nefed'ev D.I., Trofimov A.A. Eddy current sensing elements for contactless motion sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2012;(1):4–9. (In Russ.)

4. Urakseev M.A., Kagarmanov V.N. Distribution of magnetic fluxes in electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2003;(1):33–36. (In Russ.)
5. Trofimov A.A., Trofimov A.N. *Vzaimoinduktivnye datchiki peremeshcheniy: monografiya = Mutually inductive motion sensors : monograph*. Penza, 2009. (In Russ.)
6. Trofimov A.A., Konakov N.D. Transformer displacement sensors with extended measuring range. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):8–10. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksei A. Trofimov

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

Ульяна Сергеевна Чихрина

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chikhulyana@yandex.ru

Ulyana S. Chikhrina

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Валентинович Попченков

доцент кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: popchenkov79@mail.ru

Dmitry V. Popchenkov

Associate professor of the sub-department
of information and measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дарья Александровна Гулиева

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Darya A. Gulieva

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 11.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 07.03.2025

Принята к публикации / Accepted 24.03.2025