

УДК 531.714.2

*А. А. Трофимов, Д. А. Рязанцев***ДАТЧИК ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ
ИЗМЕРЕНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ***A. A. Trofimov, D. A. Ryazantsev***THE SENSOR OF LINEAR POSITIONS FOR ROCKET
AND SPACE TECHNOLOGY**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Предметом исследования является датчик линейных перемещений для систем измерения ракетно-космической техники. Целью работы является разработка и исследование датчика линейных перемещений, работающего в условиях открытого космоса. *Материалы и методы.* Разработаны структурная схема и конструкция датчика линейных перемещений на основе линейно-регулируемого дифференциального трансформатора, изготовлен датчик линейных перемещений, представлены технические характеристики разработанного датчика. *Результаты.* Выделены основные конструктивные особенности датчика, влияющие на стойкость к внешним воздействующим факторам. Представлена градуировочная характеристика и значения дополнительных погрешностей датчика линейных перемещений. *Выводы.* Полученные технические и эксплуатационные характеристики разработанного датчика линейных перемещений соответствуют требованиям, предъявляемым к датчикам, работающим в условиях открытого космоса.

A b s t r a c t. *Background.* The research subject is a linear displacement transducer for measuring systems of rocket-and-space equipment. The purpose is engineering and research of the linear displacement transducer that operates in openspace. *Materials and methods.* We worked out a block scheme and a linear displacement transducer configuration on the basis of linear variable differential transformer, made a linear displacement transducer LDT, and provided specification of the engineered sensor. *Results.* The research describes LDT design features that stability of the device against to environmental conditions, introduces gauge line and accuracy of the LDT. *Conclusions.* The obtained specification and operating characteristics of the engineered linear displacement transducer satisfy the requirements set for the sensors operating in the open space.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик перемещений, линейно-регулируемый трансформатор, элемент чувствительный.

К e y w o r d s: motion sensor, electromagnetic linear displacement transducers, sensitive element.

Введение

В космической отрасли решающее значение имеет автоматизация систем контроля и управления различными процессами сбора и получения информации [1]. Одной из составляющих таких систем являются датчики положений объектов, в частности, датчики линейных перемещений (ДЛП). ДЛП для высокоресурсных космических аппаратов (КА) должен обладать следующими характеристиками:

– высокой степенью защиты от воздействия таких факторов космического пространства, как ионизирующее излучение естественного радиационного пояса земли, воздействие протонов и тяжелых заряженных частиц;

– стойкостью к внешним воздействующим факторам (ВВФ), возникающим при запуске и эксплуатации на КА (вибрационным нагрузкам, акустическим шумам, механическим ударам, пониженному атмосферному давлению, повышенной и пониженной температуре, линейному ускорению);

– ресурсом работы датчика, соответствующим сроку активного существования КА;

– минимальными массой и размерами по причине дороговизны вывода на орбиту каждого килограмма вещества.

Основная часть

Разработка ДЛП для систем контроля и управления перемещениями механизмов спутниковых и КА подразумевает предварительный анализ методов измерения перемещения, сравнение технических характеристик имеющихся аналогов и, как итог, выбор конструкции и основных технических решений разрабатываемого датчика.

По требованиям заказчика ДЛП должен иметь следующие характеристики: диапазон измерения 0–5 мм, срок службы 21 год, погрешность не более 1,5 %. ДЛП также должен быть стоек к воздействию температур от минус 50 до плюс 50 °С, вибрации с величиной виброускорения 30g в диапазоне частот от 5 до 2000 Гц и единичного механического удара амплитудой 300g и длительностью 1–3 мс.

Выбор метода измерения перемещения является решающим фактором в определении характеристик разрабатываемого датчика.

Для измерения перемещений в АО «НИИФИ» разработан ряд потенциометрических, электромагнитных [2], линейно-регулируемых дифференциальных трансформаторных, амплитудно-фазовых трансформаторных датчиков.

Датчики положения и перемещений часто реализуются на основе линейных или поворотных потенциометров.

АО «НИИФИ» широко использует потенциометрические датчики для измерения перемещений в диапазоне до 700 мм. Потенциометрические датчики разработки АО «НИИФИ» имеют массу 0,18 и 0,3 кг, основную погрешность не более 2 %, рабочий диапазон температур ± 60 °С, что отвечает требованиям к разрабатываемому датчику по приведенным характеристикам. К недостаткам потенциометрических датчиков следует отнести значительную механическую нагрузку (трение), необходимость обеспечения механического контакта с объектом, низкое быстродействие, срок службы до 12 лет, что не позволяет использовать их в высокоресурсных КА со сроком службы 21 год.

Линейно-регулируемые дифференциальные трансформаторные (ЛРДТ) датчики используют принцип электромагнитной индукции для определения перемещений [3]. При перемещении объекта между двумя катушками изменяется магнитный поток, который преобразуется в выходное напряжение. Датчики перемещений разработки АО «НИИФИ» на основе этого метода имеют как аналоговый, так и цифровой выходной сигнал, массу, сравнимую с массой потенциометрических датчиков, основную погрешность 1–1,5 %, рабочий диапазон температур ± 50 °С, а также высокую надежность в течение всего срока службы, равного 10 годам.

Анализ характеристик растровых электромагнитных и амплитудно-фазовых трансформаторных датчиков [4] показал высокие метрологические характеристики этих датчиков: основная погрешность 0,1–1 %, в то время как масса таких датчиков начинается от 0,55 кг.

Учитывая требования к разрабатываемому датчику, наиболее перспективным направлением является ЛРДТ-метод измерения перемещения. Трансформаторный метод измерения линейных перемещений достаточно хорошо изучен [5] и широко применяется в измерении перемещений из-за своей надежности и прочности конструкции. Отличительной особенностью датчиков положения на основе ЛРДТ-метода является то, что шток не входит в контакт с другими электрическими компонентами устройства [6], как это сделано, например, в потенциометрических датчиках, и поэтому датчик имеет высокую надежность и большой срок службы.

Датчики перемещения на основе ЛРДТ-метода хорошо зарекомендовали себя в изделиях ракетно-космической техники (РКТ), также такие датчики подходят для применения в жестких промышленных средах и в долгосрочных циклах [7, 8].

Линейно-регулируемый дифференциальный трансформатор – это трансформатор с механически управляемым сердечником. На его первичную обмотку подается синусоидальное напряжение постоянной амплитуды. Применение синусоидального сигнала позволяет избавиться от паразитных гармоник. На вторичных обмотках индуцируется переменное напряжение. В цилиндрическое отверстие между обмотками вставляется сердечник из ферромагнитного материала. При этом сердечник не касается обмоток. Две вторичные обмотки включены в противофазе. Когда сердечник расположен в центре трансформатора, сигналы с вторичных обмоток вычитаются, поэтому на выходе трансформатора напряжение равно нулю. Перемещение сердечника в сторону от центрального положения приводит к изменению магнитных потоков во вторичных обмотках. В результате возникшего разбаланса появляется выходное напряжение. Изменение магнитных потоков происходит за счет изменения магнитных сопротивлений пространства между катушками.

Из всего вышесказанного следует, что значение потокосцепления определяется осевым положением сердечника. В линейной рабочей области в стационарном режиме амплитуда индуцированного сигнала пропорциональна смещению сердечника, поэтому выходное напряжение может служить мерой перемещения. Выходной сигнал ЛРДТ не только определяет значение перемещения, но и его направление. Направление перемещения определяется фазовым углом между опорным и выходным напряжением.

На основе метода ЛРДТ АО «НИИФИ» разработан датчик линейных перемещений ДЛП, структурная схема которого представлена на рис. 1.

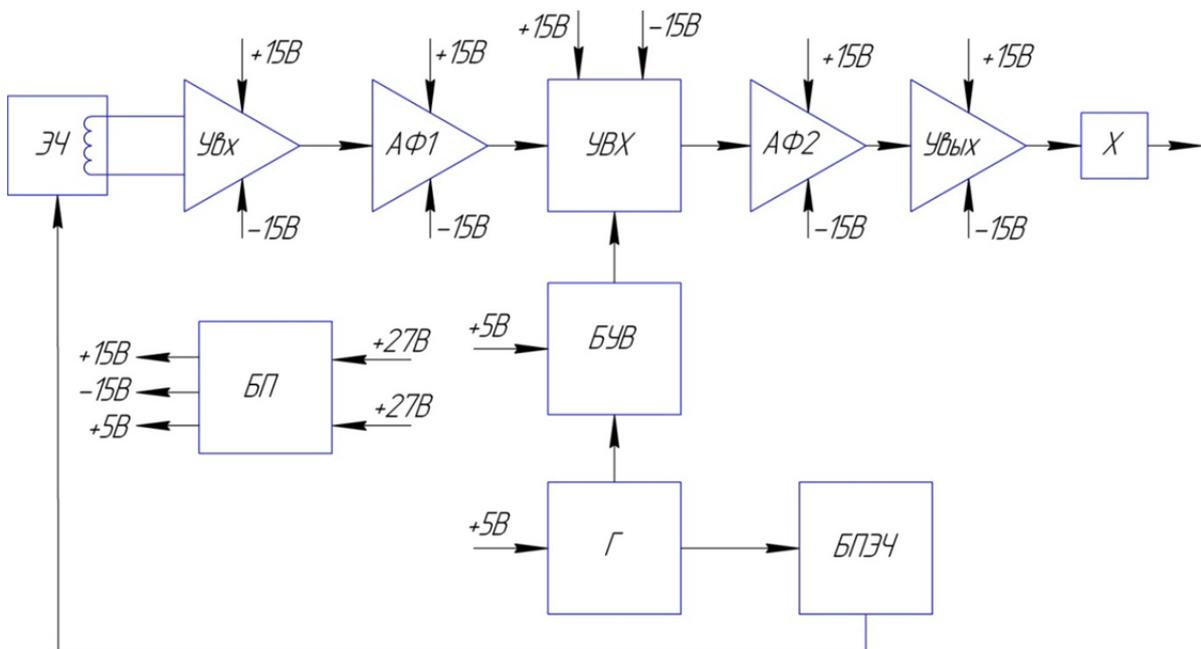


Рис. 1. Структурная схема функционирования датчика:

ЭЧ – элемент чувствительный; Увх – входной усилитель; АФ1, АФ2 – активные фильтры; УВХ – устройство выборки-хранения; БУВ – блок управления УВХ; Г – генератор; БПЭЧ – блок питания элемента чувствительного; БП – блок питания; Увых – выходной усилитель; Х – соединитель

Блок питания (БП) формирует напряжения ± 5 В; ± 15 В, требуемые для питания электроаппаратов (ЭА), входящих в состав функциональных блоков датчика.

Генератор (Г) генерирует прямоугольные импульсы с амплитудой 5 В и частотой 5 кГц. Он задает переменное напряжение на первичной обмотке индуктивности элемента чувствительного ЭЧ через транзисторный каскад блока питания ЭЧ. На вторичной обмотке в зависимости от положения штока наводится ЭДС индукции от первичной обмотки. ЭДС индукции

на вторичной обмотке в зависимости от положения штока может быть положительной, отрицательной и нулевой.

Сигнал с вторичной обмотки ЭЧ поступает на входной усилитель (Увх), который усиливает сигнал до уровня, требуемого для дальнейшей обработки. Далее активный фильтр (АФ1) пропускает частотный спектр сигнала ниже некоторой частоты (частоты среза), уменьшает амплитуду сигнала выше частоты среза и реализует положительный коэффициент усиления.

Сигнал с АФ1 поступает на устройство выборки и хранения (УВХ), которое осуществляет выборку и передачу сигнала с ЭЧ с частотой, задаваемой блоком управления УВХ (БУВ), который синхронизирует фазу сигнала с генератора и фазу сигнала, полученного с ЭЧ, для исключения возможности приема сигнала в противофазе.

Для подавления нежелательных частот на выходе УВХ стоит АФ2. Выходной сигнал с АФ2 требуется усилить до нужного уровня, что осуществляет выходной усилитель (Увых). Таким образом, на выходе датчика появляется аналоговый сигнал напряжения 0–5 В.

Разработанный ДЛП имеет моноблочную конструкцию. Конструктивно датчик линейных перемещений, представленный на рис. 2, состоит из элемента чувствительного 3, кожуха 2, электронных схем 4, штока 1, корпуса 5, соединителя 6.

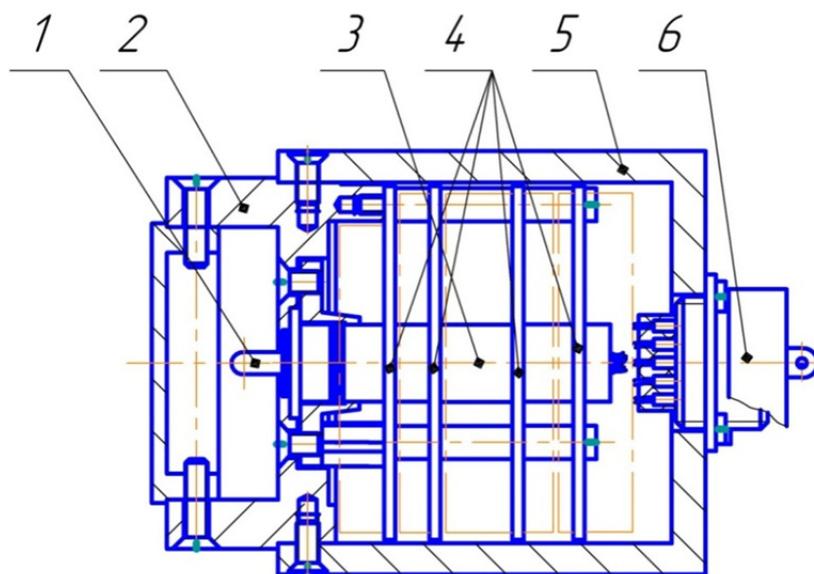


Рис. 2. Конструкция ДЛП

Элемент чувствительный датчика включает в себя: корпус; подвижный сердечник (шток); обмотки первичную и вторичную. Вторичная обмотка выполнена из двух секций одинаковой длины, встречно включенных и намотанных на полиамидный каркас.

Шток ЭЧ состоит из двух частей: одна часть выполнена из магнитного, другая – из немагнитного материала. Так как перемещение сердечника в ЭЧ сопровождается обязательным трением его поверхностей, для условий вакуума и с целью минимизации трения и, следовательно, увеличения срока службы ЭЧ втулки, на которые опирается сердечник, были сделаны из полиамида.

Для обеспечения оптимальных прочностных, габаритно-массовых характеристик и защиты от внешних воздействующих факторов (ВВФ) корпус и кожух датчика выполнены из титанового сплава. Толщина корпуса выбрана таким образом, чтобы защитить электронные компоненты датчика от радиационного излучения и снизить его габаритно-массовые параметры.

Дифференциальное включение обмоток позволяет исключить погрешности от ВВФ, таких как температура и давление. Математическая модель взаимоиндуктивных датчиков перемещений представлена в [9].

На основе разработанной конструкции были изготовлены опытные образцы датчика ДЛП и проведены испытания. По результатам испытаний были определены значения погрешностей, которые приведены ниже.

В изготовленных образцах дополнительная погрешность от температуры составила $\pm 1,5\%$, а от пониженного давления $\pm 2,5\%$. Дополнительная погрешность от пониженного давления превышает погрешности от температуры, так как в условиях пониженного давления $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па теплоотвод осуществляется через корпус изделия [10], поэтому происходит нагрев ЭРИ, который определяет значение дополнительной погрешности от пониженного давления.

Основная приведенная погрешность ДЛП составила $0,11\%$. Градуировочная характеристика ДЛП представлена на рис. 3.

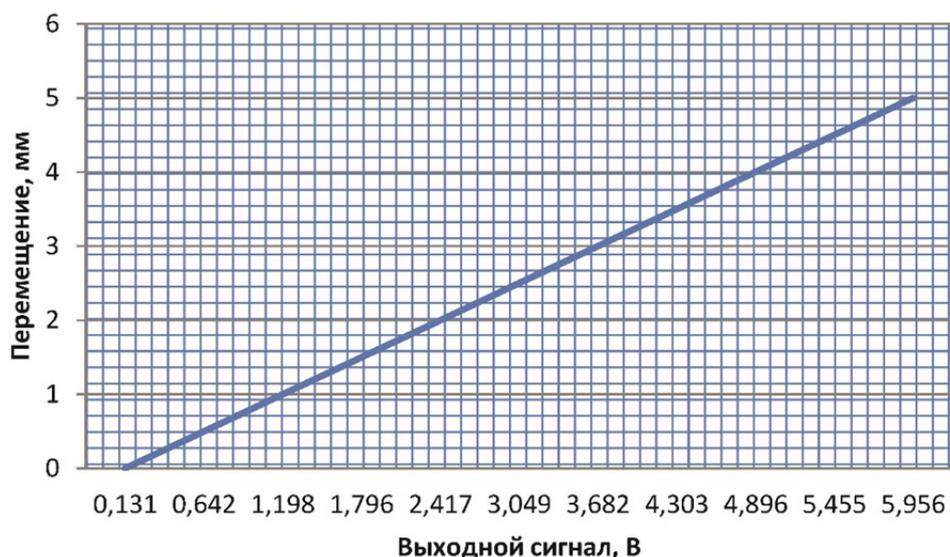


Рис. 3. Градуировочная характеристика ДЛП

Заключение

Разработанный датчик для систем ракетно-космической техники, основанный на принципе линейно-регулируемого дифференциального трансформатора, прошел предварительные испытания, в результате которых были подтверждены основные технические характеристики датчика, представленные в табл. 1. Таким образом, разработанный в АО «НИИФИ» датчик линейных перемещений соответствует требованиям, предъявляемым к датчикам, работающим в условиях открытого космоса.

Таблица 1

Основные технические характеристики ДЛП

Наименование характеристики и единицы измерения	Значения характеристик
	ДЛП
1. Диапазон измерений, мм	от 0 до 5
2. Выходной сигнал	аналоговый
3. Дополнительная погрешность от воздействия температуры, %	$\pm 1,5$
4. Дополнительная погрешность от воздействия пониженного давления, %	$\pm 2,5$
5. Наличие электроники	есть
6. Диапазон рабочих температур, °С	от минус 50 до плюс 50
7. Вибрация: величина виброускорений, g диапазон частот, Гц	30 от 5 до 2000
8. Единичный механический удар, g длительностью, мс	300 1–3
9. Основная приведенная погрешность, %	0,11
10. Масса ЧЭ, кг, не более	0,3
11. Срок службы, лет	21

Список литературы

1. Гаврилов, В. А. Система измерения линейных перемещений / В. А. Гаврилов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 44–46.
2. Дмитриенко, А. Г. Электромагнитный датчик линейных перемещений с торцевым сопряжением растров / А. Г. Дмитриенко, Д. И. Нефедьев, А. А. Трофимов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 4–10.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. Ю. А. Заболотной ; под ред. Е. Л. Свинцова. – М. : Техносфера, 2005. – 588 с.
4. Трофимов, А. Н. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений / А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – 2009. – № 6. – С. 24–27.
5. Агейкин, Д. И. Датчики контроля и регулирования / Д. И. Агейкин, Е. Н. Костин, Н. Н. Кузнецова. – М. : Машиностроение, 1965. – 928 с.
6. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики. Справочник : пер. с англ. / Р. Г. Джексон ; под ред. В. В. Лучина. – М. : Техносфера, 2007. – 280 с.
7. Шидлович, Л. Х. Дифференциальные трансформаторы и их применение / Л. Х. Шидлович. – М., 1966. – С. 78–86.
8. 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.
9. 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.
10. Трофимов, А. А. Результаты разработки тепловой модели датчика линейных перемещений / А. А. Трофимов, Д. А. Скаморин, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2007. – Т. 1. – С. 371–373.

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)

Рязанцев Дмитрий Андреевич

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Ryazantsev Dmitriy Andreevich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 531.714.2

Трофимов, А. А.

Датчик линейных перемещений для систем измерения ракетно-космической техники / А. А. Трофимов, Д. А. Рязанцев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 52–57.