

**В.В. РЫМША, И.Н. РАДИМОВ, М.В. ГУЛЫЙ,
И.П. БАБИЧ, А.А. КАЛИНИЧЕНКО, И.С. ХОЛОШНЯ**

РАЗРАБОТКА ОТРЕЗКА СЕРИИ ДАТЧИКОВ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Наведено результати розробки та практичної реалізації відрізка серії індуктивних давачів лінійного переміщення для систем гідроприводу аерокосмічної галузі. На основі результатів проектних досліджень давачів обрано варіанти розподілу їх вторинних обмоток, а також розраховано характеристики таких давачів. Результати моделювання порівняно з результатами експериментальних досліджень.

Ключові слова: давач лінійного переміщення, тривимірне магнітне поле, крутизна вихідної характеристики, нелінійність вихідної характеристики.

Представлены результаты разработки и практической реализации отрезка серии индуктивных датчиков линейного перемещения для систем гидропривода аэрокосмической отрасли. На основе результатов проектных исследований датчиков выбраны варианты распределения их вторичных обмоток, а также рассчитаны характеристики таких датчиков. Результаты моделирования сопоставлены с результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: датчик линейного перемещения, трехмерное магнитное поле, метод конечных элементов, крутизна выходной характеристики, нелинейность выходной характеристики.

Purpose. Presentation of the results of development and practical implementation of a segment of a series of inductive linear displacement sensors (linear variable differential transformer LVDT) for hydraulics systems of the aerospace industry. **Methodology.** Calculations of three-dimensional magnetic fields are carried out with the finite elements method. The solution of the differential equations connecting the input voltage, current, magnetic flux and EMF of the windings is performed by numerical integration. **Results.** As a result of calculations, the sensor configuration, embodied in the models DLP-17, DLP-30, DLP-50 and DLP-80, was obtained. Tests of the prototype models of the all sensors confirmed the principle workability of the adopted design and design solutions in its development. **Originality.** The use of three-dimensional field models allows to make an accurate calculation of the sensor's magnetic field, taking into account the edge effects on its characteristics. As a result of the calculations, a variants of the configurations of the secondary windings was chosen, which made it possible to increase the accuracy of the sensors. **Practical value.** The developed sensors DLP-17, DLP-30, DLP-50 and DLP-80 in its technical characteristics are correspond to the design specification.

Keywords: linear displacement sensor, three-dimensional magnetic field, steepness of the output characteristic, nonlinearity of the output characteristic.

Введение. Для авиакосмической отрасли Украины одной из важных задач является необходимость разработки и освоения производства отечественных датчиков линейного перемещения (ДЛП) с различной длиной рабочего хода подвижной части, которые применяются в системах обратной связи для контроля перемещения штоков приводных механизмов. К ДЛП предъявляются следующие требования: точность измерения линейного перемещения, высокая надежность при эксплуатации, минимальные массо-габаритные показатели, пониженная чувствительность выходных характеристик к изменению условий окружающей среды.

В [1] представлены результаты моделирования и макетирования одного из типов таких датчиков, имеющего рабочий ход подвижной части от нулевого положения в обе стороны 80 мм (ДЛП-80). Полученные при испытаниях положительные результаты позволили перейти к теоретической проработке и практической реализации датчиков, имеющих рабочий ход подвижной части 17 мм (ДЛП-17), 30 мм (ДЛП-30), 50 мм (ДЛП-50), 80 мм (ДЛП-80).

В настоящей статье представлены результаты, полученные в рамках научно-технического сотрудничества между Государственным предприятием «КБ «Южное» (г. Днепр) и ООО «Электротехника – Новые технологии» (г. Одесса) при создании отрезка серии датчиков ДЛП.

Объект исследования. В рассматриваемом отрезке серии все ДЛП выполнены в виде бесконтактного индуктивного преобразователя дифференциально-трансформаторного типа, имеющего относи-

тельно простую конструкцию, сочетание хороших динамических свойств с возможностью передачи сигнала на сравнительно большое расстояние с минимальными искажениями и потерями [2,3].

Конструктивно датчик состоит из следующих основных сборочных единиц: корпуса, катушки и подвижной части (рис. 1).

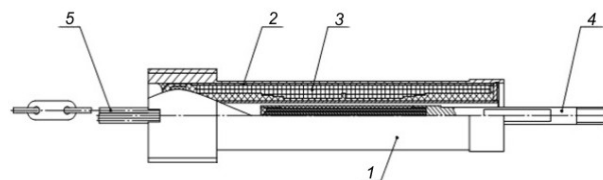


Рис. 1 – Конструктивная схема датчика: 1 – корпус; 2 – магнитопровод; 3 – катушка; 4 – подвижная часть; 5 – выводы

Корпус 1 представляет собой тонкостенный цилиндр с магнитопроводом статора 2. Катушка 3 состоит из изоляционного каркаса и размещенных на нем обмотки возбуждения ОВ (первичной) и двух измерительных (вторичных) обмоток РО1 и РО2. Первичная обмотка питается от источника переменного тока синусоидальной формы напряжением $(6 \pm 0,5)$ В частотой (2000 ± 200) Гц. Измерительные обмотки включены последовательно-встречно, намотаны над обмоткой возбуждения и смещены вдоль оси датчика друг относительно друга. Подвижная часть (якорь) 4 датчика состоит из штока и магнитопроводящего сердечника, размещенного во внутренней полости немагнитной трубки из нержавеющей стали. Якорь датчика соединяется с рабочим органом агрегата,

перемещение которого измеряется.

Напряжение на обмотках PO1 и PO2 зависит от положения якоря ДЛП. Под «нулевым» понимается такое положение якоря, при котором выходные напряжения на обмотках PO1 и PO2 одинаковы.

Для иллюстрации специфики электромагнитных процессов, возникающих при смещении якоря, на рис. 2 приведены картины двумерного магнитного поля ДЛП.

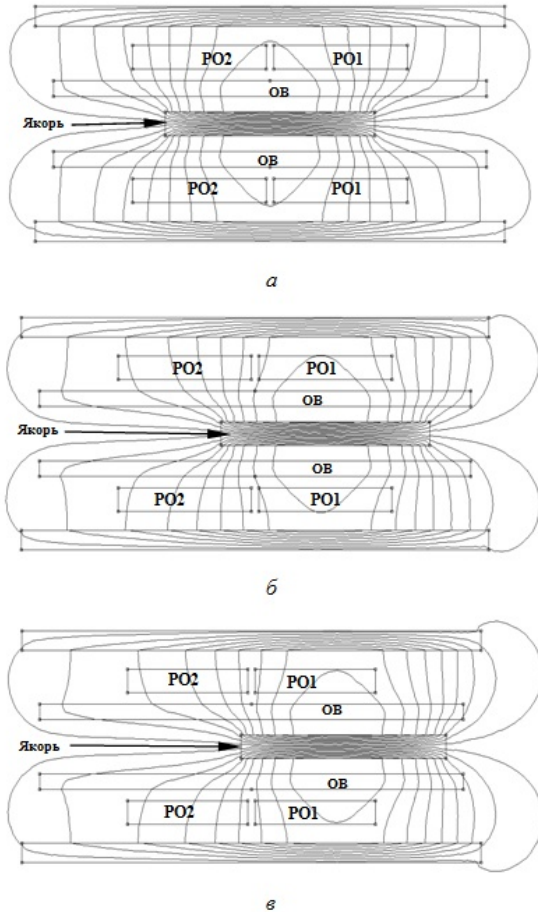


Рис. 2 – Картины двумерного магнитного поля ДЛП: а – при «нулевом» положении якоря; б – при смещении якоря вправо; в – дальнейшем смещении якоря вправо

На рис. 2, а показано распределение магнитного поля при «нулевом» положении якоря ДЛП. Из картины магнитного поля следует, что потокосцепления обмоток PO1 и PO2 одинаковы. При смещении якоря вправо имеет место максимальное потокосцепление обмотки PO2 (рис. 2, б), а при дальнейшем смещении якоря вправо потокосцепление обмотки PO2 уменьшается (рис. 2, в). В то же время потокосцепление обмотки PO1 при смещении якоря вправо от «нулевого» положения уменьшается непрерывно. Изменение напряжения на обмотках PO1 U_{PO1} и PO2 U_{PO2} соответствует изменению амплитуд потокосцепления с этими обмотками и данные зависимости имеют явно выраженную нелинейность. Характерный вид зависимостей выходных напряжений вторичных обмоток от перемещения якоря по продольной координате x представлен на рис. 3.

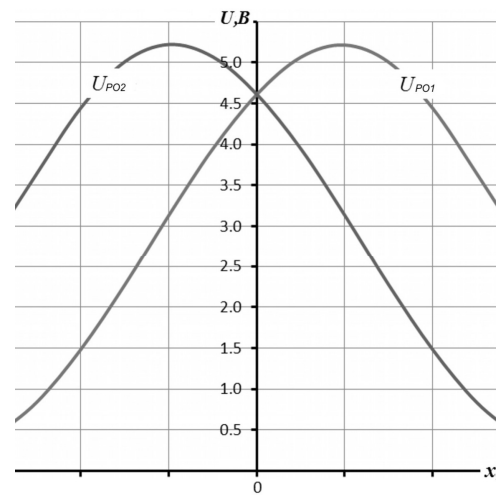


Рис. 3. Зависимости напряжения на вторичных обмотках датчика от величины перемещения подвижной части

Технические требования. Основные технические требования, предъявляемые к датчикам при питании от источника переменного тока синусоидальной формы напряжением $(6 \pm 0,5)$ В частотой (2000 ± 200) Гц и сопротивлении нагрузки $(20,0 \pm 0,1)$ кОм, сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические требования к ДЛП

Наименование	ДЛП-17	ДЛП-30	ДЛП-50	ДЛП-80
Средняя крутизна выходной характеристики, 1/мм	$0,0402 \pm 0,0004$	$0,02581 \pm 0,00025$	$0,014 \pm 0,00014$	$0,00968 \pm 0,0001$
Нелинейность выходной характеристики, % (не более)	0,5	0,5	0,5	0,5
Потребляемый ток, А (не более)	0,025	0,025	0,025	0,025
Габаритные размеры датчика:				
- длина, мм (не более)	96	133	230	325
- диаметр, мм (не более)	17	17	17	17
Рабочий ход подвижной части, мм	17	30	50	80

Основные расчетные зависимости. В рассматриваемых датчиках дифференциально-трансформаторного типа используется инвариантная схема представления выходной характеристики [2, 3], поскольку такое представление значительно уменьшает эксплуатационные погрешности измерения перемещения (погрешности от колебания напряжения питания, частоты, температуры, давления, механических перегрузок).

Выходной характеристикой датчика является зависимость отношения разности выходных напряжений вторичных обмоток к их сумме от i -го положения якоря при его перемещении:

$$\gamma_i = \frac{U_{PO1i} - U_{PO2i}}{U_{PO1i} + U_{PO2i}}, \quad (1)$$

где U_{PO1i} – выходное напряжение измерительной обмотки PO1; U_{PO2i} – выходное напряжение измерительной обмотки PO2.

Здесь же отметим, что в (1) как числитель, так и знаменатель, являются нелинейными функциями от перемещения якоря (рис. 4).

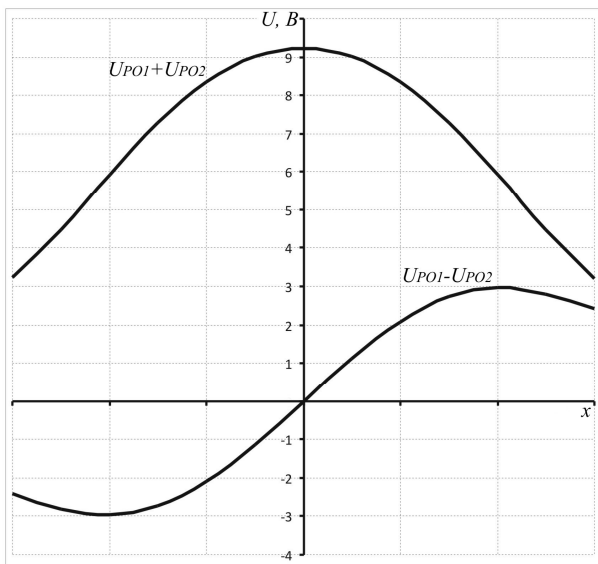


Рис. 4 – Зависимости суммы и разности выходных напряжений рабочих обмоток датчика от перемещения якоря

Однако, инвариантность, заложенная в (1), позволяет получить выходную характеристику, близкую к линейной.

Нелинейность выходной характеристики рассчитывается как:

$$n = \frac{\left(\frac{\gamma_i}{K}\right) - x_i}{x_{\max}}, \quad (2)$$

где γ_i – текущее значение выходной характеристики; K – крутизна выходной характеристики, мм^{-1} ; x_i – текущее значение перемещения якоря, мм; x_{\max} – максимальное перемещение якоря, мм.

Крутизна выходной характеристики определяется по формуле:

$$K = \frac{\sum \gamma_i}{\sum x_i}. \quad (3)$$

Постановка задачи. Основной задачей при создании датчика является поиск сочетания таких технологически реализуемых геометрических размеров магнитопровода датчика и обмоточных данных катушек ОВ, PO1 и PO2, при которых выходная характеристика датчика максимально приближалась бы к линейной функции.

В [1] показано, что учет реальной геометрии датчика, разомкнутости его магнитопровода и возникающих при этом краевых эффектов происходит путем решения задачи расчета магнитного поля методом конечных элементов в трехмерной постановке.

Моделирование датчиков. При формировании расчетных моделей датчиков было принято, что ОВ выполнена по всей длине магнитопровода.

Таким образом, задача моделирования сводится к поиску варианта конфигурации и размещения вторичных обмоток датчиков, удовлетворяющего предъявляемым к ним техническим требованиям. Для решения данной задачи были проведены многовариантные проектные расчеты датчиков при различной конфигурации и геометрических размерах их вторичных обмоток.

Результаты проектных исследований позволили остановиться на следующих вариантах распределения вторичных обмоток (рис. 5, 6, 7, 8). На данных рисунках приняты следующие обозначения: 1 – ОВ, 2 – PO1, 3 – PO2, 4 – якорь ДЛП.

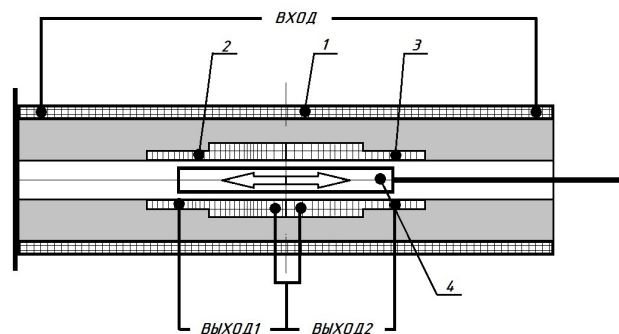


Рис. 5 – Конструктивная схема датчика ДЛП-17 с двухступенчатым распределением вторичных обмоток без перекрытия

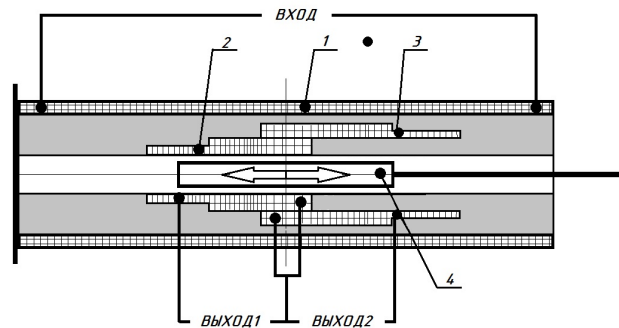


Рис. 6 – Конструктивная схема датчика ДЛП-30 с двухступенчатым распределением вторичных обмоток и их перекрытием в области нулевого положения подвижной части

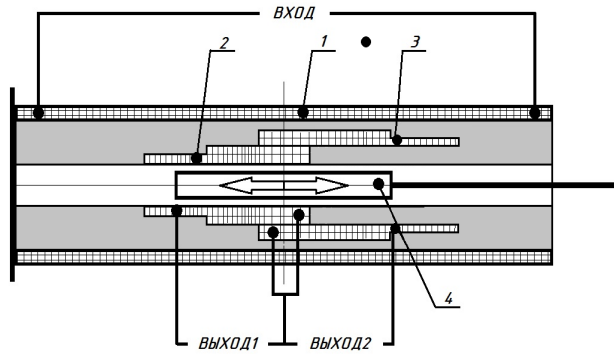


Рис. 7 – Конструктивная схема датчика ДЛП-50 с двухступенчатым распределением вторичных обмоток и их перекрытием в области нулевого положения подвижной части

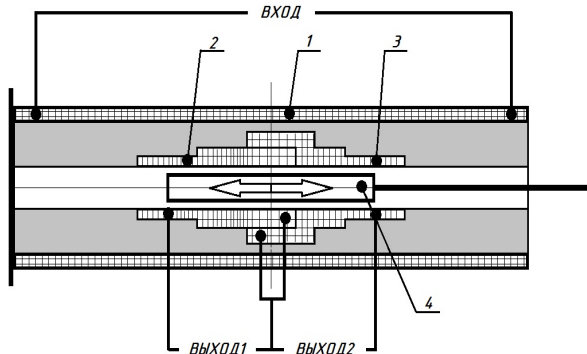


Рис. 8 – Конструктивная схема датчика ДЛП-80 с квазитрехступенчатым распределением вторичных обмоток и их перекрытием в области нулевого положения подвижной части

В результате расчетов изменяющегося во времени магнитного поля для всех исполнений датчиков были получены зависимости выходных напряжений их измерительных обмоток U_{PO1} и U_{PO2} от величины перемещения магнито-провода подвижной части, что позволило по формулам (1) – (3) рассчитать выходные характеристики датчиков, оценить крутизну и нелинейность выходных характеристик. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов ДЛП

Наименование	ДЛП-17	ДЛП-30	ДЛП-50	ДЛП-80
Средняя крутизна выходной характеристики, 1/мм	0,0405	0,025	0,0167	0,0115
Максимальная нелинейность выходной характеристики, %	0,462	0,105	0,496	0,4
Максимальное значение потребляемого тока, А	0,02	0,0212	0,008	0,0242

Для подтверждения работоспособности разработанных датчиков, возможности реализации их основных технических характеристик были изготовлены макетные образцы датчиков ДЛП-17, ДЛП-30, ДЛП-50 и ДЛП-80 (рис. 9).

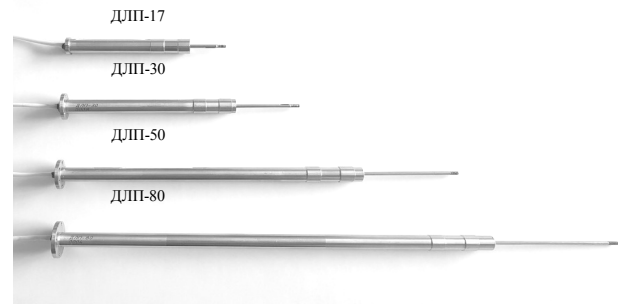


Рис. 9 – Макетные образцы датчиков

Макетирование датчиков. Для проведения испытаний датчиков был разработан стенд для автоматизации процесса снятия характеристик, обеспечивающий задание линейных перемещений с погрешностью не более 0,005 мм.

Электрическая схема стенда включает в себя (рис. 10):

- источник переменного тока синусоидальной формы с напряжением, регулируемым в пределах от 5 до 7 В, частотой (2000 ± 200) Гц и коэффициентом искажения синусоидальности кривой не более 10 %;

- преобразователь сигналов датчика, выполненный на основе микросхемы AD598JRZ [4], позволяющий экспериментально определять выходную характеристику датчика. Напряжение на выходе данной микросхемы формируется как отношение разности напряжений вторичных обмоток датчика к их сумме.

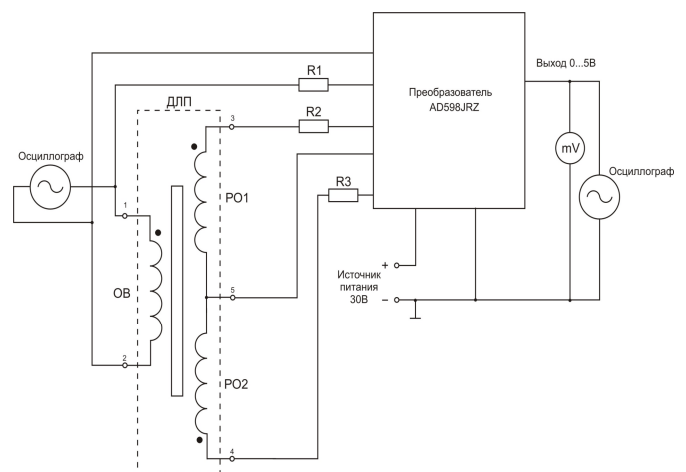


Рис. 10 - Электрическая схема стенда

В результате эксперимента для всех датчиков получено максимальное значение потребляемого тока, не превышающее заданную по ТЗ величину 0,025 А. Основные характеристики ДЛП, полученные при моделировании (м) и в результате эксперимента (э), представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Сопоставление результатов расчетов ДЛП с экспериментальными данными

Наименование	ДЛП-17		ДЛП-30		ДЛП-50		ДЛП-80	
	М	Э	М	Э	М	Э	М	Э
Средняя крутизна выходной характеристики, 1/мм	0,0405	0,0395	0,025	0,0248	0,0167	0,0165	0,0115	0,01095
Максимальная нелинейность выходной характеристики, %	0,462	0,243	0,105	0,37	0,496	0,317	0,4	0,446

Из табл. 3 следует, что результаты моделирования и макетирования достаточно близки по средней крутизне выходной характеристики датчиков. Что касается максимальной нелинейности, то здесь наблюдается отличие расчетных и экспериментальных данных. При этом максимальная нелинейность, полученная по результатам макетирования, не превышает 0,5% для всей линейки ДЛП, что соответствует техническим требованиям (см. табл. 1), предъявляемым к датчикам.

Выводы.

1. Разработан отрезок серии бесконтактных индуктивных датчиков линейного перемещения, имеющих хорошие массо-габаритные показатели и выходные характеристики. Все датчики выполнены с единым диаметром корпуса 17 мм и отличаются только длиной.

2. Датчики разработанного отрезка серии имеют высокую точность измерения с нелинейностью выходной характеристики, не превышающей 0,5%.

Список литературы

1. Рымша В.В. Разработка и исследование датчика линейного перемещения / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулий, И.П. Бабич, А.А. Калиниченко, И.С. Холошня // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2017. № 1 (1223). – С. 83–89.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка відрізка серії давачів лінійного переміщення / В.В. Рымша, І.М. Радимов, М.В. Гулий, І.П. Бабіч, О.А. Калініченко, І.С. Холошня // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 62-67. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2409-9295.

Разработка отрезка серии датчиков линейного перемещения / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулий, И.П. Бабич, А.А. Калиниченко, И.С. Холошня // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 62-67. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2409-9295.

Development of a segment of a series of linear displacement sensors / V.V. Rymsha, I.N. Radimov, M.V. Gulyy, I.P. Babich, A.A. Kalinichenko, I.S. Kholoshnia // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 62-67. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2409-9295.

2. Симон Д.А. Исследование влияния транспозиции на выходные характеристики малогабаритного индукционного линейного датчика дифференциально - трансформаторного типа / Д.А. Симон, О.П. Муравлев // Современные техника и технологии : сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск : Изд-во ТПУ. – 2014. – Т. 1. – С. 269–270.
3. Симон Д.А. Исследование выходных характеристик малогабаритного индукционного линейного датчика дифференциально-трансформаторного типа / Д.А. Симон, О.П. Муравлев // Современные техника и технологии. Сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2013. – Т. 1. – С. 347–348.
4. LVDT signal conditioner product data sheet. Rev. A. - ANALOG DEVICES, 1989. – Режим доступа : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD598.pdf> – Дата звертання : 21 лютого 2019.

References (transliterated)

1. Rymsha V.V., Radimov I.N., Gulyy M.V., Babich I.P., Kalinichenko A.A., Demenko N.P. Razrabotka i issledovanie datchika lineynogo peremecheniya [Development and investigation of the linear displacement sensor] *Bulletin of NTU KhPI. Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, 2017, no 1 (1223), pp. 83–89.
2. Simon D.A., Issledovanie vliyaniya traspozitsiyi na vihodnyye harakteristiki malogabaritnoho inductionnoho lineynogo datchika differencialno-transformatornogo tipa [Study of transfer characteristics on the output characteristics of a small inductive linear sensor of a differential-transformer type]. *Sovremenniyeh tehnika i technology : sbornik trudov XX megdunarodnoy nauchno-technicheskoy konferencyy studentov, aspirantov i molodyh uchennyh* [Modern techniques and technologies: a collection of works of the XXth international scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists]. Tomsk, TPU Publ., 2010, vol. 2, pp. 269–270.
3. Simon D.A., [Examination of output characteristics of a small-size inductive linear sensor of a differential-transformer type]. *Sovremenniyeh tehnika i technology : sbornik trudov XX megdunarodnoy nauchno-technicheskoy konferencyy studentov, aspirantov i molodyh uchennyh* [Modern technology and technology. Collection of proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference of students, PhD students and young scientists]. Tomsk, TPU Publ., 2013, vol. 1, pp. 347–348.
4. LVDT signal conditioner product data sheet. Rev. A. – ANALOG DEVICES, 1989. – Avialbe at : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD598.pdf> (accessed 21.02.2019)

Поступила (received) 10.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Римша Віталій Вікторович, доктор технічних наук, професор, ТОВ «Електротехніка – Нові технології», заступник директора, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: rimsha61@gmail.com.

Рымша Виталий Викторович, доктор технических наук, профессор, ООО «Электротехника – Новые технологии», заместитель директора, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: rimsha61@gmail.com.

Rymsha Vitaly Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, «Electrotechnika - New technology» LTD, Deputy Director, tel. +38(048)738-58-55; e-mail: rimsha61@gmail.com.

Радимов Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, ТОВ «Електротехніка – Нові технології», засновник, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: igor.radimov@gmail.com.

Радимов Игорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ООО «Электротехника – Новые технологии», учредитель, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: igor.radimov@gmail.com.

Radimov Igor Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, associate professor, «Electrotechnika - New technology» LTD, founder, tel. +38(048)738-58-55; e-mail: igor.radimov@gmail.com.

Гулий Михайло Вікторович, кандидат технічних наук, ТОВ «Електротехніка – Нові технології», головний електронік, тел. (048)738-58-55, e-mail: ukrainemotors@ukr.net.

Гулый Михаил Викторович, кандидат технических наук, ООО «Электротехника - Новые технологии», главный электроник, тел. (048)738-58-55, e-mail: ukrainemotors@ukr.net.

Gulyu Michail Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, “Electrotechnika - New technology” LTD, Chief electronics, tel. +38 (048) 738-58-55, e-mail: ukrainemotors@ukr.net.

Бабіч Ігор Петрович, ДП «КБ «Південне», Головний конструктор та начальник конструкторського бюро приводів та спеціальних систем, тел. (056)770-85-96, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Бабич Игорь Петрович, ГП «КБ «Южное», Главный конструктор и начальник конструкторского бюро приводов и специальных систем, тел. (056)770-85-96, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Babych Igor Petrovich, State Design Office “Yuzhnoye”, Chief Designer-Head of actuators, instruments and mechanisms, tel. +38 (056) 770-85-96, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Калініченко Олександр Андрійович, ДП «КБ «Південне», начальник відділу гідравлічних та електромеханічних приводів, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Калиниченко Александр Андреевич, ГП «КБ «Южное», начальник отдела гидравлических и электромеханических приводов, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Kalinichenko Aleksandr Andreevich, State Design Office “Yuzhnoye”, Head of department of the hydraulic and electromechanical drives, tel. +38 (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Холошня Іван Сергійович, ДП «КБ «Південне», начальник групи, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Холошня Иван Сергеевич, ГП «КБ «Южное», начальник группы, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Kholoshnia Ivan Sergiyovich, State Design Office “Yuzhnoye”, head of team, tel. +38 (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.