

УДК 681.586.78
doi:10.21685/2307-5538-2023-1-4

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А. А. Трофимов¹, Е. А. Фокина², Д. М. Марков³, И. Е. Смирнов⁴, В. Н. Пономарев⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ alex.t1978@mail.ru, ^{2,3,4,5} iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время эффективность развития и эксплуатации современных автоматизированных систем контроля и управления различными технологическими процессами во многом определяется технико-экономическими характеристиками первичных преобразователей информации (датчиками), среди которых важное место занимают датчики перемещений. Рассмотрена математическая модель взаимноиндуктивных датчиков линейных перемещений, лежащая в основе алгоритма расчета, разработанная на основе решения краевой электродинамической задачи взаимодействия однородного переменного поля с электромагнитным штоком. *Материалы и методы.* В работе были использованы системы уравнений Пуассона и Лапласа относительно векторного потенциала. *Результаты.* В результате проведенных исследований предложена математическая модель, которая использована при разработке трансформаторного датчика перемещений, предназначенного для измерения перемещений солнечных батарей спутникового аппарата в условиях открытого космоса.

Ключевые слова: датчик, математическая модель, перемещение, электромагнитное поле, чувствительный элемент

Для цитирования: Трофимов А. А., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е., Пономарев В. Н. Математическая модель трансформаторного датчика линейных перемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 31–37. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-4

MATHEMATICAL MODEL OF A TRANSFORMER LINEAR DISPLACEMENT SENSOR

A.A. Trofimov¹, E.A. Fokina², D.M. Markov³, I.E. Smirnov⁴, V.N. Ponomarev⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

¹ alex.t1978@mail.ru, ^{2,3,4,5} iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* At present, the efficiency of development and operation of modern automated systems of control and management of various technological processes is largely determined by the technical and economic characteristics of the primary transducers of information (sensors) among which the important place belongs to displacement sensors. The mathematical model of mutual inductive linear displacement sensors underlying the calculation algorithm developed on the basis of the solution of the boundary electrodynamic problem of interaction of a homogeneous alternating field with an electromagnetic rod is considered. *Materials and methods.* The systems of Poisson's and Laplace's equations with respect to the vector potential were used in this work. *Results.* As a result of this research, a mathematical model was proposed, which was used in the development of the TDS designed to measure the movements of the solar panels of a satellite vehicle in open space conditions.

Keywords: sensor, mathematical model, displacement, electromagnetic field, sensing element

For citation: Trofimov A.A., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E., Ponomarev V.N. Mathematical model of a transformer linear displacement sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):31–37. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-4

Совершенствование информационно-измерительных систем, систем автоматического управления и контроля во многом обусловлено достижениями в области датчиков [1–3], метрологические и надежность характеристики которых определяют достоверность контролируемой информации и обеспечивают качество работы систем в целом.

Среди большого разнообразия требований, предъявляемых к датчикам перемещений, работоспособным в жестких условиях эксплуатации, основными являются требования по

обеспечению высокой точности преобразования, длительного ресурса и метрологической надежности, под которой в соответствии понимается надежность средства измерения в части сохранения его метрологической исправности, т.е. в конечном счете сохранение метрологических характеристик в течение назначенного ресурса. Следующими требованиями, предъявляемыми при разработке датчиков перемещений, являются требования конструктивного характера. Прежде всего, это минимальные габаритные размеры и вес, простота конструкции и технологичность ее изготовления. Под технологичностью понимают оптимальный путь изготовления для данного производства.

Учитывая жесткие условия, в которых эксплуатируются датчики перемещений специального назначения, к ним предъявляются требования по устойчивости их метрологических характеристик к внешним воздействующим факторам, таким как вибрация, ударные ускорения, влажность, широкий температурный диапазон. К эксплуатационным требованиям также необходимо отнести удобство монтажа и демонтажа в системе, удобство консервации и расконсервации, ремонтпригодность.

Трансформаторные датчики перемещений (ТДП) используются для измерения линейных перемещений в диапазонах от миллиметра до нескольких десятков сантиметров [4–6]. Для измерения линейных перемещений до 5 мм может быть использован ТДП (рис. 1), в котором электромагнитное поле создается катушкой соленоидного типа 1, а подвижный элемент – шток 2 с ферромагнитной вставкой 3 перемещается внутри обмотки питания. Выходной сигнал с измерительной обмотки 4 определяется положением ферромагнитной вставки 3. Оптимизация конструкции ТДП применительно к задаче измерения линейных перемещений сводится к выбору размеров подвижного элемента, количества и координат расположения измерительных обмоток 4, реализующих выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки: преобразования перемещений в код, подавления воздействия внешних дестабилизирующих факторов и т.п.

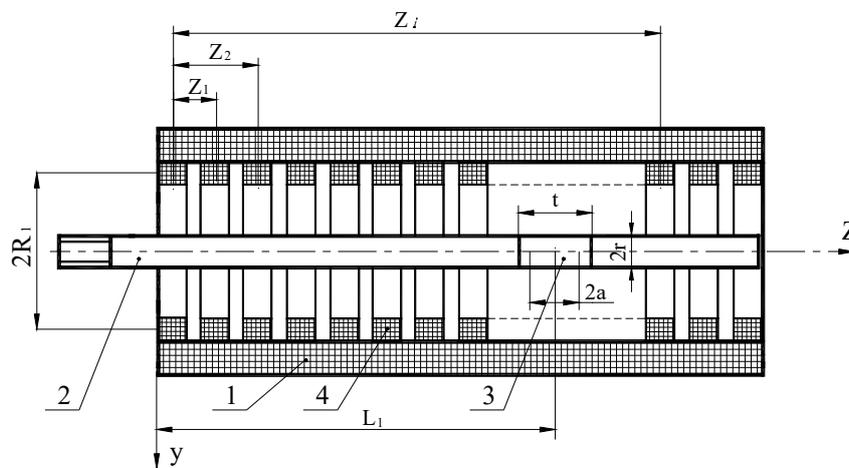


Рис. 1. Расчетная модель ТДП

Для решения поставленной задачи оптимизации конструктивного исполнения ТДП необходимо разработать математическую модель датчика, позволяющую исследовать перечисленные вопросы и допускающую варьирование основных внешних влияющих факторов в широком диапазоне их изменения.

Проведя анализ конструкции ТДП, можно сделать следующие допущения, упрощающие разработку математической модели: выходной сигнал ТДП определяется положением ферромагнитной вставки 3; подвижный элемент датчика – шток 2 – находится в однородном переменном магнитном поле $H_0 \cdot e^{j\omega t}$, направленном вдоль оси ТДП. Такое допущение правомерно, так как поле внутри возбуждающей катушки достаточно однородно, вставку 3 можно представить в виде вытянутого эллипсоида вращения (сфероида). Таким образом, математическая модель ТДП может быть разработана на основе решения краевой электродинамической задачи по расчету взаимодействия однородного переменного магнитного поля с вытянутым ферромагнитным сфероидом.

Учитывая выбранную геометрию подвижного элемента, решение поставленной задачи осуществляется в системе вытянутых сфероидальных координат ξ, η, Φ , используя при этом результаты работы [7]. Электромагнитное поле системы «ферромагнитный сфероид в однородном переменном магнитном поле» описывается системой уравнений Пуассона и Лапласа относительно векторного потенциала:

$$\Delta \overline{A}_B = -\mu_0 j_{CT}; \Delta \overline{A}_\Phi = 0, \quad (1)$$

где \overline{A}_B – векторный потенциал поля в воздухе; \overline{A}_Φ – векторный потенциал поля в ферромагнитном сфероиде; Δ – оператор Лапласа; j_{CT} – плотность стороннего тока; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

В системе вытянутых сфероидальных координат уравнение (1) запишется в следующем виде:

$$\frac{1}{a^2(\xi - \eta)} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left((\xi^2 - 1) \frac{\partial A_B}{\partial \eta} \right) \right) - \frac{A_B}{a^2(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)} = -\mu_0 j_{CT};$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left((\xi^2 - 1) \frac{\partial A_\Phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left((1 - \eta^2) \frac{\partial A_\Phi}{\partial \eta} \right) - \frac{A_\Phi}{1 - \eta^2} - \frac{A_\Phi}{\xi^2 - 1} = 0,$$

где A_B и A_Φ – Φ компоненты векторных потенциалов \overline{A}_B и \overline{A}_Φ , остальные составляющие которых равны нулю в силу осесимметричности поля; $2a$ – межфокусное расстояние сфероидальной системы координат.

Векторный потенциал в воздухе представим в виде суперпозиции

$$\overline{A}_0 + \overline{A}_p = \overline{A}_B, \quad (2)$$

где \overline{A}_0 – векторный потенциал однородного магнитного поля; \overline{A}_p – векторный потенциал поля реакции, обусловленный намагничённостью сфероида.

Функция A_0 является частным решением уравнения Пуассона и имеет следующий вид:

$$A_0 = -\frac{1}{2} \mu_0 \cdot H_0 \cdot a \cdot P_1^1(\xi) \cdot P_1^1(\eta), \quad (3)$$

где P_1^1 – присоединительный полином Лежандра 1-го рода.

Векторный потенциал реакции сфероида является общим в решении уравнения Лапласа и выбирается с учетом условия равенства нулю A_p на бесконечности

$$A_p = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot P_n^1(\xi) \cdot Q_n^1(\eta), \quad (4)$$

где Q_n^1 – присоединительные полиномы Лежандра 2-го рода; C_n – постоянные интегрирования.

Вектор-потенциал внутри ферромагнитного сфероида также удовлетворяет уравнению Лапласа и его решение строится с учетом регулярности в замкнутой области:

$$A_\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot P_n^1(\xi) \cdot P_n^1(\xi) \cdot P_n^1(\eta), \quad (5)$$

где B_n – постоянные интегрирования.

Коэффициенты C_n и B_n определим из граничных условий

$$A_\Phi = A_B; \frac{\partial(A_B \sqrt{\xi^2 + 1})}{\partial \xi} = \frac{1}{\mu_\Phi} \cdot \frac{\partial(A_\Phi \sqrt{\xi^2 + 1})}{\partial \xi}; \xi = \xi_2, \quad (6)$$

где μ_ϕ – относительная магнитная проницаемость материала вставки; ξ_2 – сфероидальная координата, определяющая поверхность вставки.

Подставляя аналитические выражения (2)–(5) в граничные условия (6), получим $C_n = B_n = 0$ для $n > 1$. Для определения коэффициентов C_1 и B_1 получим систему линейных уравнений, которая в матричной форме запишется так:

$$\begin{vmatrix} Q_1^1(\xi) & -P_1^1(\xi) \\ \mu_\phi \cdot Q_1(\xi_2) & -P_1(\xi_2) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} C_1 \\ B_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2} \mu_0 \cdot a \cdot H_0 \cdot P_1^1(\xi) \\ \frac{1}{2} \mu_0 \cdot \mu_\phi \cdot a \cdot H_0 \cdot P_1(\xi_2) \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где $P_1(\xi_2)$ и $Q_1(\xi_2)$ – полиномы Лежандра 1-го и 2-го рода.

Решая матричное уравнение (7), получим коэффициенты C_1, B_1 :

$$C_1 = \frac{1}{2} \mu_0 H_0 a (\mu_\phi - 1) \frac{P_1(\xi_2) Q_1^1(\xi_2) - P_1^1(\xi_2) Q_1(\xi_2)}{\mu_\phi P_1^1(\xi_2) Q_1(\xi_2) - P_1(\xi_2) Q_1^1(\xi_2)};$$

$$B_1 = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_\phi H_0 a \frac{P_1(\xi_2) Q_1^1(\xi_2) - P_1^1(\xi_2) Q_1(\xi_2)}{\mu_\phi P_1^1(\xi_2) Q_1(\xi_2) - P_1(\xi_2) Q_1^1(\xi_2)}.$$

Рассчитанные коэффициенты C_1 и B_1 определяют векторные потенциалы полей A_ϕ и A_ϕ в воздухе и подвижном ферромагнитном элементе.

Полученные аналитические выражения являются основой построения ТДП и позволяют построить его выходную характеристику при различных конструкциях измерительной обмотки, а также исследовать влияние размеров формы и электрофизических свойств подвижного элемента на выходные сигналы датчика.

ТДП (рис. 1) содержит в общем случае N измерительных обмоток 4 , используя которые, возможно промоделировать различные конструкции датчика. Положение этих обмоток вдоль оси z определяется координатами z_1, z_2, \dots, z_N . Первая обмотка совмещена с началом координат $z = 0$. Положение подвижного элемента на оси задается координатой L_1 , где $0 \leq L_1 \leq L$. Напряжение, вносимое в i -ю измерительную обмотку, определим следующим образом:

$$U_{\text{вн}}(L_1, R_i, z_i) = W_i \oint_{2\pi R_i} \bar{E}_p d\bar{l}, \quad \bar{E}_p = -j\omega A_p(L_1, z_i),$$

где \bar{E}_p – напряженность электрического поля реакции ферритового сфероида; W_i, z_i, R_i – число витков, координата и радиус i -й обмотки.

Используя выражение (4) для вектор-потенциала поля реакции и учитывая асимметричность поля, получим

$$U_{\text{вн}}(L_1, R_i, z_i) = -j\omega 2\pi \cdot R_i \cdot C_1 \cdot P_1^1(\eta_i) \cdot Q_1^1(\xi_i),$$

где η_i и ξ_i – сфероидальные координаты i -й измерительной обмотки.

Заменяя полиномы Лежандра $P_1^1(\eta_i)$ и $Q_1^1(\xi_i)$ их аналитическими выражениями, получим аналитическое выражение для напряжения $U_{\text{вн}}$, вносимого в i -ю измерительную обмотку ТДП:

$$U_{\text{вн}} = j\omega W_i \pi R_i \mu_0 (\mu_\phi - 1) H_0 a C_0 \xi_i \sqrt{\frac{1 - \eta_i^2}{\xi_i^2 - 1}} - j\omega W_i 0,5 \pi R_i \mu_0 (\mu_\phi - 1) H_0 a C_0 \sqrt{(\xi_i^2 - 1) \cdot (1 - \eta_i^2)} \ln \frac{\xi_i + 1}{\xi_i - 1},$$

$$\text{где } C_0 = \frac{P_1(\xi_2) \cdot P_1^1(\xi_2)}{\mu_\phi \cdot P_1^1(\xi_2) - P_1(\xi_2) \cdot Q_1^1(\xi_2)}.$$

Последнее уравнение можно представить в нормированном виде, удобном для численного анализа, через безразмерные коэффициенты, характеризующие электрические и конструктивные параметры трансформаторного датчика:

$$F_i(\alpha)_i = \gamma_i \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\lambda^2 - 1} \cdot (\mu_\phi - 1) \cdot C_0 \cdot \xi_i \cdot \sqrt{\frac{1 - \eta_i^2}{\xi_i^2 - 1}} - \frac{1}{2} \gamma_i \sqrt{\lambda^2 - 1} \cdot (\mu_\phi - 1) \cdot C_0 \sqrt{(\xi_i^2 - 1) \cdot (1 - \eta_i^2)} \ln \frac{\xi_i + 1}{\xi_i - 1}.$$

Сфероидальные координаты ξ_i , η_i рассмотрим как функции z_i и L_1 . Они вычисляются с помощью уравнений связи сфероидальной и декартовой систем координат и записываются через безразмерные переменные следующим образом:

$$\eta_i = \frac{\sqrt{2}(x_i - \alpha)^2}{\sqrt{1 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2} + \sqrt{1 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2 - 4\varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2}};$$

$$\xi_i = \frac{\sqrt{1 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2} + \sqrt{1 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2 - 4\varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2}}{\sqrt{2\varepsilon} \cdot \sqrt{\lambda^2 - 1}}.$$

В последних трех уравнениях использованы следующие обозначения:

$$\lambda = \frac{t}{2r}; \frac{a}{R} = \varepsilon \sqrt{\lambda^2 - 1}; \varepsilon = \frac{r}{R}; \alpha = \frac{L_1}{R}; x_i = \frac{z_i}{R}; H = \frac{L}{R}; \gamma_i = \frac{W_i}{W}; F(\alpha)_i = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_0};$$

$$U_0 = j\omega\pi \cdot R^2 \cdot B_0 \cdot W; \xi_2 = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}}; B_0 = \mu_0 \cdot H_0.$$

Выходной сигнал ТДП определим как отношение напряжения, наводимого в измерительных обмотках, к напряжению на компенсационной обмотке, содержащей секции, включенные последовательно-встречно и содержащие одинаковое число витков γ . Выходной сигнал данной обмотки не зависит от перемещения α , а определяется только размерами и электрофизическими свойствами подвижного элемента. Положим вначале $\gamma = 1$, тогда выходной сигнал с компенсационной обмотки равен

$$U_K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi'_i(\alpha, x_i).$$

Выходное напряжение ТДП определяется следующим образом:

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^N \gamma_i \psi_i(\alpha, x_i); \psi_i(\alpha, x_i) = \frac{\varphi_i(\alpha, x_i)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi'_n(\alpha, x_n)}. \quad (8)$$

Функции $\varphi_i(\alpha, x_i)$ и $\varphi'_n(\alpha, x_n)$ находятся в соответствии с полученными выше выражениями:

$$\varphi_i(\alpha, x_i) = -\xi_i(\alpha, x_i) \sqrt{\frac{1 - \eta_i^2(\alpha, x_i)}{\xi_i^2(\alpha, x_i) - 1}} + \frac{1}{2} \sqrt{(1 - \eta_i^2(x_i, \alpha))(\xi_i^2(\alpha, x_i) - 1)} \ln \frac{\xi_i(\alpha, x_i) + 1}{\xi_i(\alpha, x_i) - 1};$$

$$\varphi'_n(\alpha, x_n) = -\bar{\xi}_n(\alpha, x_n) \sqrt{\frac{1 - \eta_n^2(\alpha, x_n)}{\xi_n^2(\alpha, x_n) - 1}} + \frac{1}{2} \sqrt{(1 - \eta_n^2(\alpha, x_n))(\xi_n^2(\alpha, x_n) - 1)} \ln \frac{\xi_n(\alpha, x_n) + 1}{\xi_n(\alpha, x_n) - 1},$$

где

$$\bar{\xi}_n(\alpha, x_n) = \frac{\sqrt{P^2 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_n - \alpha)^2} + \sqrt{P^2 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_n - \alpha)^2 - 4\varepsilon^2(\lambda^2 - 1) \cdot (x_n - \alpha)^2}}{\sqrt{2\varepsilon} \cdot \sqrt{\lambda^2 - 1}};$$

$$\bar{\eta}_n(\alpha, x_n) = \frac{x_n - \alpha}{\xi_n(x_n, \alpha) \cdot \varepsilon \sqrt{\lambda^2 - 1}};$$

$P = \frac{R_0}{R}$ – отношение средних радиусов компенсационной и измерительной обмоток.

Сформированный выходной сигнал ТДП позволяет подавить влияние воздействия вариаций электрофизических свойств материала подвижного элемента на выходную характеристику датчика. Задавая определенные значения параметрам γ_i , можно изменять количество измерительных обмоток, их расположение и схему включения, оптимизируя таким образом вид выходной характеристики ТДП.

Разработанная математическая модель использована при разработке ТДП, предназначенного для измерения перемещений солнечных батарей спутникового аппарата в условиях открытого космоса, конструктивная схема ТДП представлена на рис. 2, а его технические характеристики в табл. 1.

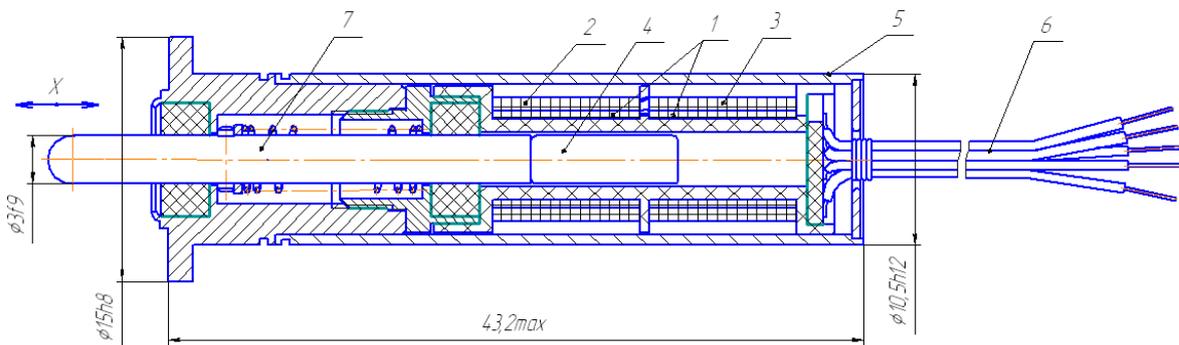


Рис. 2. Конструктивная схема чувствительного элемента ТДП: 1 – обмотка возбуждения; 2, 3 – обмотки считывания; 4 – ферромагнитная вставка; 5 – корпус; 6 – кабельная перемычка; 7 – шток

Таблица 1

Основные технические характеристики ТДП

| Параметр | Характеристика |
|-------------------------------------|---|
| Диапазон измерения перемещений | от 0 до 5 мм |
| Основная приведенная погрешность | не более 1,5 % |
| Воздействия синусоидальной вибрации | частотный диапазон от 5 до 100 Гц амплитуда ускорения до 20g |
| Диапазон рабочих температур | от -50 до +50 °С |
| Потребляемый ток | не более 125 мА |
| Выходной сигнал | от 0 до 6,3 В |
| Напряжение питания | 27 ± 2 В |

Список литературы

1. Конюхов Н. Е., Медников Ф. М., Нечаевский М. Л. Электромагнитные датчики механических величин. М. : Машиностроение, 1987. 256 с.
2. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. 174 с.
3. Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 24–27.
4. Гаврилов В. А., Трофимов А. А. Система измерения линейных перемещений // Датчики и системы. 2005 № 9. С. 44–46.
5. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.
6. Трофимов А. Н., Блинов А. В., Трофимов А. А. Унифицированный ряд высокотемпературных растровых электромагнитных датчиков перемещений // Датчики и системы. 2007. № 7. С. 24–29.
7. Морс М., Фижбах К. Методы теоретической физики. М. : Иностран. лит., 1961. 762 с.

References

1. Konyukhov N.E., Mednikov F.M., Nechaevskiy M.L. *Elektromagnitnye datchiki mekhanicheskikh velichin = Electromagnetic sensors of mechanical quantities*. Moscow: Mashinostroenie, 1987:256. (In Russ.)
2. Trofimov A.A., Trofimov A.N. *Vzaimoinduktivnye datchiki peremeshcheniy: monografiya = Mutually inductive displacement sensors : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2009:174. (In Russ.)
3. Trofimov A.N., Trofimov A.A. Expansion of the temperature range of raster transformer displacement sensors. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2009;(6):24–27. (In Russ.)
4. Gavrilov V.A., Trofimov A.A. System for measuring linear displacements. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):44–46. (In Russ.)
5. Trofimov A.A., Konakov N.D. Transformer displacement sensors with an extended measurement range. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):8–10. (In Russ.)
6. Trofimov A.N., Blinov A.V., Trofimov A.A. Unified series of high-temperature raster electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2007;(7):24–29. (In Russ.)
7. Mors M., Fizhbakh K. *Metody teoreticheskoy fiziki = Methods of theoretical physics*. Moscow: Inostr. lit., 1961:762. (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

Aleksey 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)

Екатерина Александровна Фокина

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Ekaterina A. Fokina

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Максимович Марков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Dmitry M. Markov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Иван Евгеньевич Смирнов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Ivan E. Smirnov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владислав Николаевич Пономарев

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Vladislav N. Ponomarev

Postgraduate 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 24.10.2022

Поступила после рецензирования/Revised 24.11.2022

Принята к публикации/Accepted 27.12.2022