

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ УДАРНИКА
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ**

О. А. КОЛГАНОВ*, А. В. ИЛЬИНСКИЙ, Р. А. ЕГОРОВ, А. Е. ХОШЕВ, А. В. ФЕДОРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*kolganoff2014@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается возможность применения магнитоиндукционного метода с дифференциальным включением двух катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании. На основе анализа литературы по неразрушающему контролю механических характеристик материалов обосновано применение метода динамического индентирования как перспективного направления в данной области. Разработан прототип первичного преобразователя датчика динамического индентирования, отличительной особенностью которого является применение в нем двух дифференциально включенных катушек индуктивности. Для обоснования работоспособности первичного преобразователя разработана компьютерная 3D-модель регистрации движения ударника при пролете в программе конечно-элементного анализа Comsol Multiphysics, с помощью которого проанализировано влияние изменения геометрических параметров дифференциально включенных катушек индуктивности на изменение ЭДС от времени. Приведены результаты экспериментальной отработки прототипа датчика динамического индентирования. Предложенная схема реализации магнитоиндукционного метода позволяет существенно снизить зависимость получаемого сигнала ЭДС от взаиморасположения магнита и катушек индуктивности, что, в свою очередь, позволяет повысить точность регистрации параметров движения индентора.

Ключевые слова: динамическое индентирование, контактно-ударное взаимодействие, система регистрации, параметры движения, магнитоиндукционный метод, катушка, магнит

Ссылка для цитирования: Колганов О. А., Ильинский А. В., Егоров Р. А., Хошев А. Е., Федоров А. В. Дифференциальное включение катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 74—80. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-74-80.

**DIFFERENTIAL CONNECTION OF INDUCTANCE COILS
FOR RECORDING THE PARAMETERS OF STRIKER MOTION
DURING DYNAMIC INDENTATION**

O. A. Kolganov*, A. V. Ilyinsky, R. A. Egorov, A. E. Khoshev, A. V. Fedorov

ITMO University, St. Petersburg, Russia
*kolganoff2014@yandex.ru

Abstract. The possibility of using the magnetic induction method with the differential inclusion of two inductors for recording the motion parameters of the impactor during dynamic indentation is considered. Based on analysis of the literature on non-destructive testing of the mechanical characteristics of materials, the use of the dynamic indentation method as a promising direction in this area is substantiated. A prototype of the primary transducer of the dynamic indentation sensor is developed, the distinctive feature of the prototype is the use of two differentially connected inductors in it. To demonstrate the primary converter operability, a computer 3D model is developed for registering the impactor movement during the flight in the Comsol Multiphysics finite-element analysis program, with the help of which the effect of variation of geometric parameters of differentially connected inductors on the change in EMF with time is analyzed. Results of experimental testing of the dynamic indentation sensor prototype are presented. The proposed scheme for implementing the magnetic induction method makes it possible to significantly reduce the dependence of the obtained EMF signal on the relative position of the magnet and inductors, which, in turn, ensures the possibility to increase the accuracy of recording the indenter motion parameters.

Keywords: dynamic indentation, contact-impact interaction, registration system, motion parameters, magnetoinduction method, coil, magnet

For citation: Kolganov O. A., Ilyinsky A. V., Egorov R. A., Khoshev A. E., Fedorov A. V. Differential connection of inductance coils for recording the parameters of striker motion during dynamic indentation. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 74—80 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-74-80.

Введение. В настоящее время в различных отраслях промышленности предъявляются все более высокие требования к механическим свойствам материалов изделий. При решении задач неразрушающего контроля (НК) механических свойств материалов изделий и их составных частей на этапах производства, испытаний и эксплуатации широкое применение находят безобразцовые методы, реализуемые портативными приборами. Один из перспективных методов безобразцового контроля — динамическое индентирование. Данный метод позволяет проводить безобразцовый контроль не только твердости материала, но и других его свойств (прочность, упругость и др.). При этом возможно проведение НК с использованием динамического индентирования как металлов, так и низкомолекулярных полимеров и композиционных материалов.

Метод динамического индентирования. Основа реализации метода динамического индентирования заключается в регистрации параметров движения индентора в процессе его контактного ударного взаимодействия (КУВ) с исследуемым материалом. Применение данного метода регламентируется ГОСТ Р 56474-2015. В процессе КУВ ударник, представляющий собой индентор, жестко закрепленный с магнитом, проходит через катушку индуктивности, что вызывает изменение магнитного потока и, как следствие, формирование сигнала ЭДС, пропорционального скорости движения индентора на всем временном интервале КУВ [1]. Однако следует отметить, что значения параметров первичного преобразователя и устройства его разгона в указанном стандарте не нормированы [2]. Одним из основных требований к разработке системы регистрации параметров движения индентора является пропорциональность ЭДС скорости его движения [3]. Данное требование реализуется конструктивными особенностями системы регистрации, в том числе электрическими параметрами катушки индуктивности.

Прототип датчика динамического индентирования. Одним из основных элементов датчика динамического индентирования является первичный преобразователь, с помощью которого производится регистрация параметров движения индентора при КУВ [4]. В настоящее время для регистрации параметров движения индентора в большинстве преобразователей используется одна катушка индуктивности (ГОСТ Р ИСО 8568-2010). Однако при пересечении постоянным магнитом такой катушки индуктивности количество силовых линий магнитного поля зависит от его положения. Вследствие этого выходное значение ЭДС является как функцией скорости, так и положения магнита внутри катушки индуктивности [1]. Этот недостаток объясняется тем, что, когда ударник центрирован относительно катушки индуктивности, линии потока, которые обусловлены отрицательным полюсом, также могут индуцировать ЭДС в катушке противоположной полярности. К дополнительным посторонним факторам, влияющим на точность регистрации параметров движения индентора, также следует отнести импульсные помехи, вихревые токи и температурный дрейф [5].

Для устранения этих недостатков предлагается реализация магнитоиндукционного метода с использованием двух дифференциально включенных катушек индуктивности: см. рис. 1, *a* — 3D-визуализация метода, *b* — схема метода. Отличие данного метода регистрации движения ударника заключается в разнонаправленных катушках индуктивности.

Физический смысл рассматриваемого метода состоит в следующем: в рабочем диапазоне преобразователя оба конца постоянного магнита находятся внутри катушки, которая разделена на две секции [6]. В каждой секции катушки расположен свой полюс магнита. Эти две катушки имеют разное направление витков и соединяются последовательно, чтобы получить

выходное напряжение постоянного тока, пропорциональное скорости магнита [7, 8]. 3D-модель разработанного прототипа первичного преобразователя представлена на рис. 2: *а* — прототип в сечении, *б* — прототип без защитной крышки, *в* — разрез системы регистрации с двумя катушками.

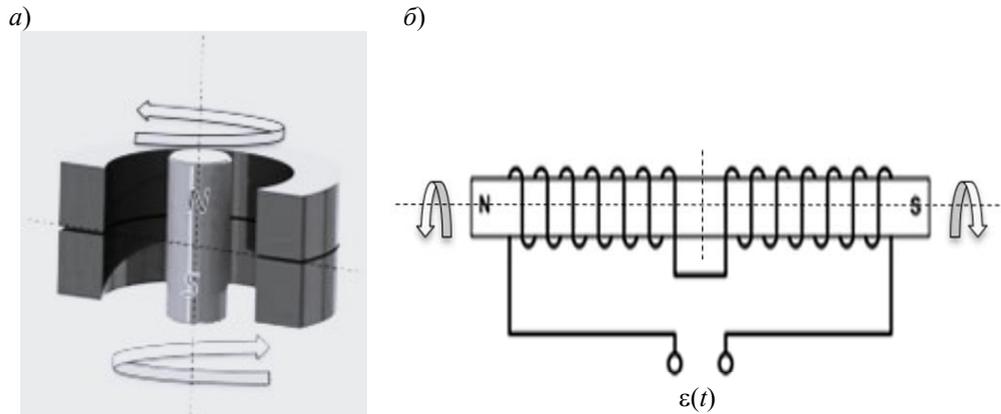


Рис. 1

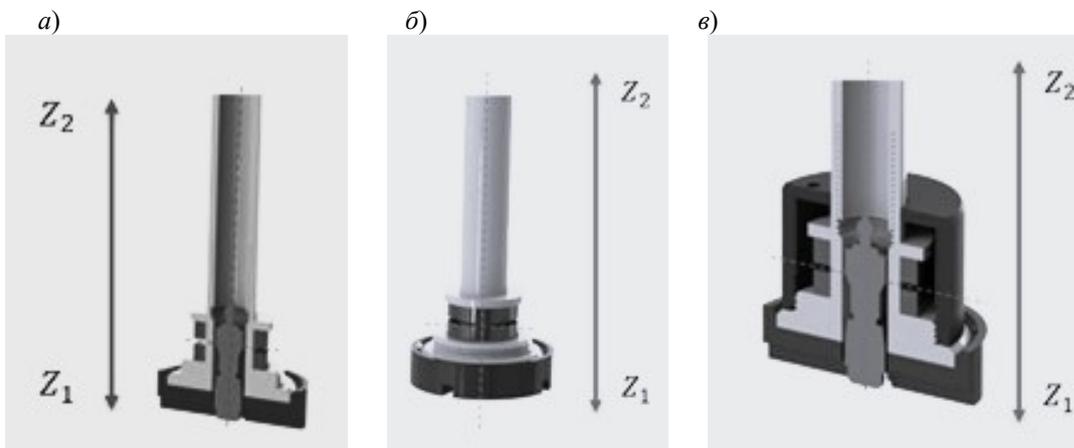


Рис. 2

Получение высокоточного сигнала зависит от многих электрических и геометрических параметров катушки индуктивности, а также от взаиморасположения магнита относительно катушки [9]. При разработке вышеуказанного прототипа были определены следующие электрические параметры катушки индуктивности: сопротивление $R = 62,4$ Ом, длина проводника $L = 30$ м, количество витков $n = 695$ и сечение проводника $S = 0,1$ мм (марка проводника — ПЭТВ-2).

Компьютерное моделирование. Для практической апробации предложенной реализации магнитоиндукционного метода была разработана компьютерная модель, выполненная в программе конечно-элементного анализа Comsol Multiphysics. Для решения задачи регистрации параметров движения ударника был использован интерфейс Magnetic Fields модуля AC/DC. Геометрия модели построена в двух измерениях с осесимметричным отображением. Характеристики магнита заданы с помощью инструмента Ampere's Law, а характеристики катушки — с помощью инструмента Coil. Сетка построена с учетом необходимости деформации двух доменов в движимой части, поэтому для них была использована mapped-сетка с переносом размерности на части Infinite element domain посредством инструментов edge и sory edge и последующим наложением mapped-сетки. Для остальных элементов была использована сетка free triangular. На рис. 3 представлена компьютерная модель регистрации пролета ударника через дифференциально включенную катушку индуктивности: *а* — визуализации компьютерной модели, *б* — зависимость ЭДС от времени.

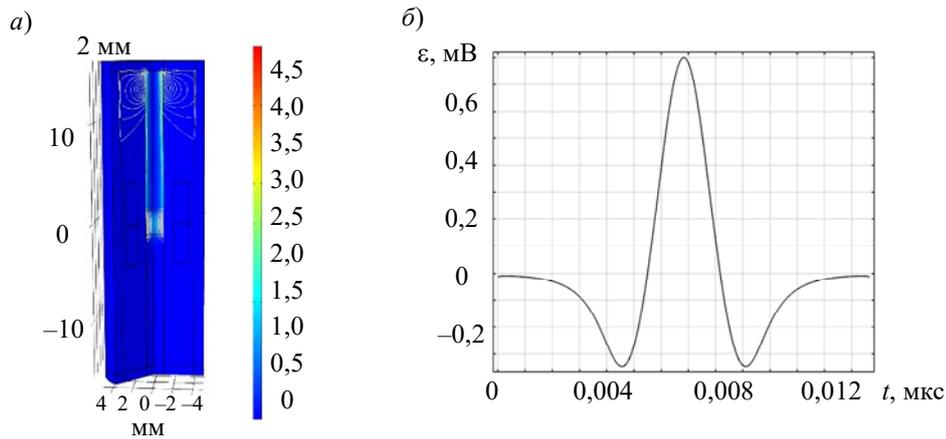


Рис. 3

С использованием разработанной компьютерной модели было проанализировано влияние изменения геометрических параметров дифференциально включенных катушек индуктивности на изменение ЭДС от времени. Основные геометрические параметры первичного преобразователя датчика динамического индентирования — диаметр и высота (длина) магнита (D_M и L_M) и диаметр и длина катушки индуктивности (D_K и L_K). Схема прототипа датчика с магнитоиндукционным включением катушек индуктивности приведена на рис 4.

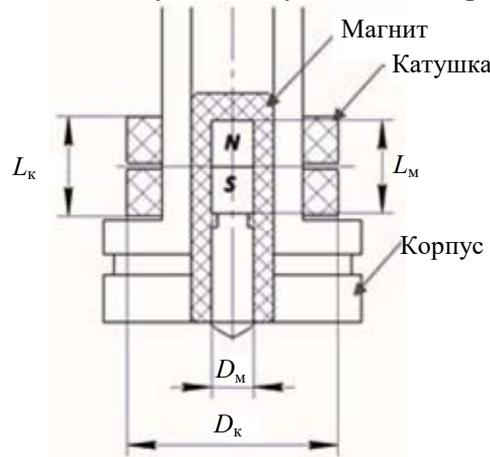


Рис. 4

На рис. 5 представлены зависимости изменения значений ЭДС от времени при пролете магнита различной высоты через катушку индуктивности: *а* — $L_M < L_K$, *б* — $L_M = L_K$, *в* — $L_M > L_K$. Анализ полученных результатов моделирования показал, что при дифференциальной схеме включения катушек индуктивности высота магнита не должна превышать длину катушки индуктивности [10].

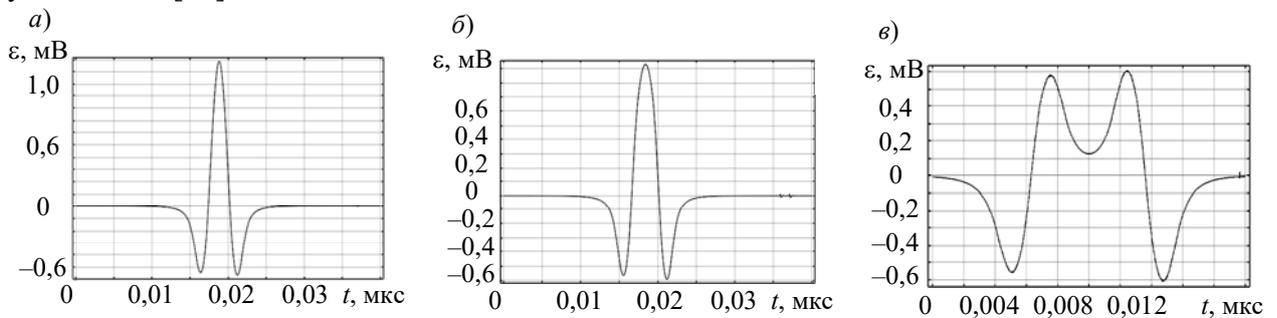


Рис. 5

Согласно результатам моделирования, были выбраны следующие геометрические параметры прототипа первичного преобразователя: $D_K=18$ мм, $L_K=9$ мм, $D_M=4$ мм, $L_M=9$ мм.

Экспериментальная отработка прототипа датчика динамического индентирования. Для подтверждения работоспособности прототипа датчика динамического индентирования был выполнен эксперимент, суть которого заключалась в регистрации зависимости $\varepsilon(t)$ на временном промежутке пролета ударника через катушку индуктивности при его гравитационном сбросе с различной высоты. Эксперимент проводился с использованием экспериментальной установки, схематично представленной на рис. 6. Изменение ЭДС во времени регистрировалось с помощью цифрового осциллографа марки RohdeSchwarz, высота сброса ударника H_i обеспечивалась конструкцией экспериментальной установки.

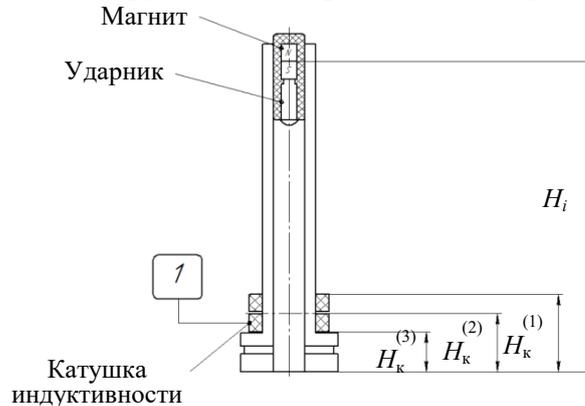


Рис. 6

Скорость пролета ударника через катушку индуктивности определялась по следующей формуле:

$$V_i^{(j)} = \sqrt{2gh_i^{(j)}} \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$);

$$h_i^{(j)} = H_i - H_k^{(j)} \quad (\text{см. рис. 6}). \quad (2)$$

На рис. 7 приведен экспериментально полученный график $\varepsilon(t)$, экстремумы значений $\varepsilon^{(j)}$ соответствуют скоростям $V^{(j)}$.

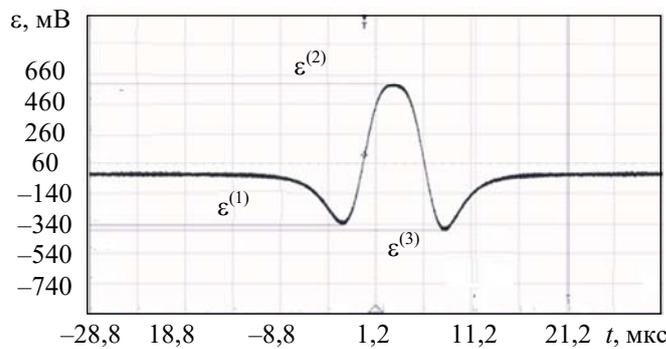


Рис. 7

В таблице представлены результаты экспериментов, включающие 5 серий измерений изменения ЭДС во времени при сбросе ударника с различной высоты, с оценкой скорости его пролета через середину катушки индуктивности.

$h_i^{(2)}$, мм	$\varepsilon_i^{(2)}$, мВ					Среднее значение ε , мВ	СКО, мВ	$V_i^{(2)}$, м/с
	1	2	3	4	5			
185	403	522	468	499	445	467,4	46,4	1,9
225	490	550	501	540	518	519,8	25,3	2,1
256	515	510	559	565	586	547,0	33,1	2,2
297	583	550	640	639	602	602,8	38,3	2,4

На рис. 8 приведены результаты аппроксимации зависимости скорости пролета ударника от ЭДС, которая представляется линейной регрессионной зависимостью вида:

$$V^{(2)} = 0,0037\varepsilon^{(2)} + 0,1781. \quad (3)$$

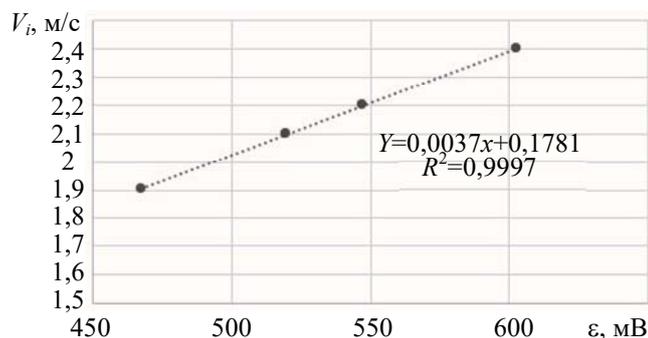


Рис. 8

Коэффициент детерминации и относительная ошибка аппроксимации эмпирической зависимости с помощью линейной функции вида (3) составили $R^2=0,9997$, $\varepsilon=0,18\%$, что свидетельствует о пропорциональности скорости движения индентора к ЭДС. Тем самым предложенная в рамках данного исследования схема реализации магнитоиндукционного метода с использованием двух дифференциально включенных катушек индуктивности позволяет существенно снизить зависимость получаемого сигнала ЭДС от взаиморасположения магнита и катушек индуктивности, а значит, повысить точность регистрации параметров движения индентора [11].

Заключение. В работе рассмотрена возможность применения магнитоиндукционного метода с дифференциальным включением катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании, разработан прототип датчика для прибора динамического индентирования. При его разработке предложено использовать магнитоиндукционный способ с двумя катушками для регистрации движения индентора, а также элементы программной обработки исходного сигнала ЭДС. Разработана компьютерная модель регистрации пролета ударника через дифференциально включенную катушку индуктивности. Проведена экспериментальная отработка прототипа датчика. Полученные экспериментальные данные подтверждают целесообразность применения предложенного способа реализации магнитоиндукционного метода для повышения точности регистрации параметров движения индентора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крень А. П., Рабцевич А. В., Зинкевич Н. В. Моделирование ударного контакта индентора с нежесткими стальными конструкциями при изменении твердости // Изв. НАУ Беларуси. Серия. Физико-технические науки. 2017. № 4. С. 38—45.
2. Крень А. П., Рудницкий В. А., Делендик М. Н. Оценка погрешности определения физико-механических характеристик материалов при их контроле методом индентирования // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9, № 3. С. 263—271.
3. Колганов О. А., Лукьянов Г. Н., Федоров А. В. Обоснование выбора метода регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2022. Т. 2. С. 54—57.
4. Марусин М. П., Протасеня Т. А. Разработка первичного преобразователя прибора динамического индентирования для измерения механических свойств материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 10. С. 85—87.
5. Колганов О. А., Лукьянов Г. Н. Разработка экспериментального стенда для стационарных исследований конструктивных элементов датчика динамического индентирования // Сб. тез. докл. конгресса молодых ученых. 2022.

6. Энергетический подход к определению твердости материалов при индентировании сферой / П. М. Огар, В. А. Тарасов, И. Б. Федоров // *Механика XXI века*. 2013. № 12. С. 66—70.
7. Medital [Электронный ресурс]: <<https://www.medital.com/products/lvt-linear-velocity-transducers>>, 02.03.2022.
8. Electricaldesk [Электронный ресурс]: <<https://www.electricaldeck.com/2021/07/measurement-of-linear-velocity-using-velocity-transducers.html>>, 02.03.2022.
9. Пат. 20080517 Беларусь, МПК (2006) G01N 3\00, BY 5150 U. Магнитоиндукционный датчик для измерения параметров динамического индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, О. В. Мацулевич. Опубл. 30.04.2009.
10. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования / Р. А. Егоров, А. В. Ильинский, М. В. Кузьмичев, А. В. Федоров // *Дефектоскопия*. 2020. № 6. С. 61—69.
11. Обеспечение единства измерений твердости динамическим методом в Российской Федерации / А. И. Потанов, В. А. Сясько, К. В. Гоголинский, А. А. Никазов // *Контроль. Диагностика*. 2016. № 4. С. 44—49.

Сведения об авторах

- | | |
|---|---|
| Олег Александрович Колганов | — аспирант; Университет ИТМО; E-mail: kolganoff2014@yandex.ru |
| Александр Вячеславович Ильинский | — Университет ИТМО; ассистент; E-mail: allill003@mail.ru |
| Роман Александрович Егоров | — Университет ИТМО; ассистент; E-mail: roman1465@yandex.ru |
| Александр Евгеньевич Хошев | — студент; Университет ИТМО; E-mail: severenarwhal@gmail.com |
| Алексей Владимирович Федоров | — Университет ИТМО; доцент; E-mail: afedor62@yandex.ru |

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

1. Kren A.P., Rudnitsky V.A., Zinkevich N.V. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series*, 2017, no. 4, pp. 38–45. (in Russ.)
2. Kren A.P., Rudnitsky V.A., Delendik M.N. *Devices and Methods of Measurements*, 2018, no. 3(9), pp. 263–271. (in Russ.)
3. Kolganov O.A., Lukyanov G.N., Fedorov A.V. *Almanac of Scientific Works of Young Scientists at ITMO University*, 2022, vol. 2, pp. 54–57. (in Russ.)
4. Marusin M.P., Protasenyia T.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 10(57), pp. 85–87. (in Russ.)
5. Kolganov O.A., Lukyanov G.N. *Collection of abstracts of reports of the congress of young scientists*, 2022. (in Russ.)
6. Ogar P.M., Tarasov V.A., Fedorov I.B. *Mechanics – XXI century*, 2013, no. 12, pp. 66–70. (in Russ.)
7. *Medital*, <https://www.medital.com/products/lvt-linear-velocity-transducers>. (in Russ.)
8. *Electricaldesk*, <https://www.electricaldeck.com/2021/07/measurement-of-linear-velocity-using-velocity-transducers.html>. (in Russ.)
9. Patent BY 20080517, G01N 3\00, BY 5150 U, *Magnitoinduktsionnyy datchik dlya izmereniya parametrov dinamicheskogo indentirovaniya* (Magnetic Induction Sensor for Measuring the Parameters of Dynamic Indentation), V.A. Rudnitsky, A.P. Kren, O.V. Matsulevich, Published 30.04.2009. (in Russ.)
10. Egorov R.A., Ilinskiy A.V., Kuzmichev M.V., Fedorov A.V. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, no. 6, pp. 61–69. (in Russ.)
11. Potapov A.I., Syasko V.A., Gogolinskiy K.V., Nikazov A.A. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 44–49. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|------------------------------|---|
| Oleg A. Kolganov | — Post-Graduate Student; ITMO University; E-mail: kolganoff2014@yandex.ru |
| Alexander V. Ilyinsky | — ITMO University; Assistant; E-mail: allill003@mail.ru |
| Roman A. Egorov | — ITMO University; Assistant; E-mail: roman1465@yandex.ru |
| Alexander E. Khoshev | — Student; ITMO University; E-mail: severenarwhal@gmail.com |
| Alexey V. Fedorov | — ITMO University; Associate Professor; E-mail: afedor62@yandex.ru |

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.