

Научная статья

УДК 621.313.13

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-118-132

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ВИБРАЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ЗАМКНУТЫМ СПИРАЛЬНЫМ ВТОРИЧНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ И УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ



Ильгиз Флюсович Янгиров

Ilgiz F. Yangirov

доктор технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия



Альберт Рашитович Халиков

Albert R. Khalikov

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры теоретических основ электротехники,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия



Евгений Михайлович Федосов

Evgeny M. Fedosov

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия



Андрей Викторович Лобанов

Andrey V. Lobanov

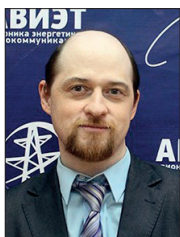
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия



Тагир Рафаилович Терезулов

Tagir R. Teregulov

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

**Денис Вилевич Максудов****Denis V. Maksudov**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

**Андрей Викторович Стыскин****Andrey V. Styskin**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

Актуальность

Разработка новых конструкций электромеханических вибрационных преобразователей (ЭМВП) является актуальной задачей и вызвана необходимостью создания устройств, удовлетворяющих в той или иной мере многим, зачастую противоречивым, требованиям по точности и пределам измерения, частотному диапазону, чувствительности, габаритным размерам, массе, стоимости, эксплуатационным характеристикам и т.д.

Важной предпосылкой решения поставленных задач является исследование и разработка новых перспективных элементов конструкции электромеханических преобразователей, материалов, комплектующих изделий, специальных технологических процессов производства.

Быстрое развитие науки и техники обуславливает большое разнообразие и усложнение автоматических систем управления. Создаются инвариантные, самонастраивающиеся и другие комплексные информационно-измерительные и управляющие системы, к которым предъявляются повышенные требования.

Современное развитие автоматизированных систем контроля и управления различными технологическими и физическими процессами характеризуется широким использованием первичных средств сбора и обработки информации. При этом электромеханические вибрационные преобразователи ЭМВП-датчики параметров вибрации являются звеном любой информационно-зрительной или управляющей системы и практически определяют ее метрологические характеристики. Потери в точности и надежности конечного результата, связанные с неудачным применением датчика, неспособна восстановить самая совершенная система преобразования информации.

Номенклатура выпускаемых промышленностью вибрационных датчиков ограничена, а их эффективная эксплуатация и оценка результатов эксперимента весьма затруднительны. Отсутствие четких рекомендаций по выбору того или иного типа датчика, обоснованных методик инженерных расчетов и экспериментальных исследований, анализа предельных эксплуатационных и технологических возможностей привело к тому, что многие типы и конструкции датчиков оказались нежизнеспособными.

Большое количество публикаций, связанных с проектированием новых конструкций вибрационных датчиков различного назначения и совершенствованием уже известных, позволяет судить о неослабевающем интересе разработчиков к этому классу устройств, особенно с развитием технических роботов и гибких модулей.

Ключевые слова

генерация, низкочастотные колебания, спиральная пружина, продольные прорези, пластина, вихревые токи, скос, магнитное число Рейнольдса, угловое ускорение

Отсутствие основ теории и инженерных методик расчета статических характеристик ЭМВП в режиме как датчика, так и двигателя со спиральным электропроводящим элементом ограничивает возможность рационального их проектирования для информационно-измерительных и управляющих систем. Поэтому задачи исследования и создания высокоэффективных ЭМВП со спиральным вторичным элементом, наиболее полно удовлетворяющих специальным требованиям со стороны систем управления, актуальны.

Цель исследования

Исследование вибрационного преобразователя (ЭМВП) с замкнутым спиральным вторичным элементом в режиме генерации низкочастотных колебаний и улучшения механических данных за счет выполнения продольных прорезей со скосом в спиральной электропроводящей пружине.

Методы исследования

Литературный обзор и патентная проработка, методы математического моделирования и экспериментальных исследований вибрационных колебаний.

Результаты

Впервые разработаны метод и методология проектирования электромеханических вибрационных преобразователей со спиральным вторичным элементом с теоретическим и экспериментальным подтверждением основных полученных положений.

Разработан натурный образец с теоретическими положениями, получен патент РФ, показана возможность использования конструкционного решения в бытовых приборах (планшетах, ноутбуках, часах электронных, наноробототехнике, сосудистой медицине и кардиологии, передаче информации как элементы GPS и GSM и т.д.).

Для цитирования: Янгиров И. Ф., Халиков А. Р., Федосов Е. М., Лобанов А. В., Терегулов Т. Р., Максудов Д. В., Стыскин А. В. Электромеханический вибрационный преобразователь с замкнутым спиральным вторичным элементом и улучшенными характеристиками // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 118-132. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-118-132>.

Original article

ELECTROMECHANICAL VIBRATION TRANSDUCER WITH A CLOSED SPIRAL SECONDARY ELEMENT AND IMPROVED CHARACTERISTICS

Relevance

The development of new designs of electromechanical vibration transducers (EMVT) is an urgent task and is caused by the need to create devices that meet to one degree or another many, often contradictory requirements for accuracy and measurement limits, frequency range, sensitivity, overall dimensions, weight, cost, performance characteristics, etc.

An important prerequisite for solving the set tasks is the study and development of new promising structural elements of electromechanical converters, materials, components, special production processes.

The rapid development of science and technology causes a great variety and complexity of automatic control systems. Invariant, self-adjusting and other complex information-measuring and control systems are created, to which increased requirements are imposed.

Keywords

generation, low-frequency oscillations, spiral spring, longitudinal slots, plate, eddy currents, bevel, magnetic Reynolds number, angular acceleration

The modern development of automated monitoring and control systems for various technological and physical processes is characterized by the widespread use of primary means of collecting and processing information. At the same time, electromechanical vibration transducers EMVP-sensors of vibration parameters are a link in any information-visual or control system and practically determine its metrological characteristics. Losses in the accuracy and reliability of the final result associated with unsuccessful use of the sensor cannot be restored by the most advanced information conversion system.

The range of industrially produced vibration sensors is limited, and their effective operation and evaluation of experimental results is very difficult. The lack of clear recommendations for choosing one type of sensor or another, sound methods of engineering calculations and experimental studies, and analysis of limiting operational and technological capabilities has led to the fact that many types and designs of sensors turned out to be unviable.

A large number of publications related to the design of new designs of vibration sensors for various purposes and the improvement of already known ones allows us to judge the continued interest of developers in this class of devices, especially with the development of technical robots and flexible modules.

The lack of fundamental theory and engineering methods for calculating the static characteristics of electric motors in the mode of both a sensor and a motor with a spiral electrically conductive element limits the possibility of their rational design for information-measuring and control systems. Therefore, the tasks of researching and creating highly efficient EMVPs with a spiral secondary element that most fully satisfy the special requirements of control systems are relevant.

Aim of research

To investigate a vibration transducer (EMVT) with a closed spiral secondary element in the mode of generating low-frequency vibrations and improving mechanical data due to the execution of longitudinal slits with a bevel in a spiral electrically conductive spring.

Research methods

Literary review and patent study, methods of mathematical modeling and experimental studies of vibration oscillations.

Results

For the first time, a method and methodology have been developed for the design of electromechanical vibration converters with a spiral secondary element with theoretical and experimental confirmation of the main obtained positions.

A full-scale sample with theoretical provisions was developed, a patent of the Russian Federation was obtained, the possibility of using a structural solution in household devices (tablets, laptops, electronic watches, nanorobototechnology, vascular medicine and cardiology, information transmission as GPS u GSM elements, etc.) was shown.

For citation: Yangirov I. F., Khalikov A. R., Fedosov E. M., Lobanov A. V., Teregulov T. R., Maksudov D. V., Styskin A. V. Elektromekhanicheskii vibratsionnyi preobrazovatel' s zamknutym spiral'nym vtorichnym elementom i uluchshennymi kharakteristikami [Electromechanical Vibration Transducer with a Closed Spiral Secondary Element and Improved Characteristics]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 118-132. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-118-132>.

Введение

В данной работе исследуется электро-механический вибрационный преобразователь (ЭМВП) с замкнутым спиральным вторичным элементом [1–3] за счет выполнения продольных прорезей со скосом в спиральной электропроводящей пружине, который найдет применение в приборостроении, машиностроении благодаря своей многофункциональности, улучшенным метрологическим и механическим характеристикам.

В работе решается задача по определению выходной характеристики новой конструкции ЭМВП-двигателя с учетом скоса продольных прорезей [4] для возможности создания инженерной методики расчета и оптимизационных решений. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации элементов автоматики подобного назначения. Анализ существующих в настоящее время таких преобразователей показывает, что все же возникает потребность в разработке новых преобразователей, генераторов крутильных колебаний и датчиков угловых ускорений и скоростей в целях расширения их метрологических функциональных характеристик и возможностей. В работе впервые представлена новая конструкция ЭМВП и впервые соответственно получены выражения для расчета выходных характеристик с учетом скоса продольных различного размера прорезей в спиральной пружине, что говорит о новизне представленной работы в области электромеханики и автоматики [5–7].

Задача исследования. Предлагается конструкция ЭМВП, отличающегося от ранее известной конструкции [1] тем, что продольные прорезы выполнены в электропроводящей спиральной пружине и прodelываются под некоторым углом α . Такое исполнение продольных прорезей за счет компенсации высших

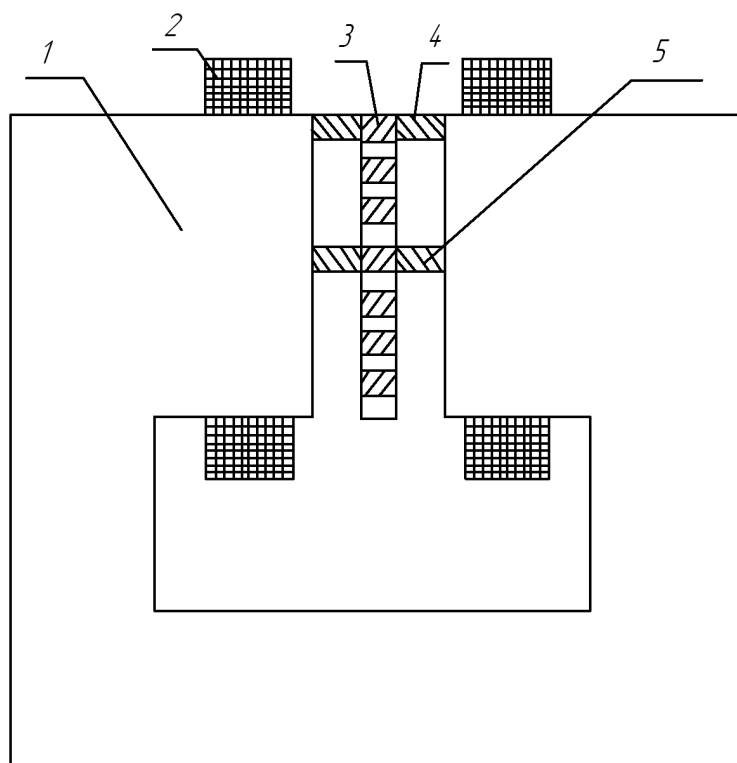
нечетных гармоник $\nu = 3, 5, 7, \dots$ приводит к улучшениям метрологических и механических характеристик ЭМВП, т.е. уничтожается спектр сигналов, искажающих информационный сигнал, исходящих непосредственно от объекта, в случае генератора крутильных колебаний компенсируется тормозящий момент от нечетных высших гармоник [8]. На рисунке 1 изображена схема конструкции в сечении.

Конструкция

Устройство для крутильных колебаний с короткозамкнутой спиральной плоской пружиной [1, 3] имеет определенное преимущество перед другими вибрационными машинами. Конструкция (рисунок 1) содержит шихтованный магнитопровод 1 с обмоткой переменного тока 2. Электропроводящая плоская пружина 3 расположена в воздушном зазоре магнитопровода 1, крепится жестко на осях 4 и 5, причем ось 4 подвижна для крутильных колебаний. При подключении обмотки 2 на источник переменного тока в зазоре создается переменное магнитное поле. Последнее индуцирует в короткозамкнутой спирали 3 ток, между токопроводящими витками спирали возникает переменная электродинамическая сила. Сила, закручивая и раскручивая спирали, заставляет ось 4 соответственно закручиваться и раскручиваться, тем самым создавая попеременный по знаку вращающий момент. То же самое возможно при подвижной оси 4, т.е. режим вибродвигателя или генератора низкочастотных колебаний [9–12].

Методы исследования

При решении задачи использованы общепринятые допущения [5, 8], которые далее корректировались известными поправочными коэффициентами. Для решения задачи в работе были использованы методы теории электрических



1 — магнитопровод; 2 — обмотка переменного тока; 3 — короткозамкнутая спиральная пружина; 4, 5 — оси крепления пружины

1 — magnetic conductor; 2 — AC winding; 3 — short-circuited coil spring;
4, 5 — axes of spring attachment

Рисунок 1. ЭМВП-двигатель с короткозамкнутой спиральной пружиной

Figure 1. EMVT-motor with a short-circuited spiral spring

цепей, уравнения механики и электродинамики, методы математического анализа и эксперимента вибрационной техники.

Решение задачи

Для определения выходной характеристики представляется расчетная схема участок спирального электропроводящего элемента в виде плоскопараллельной пластины с прорезями со скосом (рисунок 2), что справедливо при общепринятых допущениях.

Электромагнитные процессы в электромагнитных ЭМВП описываются уравнениями Максвелла для медленно движущихся изотропных и проводящих сред. В системе координат, жестко связанной с электропроводящей, для комплексных амплитуд они будут следующими [8]:

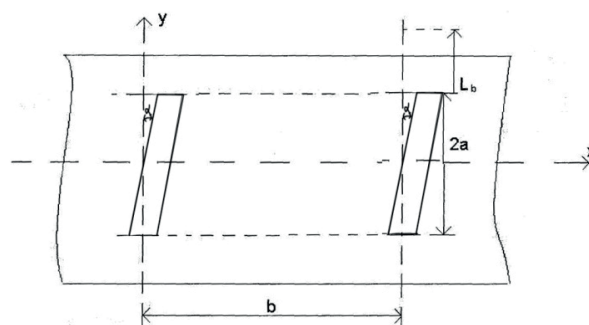


Рисунок 2. Схема расчета участка спирального элемента со скосом прорезей

Figure 2. Calculation diagram of helical element section with slot bevel

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{\delta} + \vec{\delta}_{\text{ст}}; \quad \text{rot } \vec{E} = -j\omega\vec{B};$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}; \quad \vec{\delta} = \sigma\vec{E}, \quad (1)$$

где $\vec{\delta}_{\text{ст}}$ — плотность стороннего тока.

Решение этих уравнений с учетом всех конструктивных особенностей преобразователя не представляется возможным. Поэтому при решении принимаются допущения, мало искажающие реальную картину электромагнитных процессов: толщина рабочего зазора значительно меньше среднего радиуса и магнитное поле плоскопараллельно; индукция первичного магнитного поля в воздушном зазоре задана основной пространственной гармоникой; вне индуктора поле равно нулю; плотность вихревых токов по толщине пружины постоянна; магнитная проницаемость материала пружины равна μ_0 , а магнитная проницаемость стали магнитопровода равна бесконечности; ширина прорези со скосом мала по сравнению с расстоянием между прорезями.

Для определения параметров ЭМВП двигателя необходимо найти распределение магнитного поля в зазоре, а также плотности вихревых токов в пружине. Согласно принятым допущениям, напряженность магнитного поля имеет одну составляющую по оси z , а плотности токов будут иметь две составляющие:

$$\vec{\delta}_x = \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial y}; \quad \vec{\delta}_y = \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial x}. \quad (2)$$

Здесь и далее индекс z у напряженности магнитного поля для краткости опускается.

Магнитное поле определяется в виде суммы поля индуктора (известное поле) H_0 и поля индуцированных вихревых токов H . Тогда из (1) с учетом принятых допущений можно получить [6, 13] в активной зоне (система координат $x\theta y$, $0 < x < b$, $-a < y < a$):

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} - j\varepsilon_f \alpha^2 H_a = j\varepsilon_f \alpha^2 \dot{H}_0 e^{-j\alpha x}, \quad (3)$$

где $\alpha = \pi / \tau$; τ — полюсное деление;

$\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_d$ — магнитное число Рейнольдса;

$\omega = p\Omega / t$; Ω — угловая скорость генерации;

k_d — коэффициент приведения, учитывающий влияние насыщения магнитной системы.

Решение уравнения (3) для электромагнитной силы, действующей на активную зону спиральной пружины,

$$F_x = \int_x \int_y \int_z f_{xcp} dx dy dz = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \alpha \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} 2bl_{cp} \Delta, \quad (4)$$

где Δ — толщина пружины;

l_{cp} — средний периметр рабочего спирального тела.

С учетом того, что $\alpha = \pi / 2a$, получим окончательно для интегральной электромагнитной силы:

$$F_z = \frac{\pi}{2} \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \Delta l_{cp} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}. \quad (5)$$

Момент на валу ЭМВП

$$M_z = \frac{\pi}{2} \frac{\mu_0 H_{1m}^2}{k_d} \Delta l_{cp} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} R. \quad (6)$$

Возможно функционирование исходного ЭМВП как датчика угловых ускорений. Из основного уравнения динамики [7], контролируемое угловое ускорение датчика:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} \frac{\mu_0 H_{1m}^2}{k_d} \frac{\Delta l_{cp}}{mR} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} = \varepsilon_{баз} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}, \quad (7)$$

где m — масса тонкостенной спиральной пружины;

$\varepsilon_{баз}$ — базовое контролируемое ускорение.

Используя значения для МЧР или для критической скорости, можно найти нужные параметры, изменив которые можно получить требуемую выходную характеристику. Например, для того чтобы сместить максимум сигнала в область более высоких скоростей, нужно увеличить числитель (число пар полюсов или зазор) или уменьшить знаменатель (радиус, толщину или электропро-

водность материала спиральной пружины).

На рисунке 3 представлена выходная характеристика ЭМВП-датчика без прорезей с немагнитным рабочим телом ($\nu = \infty$) $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{баз}}}$.

При проектировании различных электромеханических устройств возникают различные требования к их выходным характеристикам — для одних существенно линейность зависимости крутизны характеристики и чувствительности от скорости, для других желательно иметь максимальное значение чувствительности, для третьих важно малое изменение их в определенном диапазоне скоростей. Эти вопросы могут быстро решаться путем анализа значения МЧР: если $\varepsilon \ll 1$, то зависимость выхода от скорости практически линейна; если

$\varepsilon_f = 1$, то выходные характеристики близки к максимуму и т.д.

В результате решения математической модели преобразователя со спиральным чувствительным элементом [3] и учетом влияния скоса прорезей, получено выражение в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{баз}} (\varepsilon_i^* + k_c \Delta \varepsilon_i^*), \quad (8)$$

где $\varepsilon_i^* = \frac{2\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}$ — относительное угловое ускорение без краевого эффекта и скоса [3];

$\Delta \varepsilon_i^*$ — дополнительное ускорение в о.е. в случае наличия прорезей и скоса;

k_c — коэффициент учета скоса прорезей [8];

$\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_d$ — магнитное число Рейнольдса [4].

На рисунке 4 представлены выходные характеристики с прорезями со скосом в о. е.

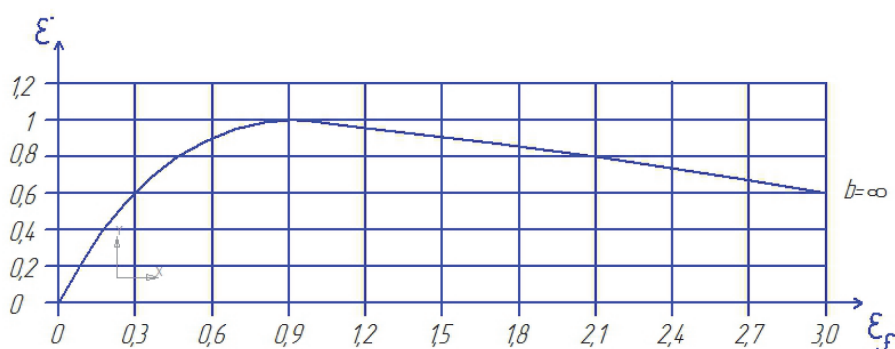


Рисунок 3. Выходная характеристика ЭМВП-датчика без прорезей (о. е.)

Figure 3. Output characteristic of EMVT-sensor without slots (r. u.)

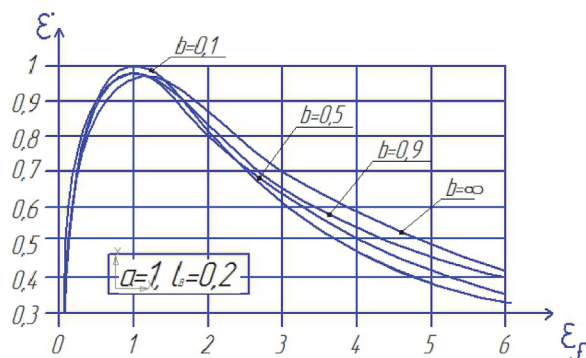


Рисунок 4. ЭМВП-датчика с прорезями со скосом

Figure 4. EMVT-sensor with slits with bevel

Из анализа кривых рисунка 4 видно, что выполнение ЭМВП-датчика с прорезями на спиральной пружине приводит к повышению крутизны преобразовательной характеристики и чувствительности, и с увеличением числа прорезей эти характеристики возрастают со смещением в сторону малых частот. Особенно эффективно применение прорезей со скосом в маломощных подобных преобразователях.

Выходная характеристика ЭМВП-датчика:

$$E = 4,44 f k_{\text{об}} W_2 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1 + \varepsilon_f^2}} s H_{1m} = \frac{2,22 \omega}{\pi} k_{\text{об}} W_2 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1 + \varepsilon_f^2}} s H_{1m}, \quad (9)$$

где ω — угловая скорость ЭМВП.

Чувствительность ЭМВП:

$$\beta = \frac{dE}{d\omega} = \frac{2,22}{\pi} k_{\text{об}} W_2 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1 + \varepsilon_f^2}} s H_{1m}, \quad (10)$$

где введя базовую чувствительность вида (рисунок 5):

$$\beta^{\text{баз}} = \frac{2,22}{\pi} k_{\text{об}} W_2 s H_{1m},$$

$$\beta^* = \beta / \beta^{\text{баз}} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}}}.$$

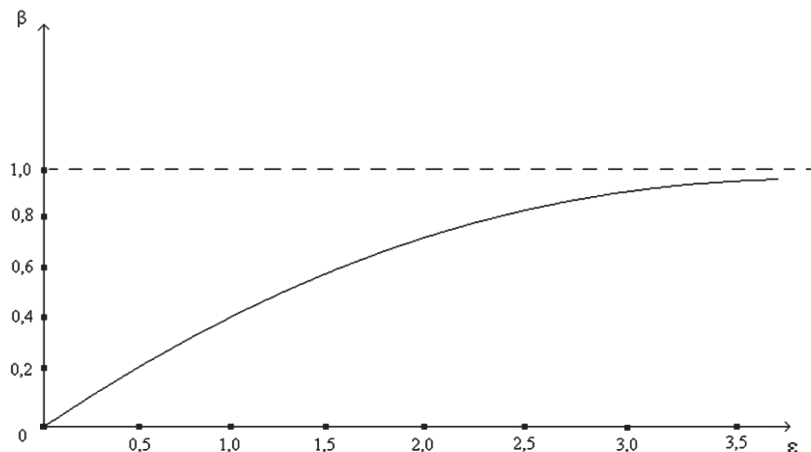


Рисунок 5. Зависимость чувствительности ЭМВП-датчика от МЧР в о. е.

Figure 5. Dependence of EMVT-sensor sensitivity on MRN in r. u.

Такой ЭМВП найдет широкое применение для высокоточных измерений оборотов и угловых ускорений контролируемых объектов различного функционального назначения.

Экспериментальные исследования

Для демонстрации работы физической модели авторами разработан стенд (рисунок 7) [14–16, 22]. Сила электродинамического взаимодействия между витками спиральной пружины ЭМВП определяется по воздействию переменного магнитного поля от обмотки переменного тока и токами в КЗВ (витка спиральной пружины) [6, 8].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований конструкций ЭМВП приведены на рисунке 9 для БрОЦ4-3 ($E = 1,15 \times 10^{11}$ Н/м², $\sigma = 1,5 \times 10^8$ Н/м², $\rho = 8800$ кг/м³) и для БрБ2 ($E = 1,35 \times 10^{11}$ Н/м²; $\sigma = 1,5 \times 10^8$ Н/м², $\rho = 8230$ кг/м³). Геометрические размеры: $R_1 = 1,5 \times 10^{-3}$ м; $h = 3,11 \times 10^{-5}$ м; $b = 3,11 \times 10^{-4}$ м; $L = 28,5 \times 10^{-3}$ м; $R_2 = 1,95 \times 10^{-3}$ м; $w = 3$; $c = 0,15 \times 10^{-3}$ м. Собственные частоты колебаний для БрОЦ4-3 — 31,4 Гц, для БрБ2 — 35,2 Гц.

Все утверждения были проверены на экспериментальной модели и стендах (рисунки 6–11).



1 — электромагнитная пушка; 2 — источник переменного тока

1 — electromagnetic gun; 2 — AC source

Рисунок 6. Испытательный стенд

Figure 6. Test bench



1 — экспериментальная физическая модель с короткозамкнутыми насадками (медь, алюминий, латунь, бронза); 2 — регулируемый источник переменного тока ($U = 0 \div 220$ В); 3 — осциллограф (Gwinstek GOS-620); 4 — стрелочный амперметр; 5 — стрелочный вольтметр; 6 — мультитестер; 7 — измерительный штангенциркуль

1 — experimental physical model with short-circuited nozzles (copper, aluminum, brass, bronze); 2 — adjustable alternative current source ($U = 0 \div 220$ В); 3 — oscilloscope (Gwinstek GOS-620); 4 — switch ammeter; 5 — switch voltmeter; 6 — multitester; 7 — measuring caliper

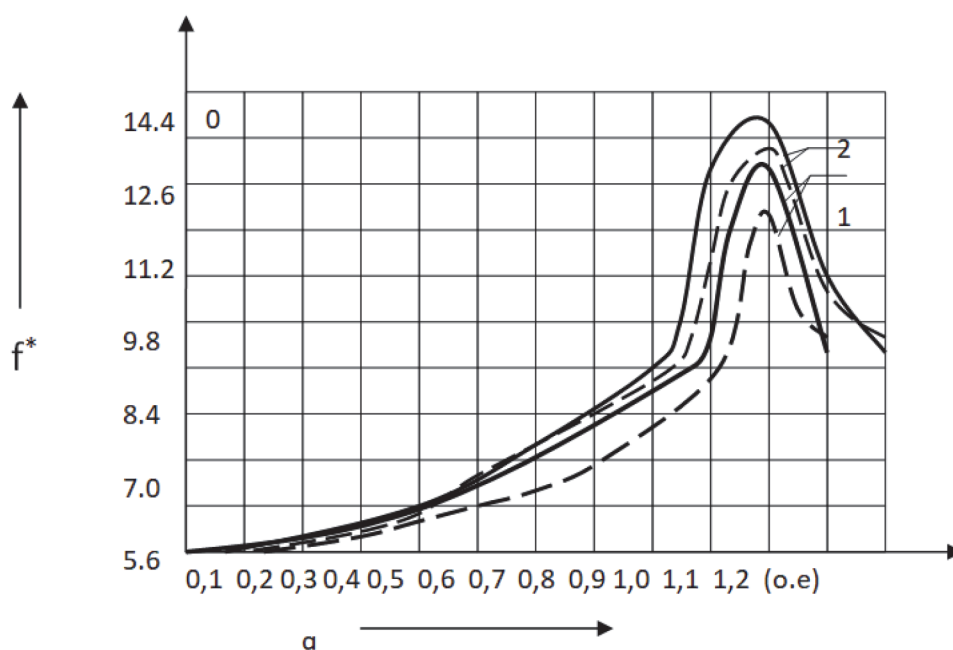
Рисунок 7. Опытно-испытательный стенд для исследования электродинамической силы межоборотного взаимодействия в вибропреобразователе (электромагнитной пушке)

Figure 7. Experimental test bench for investigation of electrodynamic force of interturn interaction in vibration transducer (electromagnetic gun)



Рисунок 8. Стенд для исследования физической модели

Figure 8. Physical model test stand



1 — — экспериментальная кривая; 2 - - - — теоретическая кривая

1 — — experimental curve; 2 - - - — theoretic curve

Рисунок 9. Результаты экспериментов

Figure 9. Experiments results

Экспериментальная проверка полученных соотношений на опытных образцах позволяет сделать вывод, что рассчитанные значения выходной характери-

стики совпадают с опытными в пределах точности эксперимента (не более 14 %) по сравнению с физической моделью и теоретически полученными.

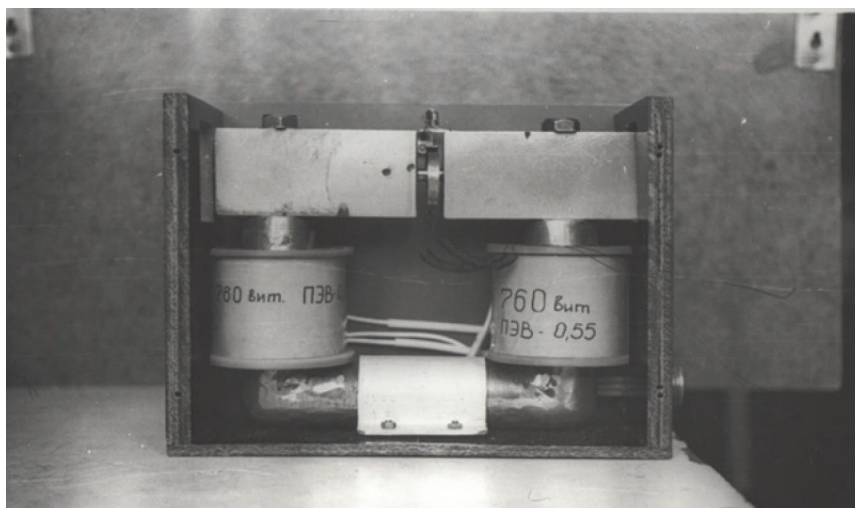


Рисунок 10. Экспериментальная модель ЭМВП-двигателя

Figure 10. Experimental model of the EMVT-engine

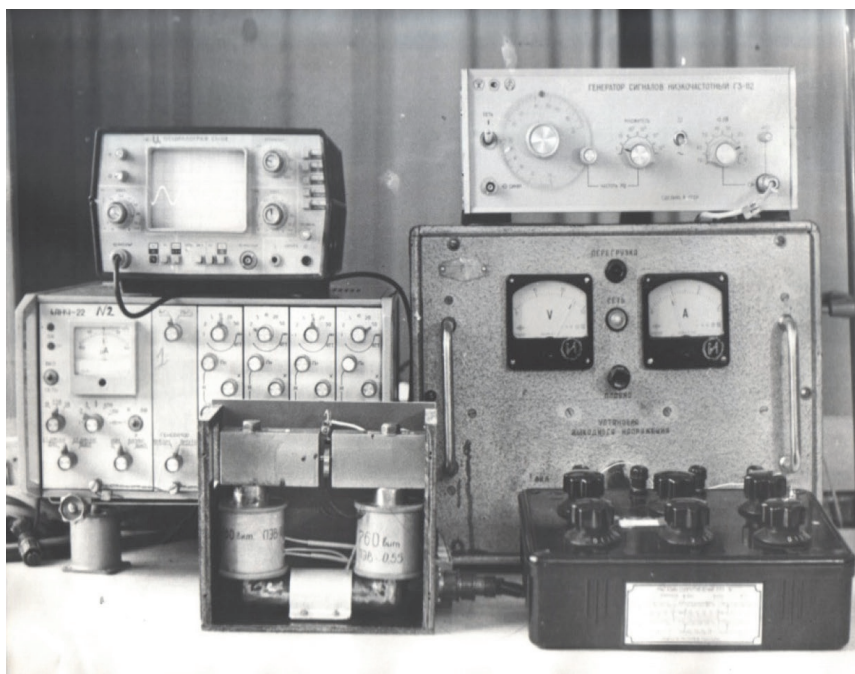


Рисунок 11. Общий вид экспериментальной установки для ЭМВП

Figure 11. General view of the experimental unit for EMVT

Выводы

1. Выполнение в ЭМВП на спирали прорезей на диамантных насадках КЗВ со скосом приводит к повышению крутизны (до 1,2–1,3 раза) механической характеристики, и с увеличением числа прорезей эти характеристики возрастают со смещением в сторону малых частот. Особенно эффективно применение прорезей под углом в маломощных ЭМВП.

2. Впервые для исследования электромеханического преобразователя со спиральным вторичным элементом использованы физическая модель в виде электромагнитной пушки и основные уравнения механики и электродинамики во взаимосвязи для составления математической модели двигателя и соответственно аналитического их решения.

3. Решением математической модели получены аналитические выражения для расчета механических характеристик соответственно для ЭМВП с экспериментальным подтверждением для различных физических моделей, что составляет не более 16 % и вполне пригодны для инженерных расчетов.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований исходного преобразователя по качественным и количественным оценкам позволяют утверждать, что они найдут специальное применение в энергетике, электромашиностроении, медицине и т.д.

5. Приведена оригинальная конструкция ЭМВП-датчика со спиральным

вторичным элементом со скосом прорезей, обладающая повышенной чувствительностью и крутизной преобразовательной характеристики, расширенными функциональными возможностями и быстроедействием, улучшенными метрологическими характеристиками.

6. Выведены аналитические соотношения для анализа и проектирования ЭМВП с учетом и без учета краевых эффектов при наличии продольных прорезей со скосом в чувствительном элементе в зависимости от МЧР, использованы так же результаты работы, полученные авторами в ранних работах [17–22].

Список источников

1. Хайруллин И.Х., Исмаилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Хайруллин Т.И. Магнитоэлектрический преобразователь-электродвигатель // Машиностроитель. 1992. № 9. С. 14.

2. Хайруллин И.Х. Исмаилов, Ф.Р., Янгиров И.Ф., Хайруллин Т.И. Устройство для возбуждения крутильных колебаний // Машиностроитель. 1993. № 7, 8. С. 19.

3. Янгиров И.Ф., Ахметова Е.О. Математическая модель спирального преобразователя с учетом основных электромеханических параметров // Научные технологии в машиностроении: Матер. Всеросс. науч.-практ. конф., 17–18 мая 2013 г., г. Ишимбай. 2013. С. 59–61.

4. Янгиров И.Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом // Электротехника. 2008. № 5. С. 14–18.

5. Исмаилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Тахогенератор-акселерометр с улучшенными метрологическими характеристиками // Электричество. 2011. № 9. С. 63а–66. EDN: OCBRLJ.

6. Хайруллин И.Х., Исмаилов Ф.Р., Саттаров Р.Р. Электромагнитные демпферы с продольными прорезями полого ротора // Электротехника. 2000. № 8. С. 27–29. EDN: GKFUGR.

7. Пат. 2003110 РФ, МПК G01P 15/105. Акселерометр / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмаилов, И.Ф. Янгиров. 04906100; Заявлено 01.30.1991; Опубл. 15.11.1993.

8. Вольдек А.И. Индукционные магнитогиродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 192 с.

9. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1968. 556 с.

10. Базаров Н.Х. Автоматика вибромашин. Ташкент: Узбекистан, 1976. 119 с.

11. Базаров Н.Х. Теоретические аспекты создания автоматизированных виброэлектроприводов // Автоматизированный электропривод: сб. ст. / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 542 с.

12. Белый И.В., Пешков П.М., Новаковская М.М. Влияние геометрических параметров плоского спирального индуктора на распределение давления и температуры в обрабатываемой заготовке // Изв. вузов. Электромеханика. 1985. № 1. С. 97–102.

13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Под общ. ред. И.Г. Арамоновича. М.: Наука, 1984. — 831 с.

14. Азовцев Ю.А., Баркова Н.А., Гаузе А.А. Вибрационная диагностика роторных машин и целлюлозно-бумажных комбинатов / СПбГУРП. 2014. 127 с.

15. Васильева Р.В. Вибростенды для тарировки виброметров и акселерометров в широком диапазоне частот // Серия: Передовой научно-технический и производственный опыт / Акад. наук СССР. Филиал Всесоюз. ин-та науч. и техн. информации. Приборы для измерения колебаний, вибраций, деформаций, перемещений, линейных и угловых размеров, скоростей, ускорений, времени, веса; Тема 31; № П-58-14/2. М.: Машгиз, 1958. 22 с.

16. Васильева Р.В., Цеханский К.Р., Шейнман Е.М., Фридлянд В.И. Аппаратура для исследования вибрации подшипников турбоагрегатов // Серия: К Всесоюзному совещанию работни-

ков промышленности по вопросам развития комплексной механизации и автоматизации производственных процессов и увеличения выпуска приборов и средств автоматизации/ М-во тяжелого машиностроения. Центр. науч.-исслед. ин-т технологии и машиностроения. М.: Машгиз, 1956. 12 с.

17. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015617007. Программа для расчета электромеханического вибрационного преобразователя с короткозамкнутым спиральным элементом / И.Ф. Янгиров, Д.В. Максудов. 2015614143, Заявл. 05.05.2015; Опубл. 20.07.2015.

18. Янгиров И.Ф. Преобразовательная характеристика преобразователя линейного ускорения // Приборы и системы управления. 2003. № 10. С. 47–51.

19. Yangirov I.F. Oscillation Eigenfrequency Determination of Electromechanical Transducers Spiral Spring // *Elektrotehnika*. 2011. No. 11. P. 58–61.

20. Yangirov I.F. Determining the Vibrational Eigenfrequency of the Spiral in Electomechanical Converters // *Russian Electrical Engineering*. 2002. No. 73. P. 83–88.

21. Янгиров И.Ф., Лобанов А.В., Халиков А.Р. Высоковольтный двухспиральный магнитокумулятивный генератор сильного магнитного поля // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. Т. 19. № 1. С. 106–116. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-106-116. EDN: OEMQAR.

22. Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А., Федосов Е.М. Физическая модель для экспериментального исследования электромеханического вибрационного преобразователя со спиральным замкнутым вторичным элементом // *Автоматизация. Современные технологии*. 2023. Т. 77, № 1. С. 3–8. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-1-3-8. EDN: YBBBOM.

References

1. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Khairullin T.I. Magnitoelektricheskii preobrazovatel'-elektrodvigatel' [Magnetoelectric Converter-Electric Motor]. *Mashinostroitel' — Mechanical Engineer*, 1992, No. 9, pp. 14. [in Russian].

2. Khairullin I.Kh., Ismagilov, F.R., Yangirov I.F., Khairullin T.I. Ustroistvo dlya vozbuzhdeniya krutil'nykh kolebanii [Device for Excitation of Torsional Vibrations]. *Mashinostroitel' — Mechanical Engineer*, 1993, No. 7, 8, pp. 19. [in Russian].

3. Yangirov I.F., Akhmetova E.O. Matematicheskaya model' spiral'nogo preobrazovatela s

uchetom osnovnykh elektromekhanicheskikh parametrov [Mathematical Model of a Spiral Converter Taking into Account the Main Electromechanical Parameters]. *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii»*, 17-18 maya 2013 g., g. Ishimbai [All-Russian Scientific and Practical Conference «Knowledge-Intensive Technologies in Mechanical Engineering», May 17-18, 2013, Ishimbay]. 2013, pp. 59–61. [in Russian].

4. Yangirov I.F. Vibratsionnyi elektrodvigatel' so spiral'nyim vtorichnym elementom [Vibration Electric Motor with a Spiral Secondary Element]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2008, No. 5, pp. 14–18. [in Russian].

5. Ismagilov F.R., Yangirov I.F. Takhogenerator-akselerometr s uluchshennymi metrologicheskimi kharakteristikami [Tachogenerator-Accelerometer with Improved Metrological Characteristics]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2011, No. 9, pp. 63a–66. EDN: OCBLRJ. [in Russian].

6. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Sattarov R.R. Elektromagnitnye dempfery s prodol'nymi prorezyami pologo rotora [Electromagnetic Dampers with Longitudinal Slots of a Hollow Rotor]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2000, No. 8, pp. 27–29. EDN: GKFUGR. [in Russian].

7. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Yangirov I.F. *Akselerometr* [Accelerometer]. Patent RF, No. 2003110, 15.11.1993. [in Russian].

8. Vol'dek A.I. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* [Induction Magnetohydrodynamic Machines with Liquid Metal Working Fluid]. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 192 p. [in Russian].

9. Babakov I.M. *Teoriya kolebanii* [Oscillation Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 556 p. [in Russian].

10. Bazarov N.Kh. *Avtomatika vibromashin* [Automatic Vibration Machines]. Tashkent, Uzbekistan, 1976. 119 p. [in Russian].

11. Bazarov N.Kh. Teoreticheskie aspekty sozdaniya avtomatizirovannykh vibroelektroprivodov [Theoretical Aspects of Creating Automated Vibroelectric Drives]. *Sbornik statei «Avtomatizirovannyi elektroprivod»* [Collection of Articles «Automated Electric Drive»]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 542 p. [in Russian].

12. Belyi I.V., Peshkov P.M., Novakovskaya M.M. Vliyanie geometricheskikh parametrov ploskogo spiral'nogo induktora na raspredelenie davleniya i temperatury v obrabatyvaemoi zagotovke [Influence of Geometric Parameters of a Flat Spiral Inductor on the Distribution of Pressure

and Temperature in the Workpiece]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika — Izv. of Universities. Electromechanics*, 1985, No. 1, pp. 97–102. [in Russian].

13. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Opre-deleniya, teoremy, formuly* [Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers. Definitions, Theorems, Formulas]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 831 p. [in Russian].

14. Azovtsev Yu.A., Barkova N.A., Gauze A.A. *Vibratsionnaya diagnostika rotornykh mashin i tsellyulozno-bumazhnykh kombinatov* [Vibration Diagnostics of Rotary Machines and Pulp and Paper Mills]. SPbGURP. 2014. 127 p. [in Russian].

15. Vasil'eva R.V. *Vibrostendy dlya tarirovki vibrometrov i akselerometrov v shirokom diapazone chastot* [Vibration Stands for Calibration of Vibrometers and Accelerometers in a Wide Frequency Range]. *Seriya: Peredovoi nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi opyt. Akad. nauk SSSR. Filial Vsesoyuz. in-ta nauch. i tekhn. informatsii. Pribory dlya izmereniya kolebanii, vibratsii, deformatsii, peremeshchenii, lineinykh i uglovykh razmerov, skorostei, uskorenii, vremeni, vesa; Tema 31; № P-58-14/2* [Series: Advanced Scientific, Technical and Production Experience. Acad. Sciences of the USSR. Vsesoyuz Branch. Institute of Science and Tech. Information. Instruments for Measuring Oscillations, Vibrations, Deformations, Movements, Linear and Angular Dimensions, Speeds, Accelerations, Time, Weight; Topic 31; No. P-58-14/2]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 22 p. [in Russian].

16. Vasil'eva R.V., Tsekhanskii K.R., Sheinman E.M., Fridlyand V.I. *Apparatura dlya issledovaniya vibratsii podshipnikov turboagregatov* [Equipment for Studying the Vibration of Bearings of Turbine Units]. *Seriya: K Vsesoyuznomu soveshchaniyu rabotnikov promyshlennosti po voprosam razvitiya kompleksnoi mekhanizatsii i avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov i uvelicheniya vypuska priborov i sredstv avtomatizatsii. M-vo tyazhelogo mashinostroeniya. Tsentr. nauch.-issled. in-t tekhnologii i mashinostroeniya* [Series: To the All-Union Meeting of Industrial Workers on the Development of Complex Mechanization and Automation of Production Processes and Increasing the Production of Instruments and Automation Equipment. Ministry of Heavy Engineering. Center.

Scientific Research Institute of Technology and Mechanical Engineering]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. 12 p. [in Russian].

17. Yangirov I.F., Maksudov D.V. *Programma dlya rascheta elektromekhanicheskogo vibratsionnogo preobrazovatela s korotkozamknutym spiral'nym elementom* [Program for Calculating an Electromechanical Vibration Transducer with a Short-Circuited Spiral Element]. Certificate of Registration of a Computer Program No. 2015617007, 20.07.2015. [in Russian].

18. Yangirov I.F. *Preobrazovatel'naya kharakteristika preobrazovatela lineinogo uskoreniya* [Transforming Characteristic of the Transformer of Linear Acceleration]. *Pribory i sistemy upravleniya — Instruments and Control Systems*, 2003, No. 10, pp. 47–51. [in Russian].

19. Yangirov I.F. *Oscillation Eigenfrequency Determination of Electromechanical Transducers Spiral Spring* [Oscillation Eigenfrequency Determination of Electromechanical Transducers Spiral Spring]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2011, No. 11, pp. 58–61. [in Russian].

20. Yangirov I.F. *Determining the Vibrational Eigenfrequency of the Spiral in Electomechanical Converters*. *Russian Electrical Engineering*, 2002, No. 73, pp. 83–88.

21. Yangirov I.F., Lobanov A.V., Khalikov A.R. *Vysokovol'tnyi dvukhspral'nyi magnitokumulyativnyi generator sil'nogo magnitnogo polya* [Double-Spiral Magnetic-Cumulative Source of Super Strong Magnetic Fields]. *Elektrotekhnicheskii i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, Vol. 19, No. 1, pp. 106–116. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-106-116. EDN: OEMQAR. [in Russian].

22. Yangirov I.F., Khalikov A.R., Safiullin R.A., Fedosov E.M. *Fizicheskaya model' dlya eksperimental'nogo issledovaniya elektromekhanicheskogo vibratsionnogo preobrazovatela so spiral'nym zamknutym vtorichnym elementom* [Physical Model for Experimental Research of an Electromechanical Vibration Transducer with a Spiral Closed Secondary Element]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii — Automation. Modern Technologies*, 2023, Vol. 77, No. 1, pp. 3–8. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-1-3-8. EDN: YBBBOM. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 06.09.2023; одобрена после рецензирования 13.09.2023; принята к публикации 20.09.2023.

The article was submitted 06.09.2023; approved after reviewing 13.09.2023; accepted for publication 20.09.2023.