

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

В. Ю. Нейман¹, Л. А. Нейман¹, С. Ю. Лаппи¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Актуальность выполненных исследований обусловлена перспективностью практического использования электромагнитных вибровозбудителей в вибрационных машинах, широко применяемых в горной и строительной отрасли для интенсификации технологических процессов, связанных с переработкой минерального сырья. Приводятся некоторые результаты по разработке электромагнитного вибровозбудителя, входящего в состав двухмассовой вибрационной технологической машины, и формированию подхода к созданию и дальнейшей реализации его математической модели, обеспечивающей широкие возможности при проведении динамических расчетов для анализа сложных электромеханических процессов и рационального выбора параметров при проектировании. На основе данных математической модели разработана компьютерная имитационная модель, обеспечивающая широкие возможности анализа периодических электромеханических процессов с потерями энергии в переходных и установившихся режимах. Приведены рекомендации по реализации математической модели в виде алгоритма динамического расчета, выполненного с помощью аппарата структурного моделирования в Matlab Simulink. В качестве примера динамического расчета представлены результаты имитационного моделирования электромагнитного вибровозбудителя в виде диаграмм, отображающих рабочий процесс включения, выхода на установившийся режим и режим наброса нагрузки при питании от промышленного источника электроэнергии по однополупериодной схеме выпрямления. Установлено качественное и количественное совпадение результатов моделирования с результатами, полученными на физической модели, имеющих расхождения, не превышающие 6%. Результаты исследований могут быть полезны для специалистов-электромехаников, занимающихся расчетом и проектированием вибрационных технологических машин с электромагнитными вибровозбудителями.

Ключевые слова: вибрационные машины и технологии; электромагнитный вибровозбудитель; двухмассовая колебательная система; уравнения Лагранжа; математическая модель; имитационная модель; методы структурного моделирования; электромеханические процессы.

Для цитирования: Нейман В. Ю., Нейман Л. А., Лаппи С. Ю. Математическое моделирование динамических процессов электромагнитного вибровозбудителя для технологических машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 203–216. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_203.

Mathematical modeling of dynamic processes in electromagnetic vibration exciters for technological machines

V. Yu. Neyman¹, L. A. Neyman¹, S. Yu. Lappi¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The actuality of the research performed is due to the promising practical use of electromagnetic vibration exciters in vibration machines, which are widely used in the mining and construction industry to intensify technological processes associated with the processing of mineral raw materials. An approach to the creation of a mathematical model of a vibration technological machine is considered. Based on the data of the mathematical model, a computer simulation model is developed that provides wide opportunities for the analysis of periodic electromechanical processes with energy loss in transient and steady-state modes. Recommendations are given for creating a mathematical model in the form of a dynamic calculation algorithm performed using the structural modeling aids of Matlab Simulink. As an example of a dynamic calculation, the results of the simulation of the electromagnetic vibration exciter are presented in the form of diagrams showing the operating process of switching on, reaching the steady state and the load surge mode when powered from an industrial power source using a half-wave rectification circuit. The simulation results are qualitatively and quantitatively agree with the results obtained using a physical model. The disagreement value is no more than 6%. The research results can be useful for specialists in electromechanics engaged in the calculation and design of vibration technological machines with electromagnetic vibration exciters.

Key words: Vibrating machines and technologies; electromagnetic vibration exciter; two-mass oscillatory system; Lagrange equations; mathematical model; simulation model; structural modeling methods; electromechanical processes.

For citation: Neyman V. Yu., Neyman L. A., Lappi S. Yu. Mathematical modeling of dynamic processes in electromagnetic vibration exciters for technological machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):203–216. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_203.

Введение

Вибрационные технологические машины с возвратно-поступательным движением рабочих органов широко используются в различных отраслях промышленности. С их помощью выполняются технологические процессы в горном и строительном производстве при переработке минерального сырья, связанные с перемещением и дозировкой сыпучих сред, сортировкой сырья, дроблением и измельчением рудного и строительного материала и др. [1,2].

Необходимой и неотъемлемой составляющей оборудования, реализующего данные технологии, являются вибровозбудители, формирую-

щие вибрационное поле и входящие в основную структуру механической колебательной системы вибрационной технологической машины [3,4].

Анализ технических характеристик имеющегося в настоящее время оборудования показывает широкий спектр его возможностей по силовым и энергетическим показателям [5].

Развитие вибрационной техники и технологий тесно связано с созданием различных типов вибровозбудителей, работающих в условиях интенсивных динамических нагружений, что вызвано необходимостью повышения их надежности, безопасности, улучшением эксплуатационных характеристик [6].

Существует большое многообразие типов схем вибровозбудителей, отличающихся по принципу преобразования того или иного вида энергии в энергию механических колебаний [7].

Значимое место среди вариантов схем такого оборудования занимают электромагнитные вибровозбудители на основе линейного электромагнитного привода [8,9].

По энергетическим показателям они несколько уступают оборудованию с вращательным приводом, но отличаются простотой конструкции и экономичностью в работе [10–12].

Основным преимуществом оборудования на основе электромагнитных вибровозбудителей является возможность снижения энергопотребления КПД при работе на резонансных или близких к резонансным режимам [13, 14]. Они не имеют вращающихся узлов, что значительно увеличивает ресурс работы [15, 16].

Перечисленные достоинства возможны только при условии рационального выбора параметров электромагнитного привода и их точном согласовании с параметрами механической колебательной системы [17]. Проведение таких исследований связано с необходимостью учета большого числа взаимосвязанных факторов, что связано с построением их точных динамических моделей [18, 19].

В статье приводятся некоторые результаты по разработке электромагнитного вибровозбудителя, применяемого в приводе вибрационного питателя, и предложения по созданию и реализации его математической модели.

Постановка задачи исследований

Вопросам расчета динамики вибрационных технологических машин уделяется значительное внимание [20].

Однако подобные расчеты в своем большинстве ограничены получением упрощенных аналитических соотношений [21].

При наличии многосторонних связей одной из главных задач точного расчета следует признать создание точных динамических моделей вибрационных машин.

В качестве объекта исследований рассматривается конструкция электромагнитного вибровозбудителя в составе вибрационной технологической машины, имеющей две степени свободы.

Цель работы — формирование подхода к созданию и реализации математической модели электромагнитного вибровозбудителя, входящего в состав двухмассовой вибрационной технологической машины, расширяющего возможности динамического расчета и исследования электромеханических процессов с применением современных методов компьютерного моделирования.

Вариант схемы однокатушечного электромагнитного вибровозбудителя представлен на рис. 1.

Вариант схемы однокатушечного электромагнитного вибровозбудителя представлен на рис. 1. Электромагнитный вибровозбудитель содержит катушку возбуждения 1, якорь 2 в виде сердечника, статор 3, корпус 4, пружину растяжения-сжатия 5 с витками-фланцами 6 и 7, опорную плиту 8, соединительный шток 9, регулировочный груз 10, подвижный сердечник 11 и пружину сжатия 12. Пружина растяжения-сжатия 5 выполнена в виде прорезной пружины, содержащей в средней части сквозной винтовой паз с нерабочими по краям витками-фланцами 6 и 7, которые жестко связаны с корпусом 4 и опорной плитой 8. Рабочие витки пружины растяжения-сжатия 5 обладают

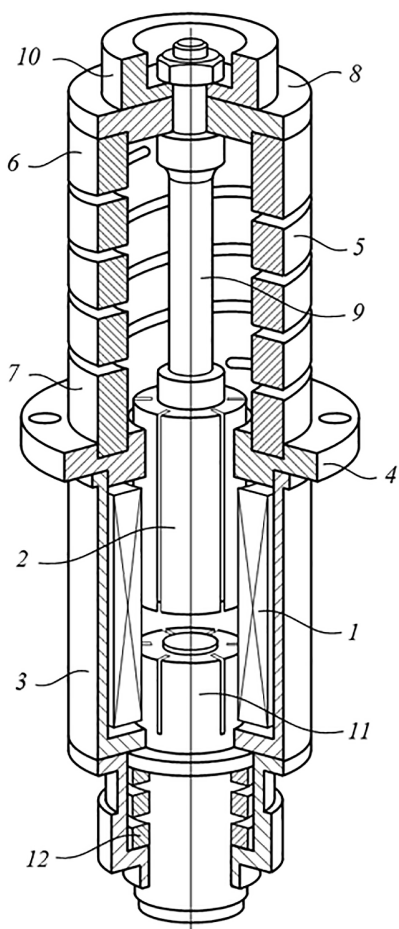


Рис. 1. Однокатушечный электромагнитный вибровозбудитель: 1 – катушка возбуждения; 2 – якорь в виде сердечника; 3 – статор; 4 – корпус; 5 – пружина растяжения-сжатия; 6, 7 – витки-фланцы пружины; 8 – опорная плита; 9 – соединительный шток; 10 – регулировочный груз; 11 – подвижный сердечник; 12 – пружина сжатия

Fig. 1. Single coil electromagnetic vibration exciter: 1 – excitation coil; 2 – anchor in the form of a core; 3 – stator; 4 – body; 5 – tension-compression spring; from; 6, 7 – coils-flanges of the spring; 8 – base plate; 9 – connecting rod; 10 – adjusting weight; 11 – movable core; 12 – compression spring

определенными упругими свойствами и податливостью в продольном относительно оси направлении. Крепление

вибровозбудителя к виброплатформе технологической машины выполняется с помощью специальных отверстий, выполненных в корпусе 4.

При протекании по катушке возбуждения 1 пульсирующего тока в воздушном зазоре возникает пульсирующее магнитное поле, что приводит к созданию пульсирующей магнитной силы, вытягивающей якорь 2 и деформирующей рабочие витки пружины растяжения-сжатия 5. Питание электромагнитного вибровозбудителя выполняется импульсами тока от промышленного источника напряжения по однополупериодной схеме выпрямления.

Математическая модель электромагнитной вибрационной машины

Согласно установленным связям на рис. 2 приведена расчетная схема двухмассовой вибрационной технологической машины.

Для математического описания движения колебательной системы (рис. 2) с двумя степенями свободы ($N = 2$) целесообразно использовать уравнения Лагранжа второго рода [22–24]. С учетом установленных обобщенных координат уравнения могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} - \frac{\partial T}{\partial x_1} = Q_i^{\Pi} + Q_i^{\Phi} + Q_i^B, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} - \frac{\partial T}{\partial x_2} = Q_i^{\Pi} + Q_i^{\Phi} + Q_i^B, \quad (2)$$

где T – кинетическая энергия системы, Дж; Q_i^{Π} , Q_i^{Φ} , Q_i^B – обобщенные силы, Н, соответствующие потенциальной энергии, энергиям рассеяния, внешних воздействий и сил трения; x_1, x_2 – обобщенные координаты, м; \dot{x}_1, \dot{x}_2 – обобщенные скорости, м/с; $i = 1, 2, 3, \dots, N$ – число степеней свободы.

Обобщенная координата x_1 определяет положение связанных инер-

ционных масс m_1 и m_3 , а обобщенная координата x_2 — положение связанных инерционных масс m_2 и m_4 . Обобщенные скорости \dot{x}_1 и \dot{x}_2 характеризуют соответствующие скорости их перемещения.

Рассматривая движения центров масс в выбранной системе обобщенных координат (рис. 2), кинетическую энергию системы с учетом обобщенных скоростей представим в виде

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N=2} m_i \dot{x}_i^2 = \frac{(m_1 + m_3) \dot{x}_1^2}{2} + \frac{(m_2 + m_4) \dot{x}_2^2}{2}. \quad (3)$$

Обобщенные силы Q_i^Π , Q_i^Φ определяются равенствами

$$Q_i^\Pi = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}; \quad Q_i^\Phi = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i},$$

где Π — потенциальная энергия системы, Дж; Φ — диссипативная функция (функция Рэлея).

Статические коэффициенты k_1 и k_2 характеризуют жесткости упругих связей, а коэффициенты b_1 и b_2 — диссипативные свойства этих связей (вязкое трение).

Обобщенные силы, вызванные деформацией упругих связей и энергией рассеяния:

$$Q_i^\Pi = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{i=1}^{N=2} \frac{1}{2} [k_1 (x_1 - x_2)^2 + k_2 x_2^2]; \quad (4)$$

$$Q_i^\Phi = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} = -\frac{\partial}{\partial \dot{x}_i} \sum_{i=1}^{N=2} \frac{1}{2} [b_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + b_2 \dot{x}_2^2]. \quad (5)$$

Частные производные от кинетической энергии (4) и производные по времени:

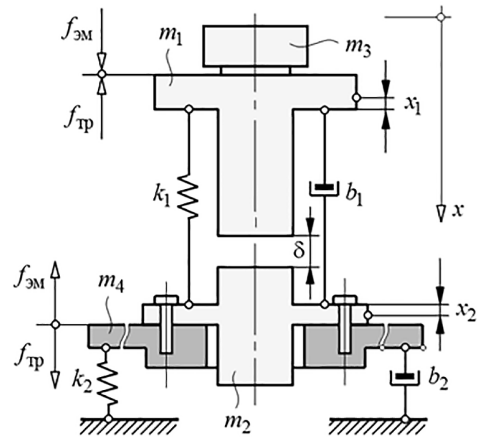


Рис. 2. Расчетная схема двухмассовой вибрационной технологической машины: m_1 — масса якорной части вибратора, кг; m_2 — масса статорной части вибратора, кг; m_3 — масса груза, кг; m_4 — масса платформы, кг; x_1 , x_2 — обобщенные координаты, м; δ — рабочий воздушный зазор, м; k_1 , k_2 — коэффициенты жесткости упругих связей Н/м; b_1 , b_2 — коэффициенты линейного сопротивления, Н·с/м; $f_{мп}$ — сила сухого трения скольжения Н; $f_{эм}$ — электромагнитная сила, Н.

Fig. 2. Design diagram of a two-mass vibration technological machine: m_1 — is the mass of the anchor part of the vibrator, kg; m_2 — is the mass of the stator part of the vibrator, kg; m_3 — is the weight of the cargo, kg; m_4 — platform weight, kg; x_1 , x_2 — are generalized coordinates, m; δ — working air gap, m; k_1 , k_2 — are the stiffness coefficients of elastic bonds N/m; b_1 , b_2 — coefficients of linear resistance, N·s/m; $f_{мп}$ — fr is the force of dry sliding friction, N; $f_{эм}$ — electromagnetic force, N.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = (m_1 + m_3) \frac{d^2 x_1}{dt^2}; \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = (m_2 + m_4) \frac{d^2 x_2}{dt^2}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0.$$

Частные производные от потенциальной энергии (4):

$$-\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = -k_1 (x_1 - x_2); \quad (8)$$

$$-\frac{\partial \Pi}{\partial x_2} = k_1(x_1 - x_2) - k_2 x_2. \quad (9)$$

Частные производные от диссипативной функции (5):

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = -b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right); \quad (10)$$

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_2} = b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - b_2 \frac{dx_2}{dt}. \quad (11)$$

Проекции обобщенных сил, вызванных внешними воздействиями и силами сухого трения скольжения:

$$Q_{x_1}^B = -f_{\text{тр}} \text{sign } v + f_{\text{эм}}(i, \delta); \quad (12)$$

$$Q_{x_2}^B = f_{\text{тр}} \text{sign } v - f_{\text{эм}}(i, \delta), \quad (13)$$

где $f_{\text{эм}}(i, \delta)$ – вынуждающая электромагнитная сила, Н; $v = \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt}$ – скорость относительного скольжения соприкасающихся инерционных масс, м/с.

Принимая во внимание (3)–(13), уравнения (1) и (2) приводятся к виду

$$(m_1 + m_3) \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -k_1(x_1 - x_2) - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - f_{\text{тр}} \text{sign } v + f_{\text{эм}}(i, \delta); \quad (14)$$

$$(m_2 + m_4) \frac{d^2 x_2}{dt^2} = k_1(x_1 - x_2) - k_2 x_2 + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - b_2 \frac{dx_2}{dt} + f_{\text{тр}} \text{sign } v - f_{\text{эм}}(i, \delta). \quad (15)$$

$$\begin{cases} u(t) = ir + \frac{d\psi(i_\mu, \delta)}{dt}, \text{ где } i = i_\pi + i_\mu; \\ (m_1 + m_3) \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1(x_1 - x_2) + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) = -f_{\text{тр}} \text{sign } v + f_{\text{эм}}(i, \delta); \\ (m_2 + m_4) \frac{d^2 x_2}{dt^2} - k_1(x_1 - x_2) + k_2 x_2 - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + b_2 \frac{dx_2}{dt} = f_{\text{тр}} \text{sign } v - f_{\text{эм}}(i, \delta). \end{cases} \quad (18)$$

Электрическая, магнитная и механическая системы вибровозбудителя связаны между собой через электромагнитные процессы, которые описываются уравнением электрического равновесия, предусматривающим насыщение стальных участков и потери энергии, поступающей из сети:

$$u(t) = ir + \frac{d\psi(i_\mu, \delta)}{dt}, \quad (16)$$

где $u(t)$ – напряжение на входе цепи, В; $i = i_\pi + i_\mu$ – ток в цепи питания катушки возбуждения, А, включающий ток потерь i_π , вызванный вихревыми токами и гистерезисом, и ток намагничивания i_μ ; $\psi = \psi(i_\mu, \delta)$ – потокосцепление катушки возбуждения, Вб; r – сопротивление в цепи питания катушки, Ом.

Входящая в уравнения (12)–(16) величина воздушного рабочего зазора δ характеризует положение якоря относительно статора, является переменной величиной и зависит от времени:

$$\delta(t) = \delta_0 - x_1(t) + x_2(t), \quad (17)$$

где δ_0 – величина зазора в положении статического равновесия при обесточенной катушке, м.

Уравнения (14)–(16) образуют полную систему дифференциальных уравнений, отражающих электрическое и механическое равновесие динамической системы, которые могут быть представлены в окончательном для решения виде:

Реализация математической модели. Решение системы дифференциальных уравнений (18) выполнялось методами структурного моделирования в программе Matlab Simulink [25–27].

Вариант структурной схемы имитационной модели с двумя степенями свободы механической системы представлен на рис. 3.

Для питания модели применяется однофазный источник электроэнергии «АС» промышленной частоты 50 Гц, установленный на входе электрической подсистемы «Electrical Subsystem». На выходе электрической подсистемы имеем источник сигнала в виде напряжения, получаемого при однополупериодном выпрямлении.

С помощью подсистемы «Magnetic Subsystem» реализуется первое уравнение системы (18). Второе и третье уравнения системы (18) реализуются с помощью подсистемы «Mechanical Subsystem».

Для фиксации выходных переменных используется система измерений в виде виртуальных приемников сигналов «Scope» (см. рис. 3). Расчет интегральных показателей осуществляется с помощью измерительного блока «Measuring Module». На выходе измерительного блока отображаются сигналы, пропорциональные потре-

бляемой от источника питания мощности, действующим значениям тока и напряжения в цепи питания катушки возбуждения, коэффициенту мощности электромагнитного вибратора.

При создании модели выполнялся предварительный расчет статических параметров потокосцепления $\psi = f(i_u, \delta)$ и электромагнитного усилия $f_{эм} = f(i, \delta)$, которые затем представлялись в виде двумерного массива (14×17), содержащего по 238 значений опорных точек. Задание функции двух аргументов и интерполяция статических параметров потокосцепления и электромагнитного усилия выполнялись средствами Simulink с использованием блоков двумерных таблиц.

Расчет статических параметров производился с помощью решения полевой задачи с использованием стандартных программ по расчету магнитного поля [28–30]. Это позволило с высокой степенью точности учесть геометрию стальных элементов конструкции якоря и статора. С методикой подобных расчетов можно ознакомиться в работах [31, 32].

Для верификации созданной имитационной модели в качестве исходных данных, согласно с расчетной схемой на рис. 2, использовались следующие параметры модели: $m_1 = 0,6$ кг;

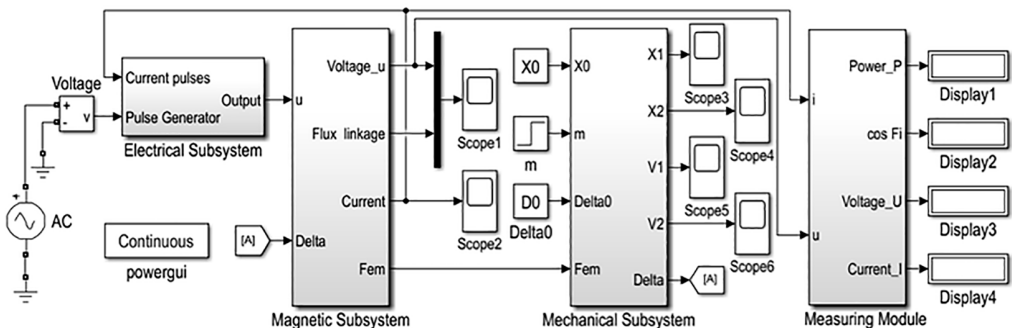


Рис. 3. Имитационная модель вибрационной машины в Matlab Simulink
Fig. 3. Simulation model of a vibration machine in Matlab Simulink

$m_2 = 2,2$ кг; $m_3 = 0,2$ кг; $m_4 = 6$ кг; $k_1 = 50 \cdot 10^3$ Н/м; $k_2 = 50 \cdot 10^3$ Н/м; $b_1 = 15$ Н·с/м; $b_2 = 15$ Н·с/м; $f_{тр} = 6$ Н. Действующее напряжение источника $U = 160$ В. Катушка возбуждения с общим количеством $w = 1035$ выполнена из медного проводника, имеющего круглое сечение. Активное сопротивление в цепи питания катушки возбуждения составляет $r = 8,5$ Ом. Якорь и статор выполнены из конструкционной стали «Сталь-3».

Результаты имитационного моделирования в виде диаграмм тока катушки возбуждения $i(t)$, перемещения обобщенных координат $x_1(t)$, $x_2(t)$, обобщенных скоростей $v_1(t)$, $v_2(t)$ и электромагнитного усилия $f_{эм}(t)$, отражающие процесс включения модели вибрационной машины и выхода на установившийся режим работы, представлены на рис. 4, а–д.

Качественный характер поведения диаграмм, полученных с помощью имитационного моделирования, полностью соответствует процессам, полученным на физических моделях.

Верификация имитационной модели выполнялась путем качественного сравнения поведения временных диаграмм, отражающих режимы работы электромагнитного вибровозбудителя, и количественного совпадения амплитудных значений величин и интегральных показателей, полученных с помощью имитационного моделирования и физического эксперимента. Сравнивались

амплитуды колебаний обобщенных координат X_{m1} , X_{m2} и амплитуда тока I_m в цепи питания катушки возбуждения. В качестве интегральных значений показателей использовались действующие значения тока I и напряжения U на входе катушки возбуждения, потребляемая от источника активная мощность P и коэффициент мощности $\cos\phi$.

Сравнение результатов представлено в таблице. Расхождение расчетных и экспериментальных значений показателей не превышает погрешности 4...6%, что вполне допустимо.

Также следует отметить, что применение модели сухого трения, нелинейным образом зависящей от скорости скольжения, существенно не отразилось на результатах моделирования при сравнении с моделью сухого трения, в которой данная зависимость от скорости скольжения отсутствует. Это объясняется тем, что вынужденная электромагнитная сила, действующая в механической колебательной системе (см. рис. 1), существенно превышает силу сухого трения покоя.

Заключение

Широкое использование вибрационных технологий в горной и строительной отраслях создает новые предпосылки при разработке мероприятий по развитию вибрационной техники и формированию предложений по совершенствованию существующих подходов для расчета оборудования,

Таблица

Сравнение расчетных и экспериментальных значений показателей
Comparison of calculated and experimental values of indicators

Показатели	X_{m1}	X_{m2}	I	I_m	U	P	$\cos\phi$
	мм	мм	А	А	В	Вт	о.е.
Расчет	9.8	2.2	6.63	13.9	135.9	408.3	0.453
Эксперимент	9.4	2.1	6.89	14.3	142.7	420.5	0.427

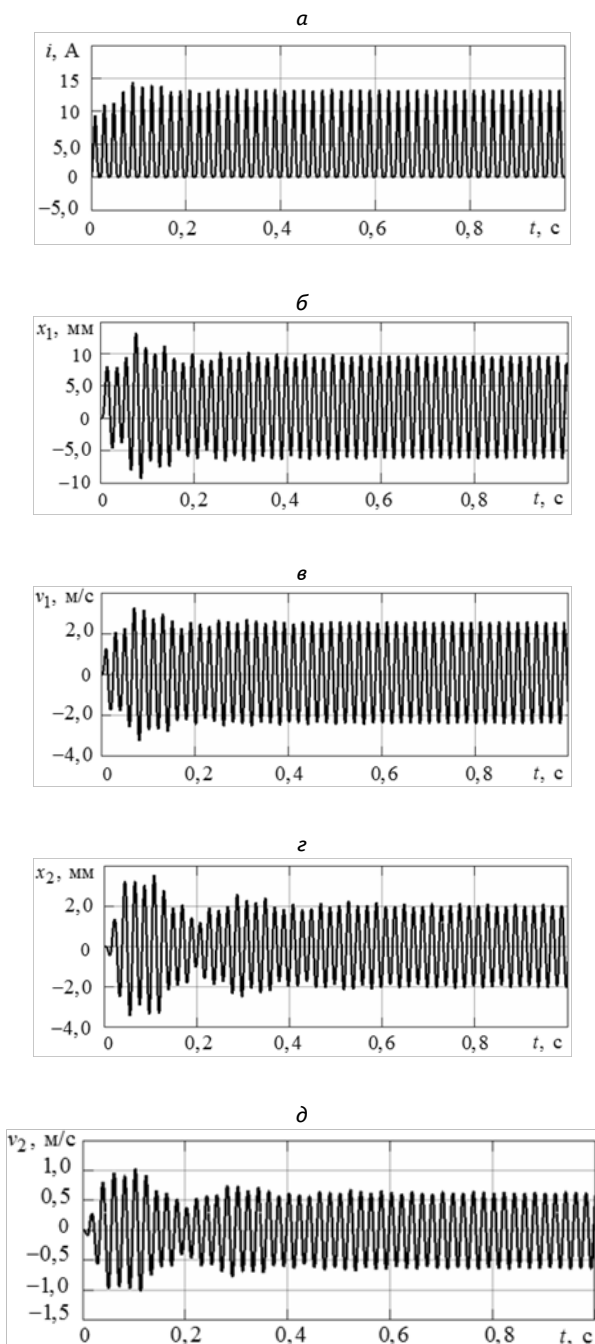


Рис. 4. Временные диаграммы: тока катушки возбуждения (а); перемещения центра массы якорной части (б); скорости центра массы якорной части (в); перемещения центра массы статорной части (г); скорости центра массы статорной части (д)

Fig. 4. Timing charts: excitation coil current (a); center displacement the mass of the anchor part (b); speed of the center of mass of the anchor part (c); displacement of the center of mass of the stator part (d); speed of the center of mass of the stator part (e)

задействованного в данных технологиях, включая современные методы компьютерного моделирования.

На примере конструкции однокатушечного электромагнитного вибровозбудителя, входящего в состав двухмассовой вибрационной технологической машины питателя, рассмотрены основные этапы реализации математической модели в виде системы дифференциальных уравнений, отражающих электрическое и механическое равновесие динамической системы с двумя степенями свободы, полученных методами Лагранжа.

Разработана имитационная модель вибрационного питателя с электро-

магнитным вибровозбудителем, отличающаяся от известных многосторонними связями в электромеханической системе. Установлено качественное и количественное совпадение результатов имитационного моделирования с результатами, полученными с помощью физической модели, расхождение которых не превышает 4...6%, и является допустимым для инженерных расчетов.

Результаты исследований могут представлять определенный интерес для специалистов в области расчета и проектирования вибрационной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вайсберг Л. А., Сафронов А. Н.* Дробильно-измельчительное оборудование вибрационного действия для переработки сырья и промышленных отходов // *Экология и промышленность России*. — 2019. — Т. 23. — № 7. — С. 4–9. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-7-4–9.

2. *Бочков В. С., Дягилев С. Д.* Анализ одностадийного и двухстадийного дробления сланца в щековой дробилке ШД 10М для изготовления бетонно-мозаичной плитки // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 7. — С. 78–84. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-78–84.

3. *Дьяконова В. Я., Калиновская Т. Г., Дьяконов М. Н., Волчкова И. В.* Модернизация вибровозбудителя грохота ГИСЛ при переходе на новый режим работы // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. — 2020. — № 2. — С. 99–108. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-99–108.

4. *Шихов А. М., Румянцев С. А., Азаров Е. Б.* Повышение энергоэффективности при пуске и работе вибротранспортных машин с тремя вибровозбудителями // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 4. — С. 137–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-137–145.

5. *Блехман И. И., Блехман Л. И., Вайсберг Л. А., Васильков В. Б.* Энергозатраты в вибрационных транспортно-технологических машинах // *Обогащение руд*. — 2019. — № 1. — С. 18–27. DOI: 10.17580/or.2019.01.03.

6. *Ляшенко В. И., Дятчин В. З., Франчук В. П.* Совершенствование вибрационных питателей-грохотов для горно-металлургической промышленности // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. — 2018. — Т. 61. — № 6. — С. 470–477. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-470–477.

7. *Блехман И. И.* Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. — СПб.: ИД «Руда и металлы», 2013. — 640 с.

8. *Афанасьев А. И., Андрюшенков Д. Н., Закаменных А. Ю.* Резонансный грохот с линейным электромагнитным двигателем // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. — 2010. — № 2. — С. 57–60.

9. *Neuman V. Yu.* Integrated linear electromagnetic motors for impulse technologies // *Russian Electrical Engineering*. 2003, vol. 74, no. 9, pp. 30–35.

10. *Павленко А. В., Батищев Д. В., Гуммель А. А., Большенко И. А.* Проектирование электромагнитных приводов, устойчивых к внешним механическим возмущающим

воздействиям // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2017. — Т. 60. — № 3. — С. 17–27. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-3-17-27.

11. *Иббодуллаев М. И., Нуралиев А. К., Есенбеков А. Ж., Назаров А. И.* Резонансный электромагнитный вибровозбудитель колебаний с обратной связью // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. — 2020. — № 1. — С. 62–66. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-62-66.

12. *Neuman L. A., Neyman V. Yu.* Complex analysis of electromagnetic machines for vibro-impact technologies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, Vol. 87, art. 032026. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032026.

13. *Афанасьев А. И., Суслов Д. Н., Чиркова А. А.* Анализ эффективности работы вибровозбудителей резонансных вибротранспортных машин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2018. — № 2. — С. 68–75. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-68-75.

14. *Гнездюлов А. А.* О реализации резонансных режимов технологических вибрационных машин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2019. — № 1 (171). — С. 159–163.

15. *Makarov L. N., Denisov V. N., Kurilin S. P.* Designing and modeling a linear electric motor for vibration-technology machines // Russian Electrical Engineering, 2017, Vol. 88, no. 3, pp. 166–169. DOI: 10.3103/S1068371217030129.

16. *Neiman L. A., Neiman V. Yu., Shabanov A. S.* A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive // Russian Electrical Engineering. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 757–760. DOI: 10.3103/S1068371214120104.

17. *Ивашин В. В., Кудинов А. К., Певчев В. П.* Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2012. — № 1. — С. 72–75.

18. *Neuman L. A., Neyman V. Yu., Obukhov K. A.* New method of the synchronous vibratory electromagnetic machine mechatronic module control // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017. Conference Proceedings, 2017, pp. 516–519. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981806.

19. *Neuman L. A., Neyman V. Yu.* Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and low-frequency vibrations generation systems // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

20. *Черно А. А., Гуров А. П., Минчула А. С., Безверхний Д. Л.* Моделирование электро-механических процессов в энергосберегающих электромагнитных приводах вибрационных установок // Электротехнические и компьютерные системы. — 2011. — № 3. — С. 397–399.

21. *Афанасьев А. И., Казаков Ю. М., Саитов В. И.* Математическая модель резонансной вибротранспортной машины с изменяющейся частотой собственных колебаний // Научный вестник. — 2016. — № 1 (7). — С. 132–141. DOI: 10.17117/nv.2016.01.132.

22. *Hendzel Z., Rykała Ł.* Modelling of dynamics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels with the use of Lagrange equations of the second kind // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2017, vol. 22, no. 1, pp. 81–99. DOI: 10.1515/ijame-2017-0005.

23. *Van Nguyen T., Petre R. A., Stroe I.* Calculus of axial force in a mechanism using Lagrange equations // INCAS Bulletin. 2016, vol. 8, no. 2, pp. 97–108. DOI: 10.13111/2066-8201.2016.8.2.8.

24. *Petre R. A., Nichifor S. E., Craifaleanu A., Stroe I.* Using Lagrange Equations to Study the Relative Motion of a Mechanism // International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering. 2020, vol. 14, no. 10, pp. 421–425.

25. *Суворов И. Ф., Романова В. В., Хромов С. В.* Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/SIMULINK // Вестник Южно-Уральского государственного

ного университета. Серия: Энергетика. — 2016. — Т. 16. — № 3. — С. 72–83. DOI: 10.14529/power160309.

26. Xu L., Song J. G., Lin Q. Q. Brushless DC motor speed control system Simulink simulation // 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). 2016, pp. 62–66. DOI: 10.1109/ICPRE.2016.7871173.

27. Kiyakli A. O., Solmaz H. Modeling of an electric vehicle with MATLAB/Simulink // International journal of automotive science and technology. 2018, vol. 2, no. 4, pp. 9–15. <https://doi.org/10.30939/ijastech..475477>.

28. Крутиков К. К., Рожков В. В. Особенности моделирования электрического и магнитного поверхностного эффекта от переменных электромагнитных полей в FEMM // Электричество. — 2020. — № 8. — С. 51–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-51-57.

29. Shevchenko V. P., Babiychuk O. B., Boltenkov V. O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex // Applied aspects of information technology. 2019, vol. 2(4), pp. 317–327.

30. Tatevosyan A. S., Tatevosyan A. A., Zaharova N. V. Calculation of non-stationary magnetic field of the polarized electromagnet with the external attracted anchor // Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 1050(1), art. 012086. DOI:10.1088/1742-6596/1050/1/012086.

31. Andreeva E. G., Semina I. A., Orlov A. S. The research of three-dimensional magnetic field of the hybrid magnetic system in the ANSYS MAXWELL program // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016, art. 7818964. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146974.

32. Andreeva E. G., Gritsay A. S. Classification and research of electro-technical devices with unclosed magnetic core // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2019, vol. 1260, no. 5, art. 052001. DOI:10.1088/1742-6596/1260/5/052001. **PLA**

REFERENCES

1. Vajsberg L. A., Safronov A. N. Vibration crushing and grinding equipment for processing raw materials and industrial waste. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019, vol. 23, no. 7, pp. 4–9. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-7-4-9.

2. Bochkov V. S., Dyagilev S. D. Analysis of one-stage and two-stage crushing of shale in jaw crusher ShchD 10M for manufacture of terrazzo tiles. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp. 78–84. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-78-84.

3. D'yakonova V. Ya., Kalinovskaya T. G., D'yakonov M. N., Volchkova I. V. Modernization of the vibration exciter of the GISL screen when switching to a new operating mode. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*. 2020, no. 2, pp. 99–108. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-99-108.

4. Shikhov A. M., Rumyantsev S. A., Azarov E. B. Improving energy efficiency during the start-up and operation of vibrotransport machines with three vibration exciters. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 4, pp. 137–145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-137-145.

5. Blekhman I. I., Blekhman L. I., Vajsberg L. A., Vasil'kov V. B. Energy consumption in vibrating transport and technological machines. *Obogashchenie rud*. 2019, no. 1, pp. 18–27. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2019.01.03.

6. Lyashenko V. I., Dyatchin V. Z., Franchuk V. P. Improvement of vibrating screen feeders for the mining and metallurgical industry. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya*. 2018, vol. 61, no. 6, pp. 470–477. [In Russ]. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-470-477.

7. Blekhman I. I. *Teoriya vibracionnyh processov i ustrojstv. Vibracionnaya mekhanika i vibracionnaya tekhnika*. [Theory of vibration processes and devices. Vibration Mechanics and Vibration Technology], Sankt-Peterburg, ID «Ruda i metally», 2013, 640 p. [In Russ].

8. Afanas'ev A. I., Andryushenkov D. N., Zakamennyh A. Yu. Resonant sifter with linear electromagnetic motor. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*. 2010, no. 2, pp. 57–60. [In Russ].

9. Neyman V. Yu. Integrated linear electromagnetic motors for impulse technologies. *Russian Electrical Engineering*. 2003, vol. 74, no. 9, pp. 30–35.
10. Pavlenko A. V., Batishev D. V., Gummel' A. A., Bol'shenko I. A. Design of electromagnetic drives resistant to external mechanical disturbances. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2017, vol. 60, no. 3, pp. 17–27. [In Russ]. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-3-17-27.
11. Ibadullaev M. I., Nuraliev A. K., Esenbekov A. Zh., Nazarov A. I. Resonant electromagnetic vibration exciter with feedback. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI*. 2020, no. 1, pp. 62–66. [In Russ]. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-62-66.
12. Neyman L. A., Neyman V. Y. Complex analysis of electromagnetic machines for vibro-impact technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, art. 032026. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032026.
13. Afanas'ev A. I., Suslov D. N., Chirkova A. A. Analysis of the efficiency of vibration exciters of resonant vibration transport machines. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*. 2018, no. 2, pp. 68–75. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-68-75.
14. Gnezdilov A. A. On the implementation of resonance modes of technological vibration machines. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019, no. 1 (171), pp. 159–163. [In Russ].
15. Makarov L. N., Denisov V. N., Kurilin S. P. Designing and modeling a linear electric motor for vibration-technology machines. *Russian Electrical Engineering*. 2017, vol. 88, no. 3, pp. 166–169. DOI: 10.3103/S1068371217030129.
16. Neiman L. A., Neiman V. Y., Shabanov A. S. A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive. *Russian Electrical Engineering*. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 757–760. DOI: 10.3103/S1068371214120104.
17. Ivashin V. V., Kudinov A. K., Pevchev V. P. Electromagnetic drives for impulse and vibration impulse technologies. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2012, no. 1, pp. 72–75. [In Russ].
18. Neyman L. A., Neyman V. Yu., Obukhov K. A. New method of the synchronous vibratory electromagnetic machine mechatronic module control. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017*. Conference Proceedings. 2017, pp. 516–519. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981806.
19. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and low-frequency vibrations generation systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.
20. Cherno A. A., Gurov A. P., Minchula A. S., Bezverhnyj D. L. Modeling Electromechanical Processes in Energy-Saving Electromagnetic Drives of Vibration Installations. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy*. 2011, no. 3, pp. 397–399. [In Russ].
21. Afanas'ev A. I., Kazakov Yu. M., Saitov V. I. Mathematical model of a resonant vibratory transport machine with a variable frequency of natural vibrations. *Nauchnyj vestnik*. 2016, no. 1 (7), pp. 132–141. [In Russ]. DOI: 10.17117/nv.2016.01.132.
22. Hendzel Z., Rykała Ł. Modelling of dynamics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels with the use of Lagrange equations of the second kind. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2017, vol. 22, no. 1, pp. 81–99. DOI: 10.1515/ijame-2017-0005.
23. Van Nguyen T., Petre R. A., Stroe I. Calculus of axial force in a mechanism using Lagrange equations. *INCAS Bulletin*. 2016, vol. 8, no. 2, pp. 97–108. DOI: 10.13111/2066-8201.2016.8.2.8.
24. Petre R. A., Nichifor S. E., Craifaleanu A., Stroe I. Using Lagrange Equations to Study the Relative Motion of a Mechanism. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020, vol. 14, no. 10, pp. 421–425.

25. Suvorov I. F., Romanova V. V., Hromov S. V. Investigation of the influence of phase voltage asymmetry on the operating modes of asynchronous motors in the MATLAB / SIMULINK simulation environment. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2016, vol. 16, no. 3, pp. 72 – 83. [In Russ]. DOI: 10.14529/power160309.

26. Xu L., Song J. G., Lin Q. Q. Brushless DC motor speed control system Simulink simulation. 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). 2016, pp. 62 – 66. DOI: 10.1109/ICPRE.2016.7871173.

27. Kiyakli A. O., Solmaz H. Modeling of an electric vehicle with MATLAB/Simulink. *International journal of automotive science and technology*. 2018, vol. 2, no. 4, pp. 9 – 15. <https://doi.org/10.30939/ijastech..475477>.

28. Krutikov K. K., Rozhkov V. V. Features of modeling the electric and magnetic surface effect from alternating electromagnetic fields in FEMM. *Elektrichestvo*. 2020, no. 8, pp. 51 – 57. [In Russ]. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-51-57.

29. Shevchenko V. P., Babiychuk O. B., Boltenev V. O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex. *Applied aspects of information technology*. 2019, vol. 2(4), pp. 317 – 327.

30. Tatevosyan A. S., Tatevosyan A. A., Zaharova N. V. Calculation of non-stationary magnetic field of the polarized electromagnet with the external attracted anchor. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1050(1), art. 012086. DOI:10.1088/1742-6596/1050/1/012086.

31. Andreeva E. G., Semina I. A., Orlov A. S. The research of three-dimensional magnetic field of the hybrid magnetic system in the ANSYS MAXWELL program. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2016, art. 7818964. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146974.

32. Andreeva E. G., Gritsay A. S. Classification and research of electro-technical devices with unclosed magnetic core. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2019, vol. 1260, no. 5, article number 052001. DOI:10.1088/1742-6596/1260/5/052001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нейман Владимир Юрьевич¹ – докт. техн. наук, заведующий кафедрой, <http://orcid.org/0000-0002-8433-1610>, e-mail: nv.nstu@ngs.ru;

Нейман Людмила Андреевна¹ – докт. техн. наук, профессор, <http://orcid.org/0000-0002-3442-6531>, e-mail: neyman31@gmail.com;

Ляппи Сергей Юрьевич¹ – аспирант, <http://orcid.org/0000-0002-4301-8513>, e-mail: kafelectro@mail.ru;

¹ Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, Россия.

Для контактов: Нейман Владимир Юрьевич, e-mail: nv.nstu@ngs.ru

Авторы заявляют о конфликте интересов при его наличии.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Neiman V. Yu.¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department, <http://orcid.org/0000-0002-8433-1610>, nv.nstu@ngs.ru;

Neiman L. A.¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, <http://orcid.org/0000-0002-3442-6531>, neyman31@gmail.com;

Lappi S. Yu.¹, postgraduate student, <http://orcid.org/0000-0002-4301-8513>, kafelectro@mail.ru.

¹ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20, Russia.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.