

УДК 621.313.17

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДВУХМАССОВОЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ****Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.В. Марков, С.Ю. Лаппи**
Новосибирский государственный технический университет

Актуальность выполненных исследований вызвана необходимостью совершенствования расчетов быстропротекающих динамических процессов в электроустановках. В качестве объекта исследований рассматривается конструкция двухмассовой технологической вибрационной установки с электромагнитным возбуждением. Предметом исследования является расчет динамических характеристик на основе созданной компьютерной модели вибрационной установки в переходных и установившихся режимах в зависимости от формы и частоты питающего источника. Основу математической модели составляют дифференциальные уравнения электрического и механического равновесия, имеющие нелинейную зависимость. Основной задачей исследования является разработка имитационной модели двухмассовой технологической вибрационной установки с электромагнитным возбуждением с применением современных методов компьютерного моделирования. Рассмотрен пример численной реализации математической модели методами структурного моделирования в программе Matlab Simulink и создана компьютерная модель электромагнитной вибрационной установки. Представлены примеры динамического расчета для анализа электромеханических процессов в переходных и установившихся режимах. Приведены некоторые расчетные значения интегральных показателей характеризующих процессы преобразования электрической энергии, потребляемой от промышленного источника. Предложенная имитационная модель технологической вибрационной установки может использоваться для расчета быстропротекающих динамических процессов в различных режимах с целью рационального выбора параметров установки при проектировании, а также решения задач анализа и синтеза систем автоматического управления амплитудой, частотой и формой питающего напряжения. Выполненные исследования могут представлять определенный интерес для специалистов в области динамики прочности машин и вибрационной защиты.

Ключевые слова: технологическая вибрационная установка, электромагнитный привод, компьютерная модель, расчет динамических процессов, методы структурного моделирования, коэффициент полезного действия.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-2-20-35

Введение

Применению вибрационного электропривода с колебательным движением рабочих органов посвящено достаточно большое количество работ [1–4].

Одним из перспективных направлений исследований в данной области является создание вибрационных машин и установки с электромагнитным возбуждением, работающих в резонансных и околорезонансных режимах, что обеспечивает широкие возможности в вопросах энергосбережения [5, 6].

Вибрационные машины с электромагнитным возбуждением широко применяются в промышленности и закрывают потребности многих технологических процессов и производств. Однако области их применения ограничиваются вибрационными установками мощностью до 1 кВт, для использования в горном, строи-

тельном, машиностроительном производстве при переработке минерального сырья, связанного с дозировкой и перемещением сыпучих сред, сортировкой и измельчением строительного материала, транспортировкой и ориентацией мелких деталей, интенсификацией химических реакций и процессов в лабораторных условиях [7].

Перспективность их применения обусловлена возможностью упрощения кинематической схемы вибрационной установки, повышения надежности снижения затрат при производстве и на обслуживании. Перечисленные достоинства определяются тем, что в качестве приводного устройства с электромагнитным возбуждением применяется линейный электромагнитный привод, который благодаря простоте своей конструкции обладает низкой себестоимостью [8–12].

По сравнению с другими типами вибрационных приводов линейный электромагнитный привод имеет целый ряд преимуществ. Основными достоинствами электромагнитного привода являются: большой ресурс работы, высокая надежность, простая реализация независимого управления амплитудой (до 3–6 мм) и частотой колебаний (до 100 Гц), высокий КПД при работе на частоте резонанса [13–15].

Вопросам расчета динамики вибрационных технологических машин уделяется значительное внимание [16–22]. Однако подобные расчеты в своем большинстве ограничены получением упрощенных аналитических соотношений, отражающих взаимодействия элементов механической колебательной системы под воздействием возмущающей периодической электромагнитной силы. Расчет динамических характеристик сводится к рассмотрению упрощенных процессов динамики, что не позволяет получать точные количественные результаты.

Особенно это касается вибрационных машин с несколькими степенями подвижности инерционных масс, в которых учет обмена энергиями между инерционными массами затрудняется необходимостью учета скоростей их движения.

В качестве объекта исследований рассматривается конструкция двухмассовой технологической вибрационной установки с электромагнитным возбуждением, предназначенной для формирования направленного вибрационного поля для воздействия на обрабатываемую среду.

Цель работы – разработка имитационной модели двухмассовой технологической вибрационной установки с электромагнитным возбуждением с применением современных методов компьютерного моделирования.

Основное назначение имитационной модели – расчет динамических процессов технологической вибрационной установки с электромагнитным возбуждением в различных режимах работы, сопровождаемых потерями энергии в электромеханической системе в зависимости от формы и частоты питающего источника.

1. Объект исследования и его математическая модель

Общая схема построения технологической вибрационной установки с электромагнитным возбуждением представлена на рис. 1. Описание работы вибрационной установки подробно рассмотрено в работе [23].

Вибрационная установка содержит корпус 1. Внутри корпуса установлен электромагнитный привод, содержащий статорную часть в виде магнитопровода 2 и якорную часть в виде подвижного сердечника 3 установленного с возможностью возвратно-поступательного движения относительно статорной части. На магнитопроводе 2 закреплены катушки возбуждения 4, 5. Подвижный сердечник 3 закреплен на штоке 6 и жестко связан с упругим амортизатором 7. Подвижный сердечник 3 и магнитопровод 2 выполнены из листов электротехнической

стали. Воздушный рабочий зазор δ гарантирует необходимую амплитуду колебаний подвижного сердечника 3.

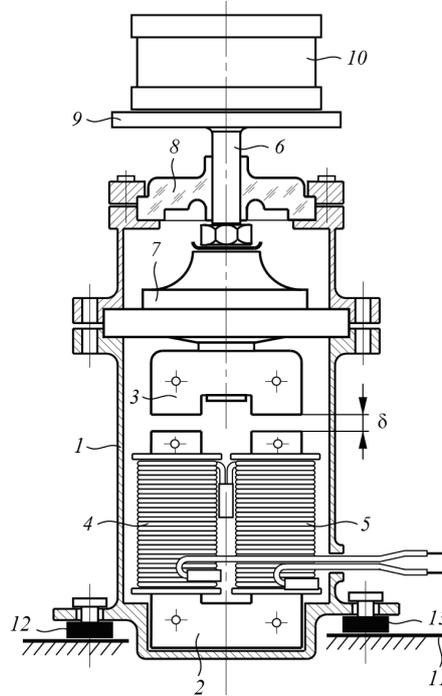


Рис. 1 – Технологическая вибрационная установка с электромагнитным возбуждением

Fig. 1 – A technological vibration plant with electromagnetic excitation

Для обеспечения соосности при вертикальных колебаниях сердечника установлена диафрагма 8, выполненная из эластичного материала. На конце штока 6 закреплена платформа 9, к которой крепится присоединенная масса 10. Платформа 9 является рабочим органом вибрационной установки. Для гашения вертикальных вибраций между корпусом 1 и установочной поверхностью платформы 11 применяются виброизоляторы 12, 13. При протекании периодического тока по катушкам возбуждения 4, 5 сердечник 3 под действием сил электромагнитного поля и упругих сил амортизатора 7 совершает колебательные движения.

Математическая модель динамического состояния двухмассовой технологической вибрационной установки может быть представлена в виде следующей системы дифференциальных уравнений [23]:

$$\begin{cases} u(t) = i r + \frac{d\psi(i, \delta)}{dt}; \\ (m_1 + m_3) \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_2) = f_{\text{эм}}(i, \delta); \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + b_2 \frac{dx_2}{dt} - k_1 (x_1 - x_2) + k_2 x_2 = -f_{\text{эм}}(i, \delta), \end{cases} \quad (1)$$

где $u(t)$ – напряжение на катушке возбуждения; $\psi(i, \delta)$ – потокосцепление катушки, зависящее от тока возбуждения и координаты положения якорной и статорной части электромагнитного привода; r – активное сопротивление катушки; i – ток катушки; δ – переменный рабочий воздушный зазор; m_1 – масса якорной части; m_2 – масса статорной части, включая массу корпуса; m_3 – присоединенная к якорной части масса; x_1, x_2 – обобщенные координаты; $\frac{dx_1}{dt}, \frac{dx_2}{dt}$ – обобщенные скорости; k_1, k_2 – коэффициенты жесткости упругих связей; b_1, b_2 – коэффициенты вязкого трения упругих связей; $f_{эм}(i, \delta)$ – периодическая электромагнитная сила, зависящая от тока возбуждения и координаты положения якорной и статорной части электромагнитного привода; δ_0 – воздушный рабочий зазор (см. рис. 1).

Воздушный рабочий зазор является переменной величиной и зависит от значений обобщенных координат $x_1(t), x_2(t)$ и величины воздушного зазора δ_0 соответствующего положению статического равновесия механической системы:

$$\delta(t) = \delta_0 - x_1(t) + x_2(t). \quad (2)$$

2. Реализация динамической модели вибрационной установки

В основе существующего подхода при реализации динамической модели используется блочное имитационное моделирование с применением современной технологии визуально-ориентированного программирования с помощью базовой системы Matrix Laboratory и ее главного расширения Simulink (Matlab Simulink), основанных на применении численных методов [29].

При создании имитационной модели технологической вибрационной установки применена технология комплексного моделирования, предусматривающая:

- определение цели и постановка задачи моделирования;
- разработка и создание концептуальной модели привода двухмассовой вибрационной установки с электромагнитным возбуждением;
- формализация имитационной модели;
- верификация имитационной модели;
- планирование и реализации плана модельных экспериментов;
- анализ и интеграция результатов моделирования.

Последние три действия применяемой технологии в существенной степени зависят от качества выполнения первых трех действий, которым в работе уделяется основное внимание.

Следует понимать, что результаты комплексного моделирования являются неотъемлемой частью дальнейших исследований, позволяющих на этапе проектирования обойтись без дорогостоящих физических моделей и ограничиться только результатами всестороннего анализа на основе созданной имитационной модели технологической вибрационной установки.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) выполнялось методами структурного моделирования в программе Matlab Simulink [25, 26]. Вариант структурной схемы динамической модели с двумя степенями свободы механической системы представлен на рис. 2. Питание модели выполняется от однофазного источника напряжения промышленной частоты 50 Гц, поступающего на вход подсистемы «Electrical Subsystem». На выходе этой подсистемы получаем источник сигнала в виде сигнала напряжения заданной формы.

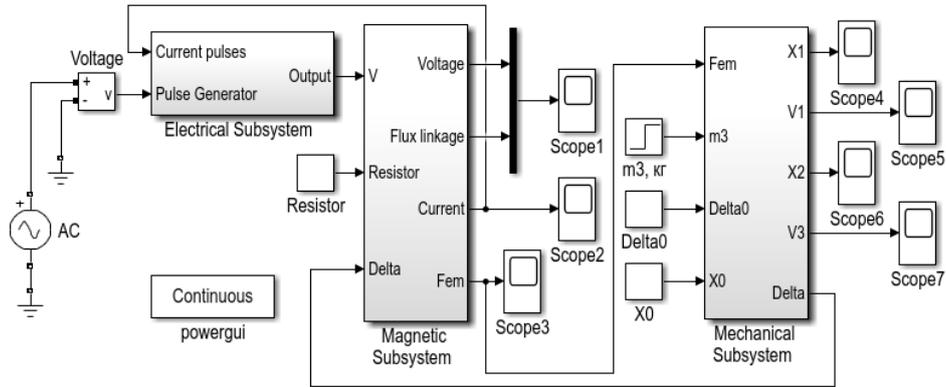


Рис. 2 – Структурная схема модели вибрационной установки в Matlab Simulink

Fig. 2 – Structural diagram of the vibration plant model in Matlab Simulink

С помощью подсистемы «Magnetic Subsystem» реализуется первое уравнение системы (1). Развернутая структурная схема подсистемы «Magnetic Subsystem» представлена на рис. 3.

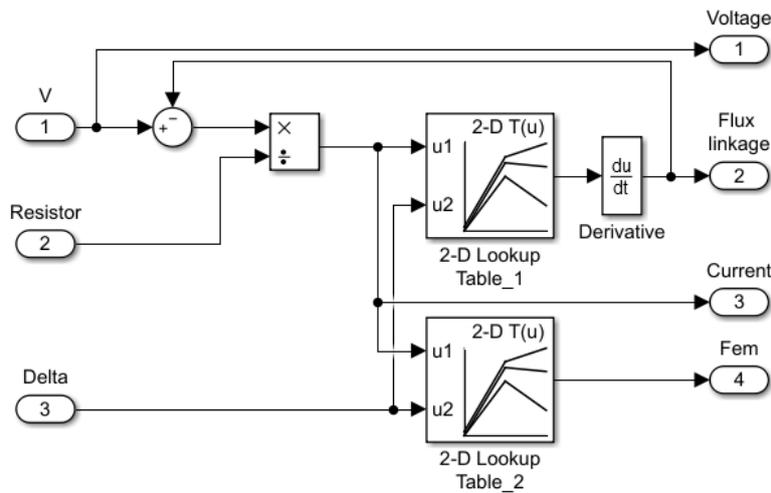


Рис. 3 – Развернутая структурная схема подсистемы «Magnetic Subsystem»

Fig. 3 – A detailed block diagram of the 'Magnetic Subsystem' subsystem

Второе и третье уравнения системы (1) реализуются с помощью подсистемы «Mechanical Subsystem», развернутая структурная схема которой приведена на рис. 4.

Для фиксации выходных переменных в процессе моделирования используется система измерения, реализованная с помощью виртуальных приемников сигналов «Scope» (рис. 3).

При создании модели выполнялся предварительный расчет статических параметров потокоцепления $\psi = f(i, \delta)$ и электромагнитного усилия $f_{эм} = f(i, \delta)$. Расчет статических параметров производился с помощью решения полевой задачи с применением пакетов программ конечно-элементного моделирования магнитного поля [27–29]. Данные статические параметры использовались в блоках двумер-

ных таблиц Look-Up Table(2D), входящих в подсистему «Magnetic Subsystem» на рис. 3. С методикой подобных расчетов можно подробно ознакомиться в работах [30–32].

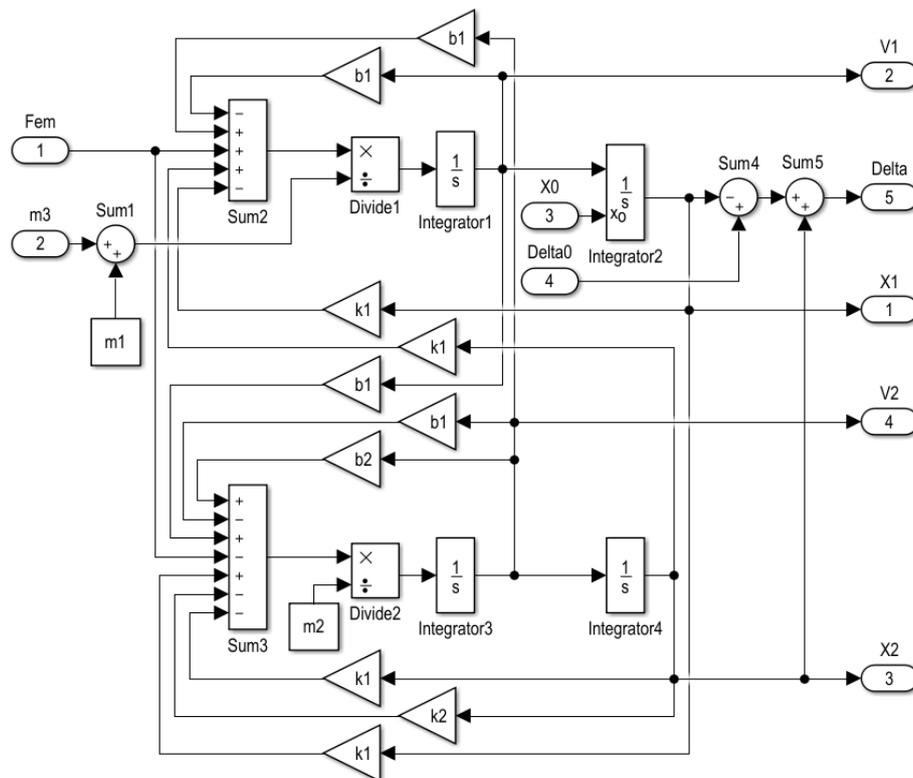


Рис. 4 – Развернутая структурная схема подсистемы «Mechanical Subsystem»

Fig. 4 – A detailed block diagram of the 'Mechanical Subsystem' subsystem

В качестве исходных данных для расчета использовались следующие параметры модели: $m_1 = 0,5$ кг; $m_2 = 2,2$ кг; $k_1 = 120 \cdot 10^3$ Н/м; $k_2 = 450 \cdot 10^3$ Н/м; $b_1 = 5$ Н·с/м; $b_2 = 8$ Н·с/м. Катушки возбуждения выполнены из медного проводника круглого сечения с общим количеством витков $w = 1036$.

Суммарное сопротивление последовательно включенных катушек составляет $r = 12,8$ Ом. Сердечник и магнитопровод выполнены из листов электротехнической стали. Характеристика намагничивания соответствует марки стали 1212. Потери энергии в стальном магнитопроводе ввиду их малости не учитывались.

Результаты имитационного моделирования в виде диаграмм тока катушки $i(t)$, перемещения обобщенных координат $x_1(t)$, $x_2(t)$ и обобщенных скоростей $v_1(t)$, $v_2(t)$, отражающие процесс включения модели и выхода на установившийся режим работы отражены на рис. 5.

Для диаграмм на рис. 5 на выходе подсистемы «Electrical Subsystem» в качестве источника сигнала формировались импульсы напряжения, прямоугольной формы и положительной полярности с частотой следования 25 Гц и максимальным значением $U_m = 160$ В.

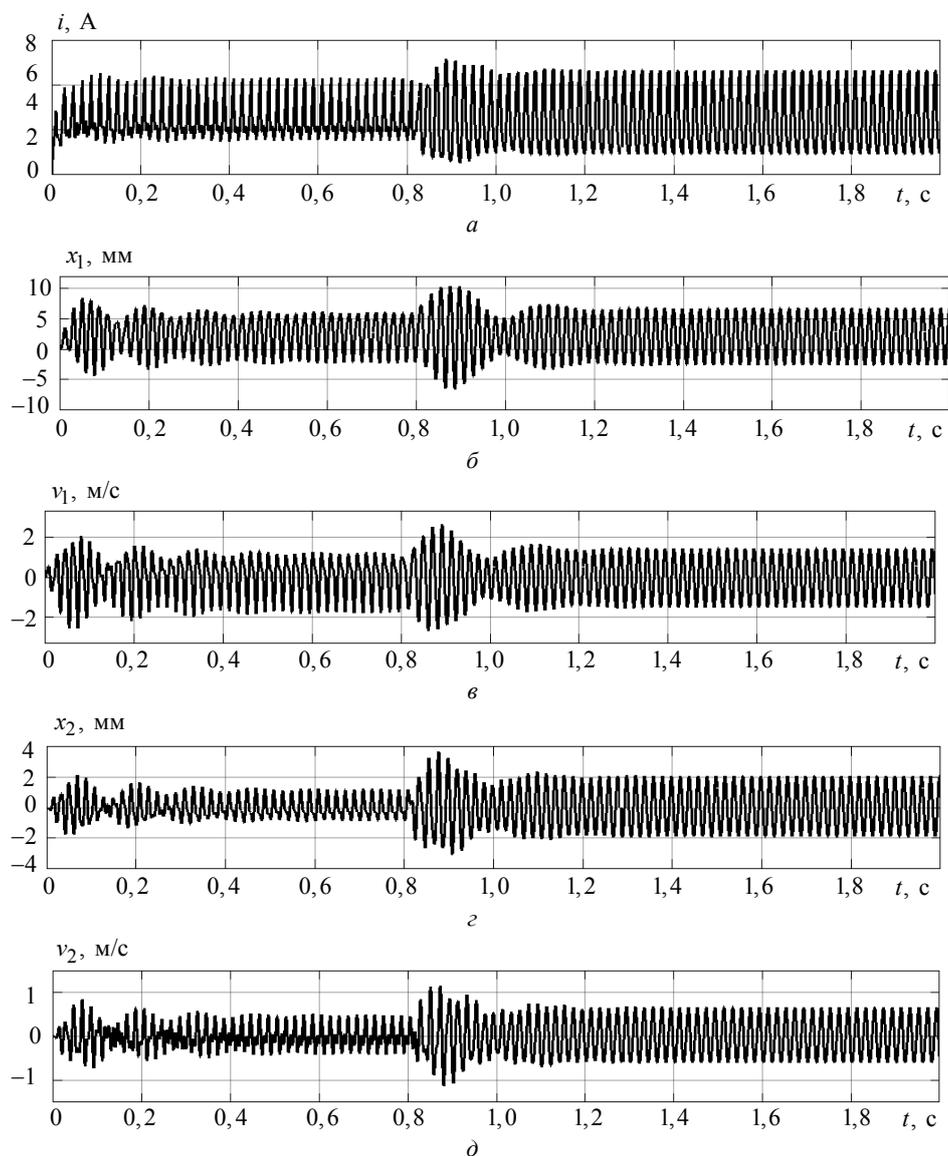


Рис. 5 – Временные диаграммы:

a – тока катушки $i(t)$; b – перемещения подвижного сердечника $x_1(t)$; c – скорости колебаний подвижного сердечника $v_1(t)$; d – перемещения магнитопровода $x_2(t)$; e – скорости колебаний магнитопровода $v_2(t)$

Fig. 5 – Timing diagrams:

a – coil current $i(t)$; b is displacement of the movable core $x_1(t)$; c – is the speed of vibrations of the movable core $v_1(t)$; d is displacement of the magnetic circuit; e is the speed of oscillations of the magnetic circuit $v_2(t)$

На рисунках также отражена реакция модели на восстановление колебательных свойств механической системы при внезапном изменении свойств нагрузки

в виде присоединенной дополнительной массы $m_3 = 0,5$ кг в момент времени $t = 0,8$ с.

На диаграммах видно заметное уменьшение амплитуды колебаний обобщенных координат и обобщенных скоростей. Качественный характер поведения диаграмм, полученных с помощью имитационного моделирования, полностью соответствует процессам, полученным на физических моделях.

Для оценки эффективности работы вибрационной технологической установки производился расчет общепринятых интегральных показателей с помощью отдельного измерительного модуля «Mechanical Subsystem». Измерительный модуль «Mechanical Subsystem» на рис. 2 не приведен.

Сделаем несколько общих замечаний относительно применения расчетных значений применяемых интегральных показателей, характеризующих качество преобразования электрической энергии, потребляемой от промышленного источника.

Потребляемая электромагнитным приводом вибрационной установки активная мощность определяется как интеграл из произведения мгновенных значений напряжения и тока в цепи питания катушки возбуждения за время одного периода колебаний подвижного сердечника:

$$P_a = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t)i(t)dt, \quad (3)$$

где $T = 1/f$ – период колебаний вибратора; f – частота колебаний; t_0 – время, соответствующее квазиустановившемуся режиму работы вибратора.

Потребляемая от источника полная мощность

$$S = UI, \quad (4)$$

где $U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t)dt}$ – действующее значение напряжения катушки возбуждения;

$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t)dt}$ – действующее значение тока в цепи питания катушки возбуждения.

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{S}. \quad (5)$$

Потребляемая активная мощность P_a , рассчитанная по выражению (3), включает в себя полезную механическую мощность $P_{\text{мех}}$ и потери мощности, обусловленные потерями в меди $P_{\text{м}}$ на нагрев и потерями в стали $P_{\text{ст}}$ на вихревые токи и гистерезис, а также потери мощности в механической колебательной системе, которые разделяются на потери мощности, вызванные силами кулоновского трения $P_{\text{тр}}$ и силами вязкого трения в упругих связях $P_{\text{в}}$.

Полезная механическая мощность может быть вычислена через работу, совершенную подвижным сердечником электромагнитного привода за один период колебаний:

$$P_{\text{мех}} = -\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f_{\text{эм}}(t) v_{\delta}(t) dt, \quad (6)$$

где $v_{\delta}(t) = \frac{d\delta}{dt}$ – скорость изменения воздушного зазора.

Потери мощности, обусловленные потерями в меди и идущие на нагрев катушки возбуждения:

$$P_{\text{М}} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) r dt. \quad (7)$$

Потери мощности, вызванные кулоновскими силами трения скольжения в механической системе:

$$P_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f_{\text{тр}i} \left[\text{sign} \frac{dx_i}{dt} \right] \frac{dx_i}{dt} dt, \quad (8)$$

где $f_{\text{тр}i}$ – величина трения скольжения относительно i -й обобщенной координаты; $\frac{dx_i}{dt}$ – скорости относительного скольжения инерционных масс.

Потери мощности, вызванные силами вязкого трения в упругих связях,

$$P_b = \sum_{i=1}^N \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} b_i \left[\frac{dx_i}{dt} \right]^2 dt, \quad (9)$$

где b_i – коэффициенты линейного сопротивления, характеризующие диссипативные свойства (вязкое трение) этих связей.

По определению относительный КПД рассчитывается через отношение полезной механической мощности к потребляемой активной мощности за время одного колебания подвижного сердечника:

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{а}}} = \frac{-\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f_{\text{эм}}(t) v_{\delta}(t) dt}{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) i(t) dt}. \quad (10)$$

Применительно к вибрационной технологической установке на рис. 1 потребляемая электроприводом активная мощность $P_{\text{а}}$, полная мощность S , коэффициент мощности $\cos \varphi$, полезная механическая мощность $P_{\text{мех}}$ и потери мощности в катушке возбуждения на нагрев $P_{\text{М}}$ полностью совпадают с записанными выражениями (3)–(7). Потери мощности, вызванные процессами в стали, ввиду их малости принимаем $P_{\text{ст}} = 0$. Также отсутствуют потери мощности, вызванные кулоновскими силами трения скольжения $P_{\text{тр}}$.

Потери мощности, вызванные силами вязкого трения упругих связей,

$$P_b = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right)^2 dt + \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} \right)^2 dt. \quad (11)$$

Характерной особенностью технологической установки (см. рис. 1) будет являться то, что полезная мощность здесь является условной величиной и определяется только механическими потерями мощности от сил, вызванных вязким трением в упругих связях.

В таком случае, учитывая равенство между полезной механической мощностью, рассчитанной по выражению (6), и потерями мощности от вязкого трения, полученного на основании выражения (11), можно записать:

$$P_{\text{мех}} = P_b. \quad (12)$$

В случае если потери мощности, вызванные вязким трением $P_b = 0$, то согласно с (12) при работе вибрационной установки полезная работа не совершается. Вся энергия, потребляемая от источника, затрачивается на компенсацию потерь энергии на нагрев катушки возбуждения.

Аналогичные выводы следуют в отношении понятия КПД вибрационной установки, который согласно с выражением (10) можно представить в следующем виде:

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_a} = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right)^2 dt + \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} \right)^2 dt}{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t)i(t)dt}. \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что при равенстве нулю расчетных значений линейных коэффициентов вязкого трения ($b_1 = 0$, $b_2 = 0$) КПД работающей вибрационной технологической установки (см. рис. 1) также будет равным нулю. В таком случае вся энергия, потребляемая от сети, идет на компенсацию потерь в меди катушки, идущих для ее нагрева.

Реальный КПД вибрационной технологической установки будет зависеть от демпфирующих свойств и сил трения скольжения обрабатываемой среды в виде присоединенной к платформе массы (рис. 1). Данные свойства обрабатываемой среды будут определять величину полезной мощности $P_{\text{мех}}$.

Заключение

На примере конструкции технологической вибрационной установки рассмотрен пример реализации имитационной компьютерной модели на основе дифференциальных уравнений, отражающих электрическое и механическое равновесие двухмассовой колебательной системы с электромагнитным возбуждением. Приведены результаты имитационного моделирования в виде диаграмм, отражающих вибрационные характеристики модели. Рассмотрены возможности динамического расчета для проведения всестороннего анализа процессов в переходных и установившихся режимах. Полученные результаты по реализации математической модели с помощью структурного моделирования в программе Matlab Simulink могут

найти широкое применение в инженерной практике при выполнении задач проектирования. Особенностью расчета с использованием структурного моделирования является относительно простая возможность учета сложных электромеханических процессов. Результаты исследований могут представлять определенный интерес для специалистов в области динамики прочности машин и аппаратов и вибрационной защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. **Блехман И.И.** Теория вибрационных процессов и устройств: вибрационная механика и вибрационная техника. – СПб.: Руда и металлы, 2013. – 640 с.
3. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 1 (36). – С. 50–55.
4. **Анисимова Л.С., Позднов М.В.** Математическая модель электромагнитной системы электромагнитного двухобмоточного вибратора // Приволжский научный вестник. – 2015. – № 3-1 (43). – С. 27–31.
5. **Афанасьев А.И., Андрищенко Д.Н., Закаменных А.Ю.** Резонансный грохот с линейным электромагнитным двигателем // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2010. – № 2. – С. 57–60.
6. Резонансный электромагнитный вибровозбудитель колебаний с обратной связью / М. Ибадуллаев, А.К. Нуралиев, А.Ж. Есенбеков, А.И. Назаров // Вестник МЭИ. – 2020. – № 1. – С. 62–66. – DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-62-66.
7. **Берозашвили Г.В., Гелашвили В.Н.** Теория, расчет и вопросы возбуждения электромагнитных вибрационных машин. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1978. – 175 с.
8. **Макаров Л.Н., Денисов В.Н., Курилин С.П.** Разработка и моделирование линейного электродвигателя для вибрационных технологических машин // Электротехника. – 2017. – № 3. – С. 74–77.
9. **Нейман В.Ю., Петрова А.А.** Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
10. **Певчев В.П., Ивашин В.В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во Тольятт. гос. ун-та, 2012. – 142 с.
11. **Манжосов В.К., Лукутина Н.О., Невенчанная Т.О.** Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Илим, 1985. – 119 с.
12. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
13. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Линейные синхронные электромагнитные машины ударного действия: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 480 с.
14. Проектирование электромагнитных приводов, устойчивых к внешним механическим возмущающим воздействиям / А.В. Павленко, Д.В. Батищев, А.А. Гуммель, И.А. Большенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 3. – С. 17–27.
15. **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.
16. Моделирование электромеханических процессов в энергосберегающих электромагнитных приводах вибрационных установок / А.А. Черно, А.П. Гуров, А.С. Минчула, Д.Л. Безверхний // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 3. – С. 397–399.

17. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40.
18. **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.
19. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
20. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 75–87. – DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-75-87.
21. **Neuman L.A., Neuman V.Yu.** Dynamic model of a vibratory electromechanical system with spring linkage // 2016 11th International Forum on Strategic Technology, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 2. – P. 23–27. – DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884234.
22. **Neuman L.A., Neuman V.Yu., Shabanov A.S.** Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2017, Erlagol, Altai Republic, 29 June – 3 July 2017: Proceedings. – Novosibirsk, 2017. – P. 503–506.
23. **Neuman L.A., Neuman V.Yu., Markov A.V.** Mathematical model of the technological vibratory unit with electromagnetic excitation // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1661. – Art. 012063. – DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012063.
24. **Дьяконов В.П.** Matlab и Simulink для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 976 с.
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 университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 72–83. – DOI: 10.14529/power160309.
26. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78. – DOI: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-73-78.
27. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
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. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor / V.Yu. Neiman, L.A. Neiman, A.A. Petrova, A.A. Skotnikov, O.V. Rogova // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82, no. 6. – P. 328–331.
30. **Andreeva E.G., Gritsay A.S.** Classification and research of electro-technical devices with unclosed magnetic core // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260, N 5. – Art. 052001. – DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052001.
31. **Нейман В.Ю., Петрова А.А.** Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 2 (52). – С. 101–108.
32. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.

DEVELOPMENT OF AN IMITATION MODEL OF A TWO-MASS TECHNOLOGICAL VIBRATORY UNIT WITH ELECTROMAGNETIC EXCITATION

Neyman L.A., Neyman V.Yu., Markov A.V., Lappi S.Yu.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The research performed is actual because it is necessary to improve methods of calculations of rapid dynamic processes in electrical units. The object of research is the construction of a two-mass technological vibration unit with electromagnetic excitation. The subject of research is the method of calculation based on the created simulation model of the vibration unit dynamic characteristics in transient and stationary modes with respect to a form and frequency of the source voltage. The mathematical model is based on non-linear differential equations of the electrical and mechanical balance. The main objective of research is the development of a simulation model of a two-mass technological vibration unit with electromagnetic excitation using modern methods of computer simulation. The example of the numerical implementation of the mathematical model by structural modeling methods in the Matlab Simulink is considered and the computer model of the electromagnetic vibration unit is created. The examples of the calculation of dynamical characteristics of electromagnetic vibration unit for the analysis of electromechanical processes in transient and stationary modes are presented. Some of calculated values of integral indicators describing conversion processes of electric energy consumed from a power supply are given. The proposed simulation model of a technological vibration unit can be used to calculate rapid dynamic processes in different modes to provide a rational choice of vibration unit parameters when it is designed. The model is also useful for the analysis and synthesis of automatic systems to control the supplied voltage amplitude, frequency and form. The results of the research can be of particular interest to specialists in the area of machine strength dynamics and vibration protection.

Keywords: technological vibration unit, electromagnetic drive, simulation model, calculation of dynamic processes, structured modeling methods, efficiency factor.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-2-20-35

REFERENCES

1. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privoda dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drive for pulse technology and vibroimpulsnyh]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
2. Blekhman I.I. *Teoriya vibratsionnykh protsessov i ustroystv: vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika* [Theory of vibrational processes and devices. Vibration mechanics and vibration technique]. St. Petersburg, Ruda i metally Publ., 2013. 640 p.
3. Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Periodicheskie rezhimy v elektromagnitnykh vibratsionnykh preobrazovatelyakh [Periodic modes in the electromagnetic vibration converters]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2010, vol. 14, no. 1 (36), pp. 50–55.
4. Anisimova L.S., Pozdnov M.V. Matematicheskaya model' elektromagnitnoi sistemy elektromagnitnogo dvukhobmotochnogo vibratora [Mathematical model of electromagnetic system of electromagnetic double-wound vibrator]. *Privolzhskii nauchnyi vestnik = Privolzhsky Scientific Journal*, 2015, no. 3-1 (43), pp. 27–31.
5. Afanas'ev A.I., Andryushenkov D.N., Zakamennykh A.Yu. Rezonansnyi grokhot s lineinym elektromagnitnym dvigatelem [Resonance screen with linear electromagnetic motor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2010, no. 2, pp. 57–60.
6. Ibadullaev M.I., Nuraliev A.K., Esenbekov A.Zh., Nazarov A.I. Rezonansnyi elektromagnitnyi vibrovzbuditel' kolebanii s obratnoi svyaz'yu [A Resonant electromagnetic vibration exciter of oscillations with a feedback]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of MPEI*, 2020, no. 1, pp. 62–66. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-62-66.

7. Berozashvili G.V., Gelashvili V.N. *Teoriya, raschet i voprosy vzbuzhdeniya elektromagnitnykh vibratsionnykh mashin* [Theory, calculation and issues of excitation of electromagnetic vibration machines]. Tbilisi, Sabchota Sakartvelo Publ., 1978. 175 p.
8. Makarov L.N., Denisov V.N., Kurilin S.P. *Razrabotka i modelirovanie lineinogo elektrodvigatelya dlya vibratsionnykh tekhnologicheskikh mashin* [Designing and modeling a linear electric motor for vibration-technology machines]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 3, pp. 74–77. (In Russian).
9. Neyman V.Yu. Petrova A.A. *Sravnenie sposobov forsirovki impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigatelei* [Comparison of forcing methods of pulsed linear electromagnetic motors]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 47a–50. (In Russian).
10. Pevchev V.P., Ivashin V.V. *Proektirovanie moshchnykh korotkokhodovykh impul'snykh elektromagnitnykh dvigatelei* [Designing powerful pulsed electromagnetic short-stroke engine]. Tol'yatti, Togliatti State University Publ., 2012. 142 p.
11. Manzhosov V.K., Lukutina N.O., Nevenchannaya T.O. *Dinamika i sintez elektromagnitnykh generatorov silovykh impul'sov* [The dynamics and synthesis of electromagnetic power pulse generators]. Frunze, Ilim Publ., 1985. 119 p.
12. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. *Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazatelei odnoobmotochnykh impul'snykh ustroystv s elektromagnitnym vzbuzhdeniem* [Ways to improve the energy performance of single-winding pulsed devices with electromagnetic excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie = Transportation: science, technology, management*, 2010, no. 8, pp. 29–31.
13. Neyman L.A., Neyman V.Yu. *Lineinye sinkhronnye elektromagnitnye mashiny udarnogo deistviya* [Linear synchronous electromagnetic percussive machines: monograph]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2021. 480 p.
14. Pavlenko A.V., Batishchev D.V., Gummel' A.A., Bol'shenko I.A. *Proektirovanie elektromagnitnykh privodov, ustoichivykh k vneshnim mekhanicheskim vozmushchayushchim vozdeistviyam* [Design of electromagnetic drives resistant to external mechanical disturbances]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 17–27.
15. Afanas'ev A.I., Suslov D.N., Chirkova A.A. *Analiz effektivnosti raboty vib-rovozbuditelei rezonansnykh vibrotransportnykh mashin* [The analysis of effectiveness of work of vibration-generators of resonant vibration-transport machines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2018, no. 2, pp. 68–75. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-68-75.
16. Chernov A.A., Gurov A.P., Minchula A.S., Bezverhnyy D.L. *Modelirovanie elektromekhanicheskikh protsessov v energosberegayushchikh elektromagnitnykh privodakh vibratsionnykh ustanovok* [The modeling of electromechanical processes in energy-efficient electromagnetic]. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy = Electrotechnic and Computer Systems*, 2011, no. 3, pp. 397–399.
17. Neyman L.A., Neyman V.Yu. *Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatel'nogo dvizheniya s uprugimi svyaziyami* [Mathematical model of electromechanical system with vibrational motion of elastic connections]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2015, no. 6, pp. 35–40.
18. Afanasiev A.I., Kazakov Yu.M., Saitov V.I. *Matematicheskaya model' rezonansnoi vibrotransportnoi mashiny s izmenyayushcheysya chastotoi sobstvennykh kolebanii* [Mathematical model of resonant vibro-transport machine with a variable frequency of natural oscillations]. *Nauchnyj vestnik = Scientific Bulletin*, 2016, no. 1 (7), pp. 132–141. DOI: 10.17117/nv.2016.01.132.
19. Neyman L.A., Neyman V.Yu. *Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem* [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of MPEI*, 2016, no. 6, pp. 64–71.
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu. *Dinamicheskaya model' elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya dlya sistem generirovaniya nizkochastotnykh vibratsii* [Oscillatory

- motion electro-magnetic drive dynamic model for low-frequency vibration generation systems]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 75–87. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-75-87.
21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Dynamic model of a vibratory electromechanical system with spring linkage. *2016 11th International Forum on Strategic Technology, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016*, Novosibirsk, 2016, pt. 2, pp. 23–27. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884234.
 22. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2017*, Erlagol, Altai Republic, 29 June – 3 July 2017: Proceedings. Novosibirsk, 2017, pp. 503–506.
 23. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Markov A.V. Mathematical model of the technological vibratory unit with electromagnetic excitation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1661, art. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012063.
 24. D'yakonov V.P. *Matlab i Simulink dlya radioinzhenerov* [Matlab and Simulink for radio engineers]. Moscow, DMK Press, 2016. 976 p.
 25. Suvorov I.F., Romanova V.V., Khromov S.V. Issledovanie vliyaniya nesimmetrii faznykh napryazhenii na rezhimy raboty asinkhronnykh dvigatelei v srede imitatsionnogo modelirovaniya MATLAB/SIMULINK [Investigation of phase voltage asymmetry influence on asynchronous motor modes in MATLAB/SIMULINK simulation environment]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 72–83. DOI: 10.14529/power160309.
 26. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnetoprovoде [Modelling of processes in the electromagnetic vibration transducer with energy losses in the yoke]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 73–78. DOI: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-73-78.
 27. Bul' O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: magnitnye tsepi, poly i programma FEMM* [Methods for calculating the magnetic systems of electric devices: magnetic circuit, field and program FEMM]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 336 p.
 28. Krutikov K.K., Rozhkov V.V. Osobennosti modelirovaniya elektricheskogo i magnitnogo poverkhnostnogo effekta ot peremennykh elektromagnitnykh polei v FEMM [The specific features of modeling the electrical and magnetic skin effects from alternating electromagnetic fields using the FEMM computer program]. *Elektrichestvo*, 2020, no. 8, pp. 51–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-51-57.
 29. Neiman V.Yu., Neiman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, no. 6, pp. 328–331.
 30. Andreeva E.G., Gritsay A.S. Classification and research of electro-technical devices with unclosed magnetic core. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1260, no. 5, art. 052001. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052001.
 31. Neyman V.Yu., Petrova A.A. Modelirovanie v FEMM magnitnogo polya dlya rascheta tyagovykh kharakteristik elektromagnitnykh dvigatelei postoyannogo toka [About modeling magnetic field in program complex FEMM for calculation of the traction characteristics of DC electromagnetic motors]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 2 (52), pp. 101–108.
 32. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Raschet pokazatelya ekonomichnosti silovogo elektromagnita postoyannogo toka s pomoshch'yu modelirovaniya magnitnogo polya [The calculation of the efficiency indicator of a DC power electromagnet using magnetic field simulation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie = Transportation: Science, Technology, Management*, 2008, no. 6, pp. 21–24.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и импульсные технологии. Опубликовано более 160 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna – (b. 1966), D.Sc. (Eng.), professor at the Department of Electrical Complexes in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machines and pulse technologies. She is the author of 160 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman31@gmail.com).



Нейман Владимир Юрьевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовые электромагнитные импульсные системы. Автор и соавтор более 250 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Neyman Vladimir Yurievich – (b. 1960), D.Sc. (Eng.), professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests include power electromagnetic pulse systems. He is the author and co-author of over 250 scientific and educational works. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).



Марков Алексей Валерьевич – родился в 1993 году, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовые электромагнитные импульсные системы. Опубликовано более 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: electro-319@mail.ru).

Markov Aleksey Valerievich – (b. 1993), a post-graduate student at the Novosibirsk State Technical University. The area of his scientific interests is power electromagnetic impulse systems. More than 10 scientific papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: electro-319@mail.ru).



Лаппи Сергей Юрьевич – родился в 1989 году, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовые электромагнитные импульсные системы. Опубликовано три научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: kafelectro@mail.ru).

Lappi Sergey Yurievich – (b. 1989), a post-graduate student at the Novosibirsk State Technical University. The area of his scientific interests is power electromagnetic impulse systems. He has published 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kafelectro@mail.ru).

Статья поступила 17 апреля 2022 г.
Received April 17, 2022

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu., Markov A.V., Lappi S.Yu. Razrabotka imitatsionnoi modeli dvukhmassovoi tekhnologicheskoi vibratsionnoi ustanovki s elektromagnitnym vozbuzhdeniem [Development of an imitation model of a two-mass technological vibratory unit with electromagnetic excitation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 2 (55), pp. 20–35. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-2-20-35.