

УДК 621.313.282.2

Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями

Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

ФГБОУВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: neyman@ngs.ru, nv.nstu@ngs.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Линейные электромагнитные преобразователи широко применяются в технических колебательных системах. Развитие мехатронных подходов расчета динамики, а также современных методов анализа и синтеза подобных систем предполагает повышенный интерес к совершенствованию математических моделей, максимально свободных от всякого рода допущений и ограничений по степени подвижности инерционных масс, учету демпфирующих свойств упругих связей и сил трения скольжения. В связи с этим актуальность проводимых исследований обусловлена необходимостью совершенствования и расширения возможностей динамического расчета при решении комплексной задачи всестороннего анализа и синтеза электромеханической системы колебательного движения с электромагнитным приводом.

Материалы и методы: В качестве объекта исследований рассматривается электромеханическая система с возвратно-поступательным движением взаимодействующих между собой инерционных масс, связанных упругими связями и возбуждаемых переменным электромагнитным полем катушки. Основу математической модели составляют дифференциальные уравнения, описывающие электрическое равновесие нелинейной цепи и механического взаимодействия поступательно движущихся масс, полученные с помощью уравнения Лагранжа второго рода.

Результаты: Разработаны примеры математических моделей обобщенного электромагнитного привода, описывающие механику двухмассовой и трехмассовой колебательных систем, для расчета электромеханических процессов в переходных, установившихся и резонансных режимах работы электропривода, учитывающие степень подвижности инерционных масс и свойства упругих связей.

Выводы: Представленные примеры математических моделей динамического состояния электромеханической системы обеспечивают возможность всестороннего анализа работы электромагнитного привода, предназначенного для возбуждения механических колебаний, и учитывают степень подвижности инерционных масс, а также процессы рассеяния энергии за счет собственных демпфирующих свойств упругих связей и сил трения скольжения.

Ключевые слова: электромеханическая система, электромагнитный привод, математические и динамические модели, многомассовые колебательные системы, уравнения Лагранжа второго рода, потери энергии в упругих связях, силы трения скольжения.

Mathematical model of a vibratory electromechanical system with spring linkages

L.A. Neyman, V.Yu. Neyman

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
E-mail: neyman@ngs.ru, nv.nstu@ngs.ru

Abstract

Background: Linear electromagnetic converters are widely used in vibratory engineering systems. Development of mechatronic approaches to dynamics analysis and modern methods of such systems analysis and synthesis draws special attention to mathematical models improvement. The models should be as free as possible of any assumptions and limitations concerning the degree of inertia masses mobility, spring linkage damper properties and sliding friction forces. Therefore, the research urgency results from the necessity to improve and extend dynamic analysis capabilities when solving the complex problem of comprehensive analysis and synthesis of a vibratory electromechanical system with an electromagnetic drive.

Materials and methods: The object of this study was an electromechanical system with reciprocating motion of interacting inertia masses coupled by spring linkages and excited by coil ac electromagnetic field. The mathematical model is based on differential equations describing the non-linear circuit and translating the masses mechanical interaction balance. These equations have been derived from Lagrange equation of the second kind.

Results: We have developed models of generalized electromagnetic drives describing the mechanics of two-mass and three-mass oscillatory systems in order to calculate electromechanical processes in transient, steady-state and resonance operation modes of electric drives. The models account for the degree of inertia mass mobility and properties of spring linkages.

Conclusions: The stated examples of electromechanical system dynamic state mathematical models enable a comprehensive analysis of the electric drive exciting mechanical vibrations which account for the degree of inertia masses mobility and power dissipation by using our own damping and sliding friction forces.

Key words: electromechanical system, electromagnetic drive, mathematical and dynamic models, multimass oscillating systems, Lagrange equations of the second kind, energy losses in spring linkages, sliding friction forces.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.035-040

Линейные электромеханические системы колебательного движения, использующие в качестве силовых преобразователей электромагнитный привод, широко используются в промышленности для обеспечения многих технологических процессов и производств [1–3].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что применение систем с электромагнитным приводом в отдельных случаях обеспечивает некоторые экономические выгоды: они просты в устройстве, обладают высокой надежностью и большим рабочим ресурсом, имеют малые габариты и массу, а также обладают возможностью снижения энергопотребления при работе в резонансных и околорезонансных режимах [4–7].

Методы расчета систем с электромагнитным приводом широко известны и, несмотря на это, продолжают совершенствоваться [8–13]. В особенности большие трудности возникают при расчете нестационарных режимов, зависящих от скорости и частоты, нагрева, свойств упругих связей и т.д. [14–19].

Простота реализации независимого управления амплитудой и частотой колебаний является еще одним главным достоинством подобных преобразователей.

Одним из перспективных направлений исследований в данной области является создание и совершенствование машин и механизмов на базе линейного электромагнитного привода колебательного движения, работающего в резонансных или околорезонансных режимах с частотой до 100 Гц.

Примером использования подобных систем являются некоторые типы вибрационных установок и устройств виброударного действия, используемые при проведении строительных работ в машиностроении, в наземной невзрывной сейсморазведке для возбуждения геофизических полей и т.д.

Эффективность работы такого электропривода существенно зависит от тесно связанных между собой параметров электрической, магнитной и механической подсистем. Поэтому еще на стадии проектирования электропривода возникает необходимость проведения динамического расчета с возможностью анализа работы всех его подсистем.

Как правило, проведение такого расчета сопровождается значительными трудностями, связанными с необходимостью построения математической модели в виде набора уравнений, наиболее точно отражающих физические явления. Для упрощения модели используется стандартный набор допущений, который является традиционным не только для электрических и магнитных цепей, но и для механической системы [20]. В особенности эти допущения касаются процессов рассеяния (поглощения) энергии за счет собственных демпфирующих свойств упругих связей и сил сухого трения, которые в большинстве случаев фигурируют только номинально или ими полностью пренебрегают.

Учитывая, что механическая система современных электромагнитных приводов обладает несколькими степенями подвижности исполнительных механизмов, упрощение связей ограничивает возможности анализа динамической модели. Также ограничиваются возможности модели при расчетах резонансных и околорезонансных режимов, при которых достигается наибольшая экономия электроэнергии.

В связи с этим актуальной является разработка математической модели, характеризующей колебательный режим работы линейного электромагнитного привода с несколькими степенями подвижности исполнительных механизмов, учитывающей совокупность электромеханических процессов и обеспечивающей возможности всестороннего анализа при расчетах переходных, установившихся, резонансных и околорезонансных режимов с учетом свойств упругих связей и сил сухого трения.

В качестве примера рассмотрим три наиболее распространенных способа построения механической системы электромагнитного привода колебательного движения. Общие схемы построения электропривода с возвратно-поступательным движением синхронно взаимодействующих между собой инерционных масс и их расчетные динамические модели представлены на рис. 1–3.

Применение любого из приведенных способов построения механической системы электропривода в каждом конкретном случае определяется техническими условиями или условиями работы.

Линейный электропривод, в самом простейшем варианте, содержит катушку 1, сердечник 2 и якорь 3, образующие магнитную систему (рис. 1–3).

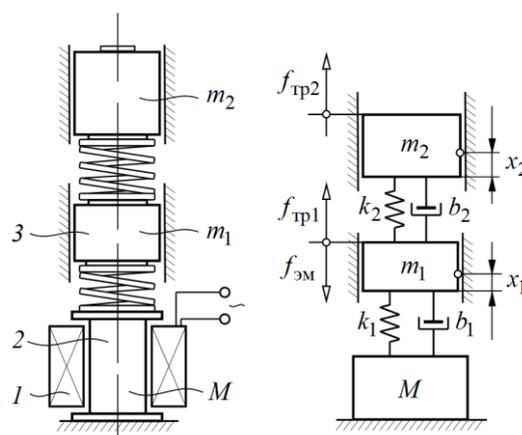


Рис. 1. Динамическая схема двухмассовой модели электромагнитного привода (вариант 1): $f_{ЭМ}$ – вынуждающая электромагнитная сила; x_1 , x_2 и x_3 – обобщенные координаты линейного перемещения центра масс; m_1 – масса якоря; m_2 – присоединенная масса; M – масса электропривода; k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты жесткости упругих связей (пружин); b_1 , b_2 и b_3 – коэффициенты вязкого трения упругих связей; $f_{тр1}$, $f_{тр2}$ – силы сухого трения скольжения

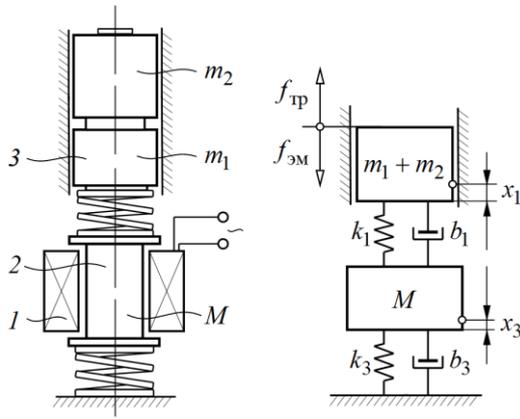


Рис. 2. Динамическая схема двухмассовой модели электромагнитного привода (вариант 2) (обозначения те же, что и на рис. 1)

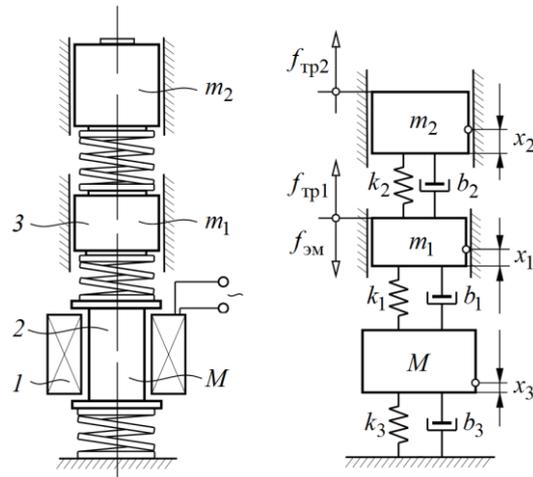


Рис. 3. Динамическая схема трехмассовой модели электромагнитного привода (обозначения те же, что и на рис. 1)

При протекании периодического тока по обмотке катушки якорь под действием электромагнитных сил и сил упругих связей механической системы совершает колебательные движения.

Механическая колебательная система имеет в своем составе традиционные массоинерционные, упругие и диссипативные звенья. В физическом смысле объект исследования представляет собой систему, имеющую рассредоточенную по оси массу с несколькими упругими связями, со свойствами, зависящими определенным образом от частоты.

Количество обобщенных независимых координат определяет число степеней свободы механической системы. Следует отметить, что расчетной схеме на рис. 3 при $x_3 = 0$ будет соответствовать расчетная схема на рис. 1, а при $x_1 = x_2$ – расчетная схема на рис. 2.

Поэтому при составлении математической модели наиболее целесообразным является ограничиться расчетной схемой на рис. 3. В этом случае расчетные схемы на рис. 1 и рис. 2 и их математические аналоги можно рассматривать как частный случай схемы на рис. 3.

Механическая и магнитная системы электропривода связаны функциональной зависимостью электромагнитного усилия $f_{ЭМ} = f(i, x)$ от величины протекающего тока i в катушке и координаты поло-

жения якоря x_1 относительно сердечника, а связь магнитной и электрической системы – зависимостью величины потокосцепления $\psi = f(i, x)$ и в общем случае описывается дифференциальным уравнением электрического равновесия нелинейной цепи

$$u(t) = ir + \frac{d\psi(i, x)}{dt}, \quad (1)$$

где $u(t)$ – напряжение на обмотке катушки; r – активное сопротивление катушки.

Напряжение $u(t)$, как правило, формируется схемой управления обмотки катушки при питании от периодического синусоидального источника промышленной частоты 50 Гц.

Мгновенные значения потокосцепления $\psi = f(i, x)$ и электромагнитного усилия $f_{ЭМ} = f(i, x)$ определяются в зависимости от величины тока и воздушного зазора (координата x_1) путем численного расчета магнитного поля в статических режимах для строго заданной конфигурации магнитной цепи. В целях упрощения приведенная на рис. 1–3 конфигурация магнитной цепи представлена лишь только условно на функциональном уровне.

Для построения модели динамического состояния механической системы воспользуемся уравнением Лагранжа 2-го рода

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} + Q_i, \quad (2)$$

где T – кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия системы; Φ – диссипативная функция механической системы (функция Релея); Q_i – обобщенная сила системы, соответствующая i -й обобщенной координате; x_i – обобщенные координаты; \dot{x}_i – обобщенные скорости.

Рассматриваемая механическая система (рис. 3) имеет три степени свободы. В качестве обобщенных координат принимаем: перемещение якоря x_1 массой m_1 ; перемещение x_2 присоединенной массы m_2 и перемещение электропривода x_3 массой M . Начала обобщенных координат поместим в положение относительно статического равновесия инерционных масс.

Последовательно определим величины, входящие в (2):

- кинетическую энергию механической системы для поступательно движущихся масс

$$T = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{M \dot{x}_3^2}{2};$$

- потенциальную энергию упругих элементов механической системы

$$\Pi = \frac{k_1 (x_1 - x_3)^2}{2} + \frac{k_2 (x_2 - x_1)^2}{2} + \frac{k_3 x_3^2}{2};$$

- диссипативную функцию Релея

$$\Phi = \frac{b_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_3)^2}{2} + \frac{b_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2}{2} + \frac{b_3 \dot{x}_3^2}{2};$$

• обобщенные силы механической системы, соответствующие i -м обобщенным координатам x_1 , x_2 и x_3 :

$$Q_{x_1} = f_{эм}(i, x) - f_{тр1} \text{sign } \dot{x}_1;$$

$$Q_{x_2} = -f_{тр2} \text{sign } \dot{x}_2;$$

$$Q_{x_3} = 0.$$

• частные производные от кинетической энергии и производные по времени:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_1 \ddot{x}_1, \quad \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) = m_2 \ddot{x}_2, \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} \right) = m_3 \ddot{x}_3, \quad \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0;$$

• частные производные от потенциальной энергии по обобщенной координате x_i :

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = k_1(x_1 - x_3) - k_2(x_2 - x_1);$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_2} = k_2(x_2 - x_1);$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_3} = -k_1(x_1 - x_3) + k_3 x_3;$$

• частные производные от диссипативной функции Релея по обобщенной скорости \dot{x}_i :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1);$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_2} = b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1);$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_3} = -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) - b_3 \dot{x}_3.$$

В соответствии с уравнением Лагранжа (2) и с учетом полученных выражений дифференциальные уравнения динамического состояния механической системы по обобщенным координатам запишутся в следующем виде:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -k_1(x_1 - x_3) + k_2(x_2 - x_1) - \\ -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - f_{тр1} \text{sign } \dot{x}_1 + \\ + f_{эм}(i, x), \\ m_2 \ddot{x}_2 = -k_2(x_2 - x_1) - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - \\ -f_{тр2} \text{sign } \dot{x}_2, \\ M \ddot{x}_3 = k_1(x_1 - x_3) - k_3 x_3 + b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) - \\ -b_3 \dot{x}_3. \end{cases}$$

В результате математическая модель динамического состояния электромеханической системы (рис. 3) с единственной обмоткой управления, возбуждаемой изменяющимся во времени периодическим током, будет описываться следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u(t) = ir + \frac{d\psi(i, x)}{dt}, \\ m_1 \frac{dx_1^2}{dt^2} + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + \\ + k_1(x_1 - x_3) - k_2(x_2 - x_1) = \\ = -f_{тр1} \text{sign } \frac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i, x), \\ m_2 \frac{dx_2^2}{dt^2} + b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + k_2(x_2 - x_1) = \\ = -f_{тр2} \text{sign } \frac{dx_2}{dt}, \\ M \frac{dx_3^2}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_3 \frac{dx_3}{dt} - \\ -k_1(x_1 - x_3) + k_3 x_3 = 0. \end{cases}$$

Рассматривая динамическую схему модели на рис. 1 как частный случай схемы на рис. 3 при $x_3 = 0$, получим

$$\begin{cases} u(t) = ir + \frac{d\psi(i, x)}{dt}, \\ m_1 \frac{dx_1^2}{dt^2} + b_1 \frac{dx_1}{dt} - b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + k_1 x_1 - \\ -k_2(x_2 - x_1) = -f_{тр1} \text{sign } \frac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i, x), \\ m_2 \frac{dx_2^2}{dt^2} + b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + k_2(x_2 - x_1) = \\ = -f_{тр2} \text{sign } \frac{dx_2}{dt}. \end{cases}$$

Аналогичным образом поступаем для динамической схемы модели на рис. 2, при $x_1 = x_2$ также получим

$$\begin{cases} u(t) = ir + \frac{d\psi(i, x)}{dt}, \\ (m_1 + m_2) \frac{dx_1^2}{dt^2} + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1(x_1 - x_3) = \\ = -f_{тр} \text{sign } \frac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i, x), \\ M \frac{dx_3^2}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_3 \frac{dx_3}{dt} - \\ -k_1(x_1 - x_3) + k_3 x_3 = 0, \end{cases}$$

где $f_{тр} = f_{тр1} + f_{тр2}$.

Полученные системы уравнений динамического состояния электромеханической системы с электромагнитным приводом колебательного движения с несколькими степенями подвижности инерционных масс позволяют производить всесторонний анализ рабочих процессов в переходных и установившихся режимах.

Для реализации уравнений можно воспользоваться известным подходом, состоящим в том, что на первом этапе с помощью решения

полевой задачи определяются значения электромагнитного усилия $f_{ЭМ}(i, x)$ и потокосцепления $\psi(i, x)$ в зависимости от тока и положения якоря, которые затем представляются в виде массива опорных точек статических параметров [20]. На втором этапе полученные массивы значений статических параметров $f_{ЭМ}(i, x)$ и $\psi(i, x)$ используются при расчете динамики, а в случае удаления расчетных значений от опорных точек интерполируются.

Для решения полевой задачи, без учета эффекта вытеснения поля в массивном магнитопроводе, можно рекомендовать стандартные программы конечно-элементного моделирования *FEMM* или *ANSYS* [21–23].

Решение динамической части задачи связано с разработкой алгоритмов расчета системы дифференциальных уравнений, что наиболее просто можно реализовать с помощью аппарата структурного моделирования в среде *Matlab Simulink* [24, 25].

Заключение

Представленные математические модели динамического состояния электромеханической системы обеспечивают возможность всестороннего анализа колебательного режима работы электромагнитного привода, предназначенного для возбуждения механических колебаний с частотой до 100 Гц.

Особенностью моделей является возможность учета совокупности взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных и установившихся режимах, учитывающих степень подвижности инерционных масс, а также процессов рассеяния энергии за счет собственных демпфирующих свойств упругих связей и сил сухого трения.

Список литературы

1. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
3. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.
4. Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курганского госуниверситета, 2006. – 284 с.
5. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.
6. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
7. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 45–49.
8. Мошкин В.И. К расчету усилия удержания интегрированного линейного электромагнитного двигателя // Электротехника. – 2013. – № 8. – С. 60–64.
9. Певчев В.П., Кудинов А.К. Составление схем замещения электромагнитных систем // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 32–36.

10. Татевосян А.С., Андреева Е.Г. Численный расчет магнитного поля электромагнитного двигателя // Известия вузов. Электромеханика. – 1985. – № 10. – С. 10–15.
11. Татевосян А.С., Андреева Е.Г. Анализ конструкций электромагнитных двигателей с различным профилем рабочего зазора на основе численного эксперимента // Известия вузов. Электромеханика. – 1992. – № 3. – С. 22–26.
12. Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 50–53.
13. Шоффа В.Н. К расчету разомкнутых магнитных систем методами теории цепей // Электричество. – 1982. – № 1. – С. 14–19.
14. Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Исследование режимов форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 1, № 1. – С. 39–44.
15. Ивашин В.В., Певчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 42–46.
16. Нейман Л.А. Приближенный расчет циклического электромагнитного привода с учетом начального превышения температуры в переходном тепловом процессе нагрева // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 1 (22). – С. 113–122.
17. Дмитриев Д.О., Курбатов П.А. Методы анализа динамических характеристик магнитоэлектрических линейных электроприводов // Электротехника. – 1998. – № 1. – С. 13–17.
18. Данилушкин А.И. Моделирование электромагнитных и тепловых полей при ускоренных термоциклических испытаниях дисков ГТД на автоматизированных стендах // Известия вузов. Электромеханика. – 1996. – № 5/6. – С. 109–113.
19. Ивашин В.В., Певчев В.П. Анализ влияния неравномерности зазора мощного электромагнитного двигателя на развиваемую механическую силу и энергию // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 9–12.
20. Расчет динамики включения электромагнита постоянного тока / Ю.А. Бахвалов, Б.Н. Лобов, Г.В. Могилевский, А.Г. Никитенко // Электротехника. – 1982. – № 1. – С. 48–51.
21. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 336 с.
22. Хоцянов И.Д. Расчет электромагнитных и тепловых полей электромеханических устройств с постоянными магнитами в программе ANSYS // Вестник МЭИ. – 2012. – № 4. – С. 36–42.
23. Андреева Е.Г., Семина И.А., Татевосян А.А. Исследование поля магнитной системы открытого типа с помощью программного пакета ANSYS // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – С. 173–175.
24. Герман-Галкин С.Г. Анализ и синтез механической системы с магнитокоммутационной машиной в пакетах MATLAB-SIMULINK // Силовая электроника. – 2006. – № 7. – С. 82–86.
25. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

References

1. Ivashin, V.V., Kudinov, A.K., Pevchev, V.P. Elektromagnitnyye privody dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologiy [Electromagnetic drives for pulse and pulse vibration technologies]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
2. Ugarov, G.G., Moshkin, V.I. Perspektivy razvitiya silovyykh elektromagnitnykh impul'snykh sistem [Prospects for the development of power electromagnetic pulse systems].

Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. cheskie nauki, 2013, no. 29, pp. 88–90.

3. Ryashentsev, N.P., Ugarov, G.G., L'vitsin, A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic presses]. Novosibirsk, Nauka, 1989. 216 p.

4. Usanov, K.M., Ugarov, G.G., Moshkin, V.I. *Lineynyy impul'snyy elektromagnitnyy privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive machine with a battery]. Kurgan, Izdatel'stvo Kurganskogo gosuniversiteta, 2006. 284 p.

5. Aksyutin, V.A., Neyman, L.A., Neyman, V.Yu., Skotnikov, A.A. *Pressovoe oborudovanie s lineynym elektromagnitnym privodom dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov udarnoy sborki i shtampovki melkikh izdeliy* [Press equipment with a linear electromagnetic drive for mechanization of technological processes shock assembly and small parts stamping]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*, 2015, no. 2, pp. 220–224.

6. Neyman, L.A., Neyman, V.Yu. *Nizkochastotnye udarnye elektromagnitnye mashiny i tekhnologii* [Low-frequency electromagnetic drum machines and technology]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*, 2014, no. 1, pp. 256–259.

7. Neyman, L.A., Neyman, V.Yu. *Lineynye sinkhronnye elektromagnitnye mashiny dlya nizkochastotnykh udarnykh tekhnologiy* [Linear synchronous electromagnetic machines for low-frequency percussion technology]. *Elektrotehnika*, 2014, no. 12, pp. 45–49.

8. Moshkin, V.I. *K raschetu usiliya uderzhaniya integririvanogo lineynogo elektromagnitnogo dvigatelya* [Calculation of the integrated linear electromagnetic motor holding force]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 8, pp. 60–64.

9. Pevchev, V.P., Kudinov, A.K. *Sostavlenie skhem zameshcheniya elektromagnitnykh sistem* [Preparation of equivalent circuits of electromagnetic systems]. *Elektrotehnika*, 2012, no. 3, pp. 32–36.

10. Tatevosyan, A.S., Andreeva, E.G. *Chislennyi raschet magnitnogo polya elektromagnitnogo dvigatelya* [Numerical calculation of the magnetic field electromagnetic motor]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1985, no. 10, pp. 10–15.

11. Tatevosyan, A.S., Andreeva, E.G. *Analiz konstruksiy elektromagnitnykh dvigateley s razlichnym profilom rabocheho zazora na osnove chislennogo eksperimenta* [Analysis of the structures of electromagnetic motors with different working gap profiles based on numerical experiments]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1992, no. 3, pp. 22–26.

12. Neyman, L.A., Neyman, V. Yu., Shabanov, A.S. *Uproshchennyi raschet elektromagnitnogo udarnogo privoda v povtorno-kratkovremennom rezhime raboty* [Simplified calculation of the electromagnetic shock drive intermittent operation]. *Elektrotehnika*, 2014, no. 12, pp. 50–53.

13. Shoffa, V.N. *K raschetu razomknutykh magnitnykh sistem metodami teorii tsepey* [Calculation of open magnetic systems using circuit theory]. *Elektrichestvo*, 1982, no. 1, pp. 14–19.

14. Moshkin, V.I., Egorov, A.A., Ugarov, G.G. *Issledovanie rezhimov forsirovannogo akumulirovaniya magnitnoy energii v impul'snykh lineynykh elektromagnitnykh dvigatelyakh* [Study of forced magnetic energy storage modes in pulsed electromagnetic linear motors]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 39–44.

15. Ivashin, V.V., Pevchev, V.P. *Osobennosti dinamiki raboty i energeticheskikh diagramm impul'snogo elektromagnitnogo privoda pri paralel'nom i posledovatel'nom soedinenii obmotok voz-buzhdeniya* [Features of work dynamics and energy diagrams of

pulsed electromagnetic actuator for parallel and series connection of excitation windings]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 6, pp. 42–46.

16. Neyman, L.A. *Priblizhennyi raschet tsiklichnogo elektromagnitnogo privoda s uchtennym nachal'nyim prevyshe-niem temperatury v perekhodnom teplovom protsesse nagreva* [An approximate calculation of the cyclic magnetic drive with discounted initial temperature rise in the transient thermal heating process]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*, 2014, no. 1(22), pp. 113–122.

17. Dmitriev, D.O., Kurbatov, P.A. *Metody analiza dinamicheskikh kharakteristik magnitoelektricheskikh lineynykh elektroprivodov* [Methods of analysing the dynamic characteristics of magnetolectric linear actuators]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 1, pp. 13–17.

18. Danilushkin, A.I. *Modelirovanie elektromagnitnykh i teplovykh poley pri uskorennykh termotsiklicheskikh ispytaniyakh diskov GTD na avtomatizirovannykh standakh* [Simulation of electromagnetic and thermal fields in accelerated thermal cycling tests of GTE disks on automated stands]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1996, no. 5/6, pp. 109–113.

19. Ivashin, V.V., Pevchev, V.P. *Analiz vliyaniya neravnovernosti zazora moshchnogo elektromagnitnogo dvigatelya na razvivaemuyu mekhanicheskuyu silu i energiyu* [Analysis of the impact of uneven gap in a powerful electromagnetic engine on the developed mechanical strength and energy]. *Elektrotehnika*, 2010, no. 9, pp. 9–12.

20. Bakhvalov, Yu. A., Lobov, B.N., Mogilevskiy, G.V., Nikitenko, A.G. *Raschet dinamiki vklucheniya elektromagnita postoyannogo toka* [Dynamics calculation of the DC electromagnetic inclusion]. *Elektrotehnika*, 1982, no. 1, pp. 48–51.

21. Bul', O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: Magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Methods of calculating the magnetic systems of electrical devices: magnetic circuit, field and FEMM program]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. 336 p.

22. Khotsyanov, I.D. *Raschet elektromagnitnykh i teplovykh poley elektromekhanicheskikh ustroystv s postoyannymi magnitami v programme ANSYS* [Calculation of electromagnetic and thermal fields of electromechanical devices with permanent magnets in the ANSYS program]. *Vestnik MEI*, 2012, no. 4, pp. 36–42.

23. Andreeva, E.G., Semina, I.A., Tatevosyan, A.A. *Issledovanie polya magnitnoy sistemy otkrytogo tipa s pomoshch'yu programmnoy paketa ANSYS* [A research into an open type magnetic system field in the ANSYS software package]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2014, no. 1, pp. 173–175.

24. German-Galkin, S.G. *Analiz i sintez mekhatronnoy sistemy s magnitokommutatsionnoy mashinoy v paketakh MATLAB-SIMULINK* [Analysis and synthesis of mechatronic systems with a magnetic commutational machine in MATLAB-SIMULINK packages]. *Silovaya elektronika*, 2006, no. 7, pp. 82–86.

25. Chernyh, I.V. *Chernykh, I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press; Saint-Petersburg, Piter, 2008. 288 p.

Нейман Людмила Андреевна,

ФГБОУВО «Новосибирский государственный технический университет»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов,
e-mail: neyman@ngs.ru

Нейман Владимир Юрьевич,

ФГБОУВО «Новосибирский государственный технический университет»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретических основ электротехники,
e-mail: nv.nstu@ngs.ru