

УДК 621.313.282.2

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ОДНОКАТУШЕЧНОЙ  
СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО  
ДЕЙСТВИЯ С ДВУХСТОРОННИМ ВЫБЕГОМ БОЙКА****Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман***Новосибирский государственный технический университет*

Актуальность исследований обусловлена необходимостью создания точной математической модели динамики электромеханической колебательной системы с электромагнитным ударным приводом, наиболее полно отражающей состояние этой системы при динамических ударных воздействиях и взаимодействии с деформируемой средой. В качестве объекта исследований рассматривается электромагнитный ударный узел с двухсторонним свободным выбегом бойка, включающий в себя многомассовую колебательную систему с упругими связями, периодически возбуждаемую в магнитном поле катушки, получающей питание от источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления с естественной коммутацией. Разработана математическая модель динамики ударного узла, обеспечивающая широкие возможности в проведении всестороннего анализа электромагнитных и электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах. Модель учитывает нелинейные свойства магнитных материалов, потоки рассеяния, степень подвижности инерционных масс, свойства упругих связей, силы трения и сопровождается различного рода потерями энергии. Основу математической модели составляют дифференциальные уравнения, описывающие электрическое равновесие нелинейной системы двигателя и механическое взаимодействие поступательно движущихся инерционных масс, полученные методом Лагранжа. Предложены алгоритм расчета и пример численной реализации модели с использованием стандартных программных комплексов, позволяющих наиболее просто интегрироваться для решения поставленных задач. На примере расчета периодических электромеханических процессов рассмотрены возможности модели в проведении всестороннего анализа рабочих процессов в переходных и квазиустановившихся режимах методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. Выполнена верификация модели сравнением расчетных значений выходных показателей с результатами физического эксперимента.

*Ключевые слова:* математическая модель, электромагнитный ударный узел, электромагнитный двигатель, механическая колебательная система, упругие связи, метод Лагранжа, потери энергии.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-98-114

**Введение**

Электромеханические колебательные ударные системы с электромагнитным возбуждением используются в различных областях техники для реализации многих технологических процессов и производств [1–4].

Тенденции применения вариантов схем механизмов и машин с электромагнитным колебательным приводом подробно рассмотрены в работах [5, 6].

Как обладающие высокими энергетическими показателями следует выделить синхронные электромагнитные ударные машины, для которых частота механических колебаний ударной массы – бойка вследствие взаимодействия с магнитным полем намагничивающей катушки, кратна частоте питающей сети [7–12].

Предельные значения энергии удара в подобных системах, как правило, ограничены значениями допустимой импульсной мощности питающей сети. Сниже-

ние влияния работы ударного узла на питающую сеть и увеличение энергии удара возможно только за счет снижения частоты ударов [12, 13].

Перспективным направлением создания электромагнитных машин с повышенной энергией удара и пониженной частотой механических колебаний по отношению к частоте промышленной сети является создание ударных узлов, использующих рабочие циклы со свободным выбегом бойка [7, 12].

Как обладающий высокими значениями КПД при передаче энергии ударом особый интерес представляет рабочий цикл однокатушечной синхронной электромагнитной машины с двухсторонним свободным выбегом бойка [13, 14].

Несмотря на то что данный рабочий цикл хорошо известен и получил широкое практическое применение в ударном электроинструменте, выполненные исследования в вопросах электромеханического преобразования энергии и существующие рекомендации в повышении эффективности использования цикла в технологических процессах весьма ограничены.

Существующие методики для расчета и проектирования электромагнитных машин основаны в своем большинстве на использовании статических подходов, что осложняет их использование в задачах анализа и синтеза [15–18].

Вызвано это, прежде всего, тем, что проведение динамического расчета связано с учетом большого числа взаимосвязанных факторов, зависящих от скорости движения, частоты, нелинейности магнитных характеристик стали, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, различного рода внешних воздействий, потерь энергии и т.д. [19–25].

Между тем любая электромеханическая система, использующая в своем составе линейный электромагнитный двигатель, устройства для передачи энергии ударом, гашения вибраций и реверса ударной массы представляет собой сложную динамическую систему, определяющую конфигурацию, структуру ударного узла и обеспечивающую рациональное формирование ударного импульса.

По известным причинам упрощение связей ограничивает возможности анализа и синтеза подобных систем, работающих исключительно в квазиустановившихся режимах, где использование статических подходов неприемлемо.

Учитывая современные тенденции в вопросах энергосбережения, создание точной математической модели динамики электромагнитного ударного узла, наиболее полно отражающей взаимосвязи параметров всех его подсистем при динамических воздействиях, а также повышающей достоверность оценки энергетических характеристик при использовании в технологических процессах является решением актуальной задачи.

Целью работы является разработка математической модели динамики однокатушечного электромагнитного ударного узла с двухсторонним свободным выбегом бойка, учитывающей возможности проведения всестороннего анализа электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах при учете нелинейных взаимосвязей в магнитной системе, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, сопровождаемых различного рода потерями энергии.

### **1. Электромагнитный ударный узел с двухсторонним выбегом бойка**

Конструктивная схема электромагнитного ударного узла с двухсторонним свободным выбегом бойка приведена на рис. 1.

Возвратно-поступательное движение ударной массы бойка 1 возникает в результате его периодического взаимодействия с магнитным полем катушки 2. Рабочий ход бойка 1 осуществляется под действием электромагнитных сил катушки 2 и упругих сил буферной пружины 3, аккумулирующей кинетическую энергию

бойка при обратном ходе и выполняющей его реверс. Обратный ход бойка 1 осуществляется под действием электромагнитных сил катушки 2 и частично за счет кинетической энергии бойка при отскоке от рабочего инструмента 4.

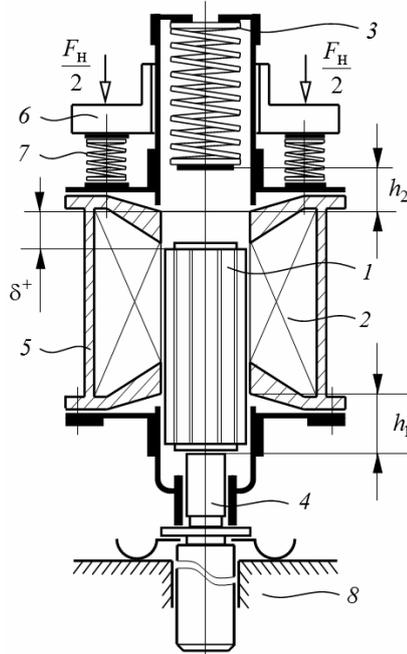


Рис. 1 – Электромагнитный ударный узел

Fig. 1 – Electromagnetic impact node

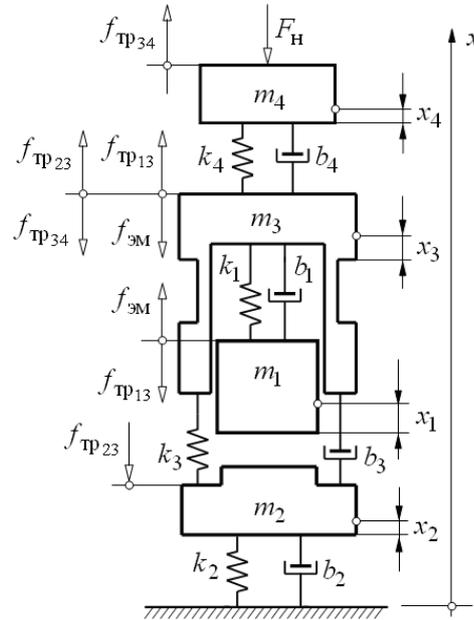


Рис. 2 – Расчетная динамическая схема механической системы

Fig. 2 – Calculated dynamic scheme mechanical system

Расположенные на одной оси цилиндрический боек 1, магнитопровод 5 с размещенной внутри катушкой 2 образуют конфигурацию магнитной системы электромагнитного двигателя. Для гашения вибраций в промежутке между упорной поверхностью удерживающего устройства 6 и ударным узлом применяется виброизолирующее устройство в виде пружины 7 заданной жесткости. Усилие нажатия  $F_H$  через виброизолирующее устройство 7 обеспечивает устойчивую связь ударного узла с рабочим инструментом при возбуждении периодических ударных нагрузок и взаимодействии с деформируемой средой 8. Катушка 2 получает питание от однофазного источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления.

Полный рабочий цикл ударного узла осуществляется за время двух периодов напряжения питающего источника, что при частоте  $f = 50$  Гц обеспечивает синхронную частоту ударов бойка  $n_{уд}$  и длительность времени рабочего цикла  $t_{ц}$ :

$$n_{уд} = \frac{60f}{2p} = 1500 \text{ уд/мин}; \quad t_{ц} = \frac{2p}{f} = 0,04 \text{ с},$$

где  $2p = 2$  – число периодов напряжения в течение времени рабочего цикла.

Для реализации рабочего цикла с двухсторонним свободным выбегом бойка используется одна катушка, обеспечивающая разгон ударной массы бойка электромагнитными силами в двух направлениях. Свободный выбег бойка осуществляется за время бестоковой паузы в подаче импульсов тока, в течение которой боек, двигаясь по инерции, поочередно сжимает буферную пружину и наносит удар по рабочему инструменту [13].

При свободном выбеге расстояние, пройденное бойком от положения магнитного равновесия до ударного сечения рабочего инструмента, обозначим как  $h_1$ , а расстояние от положения магнитного равновесия до контакта с буферной пружиной как  $h_2$  (рис. 1). Рабочий цикл ударного узла выполняется при условии полной синхронизации положения бойка при его движении с импульсами напряжения, поступающими на катушку.

## 2. Методы решения

Механическая и магнитная подсистемы электромагнитного ударного узла связаны зависимостью электромагнитного усилия  $f_{эм} = f(i, x_1)$  от величины протекающего тока  $i$  в катушке и координаты положения ударной массы бойка  $x_1$ , а связь магнитной и электрической подсистемы – зависимостью величины потокоцепления  $\psi = f(i, x_1)$  и в общем случае описывается уравнением электрического равновесия системы

$$u(t) = ir + \frac{d\psi(i, x_1)}{dt}, \quad (1)$$

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

Согласно установленным связям конструкции ударного узла (рис. 1) и действующим в системе обобщенным силам, соответствующим потенциальной энергии, энергии рассеяния и внешним воздействиям, на рис. 2 рассмотрена расчетная динамическая схема механической системы. Механическая колебательная система имеет в своем составе традиционные массоинерционные, упругие и диссипативные звенья. В качестве обобщенных координат принимаем линейные перемещения центра масс бойка  $x_1$  массой  $m_1$ , рабочего инструмента  $x_2$  массой  $m_2$ , электромагнитного двигателя  $x_3$  массой  $m_3$  и перемещение удерживающего устройства  $x_4$  массой  $m_4$ . Колебания системы в пространстве будут описываться зависимостью обобщенных координат  $x_1 \dots x_4$  от времени, отсчитываемых от положения устойчивого статического равновесия.

Уравнение движения механической системы получим на основании уравнений Лагранжа второго рода [26]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} + Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы;  $\Pi$  – потенциальная энергия системы;  $\Phi$  – диссипативная функция системы (функция Рэлея);  $\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}$ ,  $\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i}$ ,  $Q_i$  – обобщенные силы упругости, сопротивления движению и внешних воздействий, соответ-

ствующие  $i$ -й обобщенной координате;  $x_i$  – обобщенные координаты;  $\dot{x}_i$  – обобщенные скорости;  $N$  – число степеней свободы механической системы.

При построении математической модели полагаем, что рассматриваемая механическая система имеет четыре степени свободы ( $N = 4$ ). Принимая положение устойчивого статического равновесия за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной энергии системы, последовательно определим величины, входящие в (2).

Кинетическая энергия механической системы для поступательно движущихся масс

$$T = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2} + \frac{m_4 \dot{x}_4^2}{2}.$$

Потенциальная энергия упругих связей механической системы

$$\Pi = \frac{k_1 (x_1 - x_3)^2}{2} + \frac{k_2 x_2^2}{2} + \frac{k_3 (x_3 - x_2)^2}{2} + \frac{k_4 (x_4 - x_3)^2}{2},$$

где  $k_1 \dots k_4$  – статические коэффициенты жесткости упругих связей.

Диссипативная функция Рэлея

$$\Phi = \frac{b_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_3)^2}{2} + \frac{b_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{b_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2}{2} + \frac{b_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2}{2},$$

где  $b_1 \dots b_4$  – коэффициенты вязкого трения упругих связей.

Обобщенные силы внешних воздействий и силы трения, соответствующие обобщенным координатам:

$$Q_{x_1} = f_{эм}(i, x_1) - f_{тр13} \operatorname{sign} \dot{x}_1; \quad Q_{x_2} = -f_{тр23} \operatorname{sign} \dot{x}_2;$$

$$Q_{x_3} = -f_{эм}(i, x_1) + (f_{тр13} + f_{тр23} - f_{тр34}) \operatorname{sign} \dot{x}_3; \quad Q_{x_4} = f_{тр34} \operatorname{sign} \dot{x}_4 - F_H,$$

где  $f_{эм}(i, x_1)$  – вынуждающая электромагнитная сила;  $f_{тр13}$ ,  $f_{тр23}$ ,  $f_{тр34}$  – силы сухого трения скольжения;  $F_H$  – постоянная величина усилия нажатия.

В соответствие с уравнением (2), взяв частные производные от кинетической и потенциальной энергии и диссипативной функции Рэлея, а также производные по времени, учитывая внешние силы, силы трения и уравнение электрического равновесия (1), математическая модель динамического состояния колебательной электромеханической системы без учета ударного взаимодействия будет описываться следующими дифференциальными уравнениями:

$$u(t) = i r + \frac{d\psi(i, x_1)}{dt}; \quad (3)$$

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3) = -f_{тр13} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i, x_1); \quad (4)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_3 \left( \frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_2 x_2 - k_3 (x_3 - x_2) = -f_{тр23} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \quad (5)$$

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_3 \left( \frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - b_4 \left( \frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - k_1 (x_1 - x_3) + k_3 (x_3 - x_2) - k_4 (x_4 - x_3) = -f_{эм}(i, x_1) + (f_{тр13} + f_{тр23} - f_{тр34}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \quad (6)$$

$$m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} + b_4 \left( \frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_4 (x_4 - x_3) = f_{тр34} \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt} - F_H. \quad (7)$$

Под действием внешней периодической силы  $f_{эм}(i, x_1)$  в механической системе возникают сложные колебания, являющиеся результатом наложения вынужденных и свободных колебаний системы. Отметим, что на участие разгона ударной массы бойка в магнитном поле катушки его ускоренное движение осуществляется за время, равное длительности протекающего тока. Выход бойка из положения магнитного равновесия (положение, симметричное относительно полюсной системы двигателя) определяет свободный выбег, синхронизированный по времени со временем бестоковой паузы в подаче импульсов тока.

Колебательные движения бойка выполняются в квазиустановившемся режиме, а наличие ограничителей движения в конструкции ударного узла не позволяют бойку выходить за установленные пределы.

$$x_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } \delta^+ = h_1; \\ h_1 - \delta^+ & \text{при } x_1 \leq h_1; \\ h_1 + \delta^- & \text{при } x_1 > h_1, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\delta^+$ ,  $\delta^-$  – переменная величина воздушного рабочего зазора, образованного положением бойка относительно верхней и нижней полюсной системы катушки.

При нарушении синхронизации в подаче импульсов напряжения процесс движения бойка при выходе из положения магнитного равновесия ( $\delta = 0$ ) может сопровождаться при убывающем токе в цепи катушки и характеризоваться электромагнитным торможением с потерями кинетической энергии в механической системе и соответственно энергии удара.

Согласованность в работе электрической, магнитной и механической подсистем является важным фактором в обеспечении эффективности работы ударного узла.

При подаче импульсов напряжения и протекающем в цепи катушки токе возбуждается магнитное поле, обуславливающее электромагнитную силу  $f_{эм}(i, x_1)$ , которая стремится уменьшить воздушный рабочий зазор и привести систему в состояние магнитного равновесия. Путем изменения параметров импульса напряжения можно влиять на рабочий процесс ударного узла. В случае с естественной коммутацией при питании от однофазного источника напряжения синусоидальной формы по однополупериодной схеме выпрямления длительность импульсов напряжения зависит от значения параметров индуктивности токовой цепи и формально описывается следующим приближенным неравенством:

$$u(t) \approx \begin{cases} U_m \sin \omega t & \text{при } (n-1) 2\pi \leq \omega t < n2\pi, \\ 0 & \text{при } (2n-1) \pi < \omega t \leq n2\pi, \quad n = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (9)$$

где  $n$  – число полных периодов напряжения;  $U_m$  – амплитуда напряжения;  $\omega$  – циклическая частота источника.

При частично упругом ударе не вся кинетическая энергия бойка переходит рабочему инструменту и далее в деформируемую среду. Часть этой энергии возвращается обратно в колебательную систему. Количество энергии, переданное в деформируемую среду, и энергии, возвращаемой в механическую колебательную систему, напрямую зависит от свойств среды, параметров ударной системы и параметров импульса сил, воздействующих на среду.

При расчетах составляющие этих энергий с высокой долей вероятности можно учесть с помощью коэффициента отскока бойка

$$k_{от} = \frac{\bar{v}_1}{v_1},$$

где  $v_1$ ,  $\bar{v}_1$  – скорости центра массы бойка в начале и конце частично упругого удара.

Кинетическая энергия, возвращаемая в механическую колебательную систему при отскоке бойка от рабочего инструмента,

$$T_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2} k_{от}^2.$$

Полезная работа, совершаемая ударным узлом, имеет импульсный характер и оценивается кинетической энергией бойка, переходящей рабочему инструменту при ударе,

$$T_2 = \frac{m_1 v_1^2}{2} (1 - k_{от}^2).$$

Среднюю силу удара можно определить через изменение импульса одной из сталкивающихся масс, например  $m_2$ ,

$$N_1 = \frac{m_2 (\bar{v}_2 - v_2)}{\tau_{и}},$$

где  $v_2$ ,  $\bar{v}_2$  – скорости центра массы рабочего инструмента в начале и конце удара;  $\tau_{и}$  – длительность времени ударного импульса.

Полагая, что на момент удара в колебательной системе  $v_2 \approx 0$ , средняя сила удара будет равна

$$N_1 = \frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_{и}}.$$

Учитывая упругое равновесие буферной пружины на большей части рабочего цикла и соответственно равенство нулю обобщенных сил упругости, линейно зависящих от координаты положения бойка, а также сопротивления движению, пропорционального его скорости, необходимо учесть, что составляющие этих сил будут описываться кусочно-линейными функциями:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = \begin{cases} 0 & \text{при } x_1 < h_1 + h_2; \\ k_1(x_1 - x_3) & \text{при } x_1 \geq h_1 + h_2, \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = \begin{cases} 0 & \text{при } x_1 < h_1 + h_2; \\ b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) & \text{при } x_1 \geq h_1 + h_2. \end{cases} \quad (11)$$

Последнее означает, что процесс рассеяния энергии в условиях вязкого трения, вызванного диссипативными силами упругих связей, может возникать только при работе сил этих связей. В конкретном случае характеристика силы упругости, являясь линейной на отдельных участках движения, оказывается в целом нелинейной.

При создании модели также предполагается, что сопротивление и упругие свойства деформируемой среды, оказываемые перемещению инструмента, зависят от жесткости и демпфирующих свойств введенных упругих связей.

Окончательный процесс движения следует рассматривать как результат наложения вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, обусловленных различного рода потерями энергии в электромеханической системе.

Уравнения (3)–(7) совместно с (8)–(11) позволяют рассматривать обобщенную математическую модель динамического состояния электромагнитного ударного узла с двухсторонним свободным выбегом бойка в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = ir + \frac{d\psi(i_\mu, x_1)}{dt}; \\ i = i_\pi + i_\mu; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \begin{cases} \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{\text{и}}} - f_{\text{тр}13} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{\text{эм}}(i_\mu, x_1), & \text{если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2; \\ -\tilde{\lambda}_1 - f_{\text{тр}13} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{\text{эм}}(i_\mu, x_1), & \text{при } x_1 \geq h_1 + h_2, \text{ если } \frac{dx_1}{dt} > 0; \\ -f_{\text{тр}13} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{\text{эм}}(i_\mu, x_1), & \text{при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2, \text{ если } \frac{dx_1}{dt} < 0; \end{cases} \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -\frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_{\text{и}}} - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_3 - f_{\text{тр}23} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_3 + \tilde{\lambda}_4 - f_{\text{эм}}(i_\mu, x_1) + (f_{\text{тр}13} + f_{\text{тр}23} - f_{\text{тр}34}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}, \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2; \\ \tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_3 + \tilde{\lambda}_4 - f_{\text{эм}}(i_\mu, x_1) + (f_{\text{тр}13} + f_{\text{тр}23} - f_{\text{тр}34}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}, \\ \text{при } x_1 \geq h_1 + h_2; \end{cases} \\ m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} = -\tilde{\lambda}_4 + f_{\text{тр}34} \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt} - F_{\text{и}}, \end{array} \right.$$

$$\text{где } \tilde{\lambda}_1 = b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3); \quad \tilde{\lambda}_2 = b_2 \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2;$$

$$\tilde{\lambda}_3 = b_3 \left( \frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_3 (x_3 - x_2); \quad \tilde{\lambda}_4 = b_4 \left( \frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_4 (x_4 - x_3);$$

$\frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{и}}, \frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_{и}}$  – импульсы сил, действующие на массы тел в конце удара;  $i_{п}$  – ток потерь, вызванный вихревыми токами и гистерезисом;  $i_{ц}$  – намагничивающий ток.

Полученная система дифференциальных уравнений динамического состояния электромагнитного ударного узла (см. рис. 1) позволяет производить всесторонний анализ электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах, учитывающих нелинейность магнитной системы, ударные взаимодействия инерционных масс и свойства упругих связей в механической системе, обусловленных различного рода потерями энергии. Составляющая тока потерь  $i_{п}$  может быть учтена по методике, рассмотренной в [27, 28].

### 3. Пример реализации математической модели

При реализации математической модели ударного узла с помощью решения полевой задачи определялись массивы значений опорных точек статических параметров потокоцепления  $\psi(i, \delta)$  и электромагнитного усилия  $f_{эм}(i, \delta)$  в зависимости от тока и положения бойка, где  $\delta = h_1 - x_1$ . Для решения полевой задачи следует рекомендовать стандартные программы конечно-элементного моделирования FEMM, ELCUT или ANSYS [29–31]. Для решения динамической части задачи применялся аппарат структурного моделирования в среде Matlab Simulink [32].

В качестве примера на рис. 3–5 представлены результаты моделирования одного из вариантов модернизированного электромагнитного ударного узла со свободным выбегом бойка, идентичного по конструкции и размерам ударному узлу МС-18/36 [7].

В качестве исходных данных использовались следующие параметры модели. Масса инерционных элементов конструкции ударного узла:  $m_1 = 0,32$  кг;  $m_2 = 0,36$  кг;  $m_3 = 3,78$  кг;  $m_4 = 0,5$  кг. Коэффициенты жесткости и вязкого трения упругих связей:  $k_1 = 20 \cdot 10^3$  Н/м;  $b_1 = 8$  Н·с/м;  $k_2 = 2 \cdot 10^6$  Н/м;  $b_2 = 0$ ;  $k_3 = 16 \cdot 10^3$  Н/м;  $b_3 = 45$  Н·с/м;  $k_4 = 6 \cdot 10^3$  Н/м;  $b_4 = 20$  Н·с/м. Силы сухого трения скольжения:  $f_{тр13} = 4$  Н;  $f_{тр23} = 10$  Н;  $f_{тр34} = 5$  Н. Сила нажатия  $F_{н} = 350$  Н.

Материал магнитопровода – электротехническая сталь 1212. Боек выполнен цельнометаллическим из конструкционной стали 40ХН. Катушка изготовлена из медного проводника диаметром  $d_{пр} = 2,2$  мм с количеством витков  $w = 220$  и активным сопротивлением  $r = 0,36$  Ом. Питание цепи катушки осуществляется от однофазного источника напряжения с действующим значением  $U = 36$  В по однополупериодной схеме выпрямления.

На рис. 3 показаны расчетная область модели и результаты построения картины поля линий магнитного потока.

Расчет статических параметров  $\psi(i, \delta)$  и  $f_{\text{эм}}(i, \delta)$  осуществлялся через интегральные характеристики поля в режиме параметров блока по средневзвешенному тензору натяжения. Для визуализации процесса расчета статических параметров на рис. 4 приведены зависимости  $\psi(i, \delta)$  и  $f_{\text{эм}}(i, \delta)$ , при построении которых использовался массив значений  $(15 \times 17)$ , содержащий по 255 опорных точек.

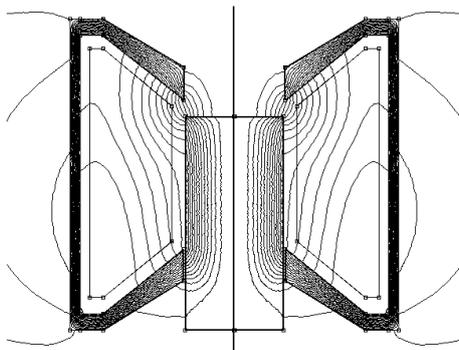


Рис. 3 – Результаты построения картины поля линий магнитного потока

Fig. 3 – The results of constructing a picture of the field of magnetic flux lines

При разработке алгоритма расчета средствами MatLab Simulink задание функции двух аргументов статических параметров модели выполнялось с помощью блоков двумерных таблиц.

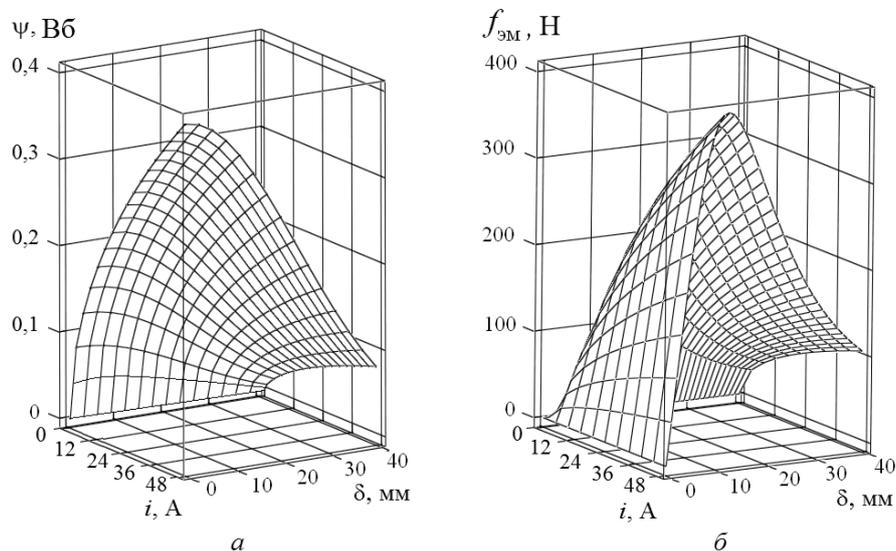


Рис. 4 – Пример расчета статических параметров:

*a* – потокосцепления  $\psi = f(i, \delta)$ ; *b* – электромагнитного усилия  $f_{\text{эм}} = f(i, \delta)$

Fig. 4 – Example of calculating statistical parameters:

*a* – flux  $\psi = f(i, \delta)$ ; *b* – electromagnetic force  $f_{\text{эм}} = f(i, \delta)$

На рис. 5 приведены временные диаграммы процесса включения электромагнитного ударного узла, где приняты следующие обозначения:  $u$  – напряжение на катушке;  $i$  – ток в цепи катушки;  $x_1$  – рабочий ход бойка;  $v_1$  – скорость бойка.

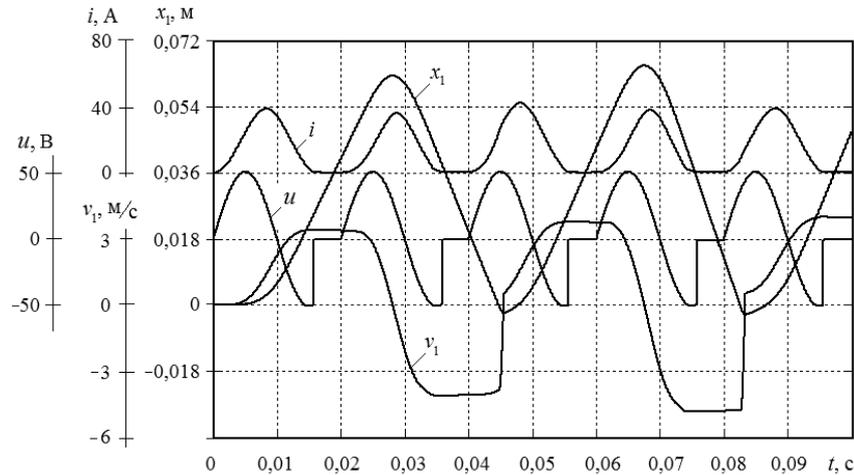


Рис. 5 – Временные диаграммы процесса включения электромагнитного ударного узла

Fig. 5 – Timing diagrams of the process for electromagnetic impact node

Диаграммы (рис. 5) отражают переходный процесс ударного узла за время двух рабочих циклов, что соответствует по времени четырем периодам напряжения. Далее работа ударного узла осуществляется в квазиустановившемся режиме.

Результаты моделирования оценивались сравнением расчетных значений показателей, энергии удара –  $A_{уд}$ , действующего значения тока –  $I$ , потребляемой –  $P_1$  и полезной –  $P_2$  мощности, КПД и  $\cos \varphi$  с показателями, полученными на физической модели (таблица).

#### Сравнение результатов моделирования

##### Comparison of simulation results

Значения показателя	$I$ , А	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$A_{уд}$ , Дж	КПД, %	$\cos \varphi$
Расчет	20,7	276	113,5	4,54	0,41	0,402
Эксперимент	21,7	289	116,9	4,68	0,4	0,39

Расхождение расчетных значений с экспериментальными не превышает 5...8 %, что позволяет сделать вывод об адекватности созданной модели.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показывает хорошее соответствие количественных значений показателей, что стало возможным только при точном учете аналогов механических характеристик модели ударного узла, работающего в условиях вязкого трения и трения скольжения.

#### Заключение

Разработана математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним свободным выбегом бойка, наиболее точно отражающая взаимосвязи в электромеханической

системе при возбуждении периодических ударных нагрузок и взаимодействии с деформируемой средой.

Особенностью модели является возможность учета взаимосвязанных электро-механических процессов с большим набором входных параметров в переходных и квазиустановившихся режимах, учитывающих магнитные свойства материалов, потоки рассеяния, степень подвижности инерционных масс, свойства упругих связей, коэффициента отскока и т. д., сопровождаемых различного рода потерями энергии.

Выполнена верификация математической модели сравнением значений выходных показателей, полученных с помощью разработанного алгоритма расчета методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink, с результатами физического эксперимента. Расхождение расчетных значений интегральных показателей модели для квазиустановившегося режима работы ударного узла соответствует погрешности 5...8 %, общепринятой для инженерных расчетов.

Установлено, что точность при динамических расчетах подобных систем в существенной степени определяется точностью воспроизведения аналогов механических характеристик модели, и в особенности это касается учета процессов, связанных с рассеянием энергии в упругих связях и потерями от сухого трения.

Полученные результаты открывают перспективы для модернизации существующих и создания новых математических моделей однокатушечных, двухкатушечных и многокатушечных электромагнитных ударных узлов, представляющих в большинстве случаев сложную и многофакторную динамическую систему с большим набором связанных переменных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
2. **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.
3. **Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.
4. 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.
5. **Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. – 220 с.
6. **Нейман В.Ю.** К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы: коллективная монография / Новосибирский государственный технический университет; под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–169.
7. **Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
8. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
9. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
10. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А.** Оценка конструктивного совершенства систем принудительного охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия // Журнал Сибирского Федерального университета. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, № 2. – С. 166–175.

11. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Новые конструктивные решения проблемы точной синхронизации возвратно-поступательного движения бойка неуправляемой электромагнитной машины ударного действия // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 280–285.
12. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 45–49.
13. **Нейман Л.А.** Анализ процессов энергопреобразования в однокатушечной синхронной электромагнитной машине с двухсторонним выбегом бойка // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 112–116.
14. **Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А.** Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.
15. **Мошкин В.И.** Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 4. – С. 93–96.
16. Оптимизация геометрии линейных электромагнитных двигателей с использованием конечноэлементного моделирования магнитного поля / Ю.Г. Соловейчик, В.Ю. Нейман, М.Г. Персова, М.Э. Рояк, Ю.Б. Смирнова, Р.В. Петров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 24–28.
17. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 1 (58). – С. 246–256.
18. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.
19. **Усанов К.М., Каргин В.А., Волгин А.В.** Оценка эффективности энергопреобразований в электромагнитной ударной машине с упругим возвратным элементом // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 1. – С. 86–87.
20. **Татевосян А.А., Татевосян А.С.** Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 121–132.
21. **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.
22. **Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р., Гумерова М.Б.** Математическое моделирование динамических режимов электромагнитных демпфирующих элементов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 5 (40). – С. 86–90.
23. **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.
24. Расчет динамики включения электромагнита постоянного тока / Ю.А. Бахвалов, Б.Н. Лобов, Г.В. Могилевский, А.Г. Никитенко // Электротехника. – 1982. – № 1. – С. 48–51.
25. **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.
26. **Добронравов В.В., Никитин Н.Н.** Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1983. – 576 с.
27. **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.
28. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.

29. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
30. Андреева Е.Г., Семина И.А., Татевосян А.В. Исследование поля магнитной системы открытого типа с помощью программного пакета ANSYS // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – С. 173–175.
31. Татевосян А.С., Татевосян А.А. Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT: учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 96 с.
32. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

### A DYNAMIC MODEL OF THE IMPACT SINGLE-INDUCTOR SYNCHRONOUS ELECTROMAGNETIC MACHINE WITH TWO-SIDE HEAD RUNNING-OUT

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Creating an accurate mathematical model of an electromechanical oscillatory system with an electromagnetic impact drive is an actual research problem. Such a model most completely reflects the electromechanical system state under dynamic impact actions with respect to its interaction with the deformed medium. The research is focused on the electromagnetic impact unit with two-side head running out. Such an impact unit consists of a multi-mass oscillatory system with spring linkages excited by the inductor periodic magnetic field. The inductor is powered by 50 Hz AC voltage through a self-switched half-period rectifier. The developed mathematical model of the impact unit dynamic mode provides wide capabilities of the complete electromagnetic and electromechanical process analysis in different operation modes. The model takes into account magnetic material non-linear properties, leakage fluxes, an inertial mass mobility degree, spring linkage properties and friction forces accompanied by a power loss. The proposed mathematical model consists of differential equations describing the electrical balance of the motor non-linear system and translating inertial mass mechanical interaction. These equations were obtained by the Lagrange method. The proposed algorithm for numerical calculations permits using standard software packages.

The example of periodic electromechanical process calculation shows the model capabilities of a complete analysis of transient and quasi-stationary processes by the MatLab Simulink structural modeling tools. The model was verified by comparing calculated values with physical experiment data.

*Keywords:* mathematical model; electromagnetic impact unit; electromagnetic motor; mechanical oscillatory system, spring linkages; Lagrange methods; power loss.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-98-114

#### REFERENCES

1. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
2. 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.
3. Usanov K.M., Ugarov G.G., Moshkin V.I. *Lineinyi impul'snyi elektromagnitnyi privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive the machine with with autonomous-powered]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2006. 284 p.
4. Aksyutin V.A., Neyman L.A., Neyman V.Yu., Skotnikov A.A. Pressovoe oborudovanie s lineinym elektromagnitnym privodom dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov udarnoi sborki i shtampovki melkikh izdelii [Pressure equipment with a linear electromagnetic drive for the mechanization of technological processes shock assembly and stamping small parts]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 220–224.

5. Moshkin V.I., Neyman V.Yu., Ugarov G.G. *Impul'snye lineinye elektromagnitnye dvigateli* [Pulsed electromagnetic linear motors]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2010. 220 p.
6. Neyman V.Yu. K voprosu o ratsionalizatsii rabochikh protsessov i vybora konstruktivnykh skhem elektromagnitnykh udarnykh mashin [On the question of the rationalization the working process and the selection of designs schemes electromagnetic percussion machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004, pp. 155–169.
7. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.
8. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Nizkochastotnye udarnye elektromagnitnye mashiny i tekhnologii [Low-frequency impact electromagnetic machines and technology]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2014, no. 1, pp. 256–259.
9. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsiionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennyye problemy teorii mashin – Modern problems of theory of machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.
10. Neyman V.Yu., Neyman L.A. Otsenka konstruktivnogo sovershenstva sistem prinuditel'nogo okhlazhdeniya sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya [Impact synchronous electromagnetic machines forced cooling systems constructions estimation]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 166–175.
11. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Novye konstruktivnye resheniya problemy tochnoi sinkhronizatsii vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya boika neupravlyaemoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya [The new design address the precise timing of the reciprocating movement of the striker unguided electromagnetic machine percussion]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 280–285.
12. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Lineinye sinkhronnye elektromagnitnye mashiny dlya nizkochastotnykh udarnykh tekhnologii [Linear synchronous electromagnetic machine for low-frequency percussion technology]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 45–49. (In Russian)
13. Neyman L.A. Analiz protsessov energopreobrazovaniya v odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashine s dvukhstoronnim vybegom boika [Analysis of energy transformation processes in the single coil of an electromagnetic synchronous machine with double Coast striker]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 112–116.
14. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. [Structural analysis of synchronous electromagnetic percussion machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy: sbornik nauchnykh trudov* [Automated electromechanical systems: collection of scientific papers]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 106–120.
15. Moshkin V.I. Sravnenie magnitnykh tsiklov impul'snogo lineinogo elektromagnitnogo dvigatelya s uchedom moshchnosti poter' v ego obmotke [Comparing magnetic pulse cycles linear electromagnetic motor based on the power loss in its winding]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 93–96. (In Russian)
16. Soloveichik Yu.G., Neyman V.Yu., Persova M.G., Royak M.E., Smirnova Yu.B., Petrov R.V. Optimizatsiya geometrii lineinykh elektromagnitnykh dvigatelei s ispol'zovaniem konechnoelementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Optimization of geometry linear electromagnetic motors using finite element modeling of the magnetic field]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2005, no. 2, pp. 24–28. (In Russian)
17. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Povyshenie tochnosti analiticheskogo rascheta radial'nykh sil odnostoronneg magnitnogo prityazheniya nekoaksial'nykh elementov magnitoprovoda [Improving the accuracy of analytical calculation unilateral radial forces of magnetic attraction coaxial magnetic elements]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 1 (58), pp. 246–256.

18. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primenenie metoda provodimostei dlya ucheta sily odnostonnogo magnitnogo prityazheniya asimmetrichnogo elektromagnita [Application conductivities method to account for the strength of a unilateral asymmetric magnetic attraction of the electromagnet]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 214–218.
19. Usanov K.M., Kargin V.A., Volgin A.V. Otsenka effektivnosti energopreobrazovaniya v elektromagnitnoi udarnoi mashine s uprugim vozvratnym elementom [Evaluating the effectiveness of energy conversion in the electromagnetic shock machine with a resilient return element]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2008, no. 1, pp. 86–87.
20. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Raschet optimal'nykh parametrov elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya [The calculation of the optimal parameters of the vibrational motion of the electromagnetic actuator]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 121–132. (In Russian)
21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Dinamicheskaya model' elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya dlya sistem generirovaniya nizkochastotnykh vibratsii [The dynamic model of the electromagnetic actuator of the vibrational motion for systems generate high-frequency vibration]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 75–87.
22. Ismagilov F.R., Sattarov R.R., Gumerova M.B. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh rezhimov elektromagnitnykh dempfiroyushchikh elementov [Mathematical modeling of dynamic modes of electromagnetic damping elements]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2010, vol. 14, no. 5 (40), pp. 86–90.
23. 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.
24. Bakhvalov Yu.A., Lobov B.N., Mogilevskii G.V., Nikitenko A.G. Raschet dinamiki vklucheniya elektromagnita postoyannogo toka [Calculation inclusion DC electromagnet dynamics]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1982, no. 1, pp. 48–51. (In Russian)
25. 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.
26. Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 576 p.
27. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitprovode [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.
28. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeistvii i nizkochastotnykh vibratsii [Simulation of dynamic processes in the electromagnetic energy converters for generating the force effects systems and low-frequency vibrations]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.
29. Bul' O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Methods for calculating the magnetic systems of electric devices: magnetic circuit, field and program FEMM]. Moscow, Academia Publ., 2005. 336 p.
30. Andreeva E.G., Semina I.A., Tatevosyan A.A. Issledovanie polya magnitnoi sistemy otkrytogo tipa s pomoshch'yu programmnoho paketa ANSYS [Investigation of the magnetic

- field open-type system using ANSYS software package]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin – Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2014, no. 1, pp. 173–175.
31. Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A. *Raschet elektricheskikh i magnitnykh polei metodom konechnykh elementov s primeneniem kompleksa programm ELCUT* [Calculation of electric and magnetic fields by finite element method using ELCUT programs in]. Omsk, OmSTU Publ., 2015. 96 p.
  32. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Нейман Людмила Андреевна** – родилась в 1966 году, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и технологии. Опубликовано более 90 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: neyman31@gmail.com).

**Neyman Lyudmila Andreevna** (b. 1966) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor at the electrotechnological unit department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machine and technologies. She is the author of 90 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: 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 200 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: nv.nstu@ngs.ru).

**Neyman Vladimir Yurievich** (b. 1960) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the department of theoretical fundamentals of electrical engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests include power electromagnetic pulse systems. He is the author and co-author of over 200 scientific and educational works. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: nv.nstu@ngs.ru).

Статья поступила 03 июля 2016 г.  
Received July 03, 2016

## To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s dvukhstoronnim vybegom boika [Dynamical model of the impact single-inductor synchronous electromagnetic machine with head two-side running-out]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 98–114. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-98-114