

УДК 621.313.282.2

**ОБОБЩЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНОКАТУШЕЧНОЙ
СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО
ДЕЙСТВИЯ****Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман***Новосибирский государственный технический университет*

Развитие современных методов анализа и синтеза электромеханических систем, в том числе ударного действия, предполагает повышенный интерес к совершенствованию динамических моделей этих систем. В настоящей работе приводятся результаты создания обобщенной динамической модели однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия (СЭМУД), объединяющей в себе различные способы реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка. В качестве объекта исследования рассматривается электромагнитный ударный узел, получающий питание от источника энергии промышленной частоты, содержащий линейный электромагнитный двигатель и многомассовую механическую колебательную систему, периодически взаимодействующую с деформируемой средой. Актуальность исследований обусловлена необходимостью совершенствования и расширения возможностей динамического расчета при решении комплексной задачи анализа и синтеза различных вариантов схем однокатушечных СЭМУД. Основу обобщенной модели составляют дифференциальные уравнения электрического равновесия и механического взаимодействия, поступательно движущихся инерционных масс, связанных упругими связями, полученные методом Лагранжа. На основе созданной обобщенной модели рассмотрен пример реализации динамической модели трехмассовой СЭМУД с двухсторонним свободным выбегом бойка, получающим питание от промышленного источника по однополупериодной схеме выпрямления. Отмечена возможность уменьшения затрат рабочего времени по созданию расчетных моделей различных вариантов схем однокатушечных СЭМУД при выполнении динамических расчетов.

Ключевые слова: обобщенная динамическая модель, синхронная электромагнитная машина, электромагнитный двигатель, электромагнитный ударный узел, метод Лагранжа, динамический расчет.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-56-71

Введение

В различных областях техники широко применяются механизмы и устройства, созданные на базе линейных электромагнитных машин для обеспечения технологических процессов и производств при пластической деформации и разрушении материалов ударом [1–6].

Среди многочисленного класса электромагнитных машин следует выделить синхронные электромагнитные машины ударного действия (СЭМУД), основные преимущества которых – меньшее энергопотребление при работе в околорезонансных режимах, а также возможность в реализации ударных взаимодействий с частотой кратной частоте промышленной сети [7–10].

Несмотря на то что данный класс машин давно известен, методы по их расчету и проектированию по-прежнему востребованы и продолжают совершенствоваться [11–16].

В особенности это касается расчета нестационарных процессов, связанных с большим числом взаимосвязанных факторов, зависящих от скорости, частоты ударов, свойств упругих связей механической системы, нагрева и т. д. [17–23].

Проведение подобного расчета сопровождается большими трудностями, связанными с необходимостью построения математических моделей, наиболее точно отражающих динамическое состояние электромеханической системы вариантов схем СЭМУД, отличающихся по способу реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка СЭМУД [24–28].

Основным этапом проектирования данного класса машин по-прежнему сохраняется создание новых комплексных моделей и подходов, совершенствующих их расчет.

В этой связи, основываясь на единой методологической основе описания различных по конструкции однокатушечных синхронных электромагнитных машин ударного действия (СЭМУД), целесообразно рассмотреть обобщенную математическую модель в виде единой системы «источник питания – электромеханический преобразователь – ударная нагрузка».

Как правило, источник питания представляет собой внешнее устройство и образует электрическую подсистему. Ударный электромагнитный привод, являющийся предметом исследования, содержит магнитную и механическую подсистемы. Механическая подсистема СЭМУД характеризуется определенной степенью подвижности инерционных масс, связанных упругими связями. Электрическая и магнитная подсистемы связаны зависимостью величины потокосцепления от протекающего тока и координаты положения бойка. Число этих связей кратно возрастает количеству катушек. Механическая и магнитная подсистемы СЭМУД связаны зависимостью электромагнитного усилия, зависящего также от тока и координаты положения бойка.

В проводимых исследованиях ограничимся только вариантами конструктивных схем однокатушечных СЭМУД. С одной стороны, это позволит упростить решение поставленной задачи, с другой стороны, может послужить хорошей методологической основой при построении обобщенных моделей СЭМУД, содержащих более сложную систему из двух, трех и более катушек.

1. Разработка обобщенной модели однокатушечной СЭМУД

Несмотря на кажущуюся идентичность вариантов СЭМУД, их конструктивные схемы характеризуются различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка. В общем цикле возвратно-поступательного движения бойка преобладают динамические режимы работы, сопровождающиеся процессами преобразования потенциальной энергии в кинетическую энергию и обратно с частичной потерей энергии на преодоление сил сопротивления движению бойка механической природы, в том числе при ударных взаимодействиях [29, 30].

Обобщенная расчетная схема механической системы четырехмассовой однокатушечной СЭМУД с упругими связями представлена на рис. 1. Механизм ударного узла обобщенной модели СЭМУД представляет собой взаимосвязанную многомассовую электромеханическую систему. Поступательное движение бойка массой m_1 возникает в результате взаимодействия магнитного поля катушки, по виткам которой протекает пульсирующий ток, с ферромагнитной массой бойка. В результате такого взаимодействия боек совершает возвратно-поступательные перемещения и наносит удар по рабочему инструменту массой m_2 . В зависимости от конструктивной схемы СЭМУД обратный ход бойка обеспечивается частично за счет потенциальной энергии упругой пружины, частично за счет кинетической энергии при отскоке бойка при его взаимодействии с рабочим инструментом и частично в результате взаимодействия магнитного поля катушки и

ферромагнитного бойка. Частота движения бойка, как правило, равна или кратна частоте питающего источника промышленной частоты $f = 50$ Гц. Рабочий цикл ударного узла выполняется при условии полной синхронизации координаты положения бойка с периодическими импульсами напряжения, поступающими на катушку.

Механическая система СЭМУД (рис. 1) содержит 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 , магнитопровода с закрепленной внутри катушкой x_3 массой m_3 и перемещения удерживающего устройства x_4 массой m_4 .

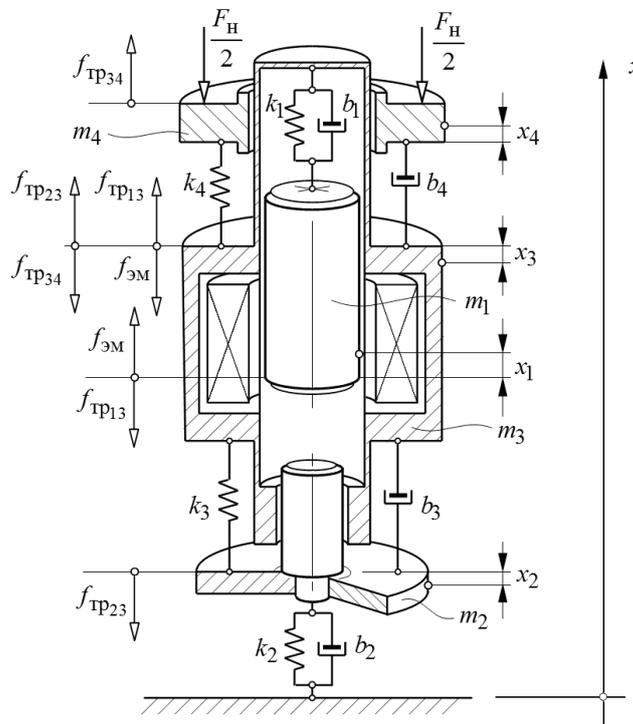


Рис. 1 – Обобщенная расчетная схема СЭМУД

Fig. 1 – Generalized design scheme SCSiEM

Уравнение электрического равновесия обобщенной модели (рис. 1) используем в известном виде:

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

где $i = i_\pi + i_\mu$ – ток на входе источника; i_π – ток потерь; i_μ – ток намагничивания катушки; r – активное сопротивление катушки; $\psi(i_\mu, x_1)$ – потокосцепление катушки, зависящее от тока намагничивания i_μ и координаты x_1 положения бойка.

Уравнение (1) предусматривает насыщение магнитопровода, потоки рассеяния и действие вихревых токов.

Уравнение движения механической системы получим на основании уравнений Лагранжа второго рода

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

где $Q_i^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}$, $Q_i^{\Phi} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i}$, Q_i^{B} – обобщенные силы, соответствующие потенциальной энергии, энергиям рассеяния сопротивления движению (диссипативная функция Рэлея), внешних воздействий и сил трения; $N = 4$ – принимаемое в расчетах ограничение числа степеней свободы системы согласно рис. 1.

Потенциальную энергию механической части рассматриваем в предположении устойчивого статического равновесия многомассовой системы. Колебания в пространстве будут описываться зависимостью обобщенных координат x_i от времени, отсчитываемых от положения устойчивого статического равновесия. Рассматривая движение масс $m_1 \dots m_4$ в выбранной системе координат (рис. 1), кинетическую энергию представим в виде

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N=4} m_i \dot{x}_i^2 = \frac{1}{2} (m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2 + m_3 \dot{x}_3^2 + m_4 \dot{x}_4^2), \quad (3)$$

где \dot{x}_i – обобщенные скорости.

Обобщенные силы Q_i^{Π} , Q_i^{Φ} определяются равенствами:

$$Q_i^{\Pi} = - \frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4} \frac{1}{2} [k_1(x_1 - x_3)^2 + k_2 x_2^2 + k_3(x_3 - x_2)^2 + k_4(x_4 - x_3)^2]}{\partial x_i}, \quad (4)$$

где x_i – обобщенные координаты; $k_1 \dots k_4$ – статические коэффициенты жесткости упругих связей;

$$Q_i^{\Phi} = - \frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4} \frac{1}{2} [b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3)^2 + b_2 \dot{x}_2^2 + b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2 + b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2]}{\partial \dot{x}_i}, \quad (5)$$

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

Для определения значений обобщенных сил внешних воздействий и сил трения, соответствующих обобщенным координатам (рис. 1), воспользуемся принципом возможных перемещений:

$$Q_{x_1} = f_{\text{эм}}(i_{\mu}, x_1) - f_{\text{тр}13} \text{sign } \dot{x}_1; \quad Q_{x_2} = -f_{\text{тр}23} \text{sign } \dot{x}_2; \quad (6)$$

$$Q_{x_3} = -f_{\text{эм}}(i_{\mu}, x_1) + (f_{\text{тр}13} + f_{\text{тр}23} - f_{\text{тр}34}) \text{sign } \dot{x}_3; \quad (7)$$

$$Q_{x_4} = f_{\text{тр}34} \text{sign } \dot{x}_4 - F_{\text{H}}, \quad (8)$$

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

Используя уравнение электрического равновесия (1) и уравнения Лагранжа второго рода (2) с учетом установленных зависимостей (3)–(5) и значений обобщенных сил внешних воздействий и сил трения (6)–(8), получим обобщенную математическую модель СЭМУД без учета ударного взаимодействия.

Дополняя полученную систему условиями соударения ударных масс и заданных пределов ограничения движения бойка, окончательный процесс движения рассматриваем как результат наложения вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, обусловленных различного рода потерями энергии в электромеханической системе [25–28].

Последующее решение уравнений может быть выполнено с применением, например, метода структурного моделирования в Matlab Simulink [31].

При изучении динамических процессов в СЭМУД необходимо дополнительно располагать точными сведениями о закономерности изменения потокоцепления $\psi = f(i_{\mu}, x_1)$ и электромагнитного усилия $f_{эм} = f(i_{\mu}, x_1)$ от тока намагничивания и координаты положения бойка, что связано с изучением характеристик магнитного поля, т.е. решением полевой задачи. Для решения полевой задачи и определения массива значений опорных точек статических параметров потокоцепления и электромагнитного усилия следует рекомендовать стандартные программы конечно-элементного моделирования FEMM, ELCUT или ANSYS [32–35].

2. Пример использования обобщенной модели

В качестве примера использования обобщенной модели (рис. 1) рассмотрим основные этапы реализации модели однокатушечной СЭМУД с двухсторонним свободным выбегом бойка, идентичной по конструкции и параметрам электромагнитной машины МС-18/36 [7].

Основные этапы реализации подобного расчета для четырехмассовой СЭМУД подробно рассмотрены в работах [25, 26]. Один из возможных вариантов конструктивной схемы ударного узла трехмассовой СЭМУД приведен на рис. 2.

Для реализации рабочего цикла с двухсторонним свободным выбегом бойка используется единственная катушка, обеспечивающая разгон ударной массы бойка электромагнитными силами в двух направлениях.

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.

При построении модели полагаем, что механическая колебательная система имеет три степени свободы ($N = 3$). Рассматривая движение инерционных масс в установленной системе координат (рис. 1), при условии $m_4 = 0$, $x_4 = 0$, $k_4 = 0$ и $b_4 = 0$ кинетическая энергия системы – T и обобщенные силы – Q^{Π} , Q^{Φ} согласно с (3) – (5) будут определяться равенствами:

$$T = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2}; \quad (9)$$

$$Q_i^\Pi = - \frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4} \frac{1}{2} [k_1(x_1 - x_3)^2 + k_2 x_2^2 + k_3(x_3 - x_2)^2]}{\partial x_i}; \quad (10)$$

$$Q_i^\Phi = - \frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4} \frac{1}{2} [b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3)^2 + b_2 \dot{x}_2^2 + b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2]}{\partial \dot{x}_i}. \quad (11)$$

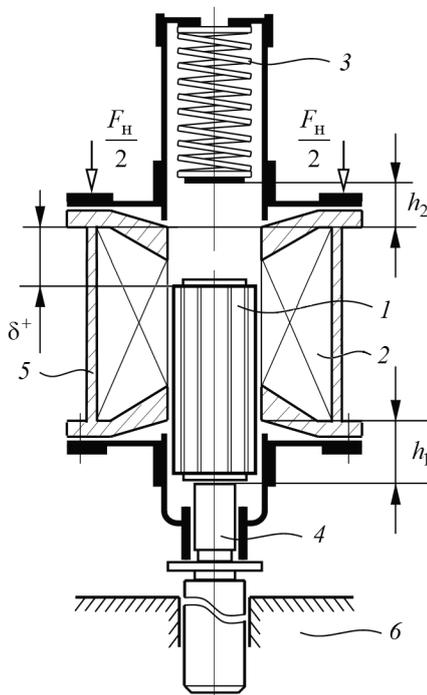


Рис. 2 – Электромагнитный ударный узел трехмассовой СЭМУД:

1 – ударная масса бойка; 2 – катушка; 3 – пружина; 4 – рабочий инструмент; 5 – магнитопровод; 6 – деформируемая среда

Fig. 2 – Electromagnetic three-mass shock unit SCSIEM:

1 – striking mass; 2 – coil; 3 – spring; 4 – work tool; 5 – magnetic core; 6 – deformable medium

Обобщенные силы внешних воздействий и силы трения в соответствии с (6) и (7) при условии $f_{\text{тр}34} = 0$:

$$Q_{x_1} = f_{\text{эм}}(i_\mu, x_1) - f_{\text{тр}13} \text{sign } \dot{x}_1; \quad Q_{x_2} = -f_{\text{тр}23} \text{sign } \dot{x}_2; \quad (12)$$

$$Q_{x_3} = -f_{\text{эм}}(i_\mu, x_1) + (f_{\text{тр}13} + f_{\text{тр}23}) \text{sign } \dot{x}_3 - F_H. \quad (13)$$

Взяв частные производные от кинетической энергии и обобщенных сил (9)–(11), а также производные по времени согласно уравнению (2), математическая модель динамического состояния СЭМУД (рис. 2) без учета ударного взаимодействия при наличии внешних воздействий и сил трения будет описываться системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = ir + \frac{d\psi(i_\mu, x_1)}{dt}; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3) = f_{\text{ЭМ}}(i_\mu, x_1) - f_{\text{ТР13}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}; \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_2 x_2 - k_3 (x_3 - x_2) = -f_{\text{ТР23}} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - k_1 (x_1 - x_3) + \\ + k_3 (x_3 - x_2) = -f_{\text{ЭМ}}(i_\mu, x_1) + (f_{\text{ТР13}} + f_{\text{ТР23}}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt} - F_{\text{H}}. \end{array} \right. \quad (14)$$

Движение бойка выполняется в квазиустановившемся режиме. Наличие ограничителей движения в конструкции ударного узла не позволяют бойку выходить за установленные пределы:

$$x_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } \delta^+ = h_1; \\ h_1 - \delta^+, & \text{при } x_1 \leq h_1; \\ h_1 + \delta^-, & \text{при } x_1 > h_1, \end{cases} \quad (15)$$

где δ^+ , δ^- – переменная величина воздушного рабочего зазора, образованного положением бойка относительно верхней и нижней полюсной системы катушки; h_1 – расстояние, пройденное бойком от положения магнитного равновесия до ударного сечения рабочего инструмента; h_2 – расстояние от положения магнитного равновесия до контакта с буферной пружиной (рис. 2).

Также следует учесть зависимость обобщенных сил, действующих на интервале перемещения бойка, которые будут записываться кусочно-линейными функциями:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2; \\ k_1 (x_1 - x_3) & \text{при } x_1 \geq h_1 + h_2, \end{cases} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2; \\ b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) & \text{при } x_1 \geq h_1 + h_2. \end{cases} \quad (17)$$

Полагаем, что сопротивление и упругие свойства деформируемой среды, оказываемые перемещению инструмента, зависят от жесткости и демпфирующих свойств введенных упругих связей.

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

Дополнение системы (14) условиями соударения ударных масс и действующих в системе обобщенных сил (15)–(17) позволяет рассматривать математическую модель динамического состояния ударного узла трехмассовой СЭМУД с двухсто-

ронним свободным выбегом бойка в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = ir + \frac{d\psi(i_\mu, x_1)}{dt}, \text{ где } i = i_\pi + i_\mu; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \begin{cases} \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_\pi} - f_{\text{ТР13}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{\text{ЭМ}}(i_\mu, x_1), \text{ если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2; \\ -\tilde{\lambda}_1 - f_{\text{ТР13}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{\text{ЭМ}}(i_\mu, x_1) \text{ при } x_1 \geq h_1 + h_2; \\ -f_{\text{ТР13}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{\text{ЭМ}}(i_\mu, x_1) \text{ при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2, \text{ если } \frac{dx_1}{dt} < 0; \end{cases} \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -\frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_\pi} - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_3 - f_{\text{ТР23}} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_3 - f_{\text{ЭМ}}(i_\mu, x_1) + (f_{\text{ТР13}} + f_{\text{ТР23}}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt} \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2; \\ \tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_3 - f_{\text{ЭМ}}(i_\mu, x_1) + (f_{\text{ТР13}} + f_{\text{ТР23}}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt} \\ \text{при } x_1 \geq h_1 + h_2, \end{cases} \end{array} \right.$$

$$\text{где } \tilde{\lambda}_1 = b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3); \quad \tilde{\lambda}_2 = b_2 \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2; \quad \tilde{\lambda}_3 = b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_3 (x_3 - x_2); \quad \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_\pi}, \frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_\pi} - \text{импульсы сил, действующие на массы соударяю-$$

щихся тел в конце частично упругого удара; v_1, \bar{v}_1 – скорости центра массы бойка в начале и конце удара; v_2, \bar{v}_2 – скорости центра массы рабочего инструмента в начале и конце удара; τ_π – длительность времени ударного импульса.

С помощью решения полевой задачи рассчитывался массив значений опорных точек статических параметров потокосцепления $\psi(i, \delta)$ и электромагнитного усиления $f_{\text{ЭМ}}(i, \delta)$ в зависимости от тока и положения бойка, где $\delta = h_1 - x_1$. Для решения динамической части задачи применялся аппарат структурного моделирования в среде Matlab Simulink. Задание функций двух аргументов статических параметров модели выполнялся с помощью блока двумерных таблиц.

В качестве примера на рис. 3–5 приведены временные диаграммы рабочего процесса ударного узла трехмассовой СЭМУД (рис. 2) идентичной по конструкции МС-18/36 [7].

Верификация полученной модели производилась сравнением расчетных значений энергии удара $A_{\text{уд}}$ (Дж), действующего значения тока I (А), потребляемой мощности P_1 (Вт), полезной мощности P_2 (Вт) и коэффициента полезного действия (КПД) с показателями, полученными на физической модели.

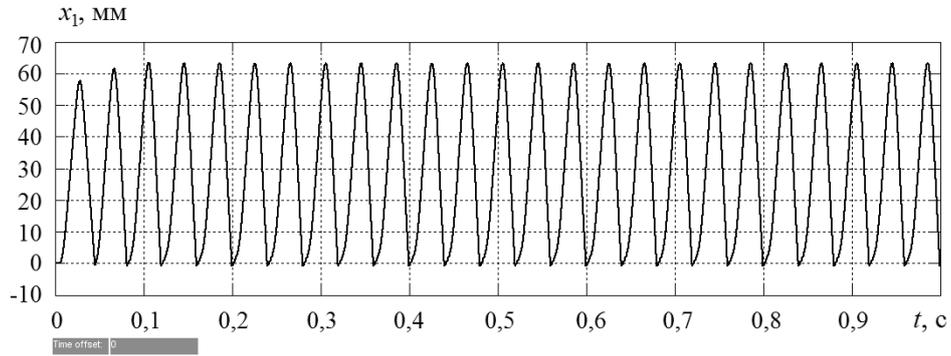


Рис. 3 – Временная диаграмма перемещения бойка $x_1(t)$

Fig. 3 – Timing diagram of the movement of the striker $x_1(t)$

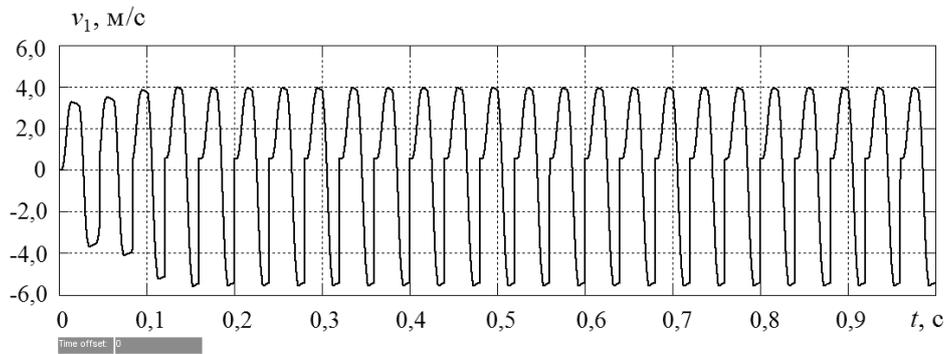


Рис. 4 – Временная диаграмма скорости перемещения бойка $v_1(t)$

Fig. 4 – Timing diagram of the movement speed of the striker $v_1(t)$

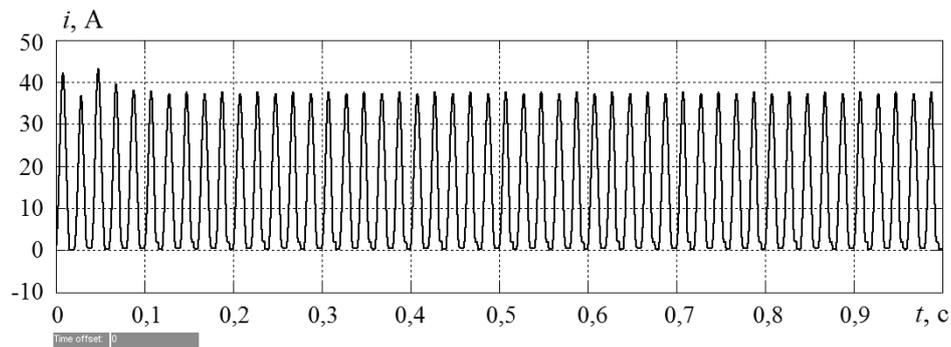


Рис. 5 – Временная диаграмма тока $i(t)$ в цепи катушки

Fig. 5 – Timing diagram of the current $i(t)$ in the coil circuit

Максимальная относительная погрешность при расчетах лежит в пределах погрешности обработки экспериментальных данных и не превышает 6–8 % [26].

3. Заключение

Предложено построение обобщенной модели динамики многомассовой однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия, наиболее точно отражающей взаимосвязи в электромеханической системе при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой. Обобщенная модель включает в себя широкий круг конструктивных исполнений базовых вариантов существующих и новых схем, что упрощает процесс создания математических моделей однокатушечных СЭМУД, представляющих в большинстве случаев сложную и многофакторную динамическую систему с большим набором связанных переменных и сокращает затраты времени при выполнении динамических расчетов.

Универсальность обобщенной модели состоит в возможности учета взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах вариантов схем СЭМУД, характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка.

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. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
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. **Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
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 В.Ю., Петрова А.А.** Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
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.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
9. **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.
10. **Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А.** Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитных машин для импульсных технологий // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2011. – С. 271–277.
11. **Нейман В.Ю.** К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы / Новосиб. гос. техн. ун-т; под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–169.
12. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310–313.

13. **Малинин Л.И., Нейман В.Ю.** Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах // *Электричество*. – 2008. – № 6. – С. 57–62.
14. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // *Автоматизированные электромеханические системы*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
15. **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.
16. **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.
17. **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.
18. Расчет динамики включения электромагнита постоянного тока / Ю.А. Бахвалов, Б.Н. Лобов, Г.В. Могилевский, А.Г. Никитенко // *Электротехника*. – 1982. – № 1. – С. 48–51.
19. **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.
20. **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.
21. **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.
22. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // *Вестник МЭИ*. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
23. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Сравнение динамики рабочих циклов двухкатушечных синхронных электромагнитных машин ударного действия со свободным выбегом бойка // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2017. – № 1 (34). – С. 98–115.
24. **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.
25. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.
26. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2016. – № 3 (32). – С. 98–114.
27. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2016. – № 4 (33). – С. 61–79.
28. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2016. – № 5. – С. 32–40.

29. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
30. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2018. – № 2 (39). – С. 70–81.
31. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
32. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
33. **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.
34. **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.
35. **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.

GENERALIZED MODEL OF A SINGLE-COIL SYNCHRONOUS IMPACT ELECTROMAGNETIC MACHINE

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Development of modern methods of electromechanical systems analysis and synthesis including impact ones requires the improvement of their dynamical models. The description of the generalized dynamical model of a single-coil synchronous impact electromagnetic machine (SCSIEM) that combines different methods of implementation of reciprocated motion of the striker impact mass is presented. The electromagnetic impact unit considered as a research subject is powered from a 50 Hz power source. It consists of the linear electromagnetic motor and the multimass mechanical oscillatory system periodically interacting with a deformed medium. The investigation is of current importance, because it is necessary to improve and extend the dynamic design procedure when the complex problem of analysis and synthesis of SCSIEM scheme variants is solved. The generalized model is based on the differential equations of the electrical balance and mechanical interaction of traveling inertial masses linked by spring linkages derived by the Lagrange method. An example of the dynamical model based on the generalized one is considered for a three-mass SCSIEM with striker two-side free running-out powered from 50 Hz power supply through a half-period rectifier. Working time for creation of dynamical design models for different variants of SCSIEM can be decreased.

Keywords: generalized dynamical model, synchronous electromagnetic machine, electromagnetic motor, electromagnetic impact unit, Lagrange method, dynamical design.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-56-71

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. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
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 autonomous-powered]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2006. 284 p.

4. Simonov B.F., Neiman V.Yu., Shabanov A.S. Impul'snyi lineinyi elektromagnitnyi privod dlya skvazhinnogo vibroistochnika [Pulsed linear electromagnetic drive for downhole vibration source]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 2017, no. 1, pp. 118–126.
5. 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 [Forging equipment with a linear electromagnetic motor for the mechanization of processes of impact assembly and stamping small parts]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 220–224.
6. 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.
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. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsiionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.
9. 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.
10. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. [Trends in the development of synchronous two-winding electromagnetic machines for impulse technologies]. *Aktual'nye problemy energetiki APK: materialy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of power engineering of the agroindustrial complex: materials II international scientific-practical conference]. Saratov, 2011, pp. 271–277. (In Russian).
11. 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.
12. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. O metodike k vyboru tipa elektromagnita po znacheniyam konstruktivnogo faktora [About the method of choosing the type of electromagnet according to the values of the design factor]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2011, no. 2, pp. 310–313.
13. Malinin L.I., Neiman V.Yu. Opredelenie napryazheniya preobrazovaniya energii i elektromagnitnykh sil v elektromekhanicheskikh sistemakh [Determination of the voltage of energy conversion and electromagnetic forces in electromechanical systems]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2008, no. 6, pp. 57–62.
14. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyanie sootnoshenii glavnykh razmerov elektromagnitov na znacheniya konstruktivnogo faktora i pokazatelya ekonomichnosti [The influence of the ratio of the main dimensions of the electromagnets on the values of the design factor and the indicator of efficiency]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.
15. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primenenie metoda provodimostei dlya ucheta sily odnostoronnegho 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.

16. Ismagilov F.R., Sattarov R.R., Gumerova M.B. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh rezhimov elektromagnitnykh dempfiyuyushchikh elementov [Mathematical modeling of dynamic modes of electromagnetic damping elements]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik UGATU*, 2010, T. 14, no. 5 (40), pp. 86–90.
17. 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.
18. Bahvalov Yu.A., Lobov B.N., Mogilevskii G.V., Nikitenko A.G. Raschet dinamiki vkhlyucheniya elektromagnita postoyannogo toka [Calculation inclusion DC electromagnet dynamics]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1982, no. 1, pp. 48–51. (In Russian).
19. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Uproshchennyi raschet elektromagnitnogo udarnogo privoda v povtorno-kratkovremennom rezhime raboty [A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 50–53. (In Russian).
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeystvii i nizkочастотных 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.
21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitprovode [Simulation of processes in an electromagnetic vibration converter with power loss in the steel magnetic core]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 73–78.
22. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatelnogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2016, no. 6, pp. 64–71.
23. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Sravnenie dinamiki rabochikh tsiklov dvukhkatushechnykh sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya so svobodnym vybegom boika [Comparison of the operating cycles dynamics of the two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with head free running-out]. *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 98–115.
24. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatelnogo dvizheniya s uprugimi svyazyami [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.
25. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki elektromagnitnogo udarnogo uzla s uprugimi svyazyami [A dynamic mathematical model of the electromagnetic impact unit with spring linkages]. *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 2 (31), pp. 94–107.
26. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki odnokatushechnoj sinkhronnoj elektromagnitnoj mashiny udarnogo deystviya s dvuhstoronnim vybegom bojka [Mathematical model of the dynamics of a single-coil synchronous electro-magnetic percussion machine with double-sided striking of the striker]. *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 98–114.

27. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s inertsionnym reversom boika [A dynamic model of a two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with an inertial head reverse]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2016, no. 4 (33), pp. 61–79.
28. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Mathematical model of dynamics of two-inductor synchronous impact electromagnetic machines with free head running with free head running-out]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2016, no. 5, pp. 32–40.
29. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny so svobodnym vybegom boika [Duty cycle synchronous electromagnetic machine with free coast of striker]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 48–52.
30. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny so svobodnym vybegom boika v katushke pryamogo khoda [An operating cycle of the two-inductor synchronous electromagnetic machine with a free head running-out in the driving stroke inductor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 70–81.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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]. Omsk, OmGTU Publ., 2015. 96 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, д-р техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и импульсные технологии. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna – (b. 1966), Doctor of Sciences (Eng.), Associate Professor at the Department of Electrical Complexes of the Novosibirsk State Technical University. Research interests: linear synchronous electromagnetic machine and pulse technologies. She is author of 100 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 200 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Neyman Vladimir Yurievich – (b. 1960), Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Head of the Department of Theory of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. Research interests – power electromagnetic pulse systems. Author and co-author of over 200 scientific and educational works. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

*Статья поступила 04 мая 2019 г.
Received May 04, 2019*

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Obobshchennaya dinamicheskaya model' odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya [Generalized model of a single-coil synchronous impact electromagnetic machine]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 2 (43), pp. 56–71. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-2-56-71.