

УДК 621.313.282.2

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДВУХКАТУШЕЧНОЙ  
СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО  
ДЕЙСТВИЯ С ИНЕРЦИОННЫМ РЕВЕРСОМ БОЙКА****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 созданию и совершенствованию математических моделей машин и устройств, наиболее объективно отражающих их динамическое состояние в различных технологических процессах. В этой связи актуальность проводимых исследований обусловлена необходимостью расширения возможностей динамического расчета электромагнитной машины возвратно-поступательного движения при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой. В качестве объекта исследований рассматривается электромагнитный ударный узел двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка, включающий в себя многомассовую колебательную систему с упругими связями и получающий питание от однофазного источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления. Создана математическая модель динамики электромагнитного ударного узла, обеспечивающая широкие возможности всестороннего анализа электромеханических процессов при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой. Основу модели составляют дифференциальные уравнения, описывающие электрическое равновесие нелинейной системы и механическое взаимодействие поступательно движущихся масс, полученные с помощью уравнения Лагранжа второго рода. Достоинством модели является возможность учета большого числа взаимосвязанных факторов, зависящих от скорости бойка и частоты ударных импульсов сил, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, магнитных свойств материалов, сопровождаемые различного рода потерями энергии. Методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink рассмотрен пример численной реализации модели ударного узла с потерями энергии. Расхождение результатов расчета с экспериментальными данными не превышает 8 %. Выполненные исследования расширяют возможности модели в проведении динамического расчета и решения вопросов рационального выбора параметров электромагнитного ударного узла на стадии проектирования.

*Ключевые слова:* ударный узел, синхронная электромагнитная машина, математическая модель, механическая колебательная система, упругие связи, инерционный реверс бойка, уравнение Лагранжа второго рода.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-61-79

**Введение**

Машины и механизмы с электроприводами возвратно-поступательного движения, в том числе ударного действия, находят широкое применение в промышленности для обеспечения многих технологических процессов [1–4].

Перспективным направлением исследований в данной области является совершенствование машин и механизмов, созданных на основе электромагнитного привода ударного действия [5, 6].

Механическая система такого электропривода обеспечивает относительно высокую его надежность и повышенный ресурс работы при воздействии ударных

нагрузок, а также некоторое снижение энергопотребления при работе в околорезонансных режимах [7, 8].

Вопросам преимущественного использования вариантов схем электромагнитных машин ударного действия посвящено достаточное количество работ [9, 10].

Как обладающие более высокими энергетическими показателями, следует выделить синхронные электромагнитные машины ударного действия, для которых частота механических колебаний ударной массы бойка кратна частоте питающей сети [11, 12].

Существующие сегодня методики точного учета конструктивных параметров синхронных машин ударного действия основаны в своем большинстве на статических подходах и позволяют в разной степени улучшать их силовые и энергетические показатели [13–17].

Повышение эффективности работы синхронных электромагнитных машин и снижение энергопотребления возможны только при условии рационального выбора параметров электромеханической системы ударного узла.

Как правило, выбор параметров ударного узла связан с учетом большого числа взаимосвязанных факторов, зависящих от скорости движения бойка и частоты ударных импульсов сил, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, нелинейности характеристик магнитных материалов и т. д. [18–20].

Упрощение связей в подобных системах, работающих исключительно в переходных режимах, существенно ограничивает в возможностях рационального выбора параметров электромеханической ударной системы. Поэтому создание математической модели динамики ударного узла, наиболее объективно отражающей взаимосвязи параметров этой системы, является решением актуальной задачи.

В качестве объекта для исследований рассматривается электромагнитный ударный узел двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка [4].

Данный вариант ударного узла широко известен, также появились более совершенные его модификации [21–23], однако выполненные к настоящему времени исследования касаются лишь частных вопросов и имеют рекомендательный характер либо не содержат обоснованных пределов применения.

Целью данной работы является разработка математической модели динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка учитывающей возможности в проведении всестороннего анализа электромеханических процессов в различных режимах.

### **1. Электромагнитный ударный узел с инерционным реверсом бойка**

Конструктивная схема двухкатушечного электромагнитного ударного узла приведена на рис. 1. Для реализации рабочего цикла используется система из двух катушек прямого 1 и обратного 2 хода, заключенных в общий или отдельные магнитопроводы 3, 4, которые обеспечивают разгон ударной массы бойка 5 электромагнитными силами в двух направлениях. Совершая возвратно-поступательные движения, боек 5 периодически взаимодействует с рабочим инструментом 6 и с массивным инерционным преобразователем 7, который выполняет его остановку и реверс. При ударном взаимодействии движение инерционного преобразователя 7 происходит в направлении, противоположном направлению движения бойка 5, а его кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию при сжатии пружины 8.

После ударного взаимодействия бойка 5 с рабочим инструментом 6 и передачи энергии в деформируемую среду 9 движение бойка под действием электромаг-

нитных сил катушки обратного хода 2 выполняется в направлении движущемуся ему навстречу инерционного преобразователя 7. Далее цикл повторяется.

Для снижения амплитуды вибраций в промежутке между крепежным устройством 10 и основанием электропривода установлен виброизолирующий упругий элемент 11.

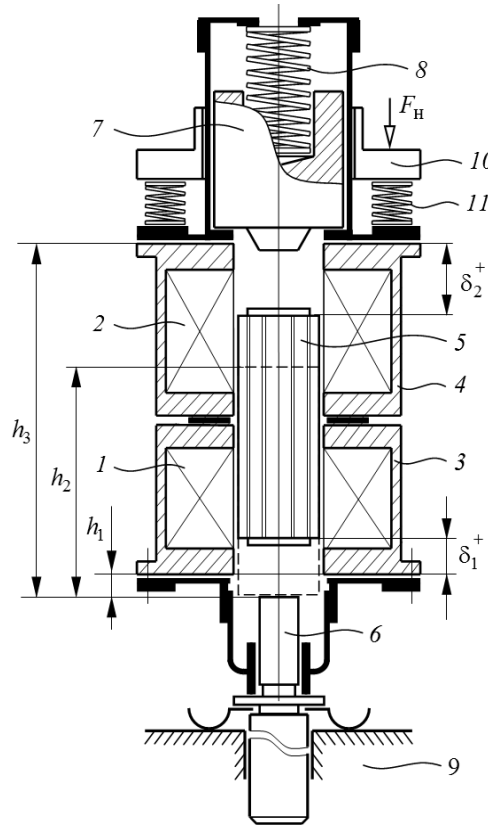


Рис. 1 – Электромагнитный ударный узел

Fig. 1 – Electromagnetic impact node

Усилие нажатия  $F_H$  обеспечивает необходимую устойчивую связь ударного узла с рабочим инструментом при возбуждении ударного импульса сил и взаимодействии с деформируемой средой. Катушки получают питание от однофазного источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления. Рабочий цикл ударного узла осуществляется за время одного периода напряжения, что при частоте источника  $f = 50 \text{ Гц}$  обеспечивает синхронную частоту ударных импульсов сил  $n_{\text{уд}}$  и длительность времени рабочего цикла  $t_{\text{ц}}$ :

$$n_{\text{уд}} = \frac{60 f}{2 p} = 3000 \text{ уд/мин}; \quad t_{\text{ц}} = \frac{2 p}{f} = 0,02 \text{ с},$$

где  $2 p = 1$  – число периодов напряжения в течение времени одного рабочего цикла.

## 2. Методы решения

На начальном этапе реализации модели полагаем, что ударного взаимодействия в механической системе не возникает, а процесс движения является результатом наложения вынужденных и свободных колебаний системы от действия внешней периодической силы. В этом случае механическая и магнитная системы (рис. 1) связаны зависимостями электромагнитного усилия  $f_{эм1} = f(i_1, x_1)$  и  $f_{эм2} = f(i_2, x_1)$  от величины протекающего по катушкам тока  $i_1, i_2$  и координаты положения бойка  $x_1$ . Магнитная и электрическая системы связаны зависимостями величины потокосцеплений  $\psi_{эм1} = f(i_1, x_1)$  и  $\psi_{эм2} = f(i_2, x_1)$ .

Уравнения электрического равновесия системы используем в виде

$$u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_1, x_1)}{dt}, \quad (1)$$

$$u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_2, x_1)}{dt}, \quad (2)$$

где  $u_1(t), u_2(t)$  – напряжение на обмотках катушек;  $r_1, r_2$  – активные сопротивления в цепи катушек.

Согласно установленным связям и действующим в системе обобщенным силам, на рис. 2 представлена расчетная схема механической части электромагнитного ударного узла (рис. 1). В качестве обобщенных координат здесь выступают линейные перемещения центра масс бойка  $x_1$  массой  $m_1$ , рабочего инструмента  $x_2$  массой  $m_2$ , инерционного преобразователя  $x_3$  массой  $m_3$ , электропривода  $x_4$  массой  $m_4$  и устройства крепежа  $x_5$  с присоединенной к нему массой  $m_5$ .

Уравнения движения механической системы получим на основании уравнения Лагранжа второго рода [24]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} + Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

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, соответствующие  $i$ -й обобщенной координате;  $x_i$  – обобщенные координаты;  $\dot{x}_i$  – обобщенные скорости;  $N$  – число степеней свободы механической системы ( $N = 5$ ).

Принимаем положение устойчивого статического равновесия системы за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной энергии. Последовательно установим величины, входящие в уравнение (3).

Кинетическая энергия механической системы для поступательно движущихся масс без учета ударного взаимодействия тел

$$T = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2} + \frac{m_4 \dot{x}_4^2}{2} + \frac{m_5 \dot{x}_5^2}{2}.$$

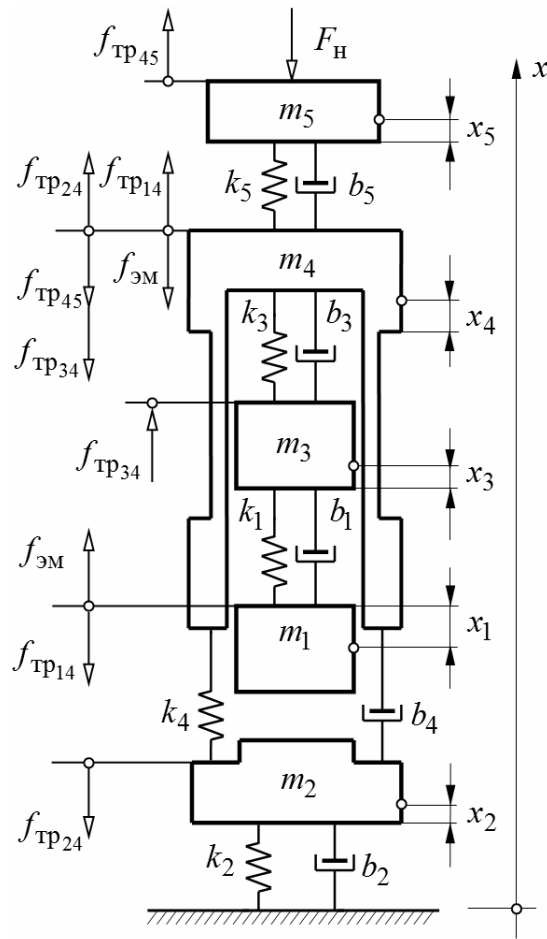


Рис. 2 – Расчетная динамическая схема электро-механической системы

Fig. 2 – Calculated dynamic model electromechanical system

Потенциальная энергия упругих связей

$$\Pi = \frac{k_1(x_1 - x_3)^2}{2} + \frac{k_2 x_2^2}{2} + \frac{k_3(x_4 - x_3)^2}{2} + \frac{k_4(x_4 - x_2)^2}{2} + \frac{k_5(x_5 - x_4)^2}{2},$$

где  $k_1 \dots k_5$  – статические коэффициенты жесткости упругих связей.

Диссипативная функция Рэлея

$$\Phi = \frac{b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3)^2}{2} + \frac{b_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{b_3(\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2}{2} + \frac{b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_2)^2}{2} + \frac{b_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2}{2},$$

где  $b_1 \dots b_5$  – коэффициенты вязкого трения упругих связей.

Отметим, что дополнительные связи (рис. 2) с приведенной жесткостью  $k_1$  и вязким трением  $b_1$  реализуются только формально. Также полагаем, что электромагнитные силы в механической системе значительно превышают вес бойка.

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

$$Q_{x_1} = f_{\text{эм}}(i, x_1) - f_{\text{тр}14} \operatorname{sign} \dot{x}_1; \quad Q_{x_2} = -f_{\text{тр}24} \operatorname{sign} \dot{x}_2; \quad Q_{x_3} = f_{\text{тр}34} \operatorname{sign} \dot{x}_3;$$

$$Q_{x_4} = -f_{\text{эм}}(i, x_1) + (f_{\text{тр}14} + f_{\text{тр}24} - f_{\text{тр}34} - f_{\text{тр}45}) \operatorname{sign} \dot{x}_4; \quad Q_{x_5} = f_{\text{тр}45} \operatorname{sign} \dot{x}_5 - F_{\text{н}},$$

где  $f_{\text{эм}}(i, x_1) = f_{\text{эм}1}(i_1, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_2, x_1)$  – вынуждающая электромагнитная сила первой и второй катушки;  $f_{\text{тр}14}, f_{\text{тр}24}, f_{\text{тр}34}, f_{\text{тр}45}$  – силы сухого трения скольжения;  $F_{\text{н}}$  – постоянная величина усилия нажатия.

Внося значения производных от кинетической энергии, потенциальной энергии и функции Рэля в уравнение (3) с учетом действующих внешних обобщенных сил и сил трения скольжения выражения (1)–(3), позволяют образовать полную систему дифференциальных уравнений без учета ударного взаимодействия инерционных масс:

$$u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_1, x_1)}{dt}; \quad (4)$$

$$u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_2, x_1)}{dt}; \quad (5)$$

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3) = f_{\text{эм}}(i, x_1) - f_{\text{тр}14} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}; \quad (6)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_4 \left( \frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_2 x_2 - k_4 (x_4 - x_2) = -f_{\text{тр}24} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - b_3 \left( \frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - k_1 (x_1 - x_3) - k_3 (x_4 - x_3) = \\ = f_{\text{тр}34} \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} + b_3 \left( \frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_4 \left( \frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - b_5 \left( \frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + \\ + k_3 (x_4 - x_3) + k_4 (x_4 - x_2) - k_5 (x_5 - x_4) = -f_{\text{эм}}(i, x_1) + \\ + (f_{\text{тр}14} + f_{\text{тр}24} - f_{\text{тр}34} - f_{\text{тр}45}) \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$m_5 \frac{d^2 x_5}{dt^2} + b_5 \left( \frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + k_5 (x_5 - x_4) = f_{\text{тр}45} \operatorname{sign} \frac{dx_5}{dt} - F_{\text{н}}. \quad (10)$$

Под действием внешних периодических сил  $f_{\text{эм}1} = f(i_1, x_1)$  и  $f_{\text{эм}2} = f(i_2, x_1)$  в механической системе возникают сложные колебания, являющиеся результатом наложения вынужденных и свободных колебаний.

Реальный процесс движения следует рассматривать как результат совместного действия вынужденных, свободных колебаний механической системы и ударных импульсов сил, обусловленных ударным взаимодействием бойка с рабочим инструментом и инерционным преобразователем.

Возвратно-поступательные движения бойка выполняются в ограниченном диапазоне перемещений, не позволяющих бойку выходить за установленные пределы, и для описания модели целесообразно воспользоваться следующей системой равенства

$$x_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = n t_{\text{ц}}; \\ h_3 - h_2 - \delta_2^+ + |\delta_2^-|, & \text{если } \frac{dx}{dt} > 0, \text{ при } n t_{\text{ц}} \leq t \leq n t_{\text{ц}} + t_{\text{р}}; \\ h_1 + \delta_1^+ - |\delta_1^-|, & \text{если } \frac{dx}{dt} < 0, \text{ при } n t_{\text{ц}} + t_{\text{р}} \leq t \leq (n+1) t_{\text{ц}}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\delta_1^+$ ,  $\delta_1^-$  – рабочий воздушный зазор, образованный положением бойка до выхода и после выхода из полюсной системы катушки прямого хода;  $\delta_2^+$ ,  $\delta_2^-$  – аналогично для катушки обратного хода;  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$  – фиксированные координаты относительно ударного сечения рабочего инструмента (см. рис. 1);  $n = 1, 2, \dots$  – число полных циклов;  $t_{\text{ц}} = t_{\text{р}} + t_{\text{п}}$ ;  $t_{\text{р}}$  – длительность времени обратного хода;  $t_{\text{п}}$  – длительность времени прямого хода.

При работе ударного узла направление движения инерционного преобразователя всегда находится в противофазе относительно движения бойка. При энергообмене ударом кинетическая энергия инерционной массы преобразователя переходит в потенциальную энергию при сжатии пружины и затем в кинетическую энергию на встречном ходе.

Учитывая упругие и диссипативные свойства материала, полагаем, что в процессе удара изменяются физические свойства массы тел, вызванные деформацией и неполным восстановлением их объемов.

Проекция скоростей центров масс в конце упругого удара (рис. 3):

$$\bar{v}_1 = \bar{v} + k_{\text{в}} (\bar{v} - v_1) = \bar{v} (1 + k_{\text{в}}) - k_{\text{в}} v_1; \quad (12)$$

$$\bar{v}_3 = \bar{v} + k_{\text{в}} (\bar{v} - v_3) = \bar{v} (1 + k_{\text{в}}) - k_{\text{в}} v_3, \quad (13)$$

где  $v_1$ ,  $v_3$  – скорости центра масс бойка и инерционного преобразователя в начале удара;  $\bar{v}_1$ ,  $\bar{v}_3$  – скорости центра масс бойка и инерционного преобразователя в конце упругого удара;  $\bar{v}$  – общая скорость центра масс абсолютно неупругого удара;  $k_{\text{в}}$  – коэффициент восстановления скорости ( $0 \leq k_{\text{в}} \leq 1$ ).

Проекция общей скорости центра масс абсолютно неупругого удара

$$\bar{v} = \frac{m_1 v_1 + m_3 v_3}{m_1 + m_3}. \quad (14)$$

Решая совместно (12), (13) и (14), получим проекции скоростей центра масс в конце упругого удара через значения скоростей в начале удара:

$$\bar{v}_1 = v_1 - (1 + k_{\text{в}}) \frac{m_3}{m_1 + m_3} (v_1 - v_3); \quad (15)$$

$$\bar{v}_3 = v_3 + (1 + k_B) \frac{m_1}{m_1 + m_3} (v_1 - v_3). \quad (16)$$

Ударный импульс взаимных реакций тел за весь период упругого удара может быть выражен через равенство

$$S_I = S_I + S_{II} = (1 + k_B) S_I, \quad (17)$$

где  $S_I$  – ударный импульс первой фазы удара, соответствующий наибольшей деформации тел;  $S_{II}$  – ударный импульс второй фазы удара;  $k_B = \frac{S_{II}}{S_I}$ .

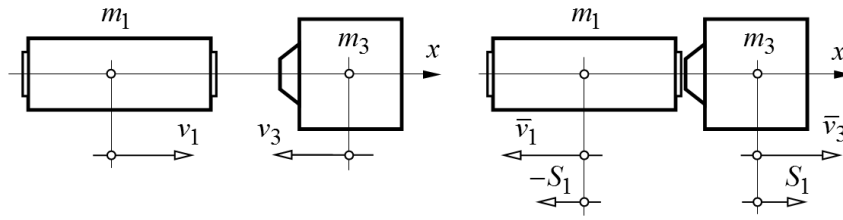


Рис. 3 – Расчетная схема элементов ударной системы инерционного реверса

Fig. 3 – Diagram of the elements of the shock inertial reverse system

Применяя теорему об изменении количества движения, импульсы ударных сил за время первой фазы удара

$$\begin{cases} m_1 (\bar{v} - v_1) = -S_I; \\ m_2 (\bar{v} - v_3) = S_I. \end{cases} \quad (18)$$

На основании равенств (14), (17) и (18) ударный импульс для каждой из соударяющихся масс (рис. 3)

$$S_I = (1 + k_B) \frac{m_1 m_3}{m_1 + m_3} (v_1 - v_3).$$

Средняя величина импульсов сил в результате взаимодействия бойка и инерционного преобразователя в конце упругого удара:

$$N_1 = \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{и}}; \quad N_2 = \frac{m_3 \bar{v}_3}{\tau_{и}},$$

где  $\tau_{и}$  – время действия импульса силы.

Аналогичные выводы можно проделать в отношении ударного взаимодействия бойка и рабочего инструмента. Полагая, что скорость рабочего инструмента на момент удара  $v_2 \approx 0$ , получим проекции скоростей центра масс в конце упругого удара

$$\bar{v}_1 = v_1 - (1 + k_B) \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_1;$$

$$\bar{v}_2 = (1 + k_B) \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1.$$



Ударный импульс взаимных реакций тел за весь период упругого удара

$$S_2 = (1 + k_B)S_1 = (1 + k_B) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} v_1.$$

Средняя величина импульсов сил в результате взаимодействия бойка и ударного инструмента в конце упругого удара:

$$N_3 = \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{и}}; \quad N_4 = \frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_{и}},$$

где  $\bar{v}_1, \bar{v}_2$  – проекции скоростей центра масс бойка и рабочего инструмента в конце упругого удара.

При отскоке бойка от рабочего инструмента часть кинетической энергии возвращается в механическую систему для использования в следующем цикле,

$$\bar{T}_2 = \frac{m_1 v_1^2}{2} k_{от}^2 = \frac{m_1 v_1^2}{2} \left[ \frac{m_2}{m_1 + m_2} \left( k_B - \frac{m_1}{m_2} \right) \right]^2,$$

где  $k_{от} = \frac{\bar{v}_1}{v_1}$  – коэффициент отскока бойка ( $0 \leq k_{от} \leq 1$ ).

Особый интерес с позиции энергопреобразования представляет приобретаемая кинетическая энергия бойка в процессе энергообмена ударом. Принимая во внимание равенство (15) и то, что движение инерционных масс (рис. 3) находится в противофазе, кинетическая энергия бойка в конце упругого удара с учетом проекций скоростей составит

$$\bar{T}_1 = \frac{m_1}{2} \left[ v_1 - (1 + k_B) \frac{m_3}{m_1 + m_3} (v_1 + v_3) \right]^2.$$

На основании последнего уравнения отношение кинетической энергии бойка в конце упругого удара к кинетической энергии в начале удара можно выразить в виде

$$\frac{\bar{T}_1}{T_1} = \left[ 1 - \frac{(1 + k_B)}{\frac{m_1}{m_3} + 1} \left( 1 + \frac{v_3}{v_1} \right) \right]^2, \quad (19)$$

где  $T_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2}$  – кинетическая энергия бойка в начале удара.

Влияние параметров инерционной ударной системы с потерями кинетической энергии на деформацию по выражению (19) для  $k_B = 0,9$  рассмотрено на диаграмме, приведенной на рис. 4.

Учитывая, что при ударе частично упругих тел закон сохранения энергии не выполняется вследствие деформации, которая сохраняется после удара, то потеря их кинетической энергии составит

$$\Delta T = \left[ \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_3 v_3^2}{2} \right] - \left[ \frac{m_1 \bar{v}_1^2}{2} + \frac{m_3 \bar{v}_3^2}{2} \right], \quad (20)$$

где первые два слагаемых правой части определяют кинетическую энергию соударяющихся масс в начале удара и вторые два слагаемых – соответственно кинетическую энергию соударяющихся масс в конце удара.

После подстановки (15) и (16) в выражение (20) и преобразования его получим потери кинетической энергии соударяющихся масс, выраженные через скорости, которыми эти массы обладали в начале удара.

$$\Delta T = (1 - k_B^2) \frac{m_1 m_3 (v_1 - v_3)^2}{2(m_1 + m_3)}. \quad (21)$$

Приводя (21) к безразмерным величинам относительно кинетической энергии соударяющихся масс в начале удара и, предварительно спроецировав скорости, получим

$$\Delta T^* = \frac{(1 - k_B^2) \frac{m_1}{m_3} \left(1 + \frac{v_3}{v_1}\right)^2}{\left(\frac{m_1}{m_3} + 1\right) \left[\frac{m_1}{m_3} + \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2\right]}. \quad (21)$$

Зависимость потерь кинетической энергии на деформацию от параметров ударной системы по уравнению (21) для  $k_B = 0,9$  приведена на диаграмме рис. 5.

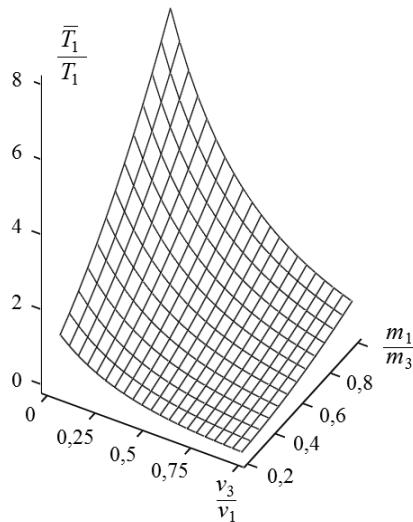


Рис. 4 – Отношение кинетических энергий бойка при энергообмене ударом

Fig. 4 – The ratio of the kinetic energy of the striker at the energy exchange impact

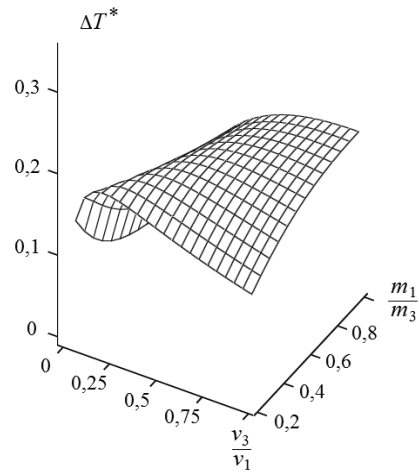


Рис. 5 – Зависимость потерь кинетической энергии на деформацию

Fig. 5 – The dependence on the deformation of the kinetic energy loss

На этапе создания модели полагаем, что сопротивление и упругие свойства деформируемой среды, оказываемые движению рабочего инструмента, определенным образом зависят от свойств введенных упругих связей. Также принимаем, что сила сопротивления движению бойка зависит только от силы трения скольжения ( $k_1 = 0$ ,  $b_1 = 0$ ).

Окончательно процесс движения в механической системе рассматриваем как результат совместного действия вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил. Принимая во внимание ударные взаимодействия в механической системе, уравнения (4) – (10) совместно с условиями (11) позволяют построить обобщенную математическую модель динамики ударного узла в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_{\mu 1}, x_1)}{dt}; \\ u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_{\mu 2}, x_1)}{dt}; \\ i_1 = i_{n1} + i_{\mu 1}; \quad i_2 = i_{n2} + i_{\mu 2}; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \begin{cases} N_3 - f_{\text{эм}1}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{\text{тр}14} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \text{ при } n t_{\text{ц}} \leq t \leq n t_{\text{ц}} + t_p; \\ -N_1 - f_{\text{эм}1}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{\text{тр}14} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} < 0, \text{ при } n t_{\text{ц}} + t_p \leq t \leq (n+1) t_{\text{ц}}; \end{cases} \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -N_4 - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_4 - f_{\text{тр}24} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = N_2 + \tilde{\lambda}_3 + f_{\text{тр}34} \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \\ m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} = -\tilde{\lambda}_3 - \tilde{\lambda}_4 + \tilde{\lambda}_5 + f_{\text{эм}1}(i_{\mu 1}, x_1) - f_{\text{эм}2}(i_{\mu 2}, x_1) + \\ + (f_{\text{тр}14} + f_{\text{тр}24} - f_{\text{тр}34} + f_{\text{тр}45}) \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt}; \\ m_5 \frac{d^2 x_5}{dt^2} = -\tilde{\lambda}_5 + f_{\text{тр}45} \operatorname{sign} \frac{dx_5}{dt} - F_{\text{н}}, \end{array} \right.$$

где  $\tilde{\lambda}_2 = b_2 \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2$ ;  $\tilde{\lambda}_3 = b_3 \left( \frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_3 (x_4 - x_3)$ ;  $\tilde{\lambda}_4 = b_4 \left( \frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_4 (x_4 - x_2)$ ;  $\tilde{\lambda}_5 = b_5 \left( \frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + k_5 (x_5 - x_4)$ ;  $i_{n1}$ ,  $i_{n2}$  – составляющие тока потерь, вызванные вихревыми токами и гистерезисом в первой и во второй катушках;  $i_{\mu 1}$ ,  $i_{\mu 2}$  – составляющие намагничивающего тока первой и второй катушек.

Полученная система дифференциальных уравнений динамики электромагнитного ударного узла (см. рис. 1) позволяет производить всесторонний анализ электромеханических процессов в различных режимах, учитывающих нелинейности в магнитной системе, степень подвижности инерционных масс и свойства упругих связей в механической системе, сопровождаемые различного рода потерями энергии.

### 3. Пример реализации модели

Решение модели выполнялось методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink [25]. Построение структурной модели динамики ударного узла и разработка алгоритма расчета производились в соответствии с имеющимися рекомендациями [26]. Решение полевой части задачи выполнялось при использовании стандартных программ конечно-элементного моделирования магнитного поля [27, 28], с помощью которых определялся массив значений опорных точек статических параметров потокоцепления  $\Psi_{\text{эм1}} = f(i_1, \delta_1)$ ,  $\Psi_{\text{эм2}} = f(i_2, \delta_2)$  и электромагнитного усилия  $f_{\text{эм1}} = f(i_1, \delta_1)$ ,  $f_{\text{эм2}} = f(i_2, \delta_2)$  в зависимости от протекающего в катушках тока и положений бойка. Полученный массив значений статических параметров применялся для задания функции двух аргументов в виде стандартных блоков двумерных таблиц в Simulink.

На рис. 6 представлены результаты моделирования в виде временных диаграмм процесса включения модернизированного варианта электромагнитного ударного узла ИЭ 4207 [4, 22].

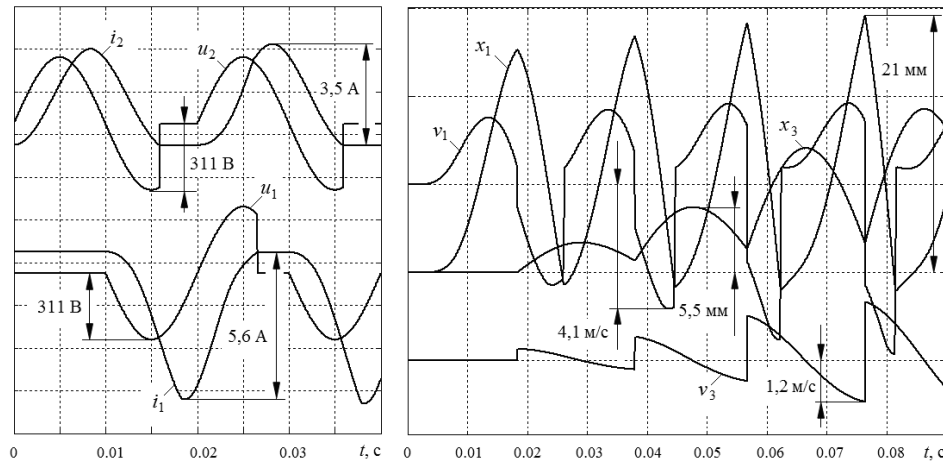


Рис. 6 – Временные диаграммы процесса включения электромагнитного ударного узла

Fig. 6 – Timing diagrams of the process for electromagnetic impact node

В качестве исходных данных модели использовались следующие параметры ударного узла:  $m_1 = 0,394$  кг;  $m_2 = 0,32$  кг;  $m_3 = 0,66$  кг;  $m_4 = 3,9$  кг;  $m_5 = 1,2$  кг;  $k_2 = 2 \cdot 10^6$  Н/м;  $b_2 = 0$ ;  $k_3 = 12,5 \cdot 10^3$  Н/м;  $b_3 = 12$  Н·с/м;  $k_4 = 16 \cdot 10^6$  Н/м;  $b_5 = 45$  Н·с/м;  $k_5 = 6 \cdot 10^3$  Н/м;  $b_5 = 6$  Н·с/м;  $f_{\text{тр14}} = 3$  Н;  $f_{\text{тр24}} = 10$  Н;  $f_{\text{тр34}} = 4$  Н;  $f_{\text{тр45}} = 5$  Н.

Магнитопровод выполнен из электротехнической стали, близкой по магнитным свойствам к стали марки 1212. Боек изготовлен цельнометаллическим из конструкционной стали 40ХН. Катушка прямого хода с количеством витков  $w_1 = 1290$  имеет диаметр проводника  $d_{пр} = 0,63$  мм и активное сопротивление  $r_1 = 12,9$  Ом. Катушка обратного хода с количеством витков  $w_2 = 1540$  имеет диаметр проводника  $d_{пр} = 0,5$  мм и активное сопротивление  $r_2 = 23,2$  Ом. Действующее значение напряжения однофазного источника  $U = 220$  В.

Учет составляющих тока потерь  $i_{п1}$  и  $i_{п2}$  произведен в соответствии с рекомендациями [29, 30].

Оценка адекватности математической модели производилась путем сравнения 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 (см. таблицу).

#### Сравнение результатов моделирования

##### Comparing modeling results

Значения показателя	$A_{уд}$ , Дж	$I$ , А	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	КПД, %	$\cos \varphi$
Расчет	6,4	4,5	820	320	39	0,42
Эксперимент	6,2	4,6	837	310	37	0,39

Расхождение между результатами расчетов и экспериментальными данными составляет 4...8 %, что позволяет сделать вывод об адекватности модели. Относительно хорошее соответствие количественных результатов существенным образом зависит от точности учета аналогов механических характеристик модели и в особенности это касается демпфирующих свойств упругих связей и сил сухого трения скольжения, которые для упрощения анализа большинство разработчиков игнорируют.

Полученные результаты расширяют возможности качественного анализа рабочих процессов и являются хорошим основанием в проведении всестороннего исследования этих процессов с целью улучшения технических характеристик двухкатушечного электромагнитного ударного узла и повышения эффективности его использования в технологических процессах.

#### Заключение

Создана математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка, обеспечивающая широкие возможности для всестороннего анализа электромеханических процессов при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой.

Достоинством модели является возможность учета большого числа взаимосвязанных факторов, зависящих от скорости бойка и частоты ударных импульсов сил, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, нелинейности характеристик магнитных материалов, сопровождаемые различного рода потерями энергии.

Методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink рассмотрен пример численной реализации модели. Максимальное расхождение между результатами численных расчетов модели и экспериментальными данными не превышает 8 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электро-механика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. **Татевосян А.А., Татевосян А.С.** Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 121–132.
3. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 1 (36). – С. 50–55.
4. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
5. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
6. **Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
7. **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.
8. **Усанов К.М., Каргин В.А.** Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2005. – № 3. – С. 59–61.
9. **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.
10. **Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н.** Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
11. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
12. **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.
13. **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.
14. **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.
15. **Нейман В.Ю.** Режимы форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – С. 105–112.
16. **Нейман В.Ю., Петрова А.А.** Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
17. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.

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. **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.
20. **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.
21. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
22. Патент 2508980 Российская Федерация, МКИ В 25 D 13/00. Синхронная электромагнитная машина ударного действия / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, Е.Ю. Артебякина; Новосибирский государственный технический университет. – № 2012121695/02; заявл. 25.05.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7.
23. **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.
24. **Добронравов В.В., Никитин Н.Н.** Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1983. – 576 с.
25. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
26. **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.
27. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
28. **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.
29. **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.
30. **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.

#### **A DYNAMIC MODEL OF A TWO-INDUCTOR SYNCHRONOUS IMPACT ELECTROMAGNETIC MACHINE WITH AN INERTIAL HEAD REVERSE**

**Neyman L.A., Neyman V.Yu.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Development of modern analysis and synthesis methods for electromechanical systems including impact ones implies interest in creating and improving mathematical models of machines and units which objectively reflect their dynamic states in various technological processes. The dynamic model research is relevant as it is necessary to extend capabilities of the dynamic analysis of a reciprocating electromagnetic machine when periodic impact force pulses are generated with respect to the interaction with a deformed medium. The research is focused on the electro-

magnetic impact unit of a two-inductor synchronous electromagnetic machine with the inertial head reverse. This unit consists of a multi-mass oscillatory system with spring linkages powered by a single-phase 50 Hz supply through a single-period rectifier. The dynamic model has been created for an electromagnetic impact unit to provide wide capabilities of a comprehensive analysis of electromechanical processes when periodic impact force pulses are generated with respect to the interaction with a deformed medium. The model is based on differential equations describing the non-linear system electrical balance and mechanical interaction of directly moving masses. The equations were derived with the help of Lagrange's equations of the second kind. The model is distinguished by its capability to take account of many interdependent factors determined by the head velocity and impact force pulses rate, the degree of inertial masses mobility and mechanical system spring linkage properties as well as material magnetic properties accompanied by various power losses. The impact unit model has its numeric implementation in Matlab Simulink by structured modeling methods. The difference between the calculation and experimental results is no more than 8%. The research made expands the model capabilities of dynamic design and reasonable selection of electromagnetic impact unit parameters.

**Keywords:** Impact unit; synchronous electromagnetic machine; mathematical model; mechanical oscillatory system; spring linkages; head inertial reverse; Lagrange's equation of the second kind.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-61-79

#### REFERENCES

1. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privoda dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drives for impulse and vibroimpulse technologies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
2. 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)
3. Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Periodicheskie rezhimy v elektromagnitnykh vibratsionnykh preobrazovatelyakh [Periodic modes in the electromagnetic vibration converters]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2010, vol. 14, no. 1 (36), pp. 50–55.
4. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malov A.T. *Elektroprivod s lineinymi elektromagnitnymi dvigatelyami* [Electric linear electromagnetic motors]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 150 p.
5. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
6. 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.
7. 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.
8. Usanov K.M., Kargin V.A. Silovaya elektromagnitnaya impul'snaya sistema dlya pogru-zheniya sterzhnevnykh elementov v grunt [The power electromagnetic pulse system for immersion rod elements in the soil]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova – Bulletin of the Saratov State Agrarian University N.I. Vavilov*, 2005, no. 3, pp. 59–61.
9. 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.
10. Ryashentsev N.P., Ryashentsev V.N. *Elektromagnitnyi privod lineinykh mashin* [The electromagnetic linear actuator machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 153 p.
  11. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsionnym 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.
  12. 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.
  13. 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)
  14. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Povyshenie tochnosti analiticheskogo rascheta radial'nykh sil odностороннего магнитного притяжения неkoаксial'nykh elementov magnetoproвода [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.
  15. Neyman V.Yu. Rezhimy forsirovannogo akkumulirovaniya magnetnoi energii v impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigatelyakh [Modes of accelerated accumulation of magnetic energy in a pulse of electromagnetic linear motors]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 1, pp. 105–112.
  16. Neiman V.Yu., Petrova A.A. Sravneniye sposobov forsirovki impulsnykh lineynykh elektromagnitnykh dvigateley [Comparison of methods for forcing pulse linear electromagnetic motors]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 47a–50. (In Russian)
  17. Neyman V.Yu. Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyanie sootnoshenii glavnykh razmerov elektromagnitov na znacheniya konstruktivnogo faktora i pokazatelya ekonomichnosti [Influence of major proportions electromagnets sizes on the value of constructive factor and indicator of profitability]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.
  18. Bakhvalov Yu.A., Lobov B.N., Mogilevskii G.V., Nikitenko A.G. Raschet dinamiki vklyucheniya elektromagnita postoyannogo toka [Calculation inclusion DC electromagnet dynamics]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1982, no. 1, pp. 48–51. (In Russian)
  19. Ismagilov F.R., Sattarov R.R., Gumerova M.B. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh rezhimov elektromagnitnykh dempfiruyushchikh 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.
  20. 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.
  21. 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.
22. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Artebyakina E.Yu. *Sinkhronnaya elektromagnitnaya mashina udarnogo deistviya* [Synchronous electromagnetic percussion machine]. Patent RF, no. 2508980, 2014.
  23. 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.
  24. Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 576 p.
  25. 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.
  26. 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.
  27. 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.
  28. 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.
  29. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovide [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.
  30. 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.

#### 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. E-mail: neyman31@gmail.com).

**Neyman Lyudmila Andreevna** (b. 1966) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Associate Professor at the Electrotechnological Units Department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests cover linear synchronous electromagnetic machines and technology. She is the author of 90 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 Electrical Engineering Theory, Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on 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, Russia. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

*Статья поступила 08 октября 2016 г.*

*Received October 08, 2016*

---

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s inertsionnym reversom boika [Dynamical model of two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with inertial head reverse]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 4 (33), pp. 61–79. doi: 10.17212/1727-2769-2016-4-61-79