

УДК 621.313.282.2

**СРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ ДВУХКАТУШЕЧНЫХ
СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАШИН УДАРНОГО
ДЕЙСТВИЯ СО СВОБОДНЫМ ВЫБЕГОМ БОЙКА****Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман***Новосибирский государственный технический университет*

Рассматриваются результаты создания комплексной динамической модели двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка. Приводится сравнение рабочих циклов электромагнитных ударных узлов, обеспечивающих наиболее рациональное формирование ударных импульсов сил при передаче энергии в деформируемую среду и характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, ускоряемой в магнитном поле катушек. В качестве объекта исследований рассматривается электромагнитный ударный узел двухкатушечной синхронной электромагнитной машины, получающий питание от однофазного источника напряжения промышленной частоты с заданным алгоритмом управления и включающий в себя многомассовую механическую колебательную систему с упругими связями. Создана математическая модель динамики ударного узла, обеспечивающая возможности всестороннего анализа электромеханических процессов в различных режимах. Основу комплексной модели составляют дифференциальные уравнения, описывающие электрическое равновесие нелинейной системы и механическое взаимодействие поступательно движущихся масс, полученные с помощью уравнений Лагранжа второго рода. Методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink рассмотрены примеры численной реализации модели и выполнено сравнение рабочих циклов между собой. Установлена предпочтительность в использовании рабочего цикла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, обеспечивающего при прочих равных условиях работы ударного узла более рациональное формирование ударных импульсов сил и имеющего более высокую энергию удара и полезную ударную мощность при взаимодействии с деформируемой средой.

Ключевые слова: электромагнитный ударный узел, свободный выбег бойка, математическая модель, сравнение рабочих циклов, многомассовая механическая колебательная система, уравнения Лагранжа, упругие связи, энергия удара, скорость бойка.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-98-115

Введение

Электромагнитные машины возвратно-поступательного движения, созданные на базе линейных электромагнитных двигателей, получили широкое применение в промышленности для обеспечения многих технологических процессов [1–4].

Благодаря конструктивной простоте и надежности электромагнитные двигатели используются в составе электромагнитного привода прессов, виброисточников, ручного ударного электроинструмента и другого виброударного оборудования с частотой ударных воздействий до 3000 уд/мин [5–9].

Несмотря на давнее использование электромагнитных машин методы для их расчета и проектирования, как и способы реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, продолжают совершенствоваться [10–15].

Перспективным направлением исследований в данной области следует признать совершенствование ударных узлов, созданных на основе синхронных элек-

тромагнитных машин, для которых частота ударных импульсов сил равна или кратна частоте промышленной сети 50 Гц [16, 17].

Практическое использование синхронных электромагнитных машин позволяет достигать высоких удельных характеристик, а также добиваться некоторого снижения энергопотребления за счет работы ударного узла в околорезонансных режимах [18, 19].

Учитывая, что питание ударных узлов осуществляется от источника однофазного напряжения бытовой осветительной сети, то увеличение энергии удара ограничивается значениями допустимой амплитуды тока.

Одним из возможных путей снижения амплитуды импульсов тока и улучшения электромагнитной совместимости является использование рабочих циклов со свободным выбегом бойка [20, 21]. Использование рабочих циклов со свободным выбегом бойка ограничивает амплитуду тока и уменьшает влияние работы ударного узла на питающую сеть.

Свободный выбег бойка осуществляется за время бестоковой паузы в подаче импульсов напряжения, в течение которой боек движется по инерции в заданном направлении.

Первый вариант ударного узла и реализованный на его основе способ управления предусматривает свободный выбег бойка в направлении рабочего инструмента [22], второй – в направлении буферного устройства, осуществляющего его остановку и реверс при обратном ходе.

В настоящее время конфигурация и структура двухкатушечного ударного узла, реализующего свободный выбег, определены только на уровне принципа действия.

В этой связи сохраняет свою актуальность вопрос в выборе варианта ударного узла, обеспечивающего необходимую характеристику движения ударной массы бойка и рациональное формирование ударного импульса силы за время рабочего цикла.

Целью работы является создание комплексной динамической модели двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка, характеризующейся различными способами реализации движения ударной массы, и сравнение на ее основе рабочих циклов, обеспечивающих наиболее рациональное формирование ударных импульсов сил.

1. Двухкатушечный электромагнитный ударный узел со свободным выбегом бойка

Принцип действия двухкатушечного ударного узла и способы реализации рабочих циклов со свободным выбегом бойка подробно изложены в работе [23].

Работа ударного узла осуществляется при полной синхронизации положений бойка с импульсами напряжения (тока), подаваемыми на катушки прямого и обратного хода.

На рис. 1 приведены диаграммы, поясняющие работу ударного узла со свободным выбегом бойка. На диаграммах положения бойка совмещены с импульсами напряжения (тока), поступающими на катушки, и синхронизированы по времени с частотой питающего источника.

Для свободного выбега бойка в катушке прямого хода и питании от однофазного источника последовательность подачи импульсов напряжения (рис. 1, *a*) формально описывается следующими неравенствами:

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t, \text{ при } (k-1)2\pi \leq \omega t < 2k\pi ; \quad (1)$$

$$u_2(t) = U_m \sin \omega t, \text{ при } (4k-3)\pi \leq \omega t < (4k-1)\pi, \quad (2)$$

где $k = 1, 2, \dots$ – порядковый номер управляющих импульсов напряжения, подаваемых на катушки; $u_1(t)$, $u_2(t)$ – напряжение на катушке прямого и обратного хода; U_m – амплитуда напряжения; ω – циклическая частота.

На рис. 1, б – аналогичные диаграммы работы ударного узла со свободным выбегом бойка в катушке обратного хода:

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t, \text{ при } (4k-1)\pi \leq \omega t < (4k+1)\pi; \quad (3)$$

$$u_2(t) = U_m \sin \omega t, \text{ при } (k-1)2\pi \leq \omega t < 2k\pi. \quad (4)$$

При определенном формировании в катушках импульсов тока возникает соответствующая импульсам и положениям бойка знакопеременная электромагнитная сила.

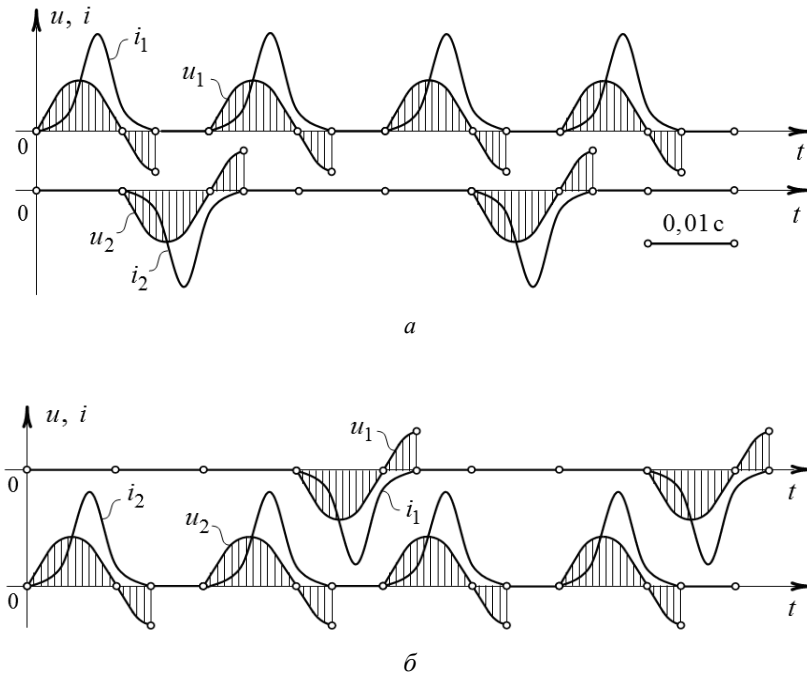


Рис. 1 – Диаграммы рабочих циклов ударного узла со свободным выбегом бойка:
а – в катушке прямого хода; б – в катушке обратного хода

Fig. 1 – Diagrams of operating shock assembly cycles by coasting striker:
а – in the coil forward stroke; б – in the flyback coil

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

$$n_{\text{уд}} = \frac{60f}{2p} = 25 \text{ с}^{-1} \text{ (1500 уд/мин)}; \quad t_{\text{ц}} = \frac{2p}{f} = 0,04 \text{ с},$$

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

Один из возможных вариантов двухкатушечного ударного узла, реализующего рабочий цикл со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, приведен на рис. 2, *a*. На рис. 2, *б* – вариант ударного узла, реализующий рабочий цикл со свободным выбегом бойка в катушке обратного хода.

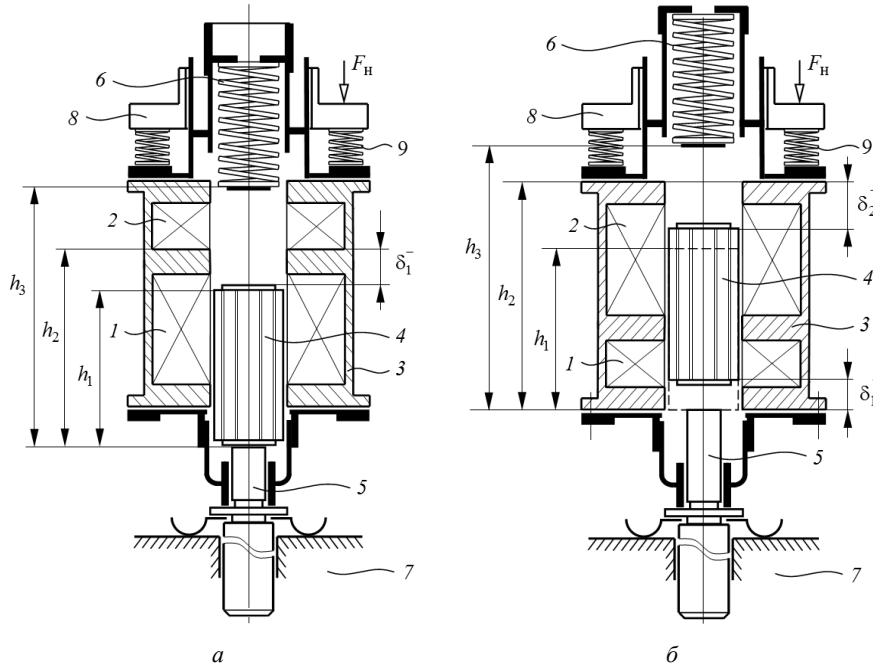


Рис. 2 – Двухкатушечный электромагнитный ударный узел со свободным выбегом бойка:

a – в катушке прямого хода; *б* – в катушке обратного хода

Fig. 2 – Dvuhkatushechny electromagnetic hammer assembly by coasting striker:

a – in the coil forward stroke; *б* – in the flyback coil

Для реализации рабочих циклов со свободным выбегом бойка (рис. 2, *a* и *б*) используется система из двух катушек прямого 1 и обратного 2 хода, заключенных в общий магнитопровод 3. При формировании в катушках импульсов тока возникает знакопеременная электромагнитная сила, обеспечивающая ускорение ударной массы бойка 4 в направлении рабочего инструмента 5 или буферной пружины 6, выполняющей остановку и реверс бойка 4. Совершая циклические движения, боек 4 периодически взаимодействует с рабочим инструментом 5 и буферной пружиной 6. При остановке бойка 4 на обратном ходе его кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию при сжатии пружины 6, и обратно в кинетическую энергию при ускорении бойка в направлении рабочего инструмента 5. При ударном взаимодействии бойка 4 с рабочим инструментом 5 основная часть кинетической энергии передается в деформируемую среду 7.

В варианте ударного узла на рис. 2, *a* катушка 1 прямого хода обеспечивает разгон бойка 4 электромагнитными силами в двух направлениях. При обратном

ходе боек 4 ускоряется под действием электромагнитных сил катушки 1 прямого и катушки 2 обратного хода, а при прямом ходе – только от действия электромагнитных сил катушки 1 прямого хода.

В варианте ударного узла на рис. 2, б рабочий процесс меняется на обратный. При обратном ходе боек ускоряется только от действия электромагнитных сил катушки 2 обратного хода, а при прямом ходе – от действия электромагнитных сил обеих катушек.

Усилием нажатия F_H обеспечивается необходимая устойчивая связь ударного узла с рабочим инструментом 5 при передаче ударного импульса сил в деформируемую среду 7.

Для снижения амплитуды вибраций в промежутке между основанием 8 крепления ударного узла и электроприводом установлен упругий виброизолирующий элемент 9.

2. Методы решения

Согласно установленным связям и действующим в системе обобщенным силам, расчетная схема механической части ударного узла обладает $N = 4$ степенями свободы и содержит в своем составе традиционные массоинерционные звенья с упругими связями, возбуждаемые внешними электромагнитными силами катушек прямого и обратного хода.

На начальном этапе полагаем, что ударного взаимодействия в механической системе не возникает. Процесс движения в системе является результатом наложения вынужденных и свободных колебаний от действия внешней периодической силы [24].

В качестве обобщенных координат здесь принимаем линейные перемещения центра масс бойка – x_1 массой m_1 , рабочего инструмента – x_2 массой m_2 , электропривода – x_3 массой m_3 , крепления – x_4 с присоединенной к нему массой m_4 .

Колебания системы в пространстве будут описываться зависимостью обобщенных координат от времени, отсчитываемых от положения статического равновесия.

Уравнения движения механической системы получим на основании уравнений Лагранжа второго рода [25]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} + Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

где T – кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия системы; Φ – 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 ($N = 4$).

В выбранной системе координат принимаем положение устойчивого статического равновесия системы за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной энергии.

Последовательно определяя и внося значения производных от кинетической, потенциальной энергии системы, функции Рэлея в уравнение (5), учитывая внеш-

ние воздействия и ранее установленные связи [24], позволяют образовать систему дифференциальных уравнений без учета ударного взаимодействия инерционных масс в следующем виде:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3) = f_{\text{эм}}(i, x_1) - f_{\text{тр13}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}; \quad (6)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_2 x_2 - k_3 (x_3 - x_2) = -f_{\text{тр23}} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \quad (7)$$

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - k_1 (x_1 - x_3) + k_3 (x_3 - x_2) - k_4 (x_4 - x_3) = -f_{\text{эм}}(i, x_1) + (f_{\text{тр13}} + f_{\text{тр23}} + f_{\text{тр34}}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \quad (8)$$

$$m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} + b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_4 (x_4 - x_3) = -f_{\text{тр34}} \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt} - F_{\text{н}}, \quad (9)$$

где $f_{\text{эм}}(i, x_1) = f_{\text{эм1}}(i_1, x_1) + f_{\text{эм2}}(i_2, x_1)$ – вынуждающая электромагнитная сила; $f_{\text{тр13}}, f_{\text{тр23}}, f_{\text{тр34}}$ – силы сухого трения скольжения; $F_{\text{н}}$ – постоянная величина усилия нажатия.

При этом механическая и магнитная системы связаны зависимостями электромагнитного усилия $f_{\text{эм1}} = f(i_1, x_1)$ и $f_{\text{эм2}} = f(i_2, x_1)$ от величины протекающего тока i_1, i_2 и координаты x_1 положения бойка. Также магнитная и электрическая системы связаны зависимостями величины потокосцепления $\psi_1 = f(i_1, x_1)$ и $\psi_2 = f(i_2, x_1)$.

Уравнения электрического равновесия, связывающие все системы, используем в известном виде:

$$u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_1, x_1)}{dt}; \quad (10)$$

$$u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_2, x_1)}{dt}, \quad (11)$$

где r_1, r_2 – активные сопротивления в цепи катушек.

Положение бойка при его движении можно описать независимой системой равенств с привязкой к полюсной системе одной из катушек с помощью фиксированных координат h_1, h_2 и h_3 относительно ударного сечения рабочего инструмента

Например, для ударного узла на рис. 2, *a* – относительно полюсной системы катушки прямого хода:

$$x_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } |\delta_1^-| = h_2 - h_1; \\ h_2 - h_1 - |\delta_1^-|, & \text{при } 0 < x_1 \leq h_2 - h_1; \\ h_2 - h_1 + \delta_1^+, & \text{при } x_1 > h_2 - h_1, \end{cases} \quad (12)$$

где δ_1^- , δ_1^+ – рабочие воздушные зазоры, образованные положением бойка относительно верхней и нижней полюсной системы катушки прямого хода.

Для ударного узла на рис. 2, б – относительно полюсной системы катушки обратного хода:

$$x_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } \delta_2^+ = h_2 - h_1; \\ h_2 - h_1 - \delta_2^+, & \text{при } 0 < x_1 \leq h_2 - h_1; \\ h_2 - h_1 + |\delta_2^-|, & \text{при } x_1 > h_2 - h_1, \end{cases} \quad (13)$$

где δ_2^- , δ_2^+ – рабочие воздушные зазоры, образованные положением бойка относительно нижней и верхней полюсной системы катушки обратного хода.

Учитывая, что сила, обусловленная упругими свойствами буферной пружины, линейно зависит от координаты положения бойка, а сила сопротивления движению пропорциональна его скорости, то составляющие этих сил могут быть описаны кусочно-линейными функциями, удовлетворяющие условиям:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_1; \\ k_1(x_1 - x_3), & x_1 \geq h_3 - h_1; \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_1; \\ b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right), & x_1 \geq h_3 - h_1. \end{cases} \quad (15)$$

Из условия (15) следует, что процесс рассеяния энергии, вызванный диссипативными силами упругих связей, может возникать только при работе сил этих связей.

Также полагаем, что сопротивление и упругие свойства деформируемой среды, оказываемые перемещению рабочего инструмента, зависят от свойств введенных упругих связей.

Окончательно рассматривая процесс движения как результат совместного действия вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, обобщенная модель динамического состояния электромеханической системы ударного узла (рис. 2, а и б), описываемая уравнениями (6)–(11) при установленных ограничениях (12)–(15) и заданных алгоритмах управления, приводится к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_{\mu 1}, x_1)}{dt}; \\ u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_{\mu 2}, x_1)}{dt}; \\ i_1 = i_{n1} + i_{\mu 1}; \quad i_2 = i_{n2} + i_{\mu 2}; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \begin{cases} N_1 \pm f_{\text{ЭМ1}}(i_{\mu 1}, x_1) \pm f_{\text{ЭМ2}}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{\text{ТР13}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \text{ при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_1; \\ -\tilde{\lambda}_1 \pm f_{\text{ЭМ1}}(i_{\mu 1}, x_1) \pm f_{\text{ЭМ2}}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{\text{ТР13}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} \\ \text{при } x_1 \geq h_3 - h_1; \\ \pm f_{\text{ЭМ1}}(i_{\mu 1}, x_1) \pm f_{\text{ЭМ2}}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{\text{ТР13}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} < 0, \text{ при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_1; \end{cases} \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -N_2 - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_3 + f_{\text{ТР23}} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_3 + \tilde{\lambda}_4 \pm f_{\text{ЭМ1}}(i_{\mu 1}, x_1) \pm f_{\text{ЭМ2}}(i_{\mu 2}, x_2) + \\ + (f_{\text{ТР13}} + f_{\text{ТР23}} + f_{\text{ТР34}}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \text{ при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_1; \\ -\tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_3 + \tilde{\lambda}_4 \pm f_{\text{ЭМ1}}(i_{\mu 1}, x_1) \pm f_{\text{ЭМ2}}(i_{\mu 2}, x_2) + \\ + (f_{\text{ТР13}} + f_{\text{ТР23}} + f_{\text{ТР34}}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \text{ при } x_1 \geq h_3 - h_1; \end{cases} \\ m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} = \tilde{\lambda}_4 - f_{\text{ТР34}} \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt} - F_{\text{н}}, \end{array} \right.$$

где $\tilde{\lambda}_1 = k_1(x_1 - x_3) + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right)$; $\tilde{\lambda}_2 = k_2 x_2 + b_2 \frac{dx_2}{dt}$; $\tilde{\lambda}_3 = k_3(x_3 - x_2) + b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right)$; $\tilde{\lambda}_4 = k_4(x_4 - x_3) + b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right)$; i_{n1} , i_{n2} – составляющие тока потерь, вызванные вихревыми токами и гистерезисом в первой и во второй катушке; $i_{\mu 1}$, $i_{\mu 2}$ – составляющие намагничивающего тока в первой и второй катушке; N_1 и N_2 – средняя величина импульсов сил в результате взаимодействия бойка и ударного инструмента в конце упругого удара [20, 21].

Полученная система дифференциальных уравнений динамики обобщенной модели ударного узла на рис. 2, *а* и *б* позволяет производить всесторонний анализ электромеханических процессов в различных режимах, учитывающих заданную последовательность в подаче импульсов напряжения на систему катушек, нелинейности в магнитной системе, степень подвижности инерционных масс и свойства упругих связей в механической системе, сопровождаемые различного рода потерями энергии, и главное – сравнение рабочих циклов, характеризующихся различными способами реализации движения ударной массы бойка.

Решение системы дифференциальных уравнений выполнялось методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink согласно рекомендациям [26–29].

Решение полевой части задачи выполнялось с использованием стандартных программ конечно-элементного моделирования магнитного поля [30, 31], с помощью которых определялись массивы значений опорных точек статических параметров потокоцепления $\psi_1 = f(i_1, \delta_1)$, $\psi_2 = f(i_2, \delta_2)$ и электромагнитного усилия $f_{эм1} = f(i_1, \delta_1)$, $f_{эм2} = f(i_2, \delta_2)$ [32].

Составляющие тока потерь $i_{п1}$ и $i_{п2}$ учтены в соответствии с рекомендациями [33, 34].

Структурная схема динамической модели в программе Matlab Simulink представлена на рис. 3.

Результаты моделирования в виде временных диаграмм процесса включения вариантов ударных узлов (рис. 2, *а* и *б*) представлены на рис. 4 и 5.

Расчеты выполнялись при идентичных параметрах моделей: $m_1 = 0,32$ кг; $m_2 = 0,36$ кг; $m_3 = 4,1$ кг; $m_4 = 0,4$ кг; $k_1 = 21 \cdot 10^3$ Н/м; $k_2 = 2 \cdot 10^6$ Н/м; $k_3 = 18 \cdot 10^6$ Н/м; $k_4 = 60 \cdot 10^6$ Н/м; $b_1 = 8$ Н·с/м; $b_2 = 0$; $b_3 = 45$ Н·с/м; $b_4 = 20$ Н·с/м; $f_{тр13} = 2$ Н; $f_{тр23} = 9$ Н; $f_{тр34} = 5$ Н.

Магнитопровод выполнен из электротехнической стали, близкой по магнитным свойства к стали марки 1212, сечением 710 мм^2 . Боек – цельнометаллический, изготовлен из конструкционной стали 40ХН.

Количество витков и активное сопротивление катушек для конструкции ударного узла на рис. 2, *а*: $w_1 = 1525$, $r_1 = 12,8$ Ом; $w_2 = 1290$, $r_2 = 11,9$ Ом. Для конструкции ударного узла на рис. 2, *б*: $w_1 = 1290$, $r_1 = 11,9$ Ом; $w_2 = 1525$, $r_2 = 12,8$ Ом.

Действующее значение напряжения однофазного источника $U = 220$ В; частота 50 Гц.

Необходимая для работы ударного узла последовательность чередования периодических импульсов напряжения (тока) формировалась с помощью управляемых вентилях, реализованных с помощью блока «Electrical subsystem».

Сравнение на первый взгляд идентичных рабочих циклов выявило существенную разницу в выходных показателях ударных узлов (рис. 2), характеризующихся различными способами реализации движения ударной массы бойка.

Для ударного узла (рис. 2, *а*) максимальные значения показателей по энергии удара и полезной механической мощности составили: $A_{уд} = 10,8$ Дж; $P_{мех} = 271$ Вт. Это приблизительно на 20 % выше, чем для ударного узла на рис. 2, *б*, имеющего максимальные значения этих показателей: $A_{уд} = 8,8$ Дж; $P_{мех} = 221$ Вт.

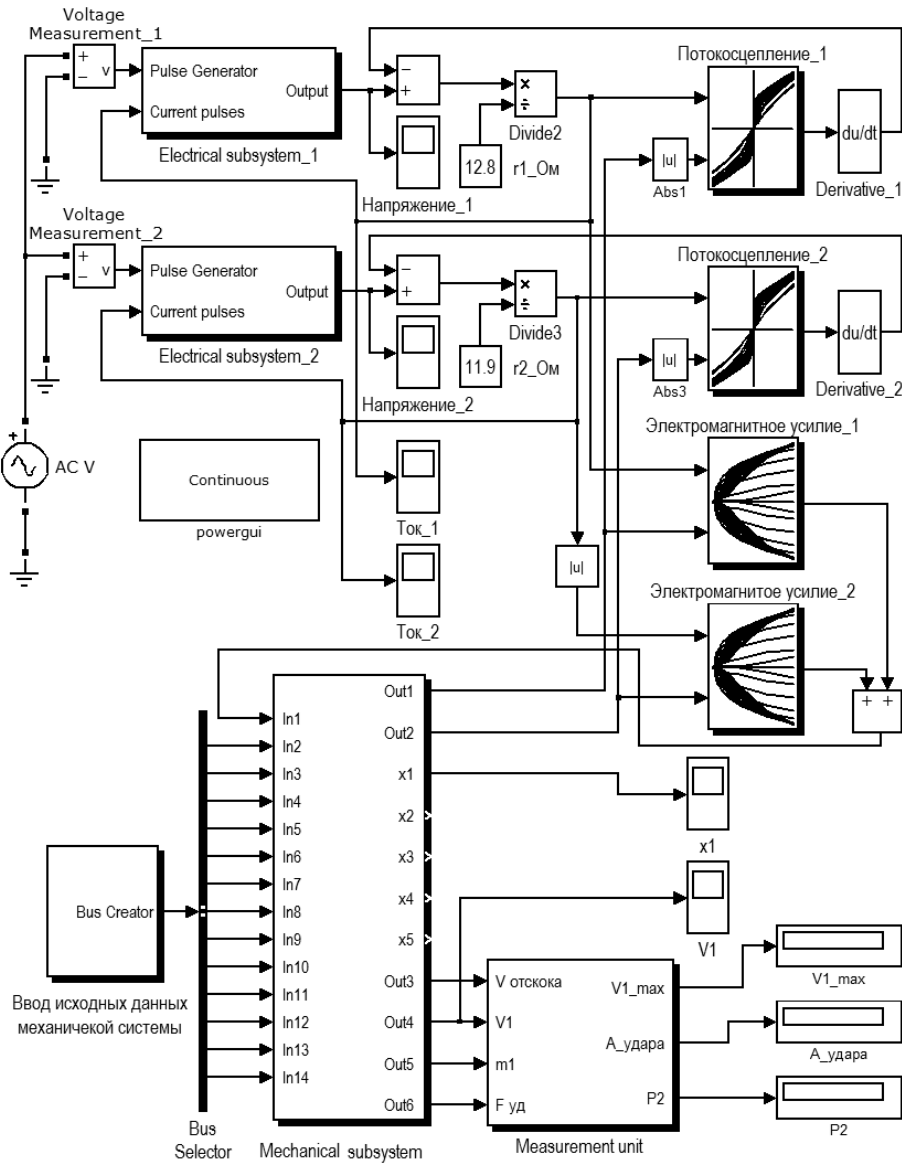


Рис. 3 – Структурная схема динамической модели в программе Matlab Simulink

Fig. 3 – Block diagram of the dynamic model in the program Matlab Simulink

Разницу в результатах поясняют диаграммы скорости движения и амплитуды колебаний бойка. Использование рабочего цикла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода обеспечивает скорость бойка в конце рабочего цикла $v_{\max 1} = 8,24$ м/с (рис. 4, e), что выше по сравнению с рабочим циклом со свободным выбегом бойка в катушке обратного хода, скорость которого не превышает значения $v_{\max 1} = 7,45$ м/с (рис. 5, e).

Также реализация способа движения ударной массы бойка в варианте ударного узла на рис. 2, a обеспечивает более высокую амплитуду колебаний по отношению к варианту на рис. 2, б.

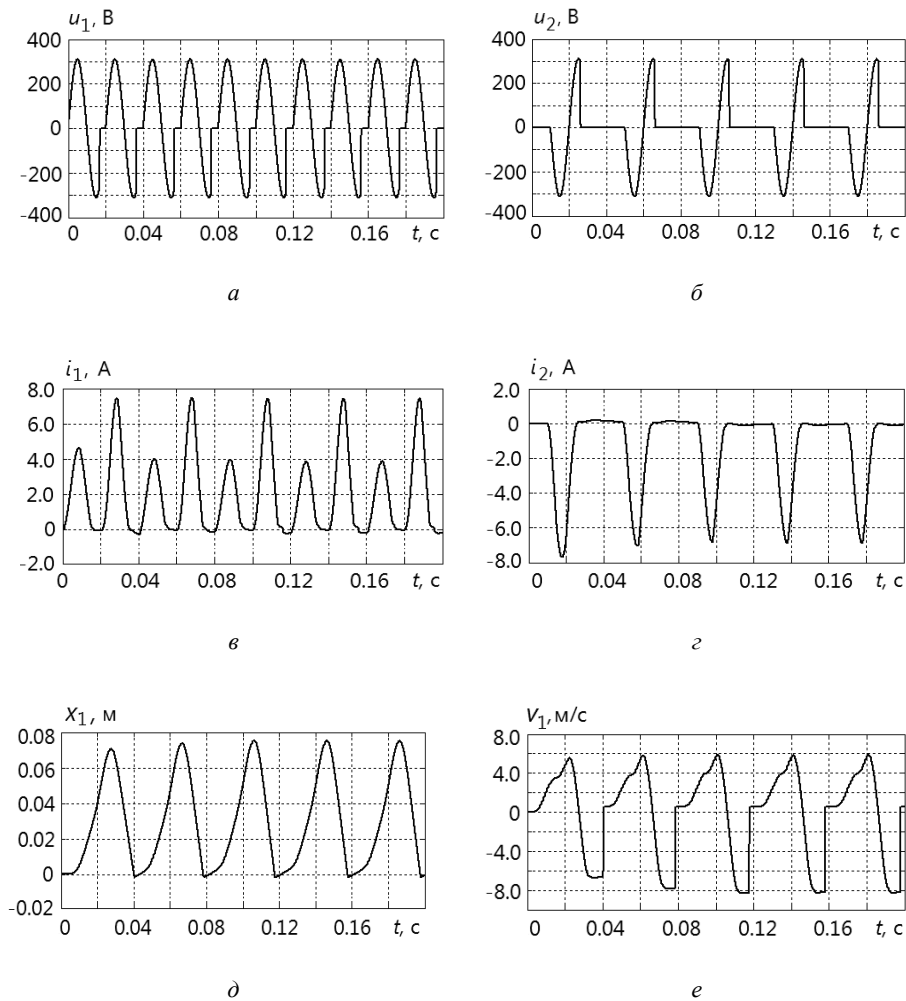


Рис. 4 – Временные диаграммы процесса включения ударного узла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода (рис. 2, а):

a – напряжение на катушке прямого хода; $б$ – напряжение на катушке обратного хода; $в$ – ток катушки прямого хода; $г$ – ток катушки обратного хода; $д$ – рабочий ход бойка; $е$ – скорость бойка

Fig. 4 – Timing diagrams of the process incorporating percussion unit by coasting striker in the coil forward run (Fig. 2, a):

a – voltage at the coil forward stroke; $б$ – the voltage on the flyback coil; $в$ – the coil current of the forward stroke; $г$ – Reverse coil current; $д$ – working stroke of the striker; $е$ – the speed of the striker

Таким образом, по результатам моделирования следует очевидная предпочтительность в использовании рабочего цикла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, обеспечивающего при прочих равных условиях наиболее рациональное формирование ударных импульсов сил и имеющего более высокие показатели на выходе.

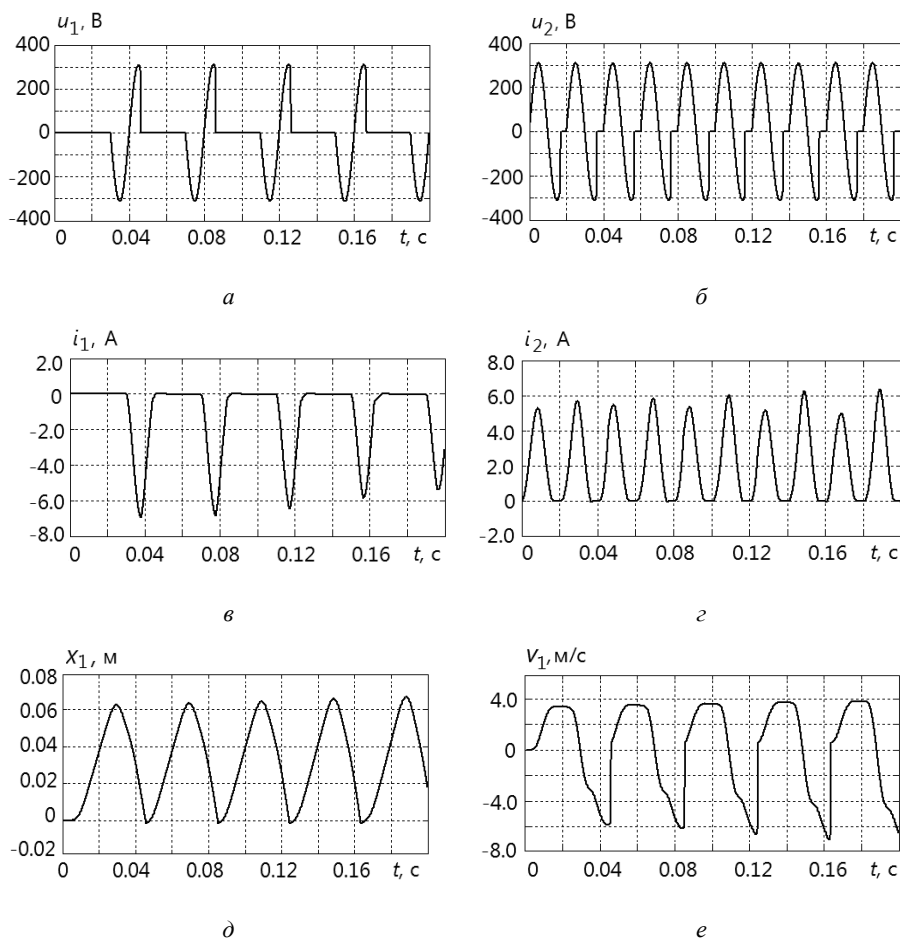


Рис. 5 – Временные диаграммы процесса включения ударного узла со свободным выбегом бойка в катушке обратного хода (рис. 2, б):

a – напряжение на катушке прямого хода; b – напряжение на катушке обратного хода; c – ток катушки прямого хода; d – ток катушки обратного хода; e – рабочий ход бойка; e – скорость бойка

Fig. 5 – Timing diagrams of the process incorporating percussion unit by coasting striker in flyback coil (Fig. 2, б.):

a – voltage at the coil forward stroke; b – the voltage on the flyback coil; c – the coil current of the forward stroke; d – Reverse coil current; e – working stroke of the striker; e – the speed of the striker

Заключение

Создана комплексная динамическая модель двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка, отличающаяся различными способами реализации движения ударной массы и наиболее полно отражающая взаимосвязи в электромеханической системе при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой.

Методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink рассмотрены примеры численной реализации модели и выполнено сравнение рабочих циклов между собой.

Установлена предпочтительность в использовании рабочего цикла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, обеспечивающего при прочих рав-

ных условиях работы ударного узла более рациональное формирование ударных импульсов сил и имеющего более высокую энергию удара и полезную ударную мощность на выходе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 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. **Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н.** Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
5. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
6. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
7. **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.
8. **Нейман В.Ю.** Режимы форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – С. 105–112.
9. **Нейман В.Ю., Петрова А.А.** Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
10. **Татевосян А.А., Татевосян А.С.** Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 121–132.
11. **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.
12. **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.
13. **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.
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: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
15. **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.
16. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
17. **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.

18. **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.
19. **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.
20. **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.
21. **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.
22. А. с. 1525856 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62. Способ управления двухкатушечным электромагнитным двигателем / А.А. Перьев, Е.М. Тимошенко, А.Л. Осокин, В.М. Борисов. – № 4104981/24-07; заявл. 30.05.86; опубл. 30.11.89, Бюл. № 44.
23. **Перьев А.А.** Обоснование технических характеристик ручных электромагнитных машин с повышенной энергией ударов // Импульсные линейные электрические машины: сборник научных трудов / отв. ред. Н.П. Ряшенцев. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 71–81.
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. **Добронравов В.В., Никитин Н.Н.** Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1983. – 576 с.
26. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
27. **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.
28. **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.
29. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
30. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
31. **Татевосян А.С., Татевосян А.А.** Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT: учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 96 с.
32. **Нейман Л.А., Шабанов А.С., Нейман В.Ю.** Решение задачи учета нелинейных свойств динамической модели электромагнитного привода // Теория и практика современной науки: материалы XIX Международной научно-практической конференции. – М., 2015. – С. 58–63.
33. **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.
34. **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.

**COMPARISON OF THE OPERATING CYCLES DYNAMICS
OF THE TWO-INDUCTOR SYNCHRONOUS IMPACT ELECTROMAGNETIC
MACHINE WITH HEAD FREE RUNNING-OUT**

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The results of development of a complex dynamical model of the two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with head free running-out are considered. The electromagnetic impact unit operating cycles are compared. Such units provide the most rational force impulse generation when energy is transferred to a deformable medium. They are featured by different ways of head impact mass reciprocated motion implementation. The impact mass is accelerated by the inductor magnetic field. The electromagnetic synchronous two-inductor machine impact unit is taken as a test object. The impact unit is powered from a 50 Hz single-phase voltage source with a certain control algorithm. It has a multi-mass mechanical oscillatory system with spring linkages. The impact unit dynamics mathematical model has been created to provide the capabilities of the detailed analysis of electromechanical processes in different modes. This complex model is based on differential equations describing the non-linear system electrical balance and mechanical interaction of directly moving masses. These equations were derived from the Lagrange equation of the second type. The examples of the model numeric implementation analysis and the operating cycle comparison were made by structured modeling methods and tools in Matlab Simulink. It has been established that the operating cycle with head running-out in the forward stroke inductor is preferable as it provides the most rational mode of impact impulse generation when other operating conditions are the same as in other cases. This cycle provides a higher useful impact energy and impact power when the head interacts with a deformable medium.

Keywords: electromagnetic impact unit, head free running-out, mathematical model, operating cycle comparison, multi-mass mechanical oscillatory system, Lagrange equations, spring linkages, impact energy, head velocity.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-98-115

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. 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.
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. Ryashentsev N.P., Ryashentsev V.N. *Elektromagnitnyi privod lineinykh mashin* [The electromagnetic linear actuator machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 153 p.
5. 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.
6. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
7. Ismagilov F.R., Sattarov R.R., Gumerova M.B. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh rezhimov elektromagnitnykh demp'iruyushchikh 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.

8. Neyman V.Yu. Rezhimy forsirovannogo akkumulirovaniya magnitnoi 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.
9. Neyman V.Yu., Petrova A.A. Sravneniye sposobov forsirovki impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigateley [Comparison of methods for forcing pulse linear electromagnetic motors]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 47a–50. (In Russian)
10. 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)
11. 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.
12. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Povysheniye tochnosti analiticheskogo rascheta radial'nykh sil odnostoronnego magnitnogo prityazheniya nekoaksial'nykh elementov magnitoprovoda [Improving the accuracy of analytical calculation unilateral radial forces of magnetic attraction coaxial magnetic elements]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 1 (58), pp. 246–256.
13. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primeneniye metoda provodimosti dlya ucheta sily odnostoronnego 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.
14. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyaniye 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]. *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.
15. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. O metodike k vyboru tipa elektromagnita po znacheniyam konstruktivnogo faktora [On the method for choosing the type of electromagnet on the values of constructive factor]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2011, no. 2, pp. 310–313.
16. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovaniye dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsiionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennyye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.
17. 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.
18. Neyman V.Yu. K voprosu o ratsionalizatsii rabochikh protsessov i vybora konstruktivnykh skhem elektromagnitnykh udarnykh mashin [On the question of the rationalization of the working process and the selection of designs schemes electromagnetic percussion machines]. *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004, pp. 155–169.
19. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Novyye konstruktivnyye resheniya problemy tochnoi sinkhronizatsii vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya boika neupravlyаемoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya [The new design address the precise timing of the reciprocating movement of the striker unguided electromagnetic machine percussion]. *Aktual'nyye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 280–285.

20. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatusechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Mathematical model of dynamics of two-inductor synchronous impact electromagnetic machines with free head running-out]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2016, no. 5, pp. 32–40.
21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s dvukhstoronnim vybegom boika [A dynamic model of the impact single-inductor synchronous electromagnetic machine with two-side head running-out]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 98–114.
22. Per'ev A.A., Timoshenko E.M., Osokin A.L., Borisov V.M. *Sposob upravleniya dvukhkatusechnym elek-tromagnitnym dvigatelem* [A method for controlling the electromagnetic motor dvukhkatusechnym]. Inventor's Certificate USSR, no. 1525856, 1989.
23. Per'ev A.A. Obosnovanie tekhnicheskikh kharakteristik ruchnykh elektromagnitnykh mashin s povyshennoi energiei udarov [Justification of specifications manual electromagnetic machines with high energy shocks]. *Impul'snye lineinye elektromagnitnye mashiny* [Pulsed electric linear machine]. Ed. by N.P. Ryashentsev. Novosibirsk, IGD SO AN SSSR Publ., 1991, pp. 71–81.
24. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatel'nogo 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. Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 576 p.
26. 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.
27. 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.
28. 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 vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 2 (31), pp. 94–107.
29. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2016, no. 6, pp. 64–71.
30. 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.
31. Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A. *Raschet elektricheskikh i magnitnykh polei metodom konechnykh elementov s primeneniem kompleksa programm ELCUT* [Calculation of electric and magnetic fields by finite element method using ELCUT programs in]. Omsk, OmSTU Publ., 2015. 96 p.
32. Neyman L.A., Shabanov A.S., Neyman V.Yu. [The solution of the problem accounting non-linear properties of the dynamic model of the electromagnetic actuator]. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki: materialy XIX mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [The theory and practice of modern science: proceedings of the XIX International scientific and practical conference]. Moscow, 2015, pp. 58–63. (In Russian)
33. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitprovode [Simulation of processes in an elec-

- tromagnetic 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.
34. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeistvii 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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



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

Neyman Lyudmila Andreevna (b. 1966) – PhD (Eng.), associate professor, associate professor at the Electrotechnological Units Department of the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machines and technology. She is the 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), D. Sc. (Eng.), professor, head of the Department of Theory of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests cover power electromagnetic pulse systems. He is the author and co-author of over 200 scientific papers and educational tutorials. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Статья поступила 14 февраля 2017 г.

Received February 14, 2017

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Sravnenie dinamiki rabochikh tsiklov dvukhkatushechnykh sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya 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 vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 98–115. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-98-115