

УДК 621.313.282.2

Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: Механизмы и устройства, использующие электромагнитный привод возвратно-поступательного движения, широко используются в промышленности для обеспечения многих технологических процессов и производств. Учитывая современные требования, особый интерес представляют низкочастотные синхронные электромагнитные машины ударного действия, для которых частота ударных импульсов сил равна или кратна частоте питающего однофазного источника. Актуальность исследований обусловлена необходимостью создания математической модели динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка и реализованного на ее основе нового рабочего цикла и способа управления.

Материалы и методы: В качестве объекта исследований рассматривается динамическая модель электромагнитного ударного узла, включающая в себя многомассовую колебательную систему с упругими связями, возбуждаемую периодическим магнитным полем системы из двух катушек. Основу модели составляют дифференциальные уравнения электрического равновесия системы и механического взаимодействия поступательно движущихся инерционных масс, полученные методом Лагранжа.

Результаты: Разработана математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка. Особенностью модели является возможность учета взаимосвязанных электромеханических процессов, учитывающих нелинейность магнитных характеристик материалов, степень подвижности инерционных масс и свойства упругих связей, сопровождаемых различного рода потерями энергии. Предложен алгоритм расчета и рассмотрен пример численной реализации модели в программной среде Matlab Simulink.

Выводы: Использование созданной модели обеспечивает широкие возможности в проведении всестороннего анализа рабочих процессов электромагнитных ударных узлов в переходных и квазиустановившихся режимах в целях улучшения их характеристик. Методами математического моделирования подтверждена эффективность в использовании нового рабочего цикла, позволяющего улучшить электромагнитную совместимость источника электроэнергии и электромагнитного ударного узла при их совместной работе.

Ключевые слова: математическая модель, электромагнитная машина ударного действия, механическая колебательная система, упругие связи, метод Лагранжа, потери энергии, энергия удара.

Mathematical model of dynamics of two-inductor synchronous impact electromagnetic machines with free head running-out

L.A. Neyman, V.Yu. Neyman
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
E-mail: neyman@ngs.ru, nv.nstu@ngs.ru

Abstract

Background: Mechanisms and devices with reciprocation electromagnetic drives are widely used in a lot of industrial technological processes. As it is necessary now to meet energy saving requirements, the paper is essentially focused on low-frequency synchronous impact electromagnetic machines. Their impact frequency is equal to or multiple of single-phase power supply frequency. The timeliness of such studies is explained by the necessity to develop a mathematical model that would simulate the dynamics of the two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with head free running-out and the new operating cycle and control method based on it.

Materials and methods: The object of the study is a dynamic model of the electromagnetic impact unit. The model includes a multi-mass oscillating system with spring linkages excited by the periodic magnetic field of the two-inductor system. The model is based on the Lagrange differential equations of system electrical balance and mechanical interaction between reciprocating inertial masses.

Results: We have developed a model of dynamics of the two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with free head running-out. The model allows simulating the interconnected electromechanical processes taking account of the non-linear characteristics of magnetic materials, inertial masses mobility degree, spring linkage properties and power loss. We have also suggested a calculation algorithm and described an example of the model numerical implementation in Matlab Simulink.

Conclusion: The created model enables comprehensive analysis of the operating processes of electromagnetic impact units in transient and quasi-stationary modes for the improvement of their characteristics. The mathematical simulation

methods have confirmed the efficiency of the new operating cycle in improving electromagnetic compatibility of a power source and the electromagnetic impact unit.

Key words: mathematical model, electromagnetic impact machine, mechanical oscillatory system, spring linkages, Lagrange method, power loss, impact energy.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.032-040

Состояние вопроса. Электромагнитные силовые импульсные системы получили широкое распространение в качестве исполнительных электроприводов возвратно-поступательного движения. К ним относятся различные по назначению электромагнитные машины ударного действия, виброисточники, пресовое оборудование, ручной электроинструмент и т.д. [1–4].

Возвратно-поступательное движение ударной массы бойка, вследствие его периодического взаимодействия с магнитным полем катушки или системы катушек, не только упрощает структуру и кинематическую схему устройства в целом, но и позволяет получить ряд дополнительных преимуществ, обеспечивающих улучшение энергетических, экономических и экологических показателей по отношению к другим машинам и устройствам, использующих в рабочем процессе промежуточные преобразователи энергии [5, 6].

Методы расчета электромагнитных машин, как и способы реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, широко известны и, несмотря на это, продолжают совершенствоваться [7–14].

Как обладающие более высокими энергетическими показателями следует выделить низкочастотные синхронные электромагнитные машины ударного действия, для которых частота ударных импульсов сил равна или кратна частоте питающего источника [15–19].

Учитывая, что процесс электромеханического преобразования энергии в полезную механическую работу имеет импульсный характер, значение энергии удара при питании от источника напряжения промышленной частоты будет ограничиваться значениями допустимой импульсной мощности питающего источника. Улучшение электромагнитной совместимости источника электроэнергии и ударного электропривода без привлечения промежуточных накопителей энергии в системе питания возможно за счет снижения частоты ударных импульсов сил при использовании рабочих циклов со свободным выбегом бойка [18–20].

Двухкратное увеличение энергии удара при сохранении амплитуды импульса тока на прежнем уровне обеспечивает рабочий цикл однокатушечной синхронной электромагнитной машины с двусторонним свободным выбегом бойка [20].

Это стало возможным за счет того, что в общем цикле перемещения бойка процесс при его ускорении и реверсе может сопровождаться непрерывными процессами преобразования кинетической энергии в потенциальную энергию и обратно.

Перспективным вариантом решения проблемы ограничения амплитуды импульса тока и снижения влияния работы электропривода на питающую сеть следует рассматривать новый рабочий цикл со свободным выбегом бойка, реализованный в варианте двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия [21].

В отличие от своего однокатушечного аналога, двухкатушечный вариант представляет собой более сложную динамическую систему, еще в большей степени зависящую от скорости движения бойка, частоты и точности синхронизации поступающих на катушки импульсов напряжения, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, различного рода воздействий, вызванных рабочим процессом, сил сопротивления движению и т.п.

Конфигурация и структура двухкатушечного ударного узла, осуществляющие необходимую характеристику движения ударной массы бойка и рациональное формирование ударного импульса сил, определены в настоящее время только на уровне принципа работы [22].

В этой связи остается нерешенным вопрос проектирования подобных устройств, основным этапом которого является создание комплексной модели, обеспечивающей возможности проведения всестороннего анализа рабочих процессов в различных режимах.

Целью работы является разработка математической модели динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка, учитывающей возможности проведения всестороннего анализа электромагнитных и электромеханических процессов, наиболее объективно отражающих взаимосвязи параметров этой системы в различных режимах работы.

Материалы и методы. На рис. 1 приведен один из возможных вариантов исполнения ударного узла двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка.

Для реализации нового рабочего цикла со свободным выбегом бойка применяется система из двух независимых катушек 1, 2, заключенных в магнитопроводы 3, 4. Каждая из катушек обеспечивает разгон ударной массы бойка 5 электромагнитными

силами в двух направлениях. Совершая возвратно-поступательные движения, боек 5 периодически взаимодействует с рабочим инструментом 6 и буферной пружиной 7, осуществляющей его остановку и реверс, а также преобразование кинетической энергии бойка в потенциальную энергию при сжатии пружины и обратно в кинетическую энергию при ускорении бойка в направлении рабочего инструмента. Усилиям нажатия F_H обеспечивается устойчивая связь ударного узла с рабочим инструментом при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой 8.

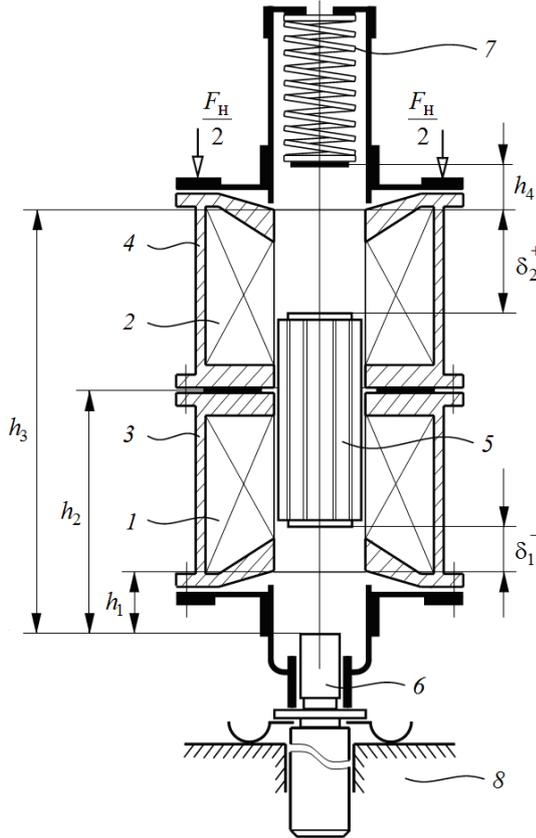


Рис. 1. Электромагнитный ударный узел

Свободный выбег бойка осуществляется за время бестоковой паузы в подаче импульсов напряжения, в течение которой боек движется по инерции в направлении буферной пружины или рабочего инструмента.

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

$$n_{уд} = \frac{60f}{2p} = 1000 \text{ уд/мин}; \quad t_{ц} = \frac{2p}{f} = 0,06 \text{ с},$$

где $2p = 3$ – число периодов напряжения.

В отличие от известных способов управления обе катушки используются дважды в течение времени рабочего цикла, а боек приобретает необходимую кинетическую энергию за счет подачи на катушки четырех электрических импульсов напряжения.

Механическая и магнитная подсистемы ударного узла связаны зависимостями электромагнитного усилия $f_{эм1} = f(i_1, x_1)$ и $f_{эм2} = f(i_2, x_1)$ от величины протекающего тока i_1, i_2 в катушках и координаты положения бойка x_1 . Магнитная и электрическая подсистемы связаны зависимостями величины потокосцепления $\psi_1 = f(i_1, x_1)$ и $\psi_2 = f(i_2, x_1)$ и в общем случае описываются уравнениями электрического равновесия системы:

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

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

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

Согласно установленным связям (рис. 1) и действующим в системе обобщенным силам, соответствующим потенциальной энергии, энергии рассеяния и внешним воздействиям, рассмотрена расчетная динамическая схема механической части электромагнитного ударного узла (рис. 2).

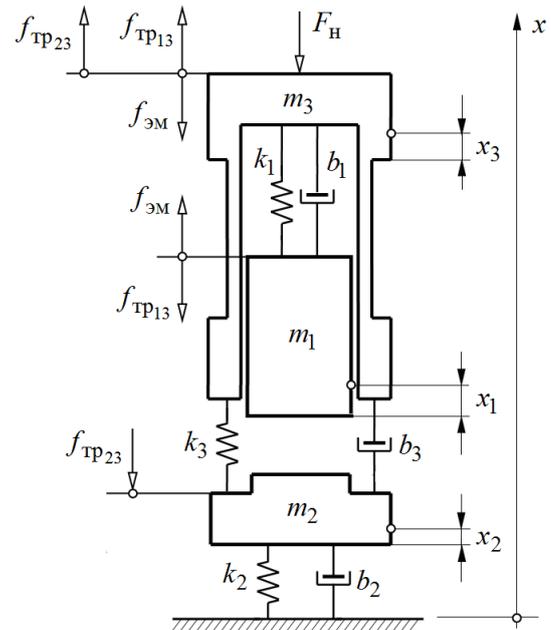


Рис. 2. Расчетная динамическая схема механической системы

В качестве обобщенных координат принимаем линейные перемещения центра масс бойка x_1 массой m_1 , рабочего инструмента x_2 массой m_2 и системы из независимых катушек и магнитопроводов x_3 массой m_3 . Колебания системы в пространстве будут описываться зависимостью обобщенных координат x_1, x_2 и x_3 от времени, отсчитываемых от положения их устойчивого статического равновесия.

Уравнения движения механической системы получим на основании уравнения Лагранжа второго рода [23]:

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

где T – кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия системы; Φ – диссипативная функция системы (функция Релея); $\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}$, $\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i}$, 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 ($N = 3$).

Принимая положение устойчивого статического равновесия за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной энергии системы, последовательно установим величины, входящие в уравнение (3):

- кинетическая энергия механической системы для поступательно движущихся масс

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

- потенциальная энергия упругих связей механической системы

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

где k_1 , k_2 и k_3 – статические коэффициенты жесткости упругих связей;

- диссипативная функция Релея

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

где b_1 , b_2 и b_3 – коэффициенты вязкого трения упругих связей;

- обобщенные силы внешних воздействий и силы трения, соответствующие обобщенным координатам:

$$Q_{x_1} = f_{\text{ЭМ}}(i, x_1) - f_{\text{ТР13}} \text{sign} \dot{x}_1;$$

$$Q_{x_2} = -f_{\text{ТР23}} \text{sign} \dot{x}_2;$$

$$Q_{x_3} = -f_{\text{ЭМ}}(i, x_1) + (f_{\text{ТР13}} + f_{\text{ТР23}}) \text{sign} \dot{x}_3 - F_{\text{Н}},$$

где $f_{\text{ЭМ}}(i, x_1) = f_{\text{ЭМ1}}(i_1, x_1) + f_{\text{ЭМ2}}(i_2, x_1)$ – вынуждающая электромагнитная сила первой и второй катушек; $f_{\text{ТР13}}$, $f_{\text{ТР23}}$ – силы сухого трения скольжения; $F_{\text{Н}}$ – постоянная величина усилия нажатия ударного узла.

Используя уравнения (1)–(3), предварительно получив частные производные от кинетической, потенциальной энергий и диссипативной функции Релея, а также производные по времени, учитывая внешние периодические силы и силы трения, математическую модель динамического состояния колебательной электромеханической системы без учета ударного взаимодействия можно описать следующими дифференциальными уравнениями:

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

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

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3) = \quad (6)$$

$$= f_{\text{ЭМ1}}(i_1, x_1) + f_{\text{ЭМ2}}(i_2, x_1) - f_{\text{ТР13}} \text{sign} \frac{dx_1}{dt};$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + \quad (7)$$

$$+ k_2 x_2 - k_3 (x_3 - x_2) = -f_{\text{ТР23}} \text{sign} \frac{dx_2}{dt};$$

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - \quad (8)$$

$$- k_1 (x_1 - x_3) + k_3 (x_3 - x_2) = -f_{\text{ЭМ1}}(i_1, x_1) -$$

$$- f_{\text{ЭМ2}}(i_2, x_1) + (f_{\text{ТР13}} + f_{\text{ТР23}}) \text{sign} \frac{dx_3}{dt} - F_{\text{Н}}.$$

В соответствии с уравнениями электромагнитного состояния (1), (2) и уравнениями движения (4)–(8), под действием внешних периодических сил в механической системе возникают сложные колебания, являющиеся результатом наложения вынужденных и свободных колебаний системы при условии, что ударного взаимодействия инерционных масс в механической системе не возникает.

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

Наличие ограничителей движения в конструкции ударного узла не позволяет бойку выходить за установленные пределы, а также осуществлять его остановку, реверс и передачу ударных импульсов сил рабочему инструменту при полной синхронизации с импульсами тока, протекающими по катушкам:

$$x_1(t) = \begin{cases} 0 \text{ при } \delta_1^+ = h_1, \\ h_1 - \delta_1^+, \text{ если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \text{ при } x_1 \leq h_1, \\ h_3 - \delta_2^+, \text{ если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \text{ при } h_1 < x_1 \leq h_2, \\ h_2 + \delta_2^- \text{ при } h_2 < x_1 < h_3, \\ h_1 + \delta_1^-, \text{ если } \frac{dx_1}{dt} < 0, \text{ при } h_1 \leq x_1 < h_2, \\ h_1 - \delta_1^+, \text{ если } \frac{dx_1}{dt} < 0, \text{ при } x_1 < h_1, \end{cases} \quad (9)$$

где δ_1^+ , δ_2^+ – воздушные рабочие зазоры, образованные положением бойка относительно верхней полюсной системы первой и второй катушек; δ_1^- , δ_2^- – воздушные рабо-

чие зазоры, образованные положением бойка относительно нижней полюсной системы первой и второй катушек; h_1, h_2 и h_3 – фиксированные координаты относительно ударного сечения рабочего инструмента.

Для питания ударного узла от однофазного источника используется система управления, обеспечивающая определенное чередование полуволн напряжения различной полярности. При этом первую полуволну напряжения подают на первую катушку, вторую и третью полуволну с паузой между ними – на вторую катушку и четвертую полуволну напряжения – на первую катушку, а после паузы в течение четного числа полуволн (три периода напряжения) повторяют указанную последовательность чередования импульсов напряжения [21, 22].

Следует отметить, что при ударе не вся кинетическая энергия бойка переходит в деформируемую среду. Часть этой энергии возвращается обратно в механическую колебательную систему при отскоке от рабочего инструмента и зависит от свойств среды, параметров ударной системы и импульса силы.

Кинетическая энергия T_1 , возвращаемая в механическую систему при отскоке бойка, и кинетическая энергия T_2 , передаваемая рабочему инструменту при ударе, составляют:

$$T_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2} k_{от}^2; \quad T_2 = \frac{m_1 v_1^2}{2} (1 - k_{от}^2),$$

где $k_{от} = \bar{v}_1 / v_1$ – коэффициент отскока бойка; v_1, \bar{v}_1 – скорости центра массы бойка перед ударом и после отскока от рабочего инструмента соответственно.

При работе ударного узла сила упругости буферной пружины линейно зависит от координаты положения бойка, а сила сопротивления движению пропорциональна его скорости. Составляющие этих сил описываются кусочно-линейными функциями, удовлетворяющими следующим условиям:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = \begin{cases} 0, & \text{при } x_1 < h_3 + h_4, \\ k_1 (x_1 - x_3), & \text{при } x_1 \geq h_3 + h_4; \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = \begin{cases} 0, & \text{при } x_1 < h_3 + h_4, \\ b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right), & \text{при } x_1 \geq h_3 + h_4. \end{cases} \quad (11)$$

Из условия (11) следует, что процесс рассеяния энергии в условиях вязкого трения, вызванного диссипативными силами упругих связей, может возникать только при работе сил этих связей.

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

Представляя процесс движения как результат наложения вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, уравнения (4)–(8) совместно с условиями

(9)–(11) позволяют рассматривать обобщенную модель динамического состояния двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} u_1(t) &= i_1 r_1 + \frac{d\psi(i_{\mu 1}, x_1)}{dt}, \\ u_2(t) &= i_2 r_2 + \frac{d\psi(i_{\mu 2}, x_1)}{dt}, \\ i_1 &= i_{n1} + i_{\mu 1}; \quad i_2 = i_{n2} + i_{\mu 2}, \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} &= \begin{cases} \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_u} + f_{\Sigma M1}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\Sigma M2}(i_{\mu 2}, x_1) - \\ - f_{TP13} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, & \text{если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 + h_4, \\ -\tilde{\lambda}_1 + f_{\Sigma M2}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{TP13} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} \\ \text{при } x_1 \geq h_3; \\ f_{\Sigma M1}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\Sigma M2}(i_{\mu 2}, x_1) - \\ - f_{TP13} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, & \text{если } \frac{dx_1}{dt} < 0, \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 + h_2, \end{cases} \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} &= -\frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_u} - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_3 - f_{TP23} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}, \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} &= \begin{cases} -\tilde{\lambda}_3 - f_{\Sigma M1}(i_{\mu 1}, x_1) - f_{\Sigma M2}(i_{\mu 2}, x_2) + \\ + (f_{TP13} + f_{TP23}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt} - F_H \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 + h_2, \\ \tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_3 - f_{\Sigma M2}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{TP13} \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt} \\ \text{при } x_1 \geq h_3 + h_2, \end{cases} \end{aligned} \right.$$

где $\tilde{\lambda}_1 = b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3);$

$$\tilde{\lambda}_2 = b_2 \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2;$$

$$\tilde{\lambda}_3 = b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_3 (x_3 - x_2); \quad \tau_u - \text{время}$$

действия импульса силы; i_{n1}, i_{n2} – составляющие тока потерь, вызванные вихревыми токами и гистерезисом в первой и второй катушках; $i_{\mu 1}, i_{\mu 2}$ – составляющие намагничивающего тока первой и второй катушек.

Результаты исследования. Полученная система дифференциальных уравнений динамического состояния двухкатушечного электромагнитного ударного узла со свободным выбегом бойка позволяет производить всесторонний анализ электромеханических

процессов в переходных и квазиустановившихся режимах, учитывающих нелинейность магнитной системы, ударные взаимодействия инерционных масс и свойства упругих связей в механической системе, обусловленные различного рода потерями энергии.

Решение математической модели динамики ударного узла связано с совместным интегрированием уравнений электрического равновесия и уравнений движения.

Исследования модели проводились методом математического моделирования в программной среде Matlab Simulink [24]. На основании полученной математической модели разрабатывались алгоритм расчета и динамическая модель ударного узла в виде структурной схемы. Построение динамической модели выполнялось в соответствии с уже имеющимися рекомендациями [25].

На начальном этапе разработки алгоритма расчета и построения модели с помощью решения полевой задачи при использовании одной из стандартных программ конечно-элементного моделирования магнитного поля FEMM, ELCUT или ANSYS [26–28] определялся массив значений опорных точек статических параметров потокоцеплений $\psi_1(i_1, \delta_1)$, $\psi_2(i_2, \delta_2)$ и электромагнитных усилий $f_{эм1}(i_1, \delta_1)$, $f_{эм2}(i_2, \delta_2)$ в зависимости от тока и положения бойка, характеризующего конкретное значение рабочего воздушного зазора относительно полюсной системы катушек (рис. 1).

На завершающем этапе построения модели средствами Matlab Simulink массив значений расчетных статических параметров применялся для задания функции двух аргументов в виде стандартных блоков двумерных таблиц.

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты моделирования в виде временных диаграмм процесса включения ударного узла (рис. 1).

В основе конструкции расчетной модели применен идентичный вариант однокатушечного ударного узла со свободным выбегом бойка МС-18/36 [18], отличающийся наличием второй катушки одинаковых габаритов.

В качестве исходных данных использовались следующие параметры модели: $m_1 = 0,32$ кг; $m_2 = 0,36$ кг; $m_3 = 4,8$ кг; $k_1 = 18 \cdot 10^3$ Н/м; $b_1 = 8$ Н·с/м; $k_2 = 2 \cdot 10^6$ Н/м; $b_2 = 0$; $k_3 = 160 \cdot 10^3$ Н/м; $b_3 = 45$ Н·с/м; $f_{тр13} = 4$ Н; $f_{тр23} = 10$ Н; сила нажатия ударного узла $F_H = 350$ Н.

Материал магнитопровода – электротехническая сталь 1212. Боек – цельнометаллический из конструкционной стали 40ХН. Намотка катушек произведена медным проводником диаметра $d_{пр} = 1,04$ мм с количеством витков $w_1 = w_2 = 1525$ и активным сопротивлением $r_1 = r_2 = 12,8$ Ом. Действующее значение напряжения источника $U = 220$ В.

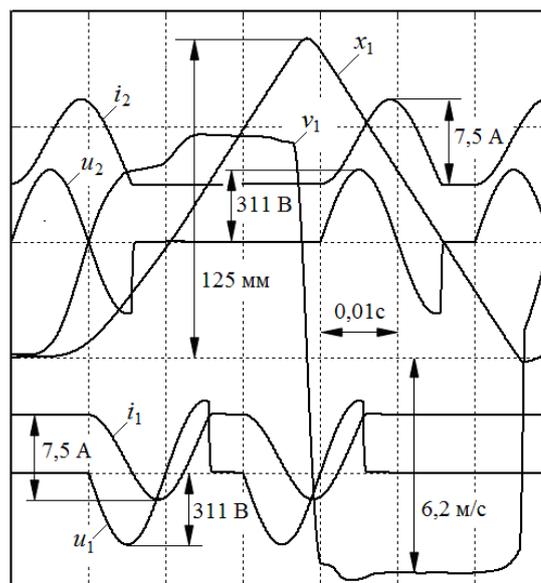


Рис. 3. Временные диаграммы процесса включения

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

Время переходного процесса модели ударного узла не превышает времени одного рабочего цикла, что составляет 0,06 с. (рис. 3). В сравнении с однокатушечным вариантом ударного узла со свободным выбегом бойка, использование двухкатушечного варианта обеспечивает двукратное увеличение энергии удара бойка при сохранении амплитуды импульсов тока на прежнем уровне.

Эффективность нового рабочего цикла очевидна, однако, как показывает расчет, предъявляются более высокие требования в вопросах согласования работы ударного узла с импульсами напряжения, подаваемыми на систему катушек. Подходы в решении вопросов согласования работы ударного узла также могут быть различными [31].

Разработанная математическая модель открывает перспективы и новые возможности в проведении всестороннего анализа рабочих процессов в двухкатушечных синхронных электромагнитных машинах ударного действия со свободным выбегом бойка в задачах проектирования в целях улучшения их характеристик.

Выводы. На примере нового рабочего цикла разработана математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка, обеспечивающая возможности для всестороннего анализа переходных и квазиустановившихся режимов при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой.

Особенностью модели является возможность учета взаимосвязанных электромеханических процессов с большим набором входных и выходных переменных, учитывающих нелинейность магнитных характеристик материалов, степень подвижности инерционных масс и свойств упругих связей, сопровождаемых различного рода потерями энергии.

Результаты моделирования подтверждают эффективность использования нового рабочего цикла, обеспечивающего улучшение электромагнитной совместимости промышленного однофазного источника электроэнергии и электромагнитного ударного узла.

Список литературы

1. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.
2. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
3. **Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2006. – 284 с.
4. **Усанов К.М., Каргин В.А.** Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт // Вестник Саратовского государственного университета им. Н.И. Вавилова. – 2005. – № 3. – С. 59–61.
5. **Певчев В.П., Ивашин В.В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольяти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
6. **Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
7. **Мошкин В.И.** Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 4, т. 321. – С. 93–96.
8. **Мошкин В.И., Угаров Г.Г.** Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружинной // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 2 (66). – С. 130–135.
9. **Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н.** Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
10. **Усанов К.М., Каргин В.А., Волгин А.В.** Оценка эффективности энергопреобразований в электромагнитной ударной машине с упругим возвратным элементом // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 1. – С. 86–87.
11. **Pevchev V.P.** The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. – 2010. – Vol. 46, no 6. – P. 656–665.
12. **Татевосян А.А., Татевосян А.С.** Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 121–132.
13. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 6. – С. 35–40.
14. **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.
15. **Zhuravlyov Y.N., Matceevich S.G., Kochevin F.G.** Low-frequency electrodynamic vibrator with magnetically suspended movable part // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Motion and Vibration Control. – 1998. – Vol. 3. – P. 1063–1067.
16. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Периодические режимы в электромагнитных виброционных преобразователях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т.14, № 1(36). – С. 50–55.
17. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Исследование виброударного режима в электромеханических реактивных преобразователях // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 23–27.
18. **Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1970. – 260 с.
19. **Электропривод с линейными электромагнитными двигателями** / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
20. **Смелягин А.И.** Синтез и исследование машин и механизмов с электромагнитным приводом. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1991. – 248 с.
21. **Пат. 2496214** Российская Федерация, МКИ H02K 33/12. Синхронный электромагнитный двигатель возвратно-поступательного движения / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников. Оpubл. 20.10.2013, Бюл. № 29.
22. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
23. **Добронравов В.В., Никитин Н.Н.** Курс теоретической механики. – М.: Высш. шк., 1983. – 576 с.
24. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
25. **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.
26. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 336 с.
27. **Андреева Е.Г., Семина И.А., Татевосян А.В.** Исследование поля магнитной системы открытого типа с помощью программного пакета

ANSYS // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – С. 173–175.

28. **Татевосян А.А., Татевосян А.С.** Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT: учеб. пособие // Минобрнауки России, ОмГТУ. 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.

31. **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.

References

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

2. Ivashin, V.V., Kudinov, A.K., Pevchev, V.P. *Elektromagnitnyy privoda dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii* [Electromagnetic drives for pulse and vibropulse technologies]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.

3. Usanov, K.M., Ugarov, G.G., Moshkin, V.I. *Lineyny impul'snyy elektromagnitnyy privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive of self-powered machines]. Kurgan, Izdatel'stvo Kurganskogo gosuniversiteta, 2006. 284 p.

4. Usanov, K.M., Kargin, V.A. *Silovaya elektromagnitnaya impul'snaya sistema dlya pogruzheniya sterzhnevyykh elementov v grunt* [The power electromagnetic pulse system for immersing rod elements in soil]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta*, 2005, no. 3, pp. 59–61.

5. Pevchev, V.P., Ivashin, V.V. *Proektirovanie moshchnyykh korotkikhodovykh impul'snykh elektromagnitnykh dvigateley* [Design of powerful short-run pulse electromagnetic motors]. Tol'yati, Izdatel'stvo TGU, 2012. 142 p.

6. Ugarov, G.G., Moshkin, V.I. *Perspektivy razvitiya silovykh elektromagnitnykh impul'snykh sistem* [Prospects for the development of power electromagnetic pulse systems]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 29, pp. 88–90.

7. Moshkin, V.I. *Sravnenie magnitnykh tsiklov impul'snogo lineynogo elektromagnitnogo dvigatelya s uchedom moshchnosti poter' v ego obmotke* [Comparison of magnetic cycles of linear pulse electromagnetic motors taking account of the winding power loss]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 4, vol. 321, pp. 93–96.

8. Moshkin, V.I., Ugarov, G.G. *Energeticheskaya i dinamicheskaya effektivnost' odnoobmotochnyykh lineynykh elektromagnitnykh dvigateley s vozvratnoy pruzhinoy* [Energy and dynamic efficiency of single-winding linear electromagnetic motors with spring return]. *Vestnik*

Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2012, no. 2 (66), pp. 130–135.

9. Ryashentsev, N.P., Ryashentsev, V.N. *Elektromagnitnyy privod lineynykh mashin* [Electromagnetic linear actuator machines]. Novosibirsk, Nauka, 1985. 153 p.

10. Usanov, K.M., Kargin, V.A., Volgin, A.V. *Otsenka effektivnosti energopreobrazovaniy v elektromagnitnoy udarnoy mashine s uprugim vozvratnym elementom* [Evaluating the effectiveness of energy conversion in the electromagnetic shock machines with a resilient return element]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2008, no. 1, pp. 86–87.

11. Pevchev, V.P. *The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source*. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 656–665.

12. Tatevosyan, A.A., Tatevosyan, A.S. *Raschet optimal'nykh parametrov elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya* [Calculation of the optimal parameters of the vibrational motion electromagnetic actuator]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 121–132.

13. Neyman, L.A., Neyman, V.Yu. *Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoy sistemy kolebatel'nogo dvizheniya s uprugimi svyaziyami* [Mathematical model of electromechanical system with vibrational motion of elastic connections]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 6, pp. 35–40.

14. Ismagilov, F.R., Sattarov, R.R., Gumerova, M.B. *Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh rezhimov elektromagnitnykh dempfiyushchikh elementov* [Mathematical modeling of dynamic modes of electromagnetic damping elements]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 14, no. 5(40), pp. 86–90.

15. Zhuravlyov, Y.N., Matceevich, S.G., Kochevin, F.G. *Low-frequency electrodynamic vibrator with magnetically suspended movable part*. *Proc. of the 4th Intern. Conf. on Motion and Vibration Control*, 1998, vol. 3, pp. 1063–1067.

16. 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*, 2010, vol. 14, no. 1(36), pp. 50–55.

17. Sattarov, R.R., Ismagilov, F.R. *Issledovanie vibroudarnogo rezhima v elektromekhanicheskikh reaktivnykh preobrazovatelyakh* [Research into vibro-impact mode of electromechanical reactive converters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2010, no. 2, pp. 23–27.

18. Ryashentsev, N.P., Timoshenko, E.M., Frolov, A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1970. 260 p.

19. Ryashentsev, N.P., Ugarov, G.G., Fedonin, V.N., Malov, A.T. *Elektroprivod s lineynymi elektromagnitnymi dvigatelyami* [Electric linear electromagnetic motors]. Novosibirsk, Nauka, 1981. 150 p.

20. Smelyagin, A.I. *Sintez i issledovanie mashin i mekhanizmov s elektromagnitnym privodom* [Synthesis and study of machines and mechanisms

with electromagnetic actuators]. Novosibirsk, Izdatel'stvo Novosibirskogo universiteta, 1991. 248 p.

21. Neyman, L.A., Neyman, V.Yu., Skotnikov, A.A. *Sinkhronnyy elektromagnitnyy dvigatel' vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya* [Synchronous electromagnetic reciprocation motors]. Patent RF, no. 2496214, 2013.

22. Neyman, L.A., Neyman, V.Yu. Rabochiy tsikl dvukhkatushechnoy sinkhronnoy elektromagnitnoy mashiny so svobodnym vybegom boyka [Operation cycle of two-inductor synchronous electromagnetic machines with free head running-out]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2013, no. 6, pp. 48–52.

23. Dobronravov, V.V., Nikitin, N.N. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1983. 576 p.

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

Neyman, L.A., Neyman, V.Yu. Dinamicheskaya model' elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya dlya sistem generirovaniya nizkочастотных вибраций [Dynamic model of electromagnetic vibration drives for low-frequency vibration generation systems]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*, 2015, no. 3(28), pp. 75–87.

26. Bul', O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: Magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Methods for calculating magnetic systems of electric devices: magnetic circuits, fields and FEMM program: a study guide]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. 336 p.

27. Andreeva, E.G., Semina, I.A., Tatevosyan, A.V. Issledovanie polya magnitnoy sistemy otkrytogo tipa s pomoshch'yu programmnoy paketa ANSYS [Investigation of

the magnetic field open-type system using ANSYS software package]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2014, no. 1, pp. 173–175.

28. Tatevosyan, A.A., Tatevosyan, A.S. *Raschet elektricheskikh i magnitnykh poley metodom konechnykh elementov s primeneniem kompleksa programm ELCUT* [Calculation of electric and magnetic fields by the finite-element method in ELCUT software package]. Omsk, Izdatel'stvo OmGTU, 2015. 96 p.

29. Neyman, L.A., Neyman, V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitprovoде [Modelling of processes in the electromagnetic vibration transducer with energy losses in the yoke]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 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 vozdeystviy i nizkочастотных вибраций [Simulation of dynamic processes in the electromagnetic energy converters for force effect and low-frequency vibration generation systems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

31. Neyman, L.A., Neyman, V.Yu. Novye konstruktivnye resheniya problemy tochnoy sinkhronizatsii vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya boyka nepravlyaemoy elektromagnitnoy mashiny udarnogo deystviya [New design solutions to the problem of precise timing of the reciprocating striker movement of the uncontrolled electromagnetic impact machine]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*, 2015, no. 2, pp. 280–285.

Нейман Людмила Андреевна,

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

Нейман Владимир Юрьевич,

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