

НОВЫЙ РАБОЧИЙ ЦИКЛ ДВУХКАТУШЕЧНОЙ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ С ИНЕРЦИОННЫМ РЕВЕРСОМ БОЙКА

Л.А. Нейман

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

При разработке новых виброударных технологий в промышленности широкое практическое применение получили импульсные электромагнитные машины ударного действия, для которых синхронная частота механических колебаний бойка равна или кратна частоте питающей сети. Актуальность исследований обусловлена необходимостью повышения энергии удара и снижения влияния работы импульсной линейной электромагнитной машины на питающую однофазную сеть промышленной частоты. Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является разработка новых рабочих циклов электромагнитных машин и реализация новых алгоритмов управления. В качестве базовой конструкции машины рассматривается усовершенствованный вариант двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия, предусматривающий разгон ударной массы бойка электромагнитными силами в прямом и обратном направлении за время, равное длительности одного периода напряжения. На примере двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка рассмотрен новый рабочий цикл и реализован на уровне изобретения новый способ управления, позволяющий уменьшить влияние работы электропривода на питающую сеть. На основе баланса энергий электромеханической системы рассмотрен процесс энергопреобразования за полный рабочий цикл, учитывающий взаимодействие между всеми элементами конструкции ударного узла. Реализация нового способа управления, в сравнении с известным способом, обеспечивает снижение амплитуды тока, и уменьшение влияния работы импульсной электромагнитной машины на питающую сеть за счет подачи на катушки трех полуволн напряжения в течение рабочего цикла.

Ключевые слова: синхронная электромагнитная машина, ударный узел, электропривод, энергия удара, рабочий цикл машины, баланс энергии электромеханической системы, инерционный реверс бойка, способ управления.

Введение

Электромагнитные машины для импульсных и виброимпульсных технологий нашли широкое практическое применение в различных отраслях промышленности [1–7].

Среди данного класса машин в особенности следует выделить линейные синхронные электромагнитные машины как обладающие наиболее высокими удельными энергетическими показателями, для которых механическая частота колебаний бойка (якоря), разгоняемого электромагнитными силами, равна или кратна частоте промышленной сети 50 Гц [8–10].

Методы расчета и проектирования электромагнитных машин широко известны и, несмотря на это продолжают совершенствоваться [11–19].

Существенная роль в решении вопросов энергосбережения электромагнитных машин и устройств, созданных на их основе, отводится изучению процессов энергопреобразования [20–27].

Актуальность и научная значимость вопроса

Импульсный характер отбора мощности при питании данных машин от источника напряжения промышленной частоты ограничивает в значениях энергии единичного удара, определяемые допустимой импульсной мощностью самого источника. В особенности эта проблема актуальна для элек-

тромагнитных машин, имеющих синхронную частоту ударов 50 с^{-1} (3000 уд/мин) [28].

Поэтому одним из перспективных направлений создания электромагнитных машин с повышенной энергией удара является создание новых рабочих циклов и способов управления, обеспечивающих снижение амплитуды тока и влияние работы электропривода на питающую сеть.

Полученные в [29] результаты качественного анализа рабочих циклов этих машин показывают принципиальную возможность в реализации рабочих циклов с механической импульсной мощностью на выходе, сопоставимой или превышающей импульсную мощность источника, без дополнительного использования для этих целей внешних накопительных устройств.

Постановка задачи и способ её решения

В практике создания электромагнитных машин ударного действия, отличающихся повышенной энергией удара, задача снижения влияния работы электропривода на питающую его сеть решается либо за счет использования в схеме управления промежуточных конденсаторных накопителей энергии, либо за счет увеличения числа последовательно установленных катушек, обеспечивающих многократный разгон бойка в магнитном поле электромагнитными силами [3–5].

Однако в первом и во втором случаях решение проблемы подобным образом приводит к увеличению общей массы электропривода.

Среди многокатушечных конструкций наибольшее практическое применение получил вариант схемы двухкатушечной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка [25, 30]. Основным отличием двухкатушечного варианта схемы является то, что в качестве реверсирующего устройства используется массивный буфер, с помощью которого осуществляется изменение направления движения бойка за счет его соударения с большей массой, движущейся ему навстречу. Постоянное воздействие на боек электромагнитных сил за счет перекрытия времени действия тяговых усилий катушек рабочего и обратного хода, несмотря на некоторое снижение к.п.д. обеспечивает устойчивые режимы работы машины в широком диапазоне изменения коэффициента отскока бойка от рабочего инструмента.

Для реализации рабочего цикла в известном способе управления [25] используются две полу-волны напряжения, что обеспечивает частоту ударов, равную частоте питающей сети при питании катушек по однополупериодной схеме выпрямления. Дальнейшее увеличение энергии единичного удара в известном способе управления возможно только за счет увеличения амплитуды тока, что только усилит влияние работы электропривода на питающую сеть.

Целью настоящей работы является решение задачи увеличения энергии единичного удара в варианте схемы двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка за счет использования нового рабочего цикла и реализация нового способа управления, позволяющего уменьшить влияние работы электропривода на питающую сеть.

Методы исследований основаны на детальном описании составляющих баланса энергии электро-механической системы, за полный рабочий цикл энергопреобразования учитывающего в соответствии с новым способом управления строгую последовательность взаимодействия всех элементов конструкции ударного узла.

В предлагаемом рабочем цикле двухкатушечной синхронной электромагнитной машины разгон бойка электромагнитными силами осуществляется за три полуволны напряжения вместо двух в известном рабочем цикле, что позволяет повысить энергию единичного удара без увеличения амплитуды тока.

Один из возможных вариантов исполнения ударного узла, объединяющего в себе элементы магнитной и механической подсистемы, двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка приведен на рис. 1. В соответствии с реализованным способом управления на рис. 2 приведен новый рабочий цикл в виде диаграммы перемещения x бойка, напряжения u и тока i катушек рабочего и обратного хода, получающих питание от полуволн напряжения переменного однофазного источника промышленной частоты согласно с заданным алгоритмом.

Ударный узел (см. рис. 1) содержит рабочий инструмент 1 , определяющий ударную массу боек 2 , магнитопровод 3 , установленные на одной оси внутри магнитопровода намагничивающие катушки рабочего 5 и обратного 6 хода и расположенное в задней части реверсирующее устройство, выполненное в виде инерционного преобразователя 7 , связанного с возвратной пружиной 4 .

Для реализации рабочего цикла используется система из двух катушек. В отличие от своего аналога [25, 30] катушка обратного хода обеспечивает разгон ударной массы электромагнитными силами в двух направлениях. Конструктивным отличием является разная длина катушек, определяемая временем движения бойка при синхронизации его механических колебаний с частотой питающего источника.

Работа ударного узла электромагнитной машины осуществляется в следующем порядке. При подаче импульса напряжения на катушку 5 рабочего хода боек 2 наносит удар по рабочему инструменту 1 и после отскока от инструмента разгоняется в обратном направлении под действием электромагнитных сил разворачивающегося электромагнитного поля катушки 6 обратного хода, нанося удар в конце хода по инерционному преоб-

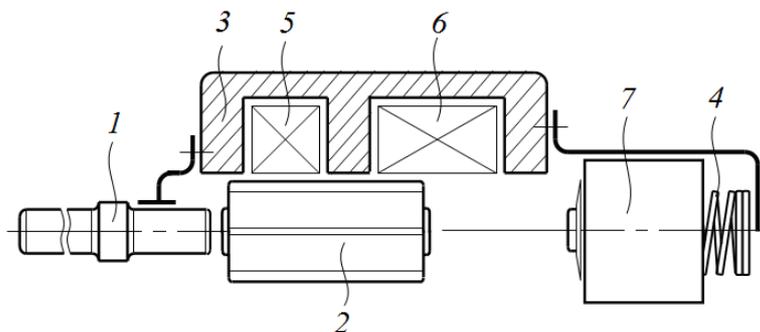


Рис. 1. Вариант исполнения ударного узла двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка

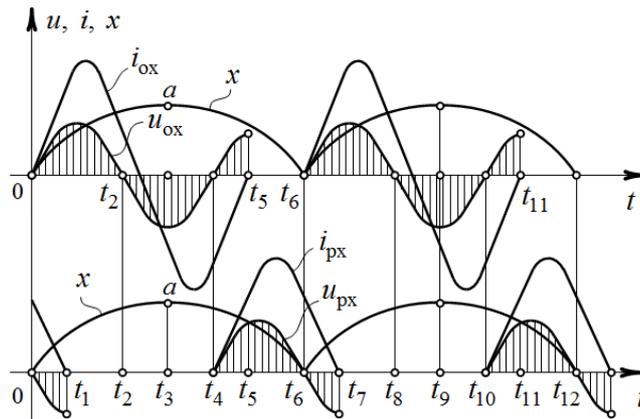


Рис. 2. Новый рабочий цикл двухкатушечной электромагнитной машины

разователю 7, движущемуся навстречу бойку за счет действия упругих сил сжатия возвратной пружины 4. Одновременно при выходе бойка 2 из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки обратного хода на катушку 6 подается повторный импульс напряжения. Боёк 2 после обмена ударами с инерционным преобразователем 7 изменяет свою скорость движения на противоположную и под действием электромагнитных сил катушки 6 обратного хода движется в направлении рабочего инструмента 1. Далее импульс напряжения подается на катушку 5 рабочего хода. При входе в полюсную систему катушки рабочего хода боёк под действием электромагнитных сил этой катушки ускоренно перемещается в направлении рабочего инструмента и наносит по нему удар. Одновременно после обмена ударами с бойком инерционный преобразователь 7 отходит в противоположную движению бойка 2 сторону и сжимает пружину 4, чтобы снова начать свое движение навстречу возвращающемуся после нанесения удара по рабочему инструменту бойку. Далее цикл повторяется.

Работа ударного узла осуществляется при полной синхронизации по времени работы электрической, магнитной и механической подсистем электропривода с помощью заданного алгоритма управления.

Полный рабочий цикл ударного узла при заданном способе управления будет превышать время одного периода напряжения питающего источника, и при частоте $f = 50$ Гц будет обеспечивать синхронную частоту ударов бойка $n_{уд}$ и длительность времени рабочего цикла $t_{уд}$:

$$n_{уд} = \frac{60f}{2p} = 2000 \text{ уд/мин}; t_{уд} = \frac{2p}{f} = 0,03 \text{ с},$$

где $2p = 1,5$ – число периодов напряжения.

В соответствии с цикличностью повторяющихся процессов энергопреобразование рассмотрим только за время одного рабочего цикла на

идентичных процессу интервалах времени в указанной на диаграмме (см. рис. 2) последовательности.

Для упрощения анализа силами сопротивления движению бойка пренебрегаем. Также полагаем, что на момент времени $t = 0$ механическая система обладает определенным начальным запасом кинетической энергии, приобретенной в предыдущем цикле в результате отскока бойка от рабочего инструмента.

Первый этап энергопреобразования совместим со временем возврата бойка после нанесения удара по рабочему инструменту. Данный этап начинается с момента времени $t = 0$ (см. рис. 2) и совпадает со временем подачи импульса напряжения на катушку обратного хода.

На интервале времени $0 \dots t_1$ катушка рабочего хода обладает остаточным запасом магнитной энергии и при выходе бойка из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки процесс энергопреобразования изменится на обратный и будет характеризоваться электромагнитным торможением. Электрическая энергия катушкой рабочего хода не потребляется. Механическая работа внешних сил, затраченная на преодоление электромагнитного торможения бойка, преобразуется в магнитную энергию с последующим преобразованием в электрическую энергию и рекупируется обратно в сеть, компенсируя при этом энергию тепловых потерь катушки рабочего хода.

Уравнение энергетического баланса катушки

$$\Delta w_{м,рх}(x,t) + \int_0^{t_1} f_{эм,рх} v dt = \int_0^{t_1} i_{рх}^2 R_{рх} dt + \Delta w_{эл,рх}(x,t),$$

где $\Delta w_{м,рх}(x,t)$ – остаточная энергия магнитного поля катушки рабочего хода от предыдущего цикла; $f_{эм,рх}$ – электромагнитная сила катушки рабо-

чего хода, равная электромагнитному торможению бойка; v – скорость движения бойка, $i_{рх}^2 R_{рх}$ – мощность тепловых потерь катушки рабочего хода; $i_{рх}$, $R_{рх}$ – соответственно ток и сопротивление катушки рабочего хода; $\Delta w_{эл,рх}(x,t)$ – электрическая энергия, генерируемая в сеть катушкой рабочего хода.

На интервале времени $0 \dots t_2$ (см. рис. 2) движение бойка в направлении инерционного преобразователя осуществляется под действием электромагнитных сил катушки обратного хода с некоторым запасом кинетической энергии приобретенной при отскоке бойка от рабочего инструмента. Электрическая энергия, потребляемая из сети катушкой обратного хода, расходуется на изменение кинетической энергии бойка при его ускорении, компенсацию энергии тепловых потерь и приращение энергии магнитного поля катушки, а также на преодоление внешних сил на интервале $0 \dots t_1$, электромагнитного торможения бойка катушкой рабочего хода.

С учтенным запасом кинетической энергии уравнение баланса энергий катушки обратного хода следует представить в виде

$$\int_0^{t_2} (u_{оx} i_{оx} - i_{оx}^2 R_{оx}) dt + \frac{mv_0^2}{2} = \int_0^{v_2} mv dv + \Delta w_{м,оx}(x,t),$$

где $u_{оx} i_{оx}$ – мощность источника; $u_{оx}$, $i_{оx}$ – соответственно напряжение и ток катушки обратного хода; $\frac{mv_0^2}{2}$ – запасенная кинетическая энергия бойка при отскоке от рабочего инструмента; m , v_0 – соответственно масса и начальная скорость бойка; v_2 – скорость бойка в момент времени t_2 ; $\Delta w_{м,оx}(x,t)$ – энергия магнитного поля катушки обратного хода.

Составляющая $\int_0^{v_2} mv dv$ правой части уравнения

баланса определяет кинетическую энергию бойка в конце интервала, которая составляет

$$\int_0^{v_2} mv dv = \frac{mv_0^2}{2} + \int_0^{t_2} f_{эм,оx} v dt - \int_0^{t_1} f_{эм,рх} v dt,$$

где $\int_0^{t_1} f_{эм,рх} v dt$ – работа электромагнитных сил при торможении бойка катушкой рабочего хода;

$\int_0^{t_2} f_{эм,оx} v dt$ – работа электромагнитных сил катушки обратного хода.

Кинетическая энергия бойка к моменту времени t_2 составляет

$$\int_0^{v_2} mv dv = \frac{mv_2^2}{2}.$$

В момент времени t_2 на катушку обратного хода подается отрицательная полуволна напряжения. Интервал времени $t_2 \dots t_3$ характеризуется выходом бойка из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки обратного хода и его электромагнитным торможением. Процесс энергопреобразования изменится на обратный, так как внешние силы продолжающего движение в направлении инерционного преобразователя бойка превышают электромагнитное усилие разворачивающегося электромагнитного поля катушки.

Ввиду имеющих место сложности и неоднозначности энергопреобразовательного процесса на данном интервале, на который в значительной степени оказывают влияние внешние условия, процесс энергопреобразования может протекать без потребления электрической энергии.

Механическая работа, затраченная на преодоление электромагнитного торможения бойка, преобразуется в магнитную с последующим преобразованием в электрическую энергию и рекуперацией обратно в сеть, компенсируя при этом энергию тепловых потерь катушки

$$\Delta w_{м,оx}(x,t) + \int_{t_2}^{t_3} f_{эм,оx} v dt =$$

$$= \int_{t_2}^{t_3} i_{оx}^2 R_{оx} dt + \Delta w_{эл,оx}(x,t),$$

где $\int_{t_2}^{t_3} f_{эм,оx} v dt$ – механическая работа по преодолению электромагнитного торможению бойка; $\Delta w_{эл,оx}(x,t)$ – электрическая энергия, рекуперированная в сеть.

В приведенном уравнении энергобаланса предполагается, что часть магнитной энергии $\Delta w_{м,оx}(x,t)$, запасенной системой на предыдущем интервале энергопреобразования, может быть также затрачена на покрытие тепловых потерь катушки или частично преобразована в электрическую энергию и рекуперирована обратно в сеть.

В точке a на кривой хода (см. рис. 2), соответствующей времени t_3 , выполняется реверс бойка и изменение скорости его перемещения на противоположную. При реверсе происходит энергообмен ударом между бойком и движущимся ему навстречу с большей массой инерционным преобразователем.

В момент энергообмена ударом инерционный преобразователь также меняет свою скорость дви-

Электромеханические системы

жения на противоположную и его кинетическая энергия полностью переходит в потенциальную при сжатии демпферной пружины

$$\frac{m_{\text{п}} v_{\text{п}}^2}{2} = \int_{x_1}^{x_2} kx dx,$$

где k – коэффициент жесткости пружины; kx – усилие сжатия пружины; $m_{\text{п}}$, $v_{\text{п}}$ – соответственно масса инерционного преобразователя и его начальная скорость в момент удара.

На интервале $t_3 \dots t_4$ (см. рис. 2) движение бойка осуществляется только под действием электромагнитных сил катушки обратного хода в направлении рабочего инструмента. Электрическая энергия, потребляемая из сети катушкой обратного хода, расходуется на изменение кинетической энергии бойка при его ускорении, компенсацию энергии тепловых потерь и приращение энергии магнитного поля катушки. Учитывая, что движение бойка на рассматриваемом интервале осуществляется с начальным запасом кинетической энергии, приобретенной в результате энергообмена при ударе с инерционным преобразователем, уравнение энергобаланса запишется в виде

$$\int_{t_3}^{t_4} (u_{\text{оx}} i_{\text{оx}} - i_{\text{оx}}^2 R_{\text{оx}}) dt + \frac{mv_{\text{н}}^2}{2} = \int_{v_3}^{v_4} mv dv + \Delta w_{\text{м.оx}}(x, t),$$

где $\frac{mv_{\text{н}}^2}{2}$ – кинетическая энергия бойка при энергообмене с инерционным преобразователем.

Полная кинетическая энергия бойка в конце интервала на момент времени t_4 составляет

$$\int_{v_3}^{v_4} mv dv = \frac{mv_{\text{н}}^2}{2} + \int_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.оx}} v dt,$$

где $\int_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.оx}} v dt$ – работа электромагнитных сил

катушки обратного хода по изменению кинетической энергии бойка.

Интервал времени $t_4 \dots t_5$ характеризуется выходом бойка из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки обратного хода и его электромагнитным торможением. За счет имеющего места начального запаса магнитной энергии катушки процесс энергопреобразования изменится на обратный, так как внешние силы движущегося в направлении рабочего инструмента бойка будут превышать усилие его электромагнитного торможения.

На данном интервале электрическая энергия катушкой обратного хода не потребляется. Механическая работа внешних сил, затраченная на преодоление электромагнитного торможения бойка,

преобразуется в магнитную, пополняя имеющийся запас магнитной энергии, с последующим ее преобразованием в электрическую энергию и рекуперацией обратно в сеть, компенсируя при этом энергию тепловых потерь

$$\Delta w_{\text{м.оx}}(x, t) + \int_{t_4}^{t_5} f_{\text{эм.оx}} v dt = \int_{t_4}^{t_5} i_{\text{оx}}^2 R_{\text{оx}} dt + \Delta w_{\text{эл.оx}}(x, t),$$

где $\int_{t_4}^{t_5} f_{\text{эм.оx}} v dt$ – работа внешних сил по электромагнитному торможению бойка.

В этот же период времени, на интервале $t_4 \dots t_6$, импульс напряжения поступает на катушку рабочего хода. Электрическая энергия, потребляемая из сети катушкой рабочего хода, расходуется на изменение кинетической энергии движущегося в направлении рабочего инструмента бойка, компенсацию энергии тепловых потерь, приращение энергии магнитного поля катушки, а также на компенсацию на интервале $t_4 \dots t_5$ электромагнитного торможения бойка катушкой обратного хода

$$\int_{t_4}^{t_6} (u_{\text{рх}} i_{\text{рх}} - i_{\text{рх}}^2 R_{\text{рх}}) dt = \int_{v_4}^{v_6} mv dv + \int_{t_4}^{t_5} f_{\text{эм.оx}} v dt + \Delta w_{\text{м.рх}}(x, t).$$

В момент времени t_6 боёк наносит удар по рабочему инструменту. Кинетическая энергия бойка за полный рабочий цикл будет определяться суммарной работой электромагнитных сил по его перемещению при обратном и рабочем ходе, что будет соответствовать балансу энергий

$$\int_{v_3}^{v_4} mv dv + \int_{v_4}^{v_6} mv dv = \frac{mv_{\text{уд}}^2}{2},$$

где $\frac{mv_{\text{уд}}^2}{2}$ – кинетическая энергия бойка по завершению рабочего цикла; $v_{\text{уд}}$ – предупредная скорость бойка.

Энергия электромагнитной машины, передаваемая рабочему инструменту по завершении рабочего цикла, составляет

$$A_{\text{уд}} = (1 - k_{\text{от}}) \frac{mv_{\text{уд}}^2}{2},$$

где $k_{\text{от}}$ – коэффициент отскока бойка от рабочего инструмента ($k_{\text{от}} = 0, 1 \dots 0, 4$)

Таким образом, увеличение энергии единичного удара в варианте схемы двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерцион-

ным возвратом бойка достигается увеличением времени рабочего цикла и уменьшением частоты ударов бойка.

Практическая значимость

Реализованный алгоритм и способ управления синхронным электромагнитным двигателем, заключающийся в поочередной подачи за время рабочего цикла трех полуволн питающего катушки напряжения, в отличие от известного способа управления, отличается тем, что первые две полуволны подаются на катушку обратного хода, а третья полуволна – на катушку рабочего хода с повторением указанной последовательности подачи полуволн напряжений без паузы между ними.

Новизна предлагаемого технического решения и нового способа управления синхронной электромагнитной машиной ударного действия подтверждена патентом на изобретение [31].

При данном способе управления катушка обратного хода обеспечивает разгон ударной массы в двух направлениях, а катушка рабочего хода – только в одном направлении.

В сравнении с известным способом управления в варианте схемы двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка реализация нового рабочего цикла обеспечивает при условии сохранения энергии удара бойка на прежнем уровне уменьшение влияния работы электропривода на питающую сеть за счет ожидаемого снижения амплитуды тока до 35 %.

Заключение

На примере нового рабочего цикла двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка и реализованного на его основе способа управления выполнен детальный анализ составляющих баланса энергии электромагнитной системы за время полного рабочего цикла энергопреобразования, учитывающего строгую последовательность синхронно взаимодействующих элементов конструкции ударного узла и поступающих на катушки импульсов напряжения питающего однофазного источника промышленной частоты.

Применение нового способа управления, в сравнении с известными, обеспечивает более высокую концентрацию энергии в конце рабочего цикла за счет ее частичной локализации в элементах конструкции колебательной системы ударного узла с последующим ее преобразованием в период рабочего хода в кинетическую энергию движения бойка и энергию ударного импульса.

Реализация нового рабочего цикла в двухкатушечной синхронной электромагнитной машине с инерционным реверсом бойка по сравнению с известным рабочим циклом позволяет повысить энергию единичного удара без увеличения влияния работы электропривода на питающую сеть.

Литература

1. Усанов, К.М. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием / К.М. Усанов, Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин. – Курган: Изд-во Курганского госуниверситета. – 2006. – 284 с.
2. Ряшенцев, Н.П. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. – Новосибирск: Наука. – 1989. – 216 с.
3. Pevchev, V.P. The Superexcitation and Efficiency Relation in a Short-stroke Pulsed Electromagnetic Motor of a Seismic Source / V.P. Pevchev // *Journal of Mining Science*. – 2010. – Vol. 46, no. 6. – P. 656–665. DOI: 10.1007/s10913-010-0083-9
4. Ивашин, В.В. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий / В.В. Ивашин, А.К. Кудинов, В.П. Певчев // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
5. Ряшенцев, Н.П. Электромагнитный привод линейных машин / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. – Новосибирск: Наука. – 1985. – 153 с.
6. Угаров, Г.Г. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем / Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин // *Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки*. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
7. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2015. – № 2. – С. 220–224.
8. Нейман, Л.А. Синхронный электромагнитный механизм для виброударного технологического оборудования // *Справочник. Инженерный журнал с приложениями*. – 2014. – № 6 (207). – С. 17–19.
9. Нейман, Л.А. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // *Электротехника*. – 2014. – № 12. – С. 45–49.
10. Нейман, Л.А. Новые конструктивные решения проблемы точной синхронизации возвратно-поступательного движения бойка неуправляемой электромагнитной машины ударного действия / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2015. – № 2. – С. 280–285.
11. Pevchev, V.P. The Use of Micro-CAP Software to Simulate Operating Processes of Electromechanical Impulse Devices / V.P. Pevchev // *Russian Electrical Engineering*. – 2010. – Vol. 81, no. 4. – P. 213–216. DOI: 10.3103/S1068371210040103
12. Мошкин, В.И. К расчету усилия удержания интегрированного линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин // *Электротехника*. – 2013. – № 8. – С. 60–64. DOI: 10.3103/S1068371213080105
13. Нейман, В.Ю. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного

- фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2011. – № 2. – С. 310–313.
14. Нейман, Л.А. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.
15. Нейман, Л.А. Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.С. Шабанов // *Электротехника*. – 2014. – № 12. – С. 50–53. DOI: 10.3103/S1068371214120104
16. Нейман, Л.А. Исследование перегрузочной способности циклического электромагнитного привода в зависимости от начального превышения температуры в переходных тепловых режимах / Л.А. Нейман // *Электротехника*. – 2014. – № 7. – С. 7–12. DOI: 10.3103/S1068371214070098
17. Нейман, Л.А. Приближенный расчет циклического электромагнитного привода с учетом начального превышения температуры в переходном тепловом процессе нагрева / Л.А. Нейман // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2014. – № 1 (22). – С. 113–122.
18. Оптимизация геометрии линейных электромагнитных двигателей с использованием конечноэлементного моделирования магнитного поля / Ю.Г. Соловейчик, В.Ю. Нейман, М.Г. Персова и др. // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2005. – № 2. – С. 24–28.
19. Нейман, В.Ю. Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2008. – № 6. – С. 21–24.
20. Мошкин, В.И. Об оптимальных условиях энергопреобразования в электромагнитных приводах / В.И. Мошкин, А.А. Егоров, Г.Г. Угаров // *Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки*. – 2005. – № 29. – С. 239–240.
21. Мошкин, В.И. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2012. – № 2 с (66). – С. 130–135.
22. Малинин, Л.И. Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока / Л.И. Малинин, В.Ю. Нейман // *Электротехника*. – 2009. – № 12. – С. 61–67. DOI: 10.3103/S1068371209120128
23. Малинин, Л.И. Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах / Л.И. Малинин, В.Ю. Нейман // *Электричество*. – 2008. – № 6. – С. 57–62.
24. Нейман, Л.А. Анализ процессов энергопреобразования в однокатушечной синхронной электромагнитной машине с двухсторонним выбегом бойка / Л.А. Нейман // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 112–116.
25. Нейман, Л.А. Анализ процессов энергопреобразования в двухкатушечной синхронной электромагнитной машине с инерционным реверсом бойка / Л.А. Нейман // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 157–163.
26. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман и др. // *Транспорт: наука, техника, управление: науч. информ. сб.* – 2010. – № 8. – С. 29–31.
27. Нейман, Л.А. Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
28. Нейман, Л.А. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
29. Нейман, В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин / В.Ю. Нейман // *Автоматизированные электромеханические системы: коллектив. моногр. / под ред. В.Н. Аносова; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–170.*
30. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями // Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
31. Пат. 2472243 Российская Федерация. Способ управления двухкатушечным электромагнитным двигателем ударного действия / В.Ю. Нейман, А.А. Скотников, Л.А. Нейман, Ю.Б. Смирнова; заявитель и патентообладатель Новосиб. гос. техн. ун-т. – № 2011123809/07; заявл. 10.06.2011. – опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.

Нейман Людмила Андреевна, канд. техн. наук, доцент, докторант, кафедра электротехнических комплексов, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; neyman@ngs.ru.

Поступила в редакцию 10 октября 2015 г.

NEW OPERATING CYCLE OF THE TWO-INDUCTOR SYNCHRONOUS IMPACT ELECTROMAGNETIC MACHINE WITH INERTIAL HEAD REVERSE

L.A. Neyman, neyman@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Impact impulse linear electromagnetic machines are widely used in new vibratory impact technologies. Their head oscillation frequency is equal to or multiple of the power-line frequency. It is necessary to increase an impact energy and decrease an influence of the impulse linear electromagnetic machine on a single-phase power-line. This is an actual problem to be solved by developing perspective operating cycles and control algorithms. The paper offers a new variant of two-inductor impact synchronous electromagnetic machine. The head impact mass is accelerated back and forth by electromagnetic forces. A newly developed operating cycle is considered based on an example of the two-inductor impact electromagnetic machine with inertial head reverse, which control method is protected by the patent. This method enables reduction of electric drive influence on the power-line. The energy conversion within the total operating cycle is described with the electromechanical system energy balance with respect to interaction between all elements of the impact node construction. The use of a new control method provides a decrease of the current amplitude. It also reduces an effect of the impulse electromagnetic machine on the power-line because of three voltage half-waves applied to the inductors within an operating cycle.

Keywords: synchronous electromagnetic machine, impact node, electric drive, impact energy, machine operating cycle, electromechanical system energy balance, inertial head reverse, control method.

References

1. Usanov K.M., Ugarov G.G., Moshkin V.I. *Lineynyy impul'snyy elektromagnitnyy privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear Pulse Electromagnetic Drive Machine with Battery]. Kurgan, Kurgan University Publ., 2006. 284 p.
2. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsyn A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic Press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
3. 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. DOI: 10.1007/s10913-010-0083-9
4. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. [Electromagnetic Drives for Pulse and Pulse Vibration Technology]. *Izvestiya VUZ. Elektromekhanika* [Higher School Proceedings. Electromechanics], 2012, no. 1, pp. 72–75. (in Russ.)
5. Ryashentsev N.P., Ryashentsev V.N. *Elektromagnitnyy privod lineynykh mashin* [The Electromagnetic Linear Actuator Machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 153 p.
6. Ugarov G.G., Moshkin V.I. [Prospects for the Development of Power Electromagnetic Pulse System]. *Bulletin of the Kurgan State University. Series: Engineering Technical Science*, 2013, no. 29, pp. 88–90. (in Russ.)
7. Aksyutin V.A., Neyman V.Yu., Skotnikov A.A. [Press Equipment with a Linear Electromagnetic Drive for Mechanization of Technological Processes Shock Assembly and Stamping Small Parts]. *Actual Problems in Mechanical Engineering*, 2015, no. 2, pp. 220–224. (in Russ.)
8. Neyman L.A. [Simultaneous Electromagnetic Mechanism for Vibro-impact Process Equipment]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem* [Directory. Engineers with the Application Log], 2014, no. 6 (207), pp. 17–19. (in Russ.)
9. Neyman L.A., Neyman V.Yu. [Linear Synchronous Electromagnetic Machine for Low-frequency Percussion Technology]. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 45–49. (in Russ.)
10. Neyman L.A., Neyman V.Yu. [The New Design to Solve the Problem Precise Timing of the Reciprocating Movement of the Striker Unguided Electromagnetic Machines Impact]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii* [Actual Problems in Engineering], 2015, no. 2, pp. 280–285. (in Russ.)
11. Pevchev V.P. [The Use of Micro-CAP Software to Simulate Operating Processes of Electromechanical Impulse Devices]. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 4, pp. 213–216. DOI: 10.3103/S1068371210040103

12. Moshkin V.I. [The Calculation of Holding Force of the Integrated Linear Electromagnetic Motor]. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 8, pp. 60–64. (in Russ.) DOI: 10.3103/S1068371213080105
13. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. [On the Method to the Choice of Solenoid for the Constructive Factor]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Transport Scientific Problems in Siberia and Far East], 2011, no. 2, pp. 310–313. (in Russ.)
14. Neyman L.A., Neyman V.Yu. [Application of the Method to Account for the Strength of the Conductivities 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. (in Russ.)
15. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. [Simplified Calculation of the Electromagnetic Shock Drive Intermittent Operation]. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 50–53. (in Russ.) DOI: 10.3103/S1068371214120104
16. Neyman L.A. [The Study of Cyclic Overload Capacity Electromagnetic Drive Depending on the Initial Temperature Rise in the Transient Thermal Conditions]. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 7, pp. 7–12. (in Russ.) DOI: 10.3103/S1068371214070098
17. Neyman L.A. [An Approximate Calculation of the Cyclic Magnetic Drive with Discounted Initial Temperature Rise in the Transient Thermal Heating Process]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii* [Reports of the Sciences Academy of Higher School of the Russian Federation], 2014, no. 1 (22), pp. 113–122. (in Russ.)
18. Soloveychik Yu.G., Neyman V.Yu., Persova M.G., Royak M.E., Smirnova Yu.B., Petrov R.V. [Optimization of the Geometry of Linear Electromagnetic Motors Using Finite Element Modeling of the Magnetic Field]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of the Universities. Electromechanics], 2005, no. 2, pp. 24–28. (in Russ.)
19. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. [The Indicator of the Power Efficiency of an Electromagnet DC through Simulation of the Magnetic Field]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: Science, Technology, Management], 2008, no. 6, pp. 21–24. (in Russ.)
20. Moshkin V.I., Egorov A.A., Ugarov G.G. [Optimal Conditions of Energy Conversion in Electromagnetic Actuators]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Kurgan State University. Series: Technical Science], 2005, no. 29, pp. 239–240. (in Russ.)
21. Moshkin V.I., Ugarov G.G. [Energy Efficiency and Dynamic Two-winding Linear Electromagnetic Motors with Spring Return]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University], 2012, no. 2 s (66), pp. 130–135. (in Russ.)
22. Malinin L.I., Neyman V.Yu. [Limit the Power of the Electromagnetic Characteristics of DC Motors]. *Russian Electrical Engineering*, 2009, no. 12, pp. 61–67. (in Russ.) DOI: 10.3103/S1068371209120128
23. Malinin L.I., Neyman V.Ju. [Definition of Energy Conversion and Voltage Electromagnetic Forces in Electromechanical Systems]. *Electricity*, 2008, no. 6, pp. 57–62. (in Russ.)
24. Neyman L.A. [Analysis of the Processes of Energy Conversion in the Single Coil of an Electromagnetic Synchronous Machine with Double Coast Striker]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [News of The Tomsk Polytechnic University], 2013, no. 4, T323, pp. 112–116. (in Russ.)
25. Neyman L.A. [Analysis of the Processes of Energy Conversion in Two-winding Synchronous Electromagnetic Machine Inertial Reverse Striker]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [News of the Tomsk Polytechnic University], 2014, vol. 325, no. 4, pp. 157–163. (in Russ.)
26. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. [Ways to Improve the Energy Performance of One-winding Pulse Devices with Electromagnetic Excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: Science, Technology, Management: Scientific Information Proceedings], 2010, no. 8, pp. 29–31. (in Russ.)
27. Neyman L.A., Neyman V.Yu. [Duty Cycle of Two-winding synchronous Electromagnetic Machine with Coasting Striker]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of the Universities. Electromechanics], 2013, no. 6, pp. 48–52. (in Russ.)
28. Neyman L.A., Neyman V.Yu. [Low-frequency Electromagnetic Drum Machines and Technologies]. *Aktual'nye problemy v mashino-stroenii* [Actual Problems in Mechanical Engineering], 2014, no. 1, pp. 256–259. (in Russ.)
29. Neyman V.Yu. [On the Question of the Rationalization of Business Processes and the Selection of Design Schemes Electromagnetic Drum Machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy: kollektivnaya monografiya* [Automated Electromechanical Systems: Collective Monograph], Novosibirsk State Technical University, Anosova V.N. (Ed). Novosibirsk, NGTU Publ., 2004, pp. 155–170. (in Russ.)

30. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malov A.T. *Elektroprivod s lineynymi elektromagnitnymi dvigatelyami* [Electrodrive with Linear Electromagnetic Motor]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 150 p.

31. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A., Smirnova Yu.B. *Sposob upravleniya dvukhkatushechnym elektromagnitnym dvigatelem udarnogo deystviya* [A Method of Controlling an Electromagnetic Motor Two-winding Percussion]. Patent RF 2472243 RF, no. 2011123809/07; decl. 10.06.2011; publ. 10.01.2013, Bul. no. 1.

Received 10 October 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Нейман, Л.А. Новый рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка / Л.А. Нейман // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 72–81. DOI: 10.14529/power160210

FOR CITATION

Neyman L.A. New Operating Cycle of the Two-Inductor Synchronous Impact Electromagnetic Machine with Inertial Head Reverse. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 72–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160210
