

УДК 621.313.282.2

**РАБОЧИЙ ЦИКЛ ДВУХКАТУШЕЧНОЙ СИНХРОННОЙ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ  
С УПРУГИМ РЕВЕРСОМ БОЙКА****Л.А. Нейман***Новосибирский государственный технический университет*

Электромагнитные машины возвратно-поступательного движения широко используются в промышленности для обеспечения многих технологических процессов при пластической деформации и разрушении материалов. Учитывая современные требования в вопросах энергосбережения, особый интерес представляют низкочастотные синхронные электромагнитные машины ударного действия, для которых частота ударных импульсов сил равна или кратна частоте питающего источника. Актуальность проводимых исследований обусловлена необходимостью улучшения электромагнитной совместимости работы электромагнитной машины при питании от промышленного однофазного источника электроэнергии и повышения эффективности ее использования в технологических процессах, что в первую очередь связано с изучением механизма процесса электромеханического преобразования энергии за время рабочего цикла машины. В качестве объекта исследований рассматривается известный вариант двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с упругим реверсом бойка, получающей питание от однофазного источника напряжения частотой 50 Гц по однополупериодной схеме выпрямления. На основе баланса энергий электромеханической системы рассмотрен процесс энергопреобразования за полный рабочий цикл машины, учитывающий взаимодействие между всеми элементами конструкции ударного узла при ускорении бойка в магнитном поле, создаваемом системой из двух катушек. Реализация рабочего цикла в двухкатушечном варианте синхронной электромагнитной машины с упругим реверсом бойка позволяет обеспечить снижение амплитуды тока и влияние работы машины на питающую сеть за счет подачи двух импульсов напряжения в течение времени рабочего цикла.

*Ключевые слова:* синхронная электромагнитная машина, двухкатушечный ударный узел, электропривод, энергия удара, рабочий цикл машины, баланс энергии электромеханической системы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-73-83

**Введение**

Линейные электромагнитные машины возвратно-поступательного движения широко используются в промышленности для обеспечения технологических процессов и производств при пластической деформации и разрушении материалов ударом [1–7].

Также известно применение электромагнитного привода в вибрационных и виброударных машинах и устройствах различного технологического назначения [8–13].

Среди многочисленного класса электромагнитных машин следует выделить синхронные электромагнитные машины ударного действия (СЭМУД) с энергией удара до 50 Дж и частотой хода бойка до 3000 ход/мин [14, 15]. Для данного класса машин синхронная частота механических колебаний ударной массы бойка всегда равна или кратна частоте питающей сети.

Тенденция преимущественного применения вариантов схем СЭМУД подробно рассмотрена в [16, 17].

Несмотря на то что данный класс машин широко известен, методы по расчету и проектированию синхронных машин по-прежнему востребованы и продолжают совершенствоваться [18, 19]. В особенности это относится к анализу рабочих процессов, определяющих эффективность энергопреобразования в рабочем цикле машины при передаче энергии ударом [20].

Среди вариантов схем известность получили двухкатушечные синхронные электромагнитные машины, реализующие рабочий цикл с упругим реверсом бойка [16]. Синхронизация возвратно-поступательного движения бойка с питающим напряжением источника, поочередно подаваемым на катушки, осуществляется при постоянном воздействии на боек электромагнитных сил. Известно, что реализация рабочих циклов с постоянным воздействием на боек электромагнитных сил позволяет получать устойчивые режимы работы в широком диапазоне коэффициента отскока бойка от рабочего инструмента за счет перекрытия времени действия электромагнитного усилия, создаваемого системой катушек [21].

Недостаточная изученность рабочих процессов двухкатушечных электромагнитных машин с упругим реверсом бойка, а также вопросов электромеханического преобразования энергии ограничивает возможности данного варианта схемы в повышении эффективности его использования в технологических процессах.

Целью настоящей работы является анализ процессов энергопреобразования в двухкатушечной синхронной электромагнитной машине с упругим реверсом бойка.

### 1. Ударный узел двухкатушечной СЭМУД с безынерционным упругим реверсом бойка

Вариант исполнения ударного узла двухкатушечной СЭМУД с безынерционным упругим звеном в виде цилиндрической пружины приведен на рис. 1.

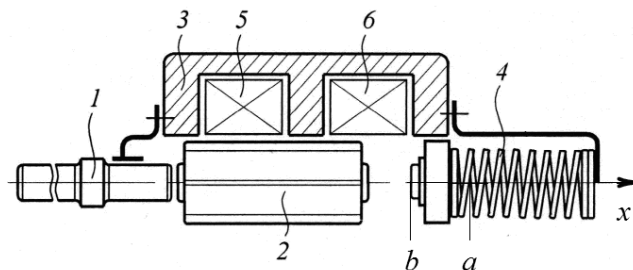


Рис. 1 – Вариант исполнения двухкатушечной СЭМУД с упругим реверсом бойка

Fig. 1 – The version of the two-coil SEMUD with an elastic reversal striker

Ударный узел СЭМУД (рис. 1), объединяющий в себе элементы магнитной и механической подсистем, содержит: рабочий инструмент – 1; определяющий ударную массу боек – 2; магнитопровод – 3; реверсирующее устройство в виде безынерционного упругого звена (цилиндрическую пружину) – 4; намагничивающие катушки рабочего – 5 и обратного – 6 хода.

Работа ударного узла осуществляется в следующем порядке. При подаче импульса напряжения на катушку 6 обратного хода боек 2 под действием электромагнитных сил разворачивающегося магнитного поля катушки 6 обратного хода

разгоняется в направлении упругого звена 4 и сжимает пружину. В этот период времени подается импульс напряжения на катушку 5 рабочего хода. Боек 2 совершает остановку в точке с координатой  $a$  (рис. 1), меняет свою скорость движения на противоположную. Под действием электромагнитных сил катушки рабочего хода 5 и запасенной потенциальной энергии упругого звена 4 боек 2 ускоренно перемещается в направлении рабочего инструмента 1 и наносит по нему удар. Далее цикл повторяется.

Работа ударного узла осуществляется при полной синхронизации по времени работы электрической, магнитной и механической подсистем ударного узла. Полный рабочий цикл ударного узла осуществляется за время одного периода напряжения, что при частоте  $f = 50$  Гц обеспечивает синхронную частоту ударов

бойка  $n_{\text{уд}} = \frac{60f}{2p} = 3000$  уд/мин и длительность времени рабочего цикла

$t_{\text{ц}} = \frac{2p}{f} = 0,02$  с, где  $2p = 1$  – число периодов напряжения в течение времени рабочего цикла.

## 2. Рабочий цикл СЭМУД с упругим реверсом бойка

Рабочий цикл электромагнитной машины представлен на рис. 2 в виде диаграммы перемещения бойка –  $x$ , напряжения  $u_{\text{рх}}$ ,  $u_{\text{ох}}$  и тока  $i_{\text{рх}}$ ,  $i_{\text{ох}}$  катушек рабочего и обратного хода, получающих питание от полуволн напряжения переменного однофазного источника промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления.

Энергопреобразование по свойственным рабочему циклу процессам и идентичности повторения рассмотрим для фиксированных интервалов их следования. Для упрощения анализа силами сопротивления движению бойка пренебрегаем. Также полагаем, что при условии цикличности работы на момент времени  $t = 0$  механическая система обладает некоторым запасом кинетической энергии, приобретенной в предыдущем цикле при отскоке бойка от рабочего инструмента.

Первый этап рабочего цикла совместим со временем обратного хода бойка. Данный этап начинается с момента времени  $t = 0$  и совпадает со временем подачи импульса напряжения  $u_{\text{ох}}$  на катушку обратного хода (рис. 2).

Период времени  $0 \dots t_3$  характеризуется ускоренным движением бойка под действием электромагнитных сил катушки обратного хода в направлении безынерционного упругого звена. Одновременно на интервале  $0 \dots t_1$  при выходе бойка из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки рабочего хода процесс энергопреобразования изменится на обратный. Данный период времени будет характеризоваться электромагнитным торможением бойка катушкой рабочего хода; при этом электрическая энергия из сети катушкой не потребляется. Работа катушки рабочего хода на интервале  $0 \dots t_1$  осуществляется в генераторном режиме. Механическая работа внешних сил, затраченная на преодоление электромагнитного торможения бойка, преобразуется в магнитную с последующим преобразованием в электрическую энергию и рекупируется обратно в сеть, компенсируя при этом энергию тепловых потерь. Уравнение энергетического баланса катушки рабочего хода на данном промежутке времени

$$\Delta w_{\text{м.рх}}(x, t) + \int_0^{t_1} f_{\text{эм.рх}} v dt = \int_0^{t_1} i_{\text{рх}}^2 r_{\text{рх}} dt + \Delta w_{\text{эл.рх}}(x, t), \quad (1)$$

где  $\Delta w_{м.рх}(x, t)$  – энергия магнитного поля катушки рабочего хода, запасенная в предыдущем цикле;  $f_{эм.рх}$  – электромагнитная сила катушки рабочего хода;  $v$  – скорость движения бойка;  $i_{рх}^2 r_{рх}$  – мощность тепловых потерь катушки;  $\Delta w_{эл.рх}(x, t)$  – электрическая энергия, генерируемая обратно в сеть катушкой рабочего хода.

На интервале времени  $0 \dots t_2$  (рис. 2) движение бойка в направлении безынерционного упругого звена осуществляется с некоторым запасом кинетической энергии, приобретенной после его отскока от рабочего инструмента.

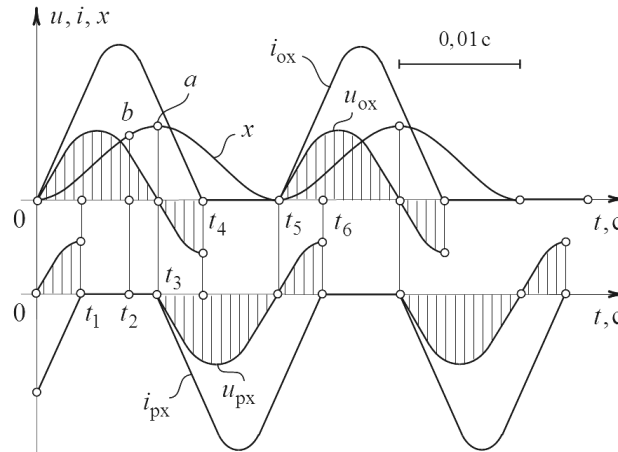


Рис. 2 – Рабочий цикл двухкатушечной СЭМУД с упругим реверсом бойка

Fig. 2 – Working cycle of a two-coil SEMUD with an elastic reversal of a striker he working cycle of a two-inductor SESM

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 обратного хода, а также на компенсацию на интервале времени  $0 \dots t_1$  внешней силы электромагнитного торможения бойка катушкой рабочего хода.

Для данного интервала времени уравнение баланса энергий системы с учетом компенсации энергии электромагнитного торможения бойка следует представить в виде

$$\int_0^{t_2} (u_{ox} i_{ox} - i_{ox}^2 r_{ox}) dt = \int_{v_0}^{v_2} m v dv + \int_0^{t_1} f_{эм.рх} v dt + \Delta w_{м.ox}(x, t), \quad (2)$$

где  $u_{ox} i_{ox}$  – мощность источника;  $i_{ox}^2 r_{ox}$  – мощность тепловых потерь катушки обратного хода;  $m, v_0$  – соответственно масса бойка и его начальная скорость в момент времени  $t = 0$ , т. е. в начале рабочего цикла;  $v_2$  – скорость бойка на момент времени  $t_2$ ;  $\Delta w_{м.ox}(x, t)$  – приращение энергии магнитного поля катушки обратного хода.

В уравнении баланса (2) составляющая  $\int_0^{t_1} f_{\text{эм.рх}} v dt$  определяет энергию, затраченную на компенсацию усилия электромагнитного торможения бойка катушкой рабочего хода, а составляющая  $\int_{v_0}^{v_2} mv dv$  определяет кинетическую энергию бойка, равную работе электромагнитных сил катушки обратного хода при ускорении бойка

$$\int_{v_0}^{v_2} mv dv = \int_0^{t_2} f_{\text{эм.ох}} v dt - \int_0^{t_1} f_{\text{эм.рх}} v dt, \quad (3)$$

где  $\int_0^{t_2} f_{\text{эм.ох}} v dt$  – полная работа электромагнитных сил катушки обратного хода.

Здесь следует отметить, что в зависимости от внешних условий, определяющих начальную скорость бойка  $v_0$  (при ненулевых начальных условиях), компенсация усилия электромагнитного торможения бойка может также выполняться за счет составляющей кинетической энергии бойка  $\frac{mv_0^2}{2}$ , приобретенной при отскоке от рабочего инструмента.

В этом случае к моменту времени  $t_2$  в точке с координатой положения бойка  $x_2 = b$  (рис. 2) и при наличии внешнего импульса силы, направленного согласно с электромагнитным усилием катушки, его кинетическая энергия достигает значения

$$\frac{mv_0^2}{2} + \int_{v_0}^{v_2} mv dv = \frac{mv_2^2}{2}. \quad (4)$$

На интервале времени  $t_2 \dots t_3$  в диапазоне перемещения бойка  $x_2 \dots x_3$  вся его кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию при сжатии упругого звена:

$$\frac{mv_0^2}{2} + \int_{v_0}^{v_2} mv dv + \int_{v_2}^{v_3} mv dv = \int_{x_2=b}^{x_3=a} kx dx, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент жесткости;  $kx$  – усилие сжатия упругого звена (пружины).

Таким образом, принимая во внимание (2)–(5), уравнение энергетического баланса за время движения на интервале времени  $0 \dots t_3$  можно записать в виде

$$\int_0^{t_3} (u_{\text{ох}} i_{\text{ох}} - i_{\text{ох}}^2 r_{\text{ох}}) dt + \frac{mv_0^2}{2} = \int_{x_2=b}^{x_3=a} kx dx + \int_0^{t_1} f_{\text{эм.рх}} v dt + \Delta w_{\text{м.ох}}(x, t). \quad (6)$$

В точке  $a$  на кривой хода бойка (рис. 2), соответствующей моменту времени  $t_3$ , выполняется остановка и реверс бойка. Скорость движения бойка меняется на противоположную.

На интервале времени  $t_3 \dots t_4$  электрическая энергия катушкой обратного хода не потребляется. Процесс энергопреобразования изменится на обратный, так как внешние силы движущегося в сторону рабочего инструмента бойка за счет электромагнитного усилия разворачивающегося магнитного поля катушки рабочего хода и силы упругого звена, обладающего запасом потенциальной энергии, будут превышать усилие в рабочем зазоре катушки обратного хода, имеющей некоторый запас магнитной энергии. Данный период времени будет характеризоваться электромагнитным торможением бойка. Механическая работа внешних сил, затраченная на преодоление электромагнитного торможения, преобразуется в магнитную энергию, пополняя имеющийся на данный момент времени запас магнитной энергии катушки с последующим ее преобразованием в электрическую энергию и рекуперацией в сеть, компенсируя при этом энергию тепловых потерь

$$\Delta w_{\text{м.ох}}(x, t) + \int_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v dt = \int_{t_3}^{t_4} i_{\text{ох}}^2 r_{\text{ох}} dt + \Delta w_{\text{эл.ох}}(x, t). \quad (7)$$

В тот же период на интервале времени  $t_3 \dots t_5$  электрическая энергия поступает в катушку рабочего хода и боек ускоренно перемещается в направлении рабочего инструмента. При этом электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется на изменение кинетической энергии бойка, компенсацию энергии тепловых потерь катушки, приращение энергии магнитного поля и компенсацию на интервале  $t_3 \dots t_4$  внешней силы при электромагнитном торможении бойка катушкой обратного хода:

$$\int_{t_3}^{t_5} (u_{\text{рх}} i_{\text{рх}} - i_{\text{рх}}^2 r_{\text{рх}}) dt + \int_{x_2=b}^{x_3=a} kx dx = \int_{v_3=0}^{v_5} mv dv + \int_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v dt + \Delta w_{\text{м.рх}}(x, t). \quad (8)$$

Первый член правой части баланса (8) определяет кинетическую энергию бойка на момент нанесения удара по рабочему инструменту:

$$\int_{v_3=0}^{v_5} mv dv = \int_{x_2=b}^{x_3=a} kx dx + \int_{t_3}^{t_5} f_{\text{эм.рх}} v dt - \int_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v dt. \quad (9)$$

В балансе (9) составляющая  $\int_{t_3}^{t_5} f_{\text{эм.рх}} v dt$  есть работа электромагнитных сил катушки рабочего хода по увеличению кинетической энергии бойка и компенсации

на интервале времени  $t_3 \dots t_4$  усилия электромагнитного торможения бойка катушкой обратного хода.

Второй член  $\int_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v dt$  правой части баланса (8) определяет энергию, затра-

ченную на компенсацию электромагнитного торможения бойка катушкой обратного хода.

В момент времени  $t_5$  (рис. 2) боек наносит удар по рабочему инструменту. Далее цикл повторяется. Таким образом, ударная масса бойка приобретает необходимую кинетическую энергию за счет подачи двух импульсов напряжения питающего источника.

Кинетическая энергия бойка за полный цикл будет определяться запасенной потенциальной энергией упругого безынерционного звена и работой электромагнитных сил катушки рабочего хода по увеличению кинетической энергии бойка при его ускорении в направлении рабочего инструмента:

$$\int_{v_3=0}^{v_5} mv \, dv = \frac{mv_{уд}^2}{2},$$

где  $\frac{mv_{уд}^2}{2}$  – кинетическая энергия бойка, приобретенная по завершению рабочего цикла;  $v_{уд} = v_5$  – скорость бойка на момент удара по рабочему инструменту.

Следует указать, что в момент удара бойка по рабочему инструменту передается только часть кинетической энергии, другая часть в виде кинетической энергии при отскоке бойка используется в следующем рабочем цикле энергопреобразования. Энергия, передаваемая рабочему инструменту ударом, составляет

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

где  $k_{от} = \frac{v_0}{v_{уд}}$  – коэффициент отскока бойка от рабочего инструмента.

Величина кинетической энергии бойка при отскоке от рабочего инструмента и передаваемая обратно в механическую колебательную для использования в следующем рабочем цикле систему будет составлять

$$\frac{mv_0^2}{2} = k_{от}^2 \frac{mv_{уд}^2}{2}.$$

Реализация рабочего цикла позволяет получать частоту ударов, равную частоте питающей сети. Постоянное воздействие на боек электромагнитных сил за счет перекрытия времени действия тягового усилия, с одной стороны, обеспечивает устойчивые режимы при работе в широком диапазоне изменений коэффициента отскока бойка от рабочего инструмента, с другой стороны, приводит к некоторому снижению коэффициента полезного действия, связанного с электромагнитным торможением бойка.

### Заключение

На основе баланса энергий электромеханической системы СЭМУД рассмотрен процесс энергопреобразования за полный рабочий цикл, учитывающий синхронность во взаимодействии между всеми элементами конструкции ударного узла при ускорении бойка в магнитном поле, создаваемом системой из двух катушек, получающих питание от однофазного источника промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления.

При кажущейся простоте решения в вопросе преобразования электрической энергии в кинетическую энергию поступательно движущейся массы бойка показано, что с точки зрения описания электромеханических процессов двухкатушечная синхронная электромагнитная машина представляет собой сравнительно сложную динамическую и многофункциональную систему.

В сравнении с однокатушечными электромагнитными машинами при одинаковой частоте и энергии ударов использование двухкатушечных электромагнит-

ных машин с упругим реверсом бойка обеспечивает разгон ударной массы бойка за два импульса напряжения, что позволяет снизить амплитуду тока и влияние работы ударного узла СЭМУД на питающую сеть.

Применение двухкатушечной системы с безынерционным упругим звеном позволяет получать ударную мощность за цикл, превосходящую импульсную мощность источника.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
2. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. 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 Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.
4. 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.
5. **Певчев В.П., Ивашин В.В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
6. **Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. – 220 с.
7. **Малинин Л.И., Нейман В.Ю.** Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 61–67.
8. **Павленко А.В., Гильмияров К.Р., Большенко И.А.** Управление электромагнитным приводом клапана газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания // Электротехника. – 2014. – № 5. – С. 40–46.
9. **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.
10. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Исследование виброударного режима в электромеханических реактивных преобразователях // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 23–27.
11. **Павленко А.В., Гильмияров К.Р.** Управление резонансным электромагнитным приводом клапана газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания с использованием методов нечеткой логики // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 55–60.
12. **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.
13. **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.
14. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
15. **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.
16. **Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А.** Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.



17. Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А. Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитных машин для импульсных технологий // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II международной научно-практической конференции. – Саратов, 2011. – С. 271–277.
18. 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.
19. Оптимизация геометрии линейных электромагнитных двигателей с использованием конечноэлементного моделирования магнитного поля / Ю.Г. Соловейчик, В.Ю. Нейман, М.Г. Персова, М.Э. Рояк, Ю.Б. Смирнова, Р.В. Петров // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 24–28.
20. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
21. 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.

## AN OPERATING CYCLE OF THE TWO-INDUCTOR IMPACT SYNCHRONOUS ELECTROMAGNETIC MACHINE WITH SPRING HEAD REVERSE

**Neyman L.A.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Reciprocating electromagnetic machines are widely used in many industrial technological processes for material plastic deformation and disruption. With respect to modern energy saving requirements, low-frequency impact synchronous electromagnetic machines attract much attention as their impact pulse frequency is equal to or multiple of the source frequency. The relevance of the research is caused by the need to improve an electromagnetic compatibility of the electromagnetic machine powered by an industrial single-phase source. It is necessary to study the electromechanical energy conversion process during the machine operating cycle. The two-inductor impact synchronous electromagnetic machine with the spring head reverse powered by a 50 Hz single-phase voltage source with a half-wave rectifier is considered. The energy conversion process over the total operating cycle based on the energy balance of the electromechanical system is considered. The interaction between all elements of the impact unit is taken into account when the head is accelerated by the magnetic field generated by the two-inductor system. The implementation of the operating cycle in the two-inductor synchronous electromagnetic machine with the spring head reverse makes it possible to reduce current amplitude and suppress electromagnetic machine influence on the mains by applying two voltage pulses during the operating cycle.

*Keywords:* synchronous electromagnetic machine, two-inductor impact unit, electric drive, impact energy, machine operating cycle, electromechanical system energy balance.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-73-83

## REFERENCES

1. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
2. 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.

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. Aksyutin V.A., Neyman L.A., Neyman V.Yu., Skotnikov A.A. Pressovoe oborudovanie s lineinym elektromagnitnym privodom dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov udarnoi sborki i shtampovki melkikh izdelii [Forging equipment with a linear electromagnetic motor for the mechanization of processes of impact assembly and stamping small parts]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 220–224.
5. Pevchev V.P., Ivashin V.V. *Proektirovanie moshchnykh korotkikhodovykh impul'snykh elektromagnitnykh dvigatelei* [Powerful short-pulse pulsed electromagnetic motors], Tol'yatti, TSU Publ., 2012. 142 p.
6. Moshkin V.I., Neyman V.Yu., Ugarov G.G. *Impul'snye lineinye elektromagnitnye dvigateli* [Pulse linear electromagnetic motors]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2010. 220 p.
7. Malinin L.I., Neyman V.Yu. Predel'nye silovye kharakteristiki elektromagnitnykh dvigatelei postoyannogo toka [Limiting power characteristics of electromagnetic direct-current motors]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2009, no. 12, pp. 61–67. (In Russian).
8. Pavlenko A.V., Gil'miyarov K.R., Bol'shenko I.A. Upravlenie elektromagnitnym privodom klapana gazoraspredelitel'nogo mekhanizma dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Control of the electromagnetic drive of the valve of the gas-distributing mechanism of the internal combustion engine]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 5, pp. 40–46. (In Russian).
9. 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.
10. Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Issledovanie vibroudarnogo rezhima v elektromekhanicheskikh reaktivnykh preobrazovatelyakh [Investigation of the vibro-impact regime in electromechanical reactive converters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2010, no. 2, pp. 23–27.
11. Pavlenko A.V., Gil'miyarov K.R. Upravlenie rezonansnym elektromagnitnym privodom klapana gazoraspredelitel'nogo mekhanizma dvigatelya vnutrennego sgoraniya s ispol'zovaniem metodov nechetkoi logiki [Controlling the resonant electromagnetic drive of the valve of the gas distribution mechanism of an internal combustion engine using fuzzy logic methods]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki – University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2011, no. 4, pp. 55–60.
12. 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.
13. 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.
14. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsiionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.
15. 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.
16. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. Strukturnyi analiz sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya [Structural analysis of synchronous electromagnetic shock machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy*. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 106–120.

17. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. [Trends in the development of synchronous two-winding electromagnetic machines for impulse technologies]. *Aktual'nye problemy energetiki APK: materialy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of power engineering of the agroindustrial complex: materials II international scientific-practical conference]. Saratov, 2011, pp. 271–277.
18. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Povyshenie tochnosti analiticheskogo rascheta radial'nykh sil odностороннего магнитного притяжения некоаксильных элементов магнитопровода [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.
19. Soloveichik Yu.G., Neyman V.Yu., Persova M.G., Royak M.E., Smirnova Yu.B., Petrov R.V. Optimizatsiya geometrii lineinykh elektromagnitnykh dvigatelei s ispol'zovaniem konechnoelementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Optimization of geometry linear electromagnetic motors using finite element modeling of the magnetic field]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2005, no. 2, pp. 24–28.
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny so svobodnym vybegom boika [The working cycle of a two-coil synchronous electromagnetic machine with a free run-out of a striker]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 48–52.
21. 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.

## 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. Email: neyman31@gmail.com).

**Neyman Lyudmila Andreevna** (b. 1966) – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Electrotechnological Units Department of the Novosibirsk State Technical University. Research interests: linear synchronous electromagnetic machine and technology. She is author of 100 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: neyman31@gmail.com).

Статья поступила 15 мая 2017 г.  
Received May 15, 2017

## To Reference:

Neyman L.A. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s uprugim reversom boika [Operating cycle of the two-inductor impact synchronous electromagnetic machine with spring head reverse]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2017, no. 2(35), pp. 73–83. doi: 10.17212/1727-2769-2017-2-73-83