

УДК 621.313.282.2

**РАБОЧИЙ ЦИКЛ ДВУХКАТУШЕЧНОЙ СИНХРОННОЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ СО СВОБОДНЫМ ВЫБЕГОМ
БОЙКА В КАТУШКЕ ПРЯМОГО ХОДА****Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман***Новосибирский государственный технический университет*

Механизмы и устройства, использующие импульсный электромагнитный привод 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 однофазного источника. Актуальность проводимых исследований обусловлена необходимостью улучшения электромагнитной совместимости работы электропривода при питании от промышленного однофазного источника электроэнергии, что в первую очередь связано с изучением механизма процесса электромеханического преобразования энергии за время рабочего цикла машины. В качестве объекта исследований рассматривается вариант двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, получающей питание от однофазного источника напряжения частотой 50 Гц. На основе баланса энергий электромеханической системы рассмотрен процесс энергопреобразования за полный рабочий цикл, учитывающий взаимодействие между всеми элементами конструкции ударного узла при ускорении ударной массы бойка в магнитном поле, создаваемом системой из двух катушек. Реализация рабочего цикла в двухкатушечной синхронной электромагнитной машине со свободным выбегом бойка, в сравнении с известным рабочим циклом, позволяет обеспечить снижение амплитуды тока и уменьшение влияния работы импульсной электромагнитной машины на питающую сеть. Применение рабочего цикла машины улучшает электромагнитную совместимость при питании от однофазного промышленного источника электроэнергии. Улучшение достигается за счет подачи на катушки трех полувольт напряжения в течение времени рабочего цикла.

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

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-70-81

Введение

Механизмы и устройства, использующие импульсный электромагнитный привод возвратно-поступательного движения, широко используются в промышленности для обеспечения технологических процессов и производств при пластической деформации и разрушении материалов ударом [1–5]. Также широкое применение получил электромагнитный привод в вибрационных и виброударных машинах и устройствах различного технологического назначения [6–11].

Методы расчета механизмов и устройств с электромагнитным приводом постоянно развиваются и совершенствуются [12–21].

При разработке новых виброударных технологий различного назначения практическое применение получили синхронные электромагнитные машины ударного действия (СЭМУД), в которых синхронная частота механических колебаний ударной массы бойка равна или кратна частоте питающей сети [22–25].

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что применение синхронных электромагнитных машин в некоторых случаях обеспечивает не только экономические выгоды (они просты в устройстве, обладают высокой надежностью и большим рабочим ресурсом, имеют малые габариты и массу), но и обладают возможностью снижения энергопотребления при работе в резонансных и околорезонансных режимах [22].

Тенденция преимущественного применения вариантов схем электромагнитных машин ударного действия подробно рассмотрена в [26, 27].

Среди вариантов схем известность получили двухкатушечные синхронные электромагнитные машины, реализующие рабочий цикл со свободным выбегом бока в катушке прямого хода [28].

Несмотря на то что данный вариант схемы электромагнитной машины давно известен, практического применения он не получил. Прежде всего это связано с недостаточной изученностью рабочих процессов двухкатушечных электромагнитных машин со свободным выбегом бойка, а также вопросов электромеханического преобразования энергии.

Целью настоящей работы является анализ процессов энергопреобразования в двухкатушечной синхронной электромагнитной машине со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода.

1. Ударный узел двухкатушечной СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода

Один из возможных вариантов исполнения электромагнитного ударного узла, объединяющего элементы магнитной и механической подсистемы, двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, приведен на рис. 1.

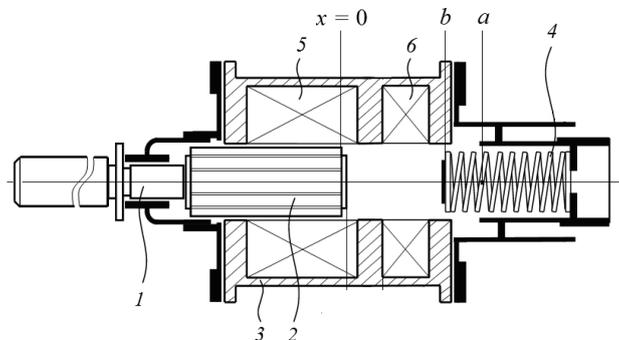


Рис. 1 – Вариант исполнения двухкатушечной СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода

Fig. 1 – A version of the two-inductor SESM with a free head running-out in the driving stroke inductor

В соответствии с реализованным способом управления на рис. 2 приведен рабочий цикл СЭМУД в виде диаграммы перемещения бойка x , напряжения $u_{рх}$, $u_{ох}$ и тока $i_{рх}$, $i_{ох}$ катушек прямого (рабочего) и обратного хода, получающих питание от полуволн напряжения переменного однофазного источника промышленной частоты согласно с заданным алгоритмом управления.

Ударный узел (рис. 1) содержит: рабочий инструмент I ; ударную массу – боек 2 ; магнитопровод 3 ; выполненное в виде упругого звена (пружины) ревер-

сирующее устройство 4; размещенные внутри магнитопровода 3 катушки прямого 5 и обратного 6 хода. Наличие упругого звена 4 обеспечивает гарантированную остановку бойка 2 и его ускорение при движении в направлении рабочего инструмента.

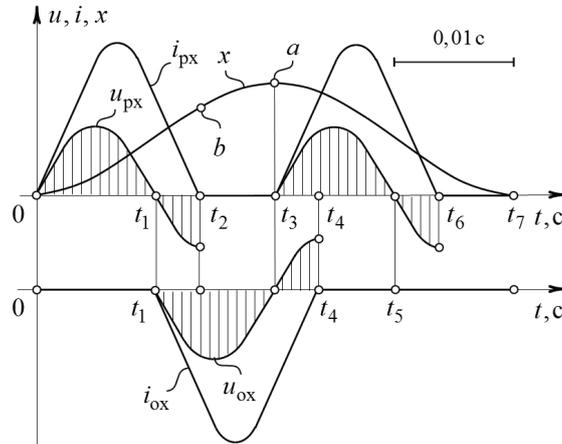


Рис. 2 – Рабочий цикл двухкатушечной СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода

Fig. 2 – The operating cycle of the two-inductor SEMSA with a free running-out in the working stroke inductor

Для реализации рабочего цикла со свободным выбегом бойка применяется система из двух катушек [25, 29]. Катушка прямого хода обеспечивает разгон ударной массы бойка в двух направлениях, а катушка обратного хода – только в одном направлении.

Свободный выбег бойка осуществляется за счет создания паузы в подаче импульсов напряжения на катушку прямого хода. Боек приобретает необходимую кинетическую энергию за счет подачи трех электрических импульсов напряжения за время рабочего цикла, равного по длительности двум периодам напряжения источника электроэнергии.

Работа ударного узла осуществляется в следующем порядке. При подаче импульса напряжения на катушку 5 прямого хода боек 2 под действием электромагнитных сил разворачивающегося магнитного поля катушки 5 прямого хода разгоняется в направлении упругого звена 4. При выходе бойка 2 из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки 5 прямого хода подается импульс напряжения на катушку 6 обратного хода, под действием электромагнитных сил которой боек 2 ускоренно движется в направлении упругого звена 4 и сжимает пружину. После остановки боек 2 под действием усилия сжатой пружины выполняет реверс. Одновременно на катушку 5 прямого хода вновь подается импульс напряжения. Боек 2 под действием упругих сил сжатой пружины 4 и электромагнитных сил катушки 5 прямого хода разгоняется 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 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 $n_{уд} = 60 f / 2p = 2000$ уд/мин и длительность времени рабочего цикла $t_{ц} = 2p / f = 0,03$ с, где $2p = 1,5$ – число периодов напряжения за время цикла.

2. Рабочий цикл СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода

В соответствии с цикличностью повторяющихся процессов энергопреобразование рассмотрим только за время одного рабочего цикла на идентичных процессах интервалах времени в указанной на диаграмме 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. При анализе процессов энергопреобразования используем следующие условные обозначения v – скорость движения бойка; $r_{рх}$, $r_{ох}$ – сопротивление катушек прямого и обратного хода; $f_{эм.рх}$, $f_{эм.ох}$ – электромагнитная сила созданная катушками прямого (рабочего) и обратного хода; $\Delta w_{м.рх}(x, t)$, $\Delta w_{м.ох}(x, t)$ – энергия магнитного поля катушек прямого и обратного хода; $\Delta w_{эл.рх}(x, t)$, $\Delta w_{эл.ох}(x, t)$ – электрическая энергия, генерируемая в сеть катушками прямого и обратного хода.

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

На интервале $0 \dots t_1$ после отскока бойка от рабочего инструмента его движение в направлении безынерционного упругого звена осуществляется под действием электромагнитных сил катушки прямого хода. Электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется на изменение кинетической энергии бойка при его ускорении, компенсацию энергии тепловых потерь и приращение энергии магнитного поля катушки прямого (рабочего) хода:

$$\int_0^{t_1} (u_{рх} i_{рх} - i_{рх}^2 r_{рх}) dt = \int_{t_0}^{t_1} f_{эм.рх} v dt + \Delta w_{м.рх}(x, t), \quad (1)$$

где $\int_{t_0}^{t_1} f_{эм.рх} v dt = \int_{v_0}^{v_1} m v dv$ – механическая работа по изменению кинетической энергии бойка за время движения.

Кинетическая энергия бойка к моменту времени t_1 (рис. 2) составит

$$\frac{m v_0^2}{2} + \int_{v_0}^{v_1} m v dv = \frac{m v_1^2}{2}, \quad (2)$$

где $\frac{m v_0^2}{2}$ – кинетическая энергия бойка при отскоке от рабочего инструмента; v_0 – начальная скорость отскока бойка.

На интервале времени $t_1 \dots t_2$ при выходе бойка из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки прямого хода процесс энергопреобразования изменится на обратный. Внешние силы движущегося бойка, обладающего запасом кинетической энергии, и электромагнитное усилие разворачивающегося магнитного поля катушки обратного хода будут превышать усилие в катушке прямого хода, обладающей на данном интервале времени некоторым запасом магнитной энергии и оказывающей тормозное воздействие. Механическая работа, затраченная на преодоление электромагнитного торможения бойка, преобразуется в магнитную энергию, пополняя существующий запас магнитной энергии катушки, которая преобразуется в электрическую энергию и рекуперирована обратно в сеть, компенсируя энергию тепловых потерь катушки прямого хода:

$$\Delta w_{\text{м.пх}}(x, t) + \int_{t_1}^{t_2} f_{\text{эм.пх}} v dt = \int_{t_1}^{t_2} i_{\text{рх}}^2 r_{\text{рх}} dt + \Delta w_{\text{эл.пх}}(x, t). \quad (3)$$

В этот же период времени на интервале $t_1 \dots t_3$ электрическая энергия поступает в катушку обратного хода и боек, получая дополнительное ускорение, продолжает ускоренное движение в направлении упругого звена. Электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется на изменение кинетической энергии бойка, компенсацию энергии тепловых потерь катушки, приращение энергии магнитного поля и компенсацию на интервале $t_1 \dots t_2$ внешних сил при электромагнитном торможении бойка катушкой прямого хода:

$$\int_{t_1}^{t_3} (u_{\text{ох}} i_{\text{ох}} - i_{\text{ох}}^2 r_{\text{ох}}) dt = \int_{v_1}^{v_3} m v dv + \int_{t_1}^{t_2} f_{\text{эм.пх}} v dt + \Delta w_{\text{м.ох}}(x, t). \quad (4)$$

В период времени $t_2 \dots t_3$ движение бойка под действием электромагнитных сил катушки обратного хода сопровождается действием внешней силы упругого звена, направление которой противоположно движению бойка. При этом кинетическая энергия бойка полностью переходит в потенциальную энергию упругого звена при сжатии пружины:

$$\frac{m v_0^2}{2} + \int_{v_0}^{v_1} m v dv + \int_{v_1}^{v_3} m v dv = \int_{x_2=b}^{x_3=a} k x dx, \quad (5)$$

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

В точке a на кривой хода (рис. 2) выполняется остановка бойка и изменение знака скорости его движения на противоположную.

Период времени $t_3 \dots t_5$ характеризуется ускоренным перемещением бойка в сторону рабочего инструмента под действием внешних упругих сил безынерционного упругого звена, обладающего запасом потенциальной энергии, и электромагнитных сил катушки прямого хода. Электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется на устранение электромагнитного торможения бойка катушкой обратного хода, изменение кинетической энергии бойка, компенсацию энергии тепловых потерь и приращение энергии магнитного поля катушки прямого хода:

$$\int_{t_3}^{t_5} (u_{\text{рх}} i_{\text{рх}} - i_{\text{рх}}^2 r_{\text{рх}}) dt + \int_{x_2=b}^{x_3=a} k x dx = \int_{v_3}^{v_5} m v dv + \int_{t_3}^{t_5} f_{\text{эм.ох}} v dt + \Delta w_{\text{м.пх}}(x, t), \quad (6)$$

где $v_3 = 0$ – начальная скорость бойка в точке a (рис. 2).

Составляющая $\int_{v_3=0}^{v_5} mv dv$ правой части уравнения баланса определяет кинетическую энергию бойка за время его движения на интервале $t_3 \dots t_5$:

$$\int_{v_3=0}^{v_5} mv dv = \int_{x_2=b}^{x_3=a} kx dx + \int_{t_3}^{t_5} f_{\text{эм.пх}} v dt - \int_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v dt. \quad (7)$$

На интервале времени $t_3 \dots t_4$ электрическая энергия катушкой обратного хода из сети не потребляется, и при выводе бойка внешними силами из положения магнитного равновесия режим будет характеризоваться электромагнитным торможением бойка катушкой обратного хода, обладающей некоторым запасом магнитной энергии. Механическая работа, затраченная по преодолению электромагнитного торможения бойка, преобразуется в магнитную энергию, увеличивая ее запас при одновременном преобразовании магнитной энергии в электрическую энергию, которая за вычетом энергии тепловых потерь в катушке обратного хода рекуперирована обратно в сеть:

$$\Delta w_{\text{м.ох}}(x, t) + \int_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v dt = \int_{t_3}^{t_4} i_{\text{ох}}^2 r_{\text{ох}} dt + \Delta w_{\text{эл.ох}}(x, t), \quad (8)$$

где $\int_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v dt = \int_{v_3}^{v_4} mv dv$ – механическая работа, затраченная на преодоление на интервале $t_3 \dots t_4$ электромагнитного торможения бойка.

На интервале времени $t_5 \dots t_6$ электрическая энергия из сети катушкой прямого хода не потребляется. Механическая работа совершается за счет запасенной магнитной энергии, которая частично расходуется на увеличение кинетической энергии движущегося бойка и частично в виде электрической энергии рекуперирована обратно в сеть, компенсируя энергию тепловых потерь в катушке:

$$\Delta w_{\text{м.пх}}(x, t) = \int_{t_5}^{t_6} f_{\text{эм.пх}} v dt + \int_{t_5}^{t_6} i_{\text{пх}}^2 r_{\text{пх}} dt + \Delta w_{\text{эл.пх}}(x, t), \quad (9)$$

где $\int_{t_5}^{t_6} f_{\text{эм.пх}} v dt = \int_{v_5}^{v_6} mv dv$ – механическая работа по увеличению кинетической энергии бойка.

В период бестоковой паузы $t_6 \dots t_7$ осуществляется свободный выбег бойка в сторону рабочего инструмента. В момент времени t_7 боек, двигаясь по инерции, наносит удар по рабочему инструменту. Далее цикл повторяется.

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

$$\int_{x_2=b}^{x_3=a} kx dx + \int_{v_3=0}^{v_5} mv dv + \int_{v_5}^{v_6} mv dv = \frac{mv_{\text{уд}}^2}{2}, \quad (10)$$

где $v_{уд} = v_6$ – предупредная скорость бойка; $\frac{mv_{уд}^2}{2}$ – кинетическая энергия бойка по завершению рабочего цикла.

В момент удара по рабочему инструменту передается только часть кинетической энергии

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

где $k_{от}$ – коэффициент отскока бойка от рабочего инструмента.

Другая часть кинетической энергии в виде энергии отскока бойка от рабочего инструмента используется в следующем рабочем цикле синхронной машины. Таким образом, ударная масса бойка двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода приобретает необходимую кинетическую энергию за счет подачи трех электрических импульсов напряжения на систему катушек в течение времени рабочего цикла.

Следует также отметить, что любое отклонение от заданного алгоритма работы двухкатушечной СЭМУД может повлиять на режимы работы электромеханической системы, что может потребовать внесения дополнительных корректировок в уравнения энергетического баланса (1) – (10).

Заключение

На основе баланса энергий электромеханической системы рассмотрен процесс энергопреобразования СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, учитывающий взаимодействие между всеми элементами конструкции ударного узла при ускорении ударной массы бойка в магнитном поле, создаваемом системой из двух катушек.

Рассмотренные процессы взаимного преобразования электрической, магнитной, кинетической, потенциальной энергии в электромеханической системе дополняют базовые знания фундаментальных положений теории импульсных электромагнитных машин, составляющие научные основы их создания и совершенствования.

Реализация рабочего цикла в двухкатушечной СЭМУД со свободным выбегом бойка, в сравнении с известными рабочими циклами, позволяет обеспечить снижение амплитуды тока и уменьшение влияния работы импульсной электромагнитной машины на питающую сеть, что улучшает электромагнитную совместимость при питании от однофазного источника промышленной частоты 50 Гц за счет подачи на катушки трех полувольт напряжения в течение времени рабочего цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
2. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
3. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
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. **Малинин Л.И., Нейман В.Ю.** Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока // *Электротехника*. – 2009. – № 12. – С. 61–67.
6. **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.
7. **Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.
8. **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. **Певчев В.П., Ивашин В.В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
10. **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.
11. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Исследование виброударного режима в электромеханических реактивных преобразователях // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2010. – № 2. – С. 23–27.
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. **Малинин Л.И., Нейман В.Ю.** Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах // *Электричество*. – 2008. – № 6. – С. 57–62.
14. **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.
15. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // *Вестник МЭИ*. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
16. **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.
17. **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.
18. **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.
19. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
20. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы // *Электротехника*. – 2014. – № 12. – С. 50–53.
21. **Нейман В.Ю.** Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах // *Электротехника*. – 2003. – № 2. – С. 30–36.
22. **Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
23. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2016. – № 3 (32). – С. 98–114.

24. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40.
25. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33). – С. 61–79.
26. **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.
27. **Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
28. **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.
29. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.

AN OPERATING CYCLE OF THE TWO-INDUCTOR SYNCHRONOUS ELECTROMAGNETIC MACHINE WITH A FREE HEAD RUNNING-OUT IN THE DRIVING STROKE INDUCTOR

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

Novosibirsk State Technical University Novosibirsk, Russia

Mechanisms and units with reciprocated impulse electromagnetic drives are widely used in many industrial technological processes of material plastic deformation and disruption. Taking into account modern requirements to energy-saving, low-frequency impact synchronous electromagnetic machines attract attention as their impact pulse frequency is equal to or multiple of single-phase source frequency. The relevance of the research is explained by the need to improve electromagnetic compatibility of the electric drive powered by an industrial single-phase source. It is necessary to study electromechanical energy conversion process during the machine operating cycle.

A two-inductor synchronous electromagnetic machine with a free head running-out in the driving stroke inductor powered by a 50 Hz single-phase voltage source is considered. The research methods are based on the energy balance of the electromechanical system and its components during the impact unit total operating cycle.

With due regard to the interaction between all impact unit elements when the head impact mass is accelerated by the magnetic field generated by the system of two inductors, the energy conversion process based on the electromechanical system energy balance is considered for the total operating cycle. The implementation of the operating cycle in the two-inductor synchronous electromagnetic machine with a free running-out makes it possible to reduce the current amplitude and to suppress an electromagnetic machine effect on the mains in comparison with the known operating cycle.

The operating cycle with free head running-out in the driving stroke inductor of the synchronous two-inductor impact electromagnetic machine improves electromagnetic compatibility if the machine is powered by a single-phase voltage source and three voltage half-waves are applied during the operating cycle.

Keywords: Synchronous electromagnetic machine, impact unit, electric drive, impact energy, machine operating cycle, electromagnetic compatibility, electromechanical system energy balance.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-70-81

REFERENCES

1. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
2. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malov A.T. *Elektroprivod s lineinymi elektromagnitnymi dvigatelyami* [Electric linear electromagnetic motors]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 150 p.
3. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Nizkochastotnye udarnye elektromagnitnye mashiny i tekhnologii [Low-frequency impact electromagnetic machines and technology]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2014, no. 1, pp. 256–259.
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. Malinin L.I., Neyman V.Yu. Predel'nye silovye kharakteristiki elektromagnitnykh dvigatelei postoyannogo toka [Limiting power characteristics of electromagnetic direct-current motors]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2009, no. 12, pp. 61–67. (In Russian).
6. 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.
7. Usanov K.M., Ugarov G.G., Moshkin V.I. *Lineinyi impul'snyi elektromagnitnyi privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive the machine with autonomous-powered]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2006. 284 p.
8. Pavlenko A.V., Gil'miyarov K.R., Bol'shenko I.A. Upravlenie elektromagnitnym privodom klapana gazoraspredeitel'nogo mekhanizma dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Control of the electromagnetic drive of the valve of the gas-distributing mechanism of the internal combustion engine]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 5, pp. 40–46. (In Russian).
9. Pevchev V.P., Ivashin V.V. *Proektirovanie moshchnykh korotkokhodovykh impul'snykh elektromagnitnykh dvigatelei* [Powerful short-pulse pulsed electromagnetic motors]. Tol'yatti, TSU Publ., 2012. 142 p.
10. 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.
11. 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.
12. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Raschet optimal'nykh parametrov elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya [The calculation of the optimal parameters of the vibrational motion of the electromagnetic actuator]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 121–132. (In Russian).
13. Malinin L.I., Neiman V.Yu. Opredelenie napryazheniya preobrazovaniya energii i elektromagnitnykh sil v elektromekhanicheskikh sistemakh [Determination of the voltage of energy conversion and electromagnetic forces in electromechanical systems]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2008, no. 6, pp. 57–62.
14. 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.

15. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2016, no. 6, pp. 64–71.
16. 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.
17. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeystvii i nizkочastotnykh vibratsii [Simulation of dynamic processes in the electromagnetic energy converters for generating the force effects systems and low-frequency vibrations]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.
18. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovoде [Simulation of processes in an electromagnetic vibration converter with power loss in the steel magnetic core]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 73–78.
19. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazatelei odnoobmotochnykh impul'snykh ustroystv s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Methods for improving the energy performance of single-winding pulse devices with electromagnetic excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: science, technology, management*, 2010, no. 8, pp. 29–31.
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Uproshchennyi raschet elektromagnitnogo udarnogo privoda v povtorno-kratkovremennom rezhime raboty [A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 50–53. (In Russian).
21. Neyman V.Yu. Analiz protsessov energopreobrazovaniya lineinykh elektromagnitnykh mashin s predvaritel'nym akkumulirovaniem magnitnoi energii v dinamicheskikh rezhimakh [Analysis of the processes of energy transformation of linear electromagnetic machines with preliminary accumulation of magnetic energy in dynamic modes]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2003, no. 2, pp. 30–36. (In Russian).
22. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.
23. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s dvukhstoronnim vybegom boika [A dynamic model of the impact single-inductor synchronous electromagnetic machine with two-side head running-out]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2016, no. 3 (32), pp. 98–114.
24. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatshhechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Mathematical model of dynamics of two-inductor synchronous impact electromagnetic machines with free head running with free head running-out]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2016, no. 5, pp. 32–40.
25. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatshhechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s inertsionnym reversom boika [A dynamic model of a two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with an inertial head reverse]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2016, no. 4 (33), pp. 61–79.
26. 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. (In Russian).

27. Ugarov G.G., Moshkin V.I. Perspektivy razvitiya silovyykh elektromagnitnykh impul'snykh sistem [Perspectives of development of power electromagnetic pulse systems]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Kurgan State University. Series: Technical Sciences*, 2013, no. 29, pp. 88–90.
28. 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.
29. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennyye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.

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 120 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna (b. 1966) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of electrotechnical units in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machines and technology. She is the author of 120 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman31@gmail.com).



Нейман Владимир Юрьевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовые электромагнитные импульсные системы. Автор и соавтор более 200 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Neyman Vladimir Yurievich (b. 1960), Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the Department of Electrical Engineering Foundations, Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on power electromagnetic pulse systems. He is the author and co-author of over 200 scientific and educational works. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Статья поступила 25 февраля 2018 г.
Received February 25, 2018

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny so svobodnym vybegom boika v katushke pryamogo khoda [An operating cycle of the two-inductor synchronous electromagnetic machine with a free head running-out in the driving stroke inductor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 70–81. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-70-81.