

УДК 621.313.17

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ЦИКЛИЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА С УЧТЕННЫМ НАЧАЛЬНЫМ ПРЕВЫШЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЕРЕХОДНОМ ТЕПЛОВОМ ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА

Л.А. Нейман

Новосибирский государственный технический университет

Разработка новых виброударных технологий и применение для этих целей линейных электромагнитных машин вызывает необходимость совершенствования инженерных методик по их расчету, позволяющих на стадии проектирования оптимизировать работу электропривода с учетом заданных динамических параметров, обусловленных рабочим процессом. На основании ранее полученного решения уравнения Ньютона в конечных разностях с помощью дискретного преобразования Лапласа для решетчатых функций получены новые расчетные соотношения нагрева для кратковременного режима работы электропривода. Расчеты выполнены при допущении, что электропривод является однородным телом с равномерно распределенным источником теплоты и с идеальной теплопроводностью, мощность тепловыделений в процессе нагрева не меняется. Для широко распространенного в практике способа управления тепловой нагрузкой получены приближенные выражения, устанавливающие допустимое значение энергии удара в зависимости от количества произведенных рабочих циклов или ударов, учитывающие начальное превышение температуры над температурой окружающей среды, а также теплофизические и геометрические параметров электропривода. Полученные зависимости для переходного режима нагрева электропривода от параметров, характеризующих режим его работы, могут быть широко использованы в инженерной практике как при разработке новых виброударных устройств, так и для управления их тепловой нагрузкой, что позволит без применения сложного математического аппарата оптимизировать работу электропривода с учетом заданных динамических параметров, обусловленных рабочим процессом.

Ключевые слова: электромагнитный привод, начальное превышение температуры, циклический процесс нагрева, кратковременный режим работы.

1. Постановка задачи

Для реализации импульсных технологий в промышленности применяются машины и устройства, генерирующие большие по величине и кратковременные по длительности усилия. Одним из направлений в развитии подобных устройств стали электромагнитные импульсные системы, созданные на основе электромагнитных машин ударного действия [1–8].

В настоящее время подобные машины и устройства значительно усовершенствованы, а некоторые из них доведены до серийного производства [9–10].

Разработка новых виброударных технологий и применение для этих целей более совершенных конструкций линейных электромагнитных машин вызывает необходимость совершенствования инженерных методик по их расчету, позволяющих на стадии проектирования оптимизировать работу электропривода с учетом заданных динамических параметров, обусловленных рабочим процессом [11–18].

В проводимых исследованиях рассматривается циклический режим работы электропривода, при котором подводимая мощность существенно превышает значение этой мощности в продолжительном режиме работы. При достижении температуры элементов электропривода некоторого предельно допустимого значения его необходимо отключить и охладить. При повторном включении начальная температура нагрева электропривода может превышать температуру окружающей среды.

Данный способ управления тепловой нагрузкой электропривода с прерыванием технологического процесса позволяет увеличить энергию удара и мощность ударного узла, а для ряда технологических устройств является основным рабочим режимом.

2. Приближенный тепловой расчет циклического электропривода

При циклической работе электропривода процесс нагрева и охлаждения для любого n -го цикла ($n = 0, 1, 2 \dots$) определяется с помощью уравнения Ньютона

$$\begin{cases} C \frac{d\tau}{dt} + k_T S_{\Pi} \tau = P_p, & n t_{\Pi} \leq t \leq n t_{\Pi} + t_p; \\ C \frac{d\tau}{dt} + k_T S_{\Pi} \tau = 0, & n t_{\Pi} + t_p \leq t \leq (n+1) t_{\Pi}, \end{cases} \quad (1)$$

где τ – превышение температуры электромагнитного привода над температурой окружающей среды; C – теплоемкость тела электропривода; k_T – коэффициент теплоотдачи с поверхности тела; S_{Π} – теплоотдающая поверхность (поверхность охлаждения); P_p – мощность тепловых потерь; $t_{\Pi} = t_p + t_{\Pi}$ – время рабочего цикла; t_p – интервал времени протекания тока в катушке; t_{Π} – интервал времени бес-токовой паузы; n – число циклов на равноотстоящих интервалах времени.

График нагрузки электропривода кратковременного режима работы приведен на рис. 1.

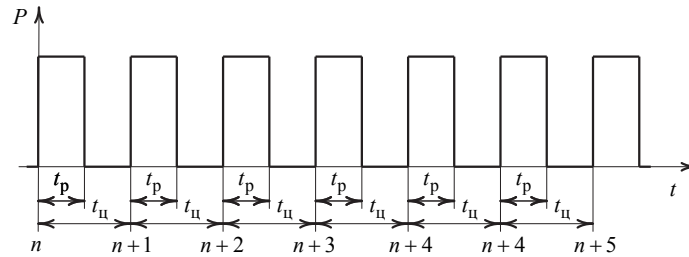


Рис. 1. График нагрузки электропривода

Решение системы (1) получено в конечных разностях с помощью дискретного преобразования Лапласа для решетчатых функций и в полном объеме представлено в [19], здесь же приводятся установленные выражения для перегрева и их применение при расчетах зависимости температуры от параметров электропривода на дискретных равноотстоящих интервалах времени в виде

$$\tau(n)_{\min} = \tau(0) \gamma^n + \frac{\tau_y (1-a)(1-\gamma^n) \frac{\gamma}{a}}{1-\gamma}, \quad (2)$$

$$\tau(n)_{\max} = \tau(0) \gamma^n + \frac{\tau_y (1-a)(1-\gamma^n)}{1-\gamma}, \quad (3)$$

где $\gamma = e^{-\frac{t_{\Pi}}{T_0}}$, $a = e^{-\frac{t_p}{T_0}}$, $\gamma = e^{-\frac{t_{\Pi}}{T_0}}$; T_0 – постоянная времени нагрева электропривода; τ_y – установившееся значение перегрева при длительном процессе выделе-

ния мощности; $\tau(0)$ – начальное превышение температуры по отношению к температуре окружающей среды; $\tau(n)_{\min}$, $\tau(n)_{\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения перегрева в n -м рабочем цикле нагрева.

Установленные зависимости превышения температуры (2) и (3) получены при следующих допущениях: электропривод является однородным телом с равномерно распределенным источником теплоты и с идеальной теплопроводностью, т. е. перепад температуры по сечению двигателя равен нулю; коэффициент теплоотдачи в процессе нагрева и охлаждения не зависит от превышения температуры теплоотдающей поверхности над температурой окружающей среды; не учитывается изменение активного сопротивления катушки при нагреве, т. е. принимается, что мощность тепловыделений в процессе нагрева не меняется.

Правомерность принятых допущений соответствует поставленной задаче приближенного расчета.

Если исходить из того, что значение максимального, $\tau(n)_{\max}$, и минимального, $\tau(n)_{\min}$, превышения температуры электропривода при циклическом режиме работы не должно превышать заданного допустимого значения $\tau_{\text{доп}}$

$$\tau(n)_{\max} \leq \tau_{\text{доп}}, \quad \tau(n)_{\min} \leq \tau_{\text{доп}},$$

и с учетом нагрева при ненулевых начальных условиях, когда $\tau(0) \neq 0$, после несложных преобразований выражений (2) и (3) их можно привести к виду

$$\frac{\tau_y}{\tau_{\text{доп}}} = \left[1 - \frac{\tau(0)}{\tau_{\text{доп}}} \gamma^n \right] \frac{1 - \gamma}{(1 - a)(1 - \gamma^n)} \frac{a}{\gamma}, \quad (4)$$

$$\frac{\tau_y}{\tau_{\text{доп}}} = \left[1 - \frac{\tau(0)}{\tau_{\text{доп}}} \gamma^n \right] \frac{1 - \gamma}{(1 - a)(1 - \gamma^n)}. \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5) величина $\frac{\tau_y}{\tau_{\text{доп}}} = k_p$ – определяет тепловой коэффициент перегрузки по мощности [20], а величина $\frac{\tau(0)}{\tau_{\text{доп}}} = \varepsilon$ – относительное начальное

превышение температуры над температурой окружающей среды. Величина теплового коэффициента может характеризоваться относительно высокими значениями $k_p > 1$, пределы изменений относительного превышения температуры $\varepsilon = 0 \dots 1,0$. При $\varepsilon = 0$ следует считать, что начальная температура элементов электропривода в момент включения определяется температурой окружающей среды. При $\varepsilon = 1,0$ принимается, что $\tau(0) = \tau_{\text{доп}}$, т. е. равна предельно-допустимой температуре по условию нагрева.

После подстановки установленных коэффициентов в выражения (4) и (5) получим

$$k_p = \frac{(1 - \varepsilon \gamma^n)(1 - \gamma)}{(1 - a)(1 - \gamma^n)} \frac{a}{\gamma}, \quad (6)$$

$$k_p = \frac{(1 - \varepsilon \gamma^n)(1 - \gamma)}{(1 - a)(1 - \gamma^n)}. \quad (7)$$

Выражение (6) справедливо для решения относительно значений минимального перегрева в рабочем цикле, а выражение (7) – для значений максимального перегрева.

При этом относительная разница колебаний температуры между максимальным и минимальным значениями перегрева составляет

$$\Delta \% = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\tau_{\max}} 100\% = \left(1 - \frac{\gamma}{a}\right) 100\% = \left[1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T_0}\right)\right] 100\%.$$

При $\frac{t_p}{T_0} \leq 0,05$ относительная разница колебаний температуры составляет менее 5 %, при $\frac{t_p}{T_0} \leq 0,01$ разница колебаний уменьшается до 1 %.

Таким образом, для всех значений $\frac{t_p}{T_0} \leq 0,01$ выражения (6) и (7) следует считать идентичными, так как разница в расчетах будет составлять не более 1%. Такая точность вполне удовлетворяет требованиям приближенного расчета.

При цикличном характере выделения мощности значение коэффициента тепловой перегрузки по мощности определяется известным отношением [21]:

$$k_p = \frac{P_p}{P_{\text{дл}}},$$

где $P_{\text{дл}}$ – мощность потерь из условия допустимого нагрева в длительном режиме; P_p – мощность потерь в промежутке времени t_p рабочего хода бойка.

Потери мощности P_p обусловлены электрическим сопротивлением катушки и определяются по среднему значению эквивалентной мощности:

$$P_p = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} i_p^2 R dt,$$

где i_p – ток катушки; R – активное сопротивление катушки.

Связывая длительно допустимую мощность потерь и мощность потерь в промежутке t_p , как если бы она выделялась бесконечно долго, в [22] получено решение для коэффициента тепловой перегрузки по мощности, выраженного через теплофизические, геометрические и рабочие параметры ударного узла в виде

$$k_p = \frac{A_{\text{уд}}(1 - \eta)}{t_p \eta k_T (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0) S_{\text{п}}}, \quad (8)$$

где $A_{уд}$ – энергия удара бойка; η – КПД электромагнитного привода; k_T – коэффициент теплоотдачи с поверхности охлаждения; $\vartheta_{доп}$ – допустимая по условиям перегрева температура электропривода; ϑ_0 – температура окружающей среды; S_{Π} – поверхность охлаждения.

Согласно (8) значение энергии удара

$$A_{уд} = \frac{t_p \eta k_T (\vartheta_{доп} - \vartheta_0) S_{\Pi}}{(1 - \eta)} k_p,$$

и после подстановки в него выражения (6) и (7) определяем

$$A_{уд}|_{\min} = \frac{t_p \eta k_T (\vartheta_{доп} - \vartheta_0) S_{\Pi}}{(1 - \eta)} \frac{(1 - \varepsilon \gamma^n)(1 - \gamma)}{(1 - a)(1 - \gamma^n)} \frac{a}{\gamma}, \quad (9)$$

$$A_{уд}|_{\max} = \frac{t_p \eta k_T (\vartheta_{доп} - \vartheta_0) S_{\Pi}}{(1 - \eta)} \frac{(1 - \varepsilon \gamma^n)(1 - \gamma)}{(1 - a)(1 - \gamma^n)}. \quad (10)$$

Полученные соотношения (9) и (10) носят универсальный характер и устанавливают предельно допустимые значения энергии удара относительно значений минимального и максимального перегрева в цикле в зависимости от числа произведенных рабочих циклов (ударов).

Необходимо также отметить, что количество произведенных рабочих циклов является установленной конечной величиной, т. е. $n = n_{\max}$ ($n \neq \infty$).

В формулах (9) и (10) энергия удара непосредственно зависит от объема электропривода, определяющего его габаритные размеры, что будет сказываться на неравнозначном по отношению к объему изменении поверхности охлаждения, участвующей в отдаче тепла. Устраняя факт влияния объема электропривода, и переходя к безразмерным параметрам, получим

$$A_{уд \min}^* = \frac{(1 - \varepsilon \gamma^{n_{\max}})(1 - \gamma)}{(1 - a)(1 - \gamma^{n_{\max}})} \frac{a}{\gamma}, \quad (11)$$

$$A_{уд \max}^* = \frac{(1 - \varepsilon \gamma^{n_{\max}})(1 - \gamma)}{(1 - a)(1 - \gamma^{n_{\max}})}, \quad (12)$$

где энергия удара является только функцией максимального количества произведенных циклов на равноотстоящих интервалах времени.

Ограничиваясь при рассмотрении только значениями максимального перегрева в рабочем цикле на рис. 2 приведены зависимости $A_{уд}^* = f(n_{\max})$, полученные в результате расчета по выражению (12), учитывающие начальное превышение температуры над температурой окружающей среды.

Зависимости (рис. 2) воспроизводят регулировочные характеристики, обеспечивающие оптимальное управление тепловой нагрузкой ударного электропривода с учетом начального превышения температуры в момент включения.

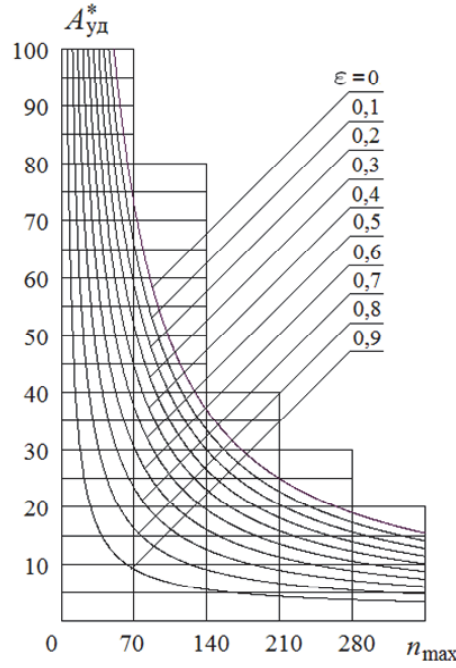


Рис. 2. Зависимости $A_{уд}^*(n)_{max} = f(n)$

$$\text{при } \frac{T_0}{t_{ц}} = 2500 \text{ и } \frac{t_p}{t_{ц}} = 0,5$$

Для квазиустановившегося режима нагрева при $n_{max} \rightarrow \infty$ выражения для допустимой энергии удара приводятся к виду

$$A_{уд \max} = \frac{t_p \eta k_T (\vartheta_{доп} - \vartheta_0) S_{\Pi} (1 - \gamma) a}{(1 - \eta) (1 - a) \gamma};$$

$$A_{уд \min} = \frac{t_p \eta k_T (\vartheta_{доп} - \vartheta_0) S_{\Pi} (1 - \gamma)}{(1 - \eta) (1 - a)}.$$

При $T_0 \gg t$ для расчетов можно принять $1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \approx \frac{t}{T_0}$, и запись выражений (9) и (10) для энергии удара упрощается:

$$A_{уд}(n_{max})_{\min} = \frac{\eta k_T (\vartheta_{доп} - \vartheta_0) S_{\Pi}}{(1 - \eta)} \frac{\left[1 - \varepsilon \left(1 - \frac{t_{ц}}{T_0} n_{max} \right) \right] (T_0 - t_{п})}{n_{max}}; \quad (13)$$

$$A_{уд}(n_{max})_{\max} = \frac{\eta k_T (\vartheta_{доп} - \vartheta_0) S_{\Pi}}{(1 - \eta)} \frac{\left[1 - \varepsilon \left(1 - \frac{t_{ц}}{T_0} n_{max} \right) \right] T_0}{n_{max}}, \quad (14)$$

При $\frac{t_{\text{ц}}}{T_0} n_{\text{max}} \leq 0,1$ ошибка в расчетах по выражениям (13) и (14) составляет не более 5 %, при $\frac{t_{\text{ц}}}{T_0} n_{\text{max}} \leq 0,01$ ошибка менее 1 %.

Заключение

1. Для широко распространенного в практике способа управления тепловой нагрузкой цикличного электромагнитного привода из условия допустимого нагрева получены приближенные расчетные соотношения, устанавливающие допустимое значение энергии удара в зависимости от количества произведенных рабочих циклов (ударов) и начального превышения температуры над температурой окружающей среды, а также теплофизических и геометрических параметров электропривода.

2. Полученные зависимости для переходного режима нагрева электропривода от параметров, характеризующих режим его работы, могут быть использованы в инженерной практике как при разработке новых виброударных устройств, так и для управления их тепловой нагрузкой, что позволит без применения сложного математического аппарата оптимизировать работу электропривода с учетом заданных динамических параметров, обусловленных рабочим процессом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н.** Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
- [2] **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
- [3] **Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.
- [4] **Нейман В.Ю.** Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий // *Электротехника*. – 2003. – № 9. – С. 25–30.
- [5] **Нейман Л.А.** Оценка конструктивного совершенства систем охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия // *Научный вестник НГТУ*. – 2013. – № 4. – С. 177–183.
- [6] **Нейман Л.А.** Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2013. – № 6. – С. 48–53.
- [7] **Симонов Б.Ф., Кадышев А.И., Нейман В.Ю.** Исследование статических параметров длинноходовых электромагнитов для молотов // *Транспорт: Наука, техника, управление: Научный информационный сборник*. – М.: Изд-во ВИНТИ, 2011. – № 12. – С. 30–31.
- [8] **Нейман Л.А.** Анализ процессов энергопреобразования в однокатушечной синхронной электромагнитной машине с двухсторонним выбегом бойка // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 112–116.
- [9] **Угаров Г.Г., Нейман В.Ю.** Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2002. – № 2. – С. 37–43.
- [10] **Угаров Г.Г., Нейман В.Ю.** Анализ показателей электромагнитных ударных машин // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1996. – № 2. – С. 72–80.
- [11] **Пат. № 2127017 РФ, МПК 6 H02 K 33/02.** Способ управления однообмоточным линейным электромагнитным двигателем ударного действия. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю., Усанов К.М. Подано 21.11.1995. Опубликовано 27.02.1999, *Бюллетень изобретений*, 1999, № 6, Приоритет от 27.02.1999.
- [12] **Пат. 2486656 РФ, МПК H02K 33/12, H02P 25/02, H01F 7/18.** Способ управления двухкатушечным электромагнитным двигателем возвратно-поступательного движе-

- ния. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Ерыгина Е.А. Подано 20.02.2012. Опубликовано 27.06.2013, *Бюллетень изобретений*, 2013, № 18, Приоритет от 27.06.2013.
- [13] Пат. № 2491701, МПК H02K 33/12, B25D 13/00. Синхронный электромагнитный ударный механизм. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Скотников А.А. Подано 02.12.2011. Опубликовано 27.08.2013, *Бюллетень изобретений*, 2013, № 24, Приоритет от 27.08.2013.
- [14] Пат. № 2496215, МПК H02K 33/12, F16F 7/104. Электромагнитный двигатель возвратно-поступательного движения. Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Скотников А.А. Подано 20.02.2012. Опубликовано 20.10.2013, *Бюллетень изобретений*, 2013, № 29, Приоритет от 20.10.2013.
- [15] Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2011. – № 2. – С. 310–313.
- [16] Нейман Л.А. К решению задачи рационального выбора электромагнитного двигателя заданного габарита и веса на основе численного эксперимента // *Научный вестник НГТУ*. – 2013. – № 4. – С. 184–190.
- [17] Neyman V. Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechanotronic systems // *IFOST 2008: Proceedings of the 3d International Forum on Strategic Technology, June 23–29*. – 2008. – Novosibirsk, Tomsk. – P.452–454.
- [18] Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А., Рогова О.В., Скотников А.А. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора // *Электротехника*. – 2011. – № 6. – С. 50–53.
- [19] Нейман Л.А., Скотников А.А., Нейман В.Ю. Исследование нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2012. – № 6. – С. 50–54.
- [20] Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
- [21] Буткевич Г.В. Основы теории электрических аппаратов. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.
- [22] Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. К оценке режимов работы электромагнитных ударных машин // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1996. – № 4. – С. 72–80.

APPROXIMATE DESIGN OF THE CYCLIC ELECTROMAGNETIC DRIVE WITH RESPECT TO AN INITIAL TEMPERATURE EXCESS IN THE TRANSIENT HEATING PROCESS

Neyman L.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The development of new vibratory impact technologies based on linear electromagnetic machines makes it necessary to improve design procedures at the design stage to optimize the electric drive operation with regard to the given dynamical operation parameters. New design heating relations for the electric drive short-time mode have been found from the Newton finite difference equation with using the Laplace discrete transformation for trellis functions. These formulas have been obtained assuming that the electric drive is a homogeneous body with a uniformly distributed heat source and ideal heat conductance. Heat release power during heating is constant. Approximate design relations giving an acceptable impact energy value depending on the number of impact operation cycles with regard to an initial temperature excess over ambient temperature as well as the electric drive thermophysical and geometrical parameters have been found for the widely used method of controlling the cyclic electromagnetic drive thermal load. The obtained dependences of the electric drive heating transient mode on the operation parameters can be practically used for creating new vibratory impact machines and controlling their thermal load. Hence it is possible to optimize electric drive operation with respect to the given dynamic operation parameters without complicated mathematical manipulations.

Keywords: electromagnetic drive; initial temperature excess; cyclic heating process; short-time operation mode

REFERENCES

- [1] **Rjashencev N.P., Rjashencev V.N.** *Jelektromagnitnyj privod linejnyh mashin* [Electromagnetic drive of linear machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, 153 p.
- [2] **Rjashencev N.P., Ugarov G.G., L'vicyn A.V.** *Jelektromagnitnye pressy* [Electromagnetic presses]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989, 216 p.
- [3] **Moshkin V.I., Neyman V.Ju., Ugarov G.G.** *Impul'snye linejnye jelektromagnitnye dvigateli* [Pulsed electromagnetic linear machines]. Kurgan, KSU Publ., 2010, 220 p.
- [4] **Neyman V.Ju.** Integrirrovannye linejnye jelektromagnitnye dvigateli dlja impul'snyh tehnologij [Integrated linear electromagnetic machines for impulse technologies]. *Elektrotehnika*, 2003, no. 9, pp. 25–30.
- [5] **Neyman L.A.** Ocenka konstruktivnogo sovershenstva sistem ohlazhdenija sinhronnyh jelektromagnitnyh mashin udarnogo dejstvia [Structural assessment of cooling systems of synchronous electromagnetic percussion machines]. *Nauchnyj vestnik NGTU*, 2013, no. 4, pp. 177–183.
- [6] **Neyman L.A.** Rabochij cikl dvuhkatushechnoj sinhronnoj jelektromagnitnoj mashiny so svobodnym vybegom bojka [The duty cycle of the dual synchronous electromagnetic machine with striker coasting]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij: Jeletromehanika*, 2013, no. 6, pp. 48–53.
- [7] **Simonov B.F., Kadyshev A.I., Neyman V.Ju.** Issledovanie staticheskikh parametrov dlinnohodovyh jelektromagnitov dlja molotov [Investigation of static parameters for long-stroke solenoid hammers]. *Transport: Nauka, tehnika, upravlenie*, 2011, no. 12, pp. 30–31.
- [8] **Neyman L.A.** Analiz processov jenergopreobrazovanija v odnokatushechnoj sinhronnoj jelektromagnitnoj mashine s dvuhstoronnim vybegom bojka [The analysis of the processes of energy conversion in a single-coil electromagnetic synchronous machine with double-sided striker coasting]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2013, no. 4, pp. 112–116.
- [9] **Ugarov G.G., Neyman V.Ju.** Tendencii razvitiya i primeneniya ruchnyh udarnykh mashin s jeletromehanicheskim preobrazovaniem jenerгии [Trends in the development and application of hand drum machines with electromechanical energy conversion]. *Izvestija vuzov. Jeletromehanika*, 2002, no. 2, pp. 37–43.
- [10] **Ugarov G.G., Neyman V.Ju.** Analiz pokazatelej jelektromagnitnyh udarnykh mashin [The analysis of electromagnetic shock machine parameters]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 1996, no. 2, pp. 72–80.
- [11] **Ugarov G.G., Neyman V. Ju., Usanov K.M.** *Sposob upravlenija odnoobmotochnym linejnym jelektromagnitnym dvigatelem udarnogo dejstvia* [The control method of a one-solenoid linear electromagnetic percussion machine]. Patent RF, no. 2127017 (MPK 6 N02 K 33/02), 1999.
- [12] **Neyman V.Ju., Neyman L.A., Erygina E.A.** *Sposob upravlenija dvuhkatushechnym jelektromagnitnym dvigatelem vozvratno-postupatel'nogo dvizhenija* [The control method of a dual-solenoid reciprocation machine]. Patent RF, no. 2486656 (MPK H02K 33/12, H02P 25/02, H01F 7/18), 2013.
- [13] **Neyman V.Ju., Neyman L.A., Skotnikov A.A.** *Sinhronnyj jelektromagnitnyj udarnyj mehanizm* [A synchronous electromagnetic hammer mechanism]. Patent RF, no. 2491701 (MPK H02K 33/12, B25D 13/00), 2013.
- [14] **Neyman L.A., Neyman V.Ju., Skotnikov A.A.** *Jeletromagnitnyj dvigatel' vozvratno-postupatel'nogo dvizhenija* [The electromagnetic reciprocation motor]. Patent RF, no. 2496215 (MPK H02K 33/12, F16F 7/104), 2013.
- [15] **Neyman V.Ju., Neyman L.A., Petrova A.A.** O metodike k vyboru tipa jelektromagnita po znachenijam konstruktivnogo faktora [On the method of choosing an electromagnet based on the design factor values]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2011, no. 2, pp. 310–313.
- [16] **Neyman L.A.** K resheniju zadachi racional'nogo vybora jelektromagnitnogo dvigatelja zadannogo gabarita i vesa na osnove chislennogo jeksperimenta [On the rational choice of the electromagnetic motor with specified dimensions and weight based on the numerical experiment]. *Nauchnyj vestnik NGTU*, 2013, no. 4, pp. 184–190.

- [17] **Neyman V. Yu., Neyman L.A., Petrova A.A.** Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechanotronic systems. *Proc. of the 3rd International Forum on Strategic Technology*, Novosibirsk, 2008, pp.452–454.
- [18] **Neyman V.Ju., Neyman L.A., Petrova A.A., Rogova O.V., Skotnikov A.A.** К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора [On accounting major sizes when choosing the type of electromagnet based on the design factor]. *Jelektrotehnika*, 2011, no. 6, pp. 50–53.
- [19] **Neyman L.A., Skotnikov A.A., Neyman V.Ju.** Исследование нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах [Study of electromagnetic motor heating in transient modes]. *Izvestija vuzov: Jelektromehhanika*, 2012, № 6, pp. 50–54.
- [20] **Gordon A.V., Slivinskaja A.G.** *Jelektromagnitny postojannogo toka* [DC electromagnets]. Moscow, Gosjenergoizdat Publ., 1960, 447 p.
- [21] **Butkevich G.V.** *Osnovy teorii jelektricheskikh apparatov* [Fundamentals of the electrical machines theory]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1970, 600 p.
- [22] **Ugarov G.G., Neyman V.Ju.** К оценке режимов работы электромагнитных ударных машин [Estimating electromagnetic drum machines modes]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 1996, no. 4, pp. 72–80.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: импульсные синхронные электромагнитные двигатели. Опубликовано 60 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. Her research interests are currently focused on pulse synchronous electromagnetic motors. She is author of 60 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: neyman31@gmail.com)

Статья поступила 23 декабря 2013 г.

Received 23 Dec. 2013

To Reference:

Neyman L.A. Priblizhennyi raschet tsiklichnogo elektromagnitnogo privoda s uchennym nachal'nym prevyseniem temperatury v perekhodnom teplovom protsesse nagreva [Approximate design of the cyclic electromagnetic drive with respect to an initial temperature excess in the transient heating process]. *Doklady Akademii Nauk Vysheish Shkoly Rossiiskoi Federatsii* [Reports of Russian Higher Education Academy of Sciences], 2014, no. 1(22), pp. 113–122. (in Russ.).