

Current Status of the Technology. *Energies*. 2. Doi: 10.3390/en20300556.

6. Sukhoverkova V.E. Sposoby utilizatsii ptichego pometa, predstavlennye v sovremennykh patentakh // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – No. 9 (143). – S. 45-55.

7. Sposob termicheskoy pererabotki bytovykh i promyshlennykh otkhodov: pat. 2283987 Ros. Federatsiya: MPK F23G 5/027 / Kokarev V.A., Kokarev V.V.; заявитель и патентообладатель Kokarev V.A., Kokarev V.V. – No. 2004108243/03; заявл. 24.03.04; опubl. 20.09.06, Byul. No. 26.



УДК 621.313.3

К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Волгин, А.П. Моисеев
K.M. Usanov, V.A. Kargin, A.V. Volgin, A.P. Moiseyev

ОЦЕНКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УДАРНЫХ МАШИН

THE ANALYSIS OF OPERATING MODES OF ELECTROMAGNETIC IMPACT MACHINES

Ключевые слова: линейный электромагнитный двигатель, погружение стержневых элементов, энергия удара, ударная мощность, мощность потерь.

Применение ударных машин с линейными электромагнитными двигателями (ЛЭМД) на объектах АПК, например, для погружения металлических стержневых элементов в грунт, представляется вполне эффективным ввиду относительно малого энергопотребления, непосредственного преобразования электрической энергии в механическую работу и сравнительно высоких удельных показателей. Для таких машин характерен частотный режим работы с форсированным энергопреобразованием с повышенными значениями отношений мощности потерь к полезной механической, достигающие 1,2-5,5 из-за относительно низкого КПД. Применение интенсивных способов охлаждения для уменьшения перегрева сводит на нет главное преимущество этих машин – их конструктивную простоту и надёжность. При оценке технологических возможностей таких устройств представляется важной задачей определения приближёнными методами из условия

допустимого нагрева энергии и частоты ударов якоря для характерных режимов работы ударных машин с ЛЭМД. При определении расчётных соотношений исходили из одномерности температурного поля обмотки и независимости теплофизических параметров элементов двигателя от нагрева. Повторно-кратковременный режим действия ударной машины с ЛЭМД состоит из циклов «работа – пауза» с определёнными значениями относительной продолжительности включения, определяемыми отношением интервалов работы и всего цикла. Получено общее уравнение перегрева двигателя в конце цикла в повторно – кратковременном режиме. Для режима непрерывных срабатываний ЛЭМД из условия допустимого нагрева определены приближёнными методами энергия и частота ударов якоря при условии одномерности температурного поля обмотки и независимости теплофизических параметров элементов двигателя от нагрева. Полученные выражения могут быть использованы лишь для предварительной, приближённой оценки тепловых режимов электромагнитных ударных машин, например, на этапе их проектирования.

Keywords: *linear electromagnetic engine, immersion of rod elements, impact energy, impact power, lost power.*

The use of impact machines with linear electromagnetic engines (LEME) at agricultural facilities, for example, for embedding metal rod elements into the ground, seems quite effective due to the relatively low energy consumption, direct conversion of electrical energy into mechanical work, and relatively high specific indices. Such machines are characterized by a high-impact mode of operation with forced energy conversion with increased values of the ratio of power losses to useful mechanical power, reaching 1.2...5.5 due to a relatively low efficiency. The use of intensive cooling methods to reduce overheating negates the main advantage of these machines - their structural simplicity and reliability. When evaluating the technological capabilities of such devices, it is important to specify the approximate methods of determining the permissible heating of energy and the frequency of armature strikes for the typical operating modes of impact machines with LEME.

When determining the calculated ratios, we proceeded from the one-dimensionality of the temperature field of the winding and the independence of the thermophysical parameters of the engine elements from heating. Intermittent duty of the impact machine with LEME consists of "work - pause" cycles with certain values of the relative duration of activation determined by the ratio of the intervals of operation and the entire cycle. The general equation of engine overheating at the end of the cycle in the intermittent regime is obtained. For the mode of continuous LEME, under the condition of permissible heating, the energy and frequency of armature strikes are determined using approximate methods, provided that the temperature field of the winding is one-dimensional and the thermal parameters of the engine elements are independent of heating. The resulting expressions may only be used for a preliminary, approximate assessment of the thermal conditions of electromagnetic impact machines, for example, at the stage of their design.

Усанов Константин Михайлович, д.т.н., проф. каф. «Инженерная физика, электрооборудование и электро-технологии», Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова. Тел.: (8452) 74-96-51. E-mail: primeneniye@mail.ru.

Каргин Виталий Александрович, к.т.н., доцент каф. «Инженерная физика, электрооборудование и электро-технологии», Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова. Тел.: (8452) 74-96-51. E-mail: vakargin@mail.ru.

Волгин Андрей Валерьевич, к.т.н., доцент каф. «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии», Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова. Тел.: (8452) 74-96-51. E-mail: primeneniye@mail.ru.

Моисеев Алексей Петрович, к.т.н., доцент каф. «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии», Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова. Тел.: (8452) 74-96-51. E-mail: primeneniye@mail.ru.

Usanov Konstantin Mikhaylovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Chair of Engineering Physics, Electrical Equipment and Electrical Engineering, Saratov State Agricultural University named after N.I. Vavilov. Ph.: (8452) 74-96-51. E-mail: primeneniye@mail.ru.

Kargin Vitaliy Aleksandrovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Engineering Physics, Electrical Equipment and Electrical Engineering, Saratov State Agricultural University named after N.I. Vavilov. Ph.: (8452) 74-96-51. E-mail: vakargin@mail.ru.

Volgin Andrey Valeryevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Engineering Physics, Electrical Equipment and Technologies, Saratov State Agricultural University named after N.I. Vavilov. Ph.: (8452) 74-96-51. E-mail: primeneniye@mail.ru.

Moiseyev Aleksey Petrovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Engineering Physics, Electrical Equipment and Electrical Engineering, Saratov State Agricultural University named after N.I. Vavilov. Ph.: (8452) 74-96-51. E-mail: primeneniye@mail.ru.

Введение

В настоящее время применение машин ударного действия с импульсными линейными электромагнитными двигателями (ЛЭМД) для неторцевой забивки стержневых элементов в грунт (например, при реконструкции сельских трансформаторных подстанций) является вполне эффективным ввиду малого энергопотребления при сравнительно высоких удельных показателях [1, 2].

Нагрев ЛЭМД в таких машинах в значительной степени зависит как от конструктивных параметров (геометрия и сопротивление обмотки, величина охлаждающей поверхности статора),

так и от режимных параметров (форма тока, количество и длительность импульсов), которые влияют на энергию A_y и частоту n_y ударов якоря. При этом потери в меди достигают 47% всех потерь, что приводит к повышению температуры обмотки двигателя и сокращению времени его работы в условиях естественного охлаждения [1-4].

Цель исследования – расширение эксплуатационных возможностей импульсного ЛЭМД для забивки стержневых элементов в грунт.

Задача исследования – определение энергии A_y и частоты n_y ударов якоря импульсной элек-

тромагнитной машины по условиям допустимого нагрева.

Объект и методика исследований

При выводе расчётных формул считаем температурное поле обмотки одномерным и теплофизические параметры элементов ЛЭМД – независимыми от нагрева [1].

Представляя процесс работы ЛЭМД последовательностью из n непрерывных срабатываний (циклов) и выражая перегрев в конце каждого цикла через предыдущий, получим общее уравнение максимального перегрева в конце n -го цикла [5-7]:

$$\tau_{\max.n} = \tau_y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T}\right) \right] \frac{1 - \exp\left(-n\frac{t_{\text{ц}}}{T}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{ц}}}{T}\right)}, \quad (1)$$

где $\tau_{\max.n}$ – максимальная температура перегрева в конце n -го цикла;

n – число циклов при работе ЛЭМД;

$t_{\text{ц}} = t_p + t_n$ – время цикла;

τ_y – установившееся превышение температуры;

T – постоянная времени нагрева обмотки:

$$T = \frac{M[c_M k + \beta \cdot c_c(1 - k)]}{k_M S_n},$$

где M – масса ЛЭМД;

$\beta = 0,39$ – коэффициент, зависящий от времени работы ЛЭМД и условий передачи тепла от обмотки к стали;

$k_M = m_M/M$;

c_M, c_c – удельная теплоёмкость меди и стали;

m_M – масса меди обмотки ЛЭМД.

Определим время работы электромагнитной машины с ЛЭМД при заданных энергии удара и частоте для кратковременного режима погружения стержневых элементов в грунт.

При $n = n_{\max}$ из выражения (1) выразим максимальное количество ударных воздействий машины до достижения ей предельно-допустимой температуры:

$$n_{\max} = \frac{T}{t_{\text{ц}}} \ln \left\{ 1 - \frac{\tau_{\max.n}}{\tau_y} \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{ц}}}{T}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T}\right)} \right] \right\}^{-1}. \quad (2)$$

Согласно [2] отношение $\tau_{\max.n}/\tau_y$ в выражении (2) определяет величину, которая обратно-пропорциональна коэффициенту перегрузки

k_p . Коэффициент перегрузки определим через длительно-допустимую мощность потерь ΔP_d , мощность потерь за импульс ΔP_p и время t_p

$$\frac{1}{k_p} = \frac{\tau_{\max.n}}{\tau_y} = \frac{\Delta P_d}{\Delta P_p}. \quad (3)$$

Используя уравнение теплового баланса, определим длительно-допустимую мощность потерь:

$$\Delta P_d = k_M(\tau_d - \tau_{\text{ок.с}})S_n. \quad (4)$$

Мощность потерь за импульс запишем через энергию W , которую потребляет ЛЭМД за одно срабатывание $\Delta P_p = \frac{W}{t_p}(1 - \eta)$, где η – КПД ЛЭМД.

Учитывая, что $A_y = W \cdot \eta$, мощность потерь представим в виде:

$$\Delta P_p = \frac{A_y(1-\eta)}{t_p \eta}. \quad (5)$$

Выполнив подстановку (4) и (5) в (3), получим выражение для коэффициента перегрузки:

$$k_p = \frac{\tau_y}{\tau_{\max.n}} = \frac{k_o \cdot A_y(1-\eta)}{t_p \eta}, \quad (6)$$

где $k_o = 1/k_M(\tau_d - \tau_{\text{ок.с}})S_n$ – величина, обратно-пропорциональная мощности потерь ΔP_d .

Учитывая выражение (6) уравнение (2) принимает вид

$$n_{\max} = \frac{T}{t_{\text{ц}}} \ln \left\{ 1 - \frac{t_p \eta}{k_o \cdot A_y(1-\eta)} \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{ц}}}{T}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T}\right)} \right] \right\}^{-1}. \quad (7)$$

При условии, что $t_{\text{ц}} \ll T$ и $\exp(-x) \approx 1 - x$, $\exp(-x) \approx 1 - x$, (7) упрощается и представляется в виде

$$n_{\max} = \frac{T}{t_{\text{ц}}} \ln \left[1 - \frac{t_p \eta}{k_o \cdot A_y(1-\eta)} \right]^{-1}. \quad (8)$$

При непрерывной последовательности рабочих циклов время работы ЛЭМД определяется как $t_{\max} = t_{\text{ц}} \cdot n_{\max}$. С учётом выражения (8) t_{\max} представим в виде:

$$t_{\max} = T \ln \left[1 - \frac{60\eta}{k_o \cdot n_y \cdot A_y(1-\eta)} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где $n_y = 60/t_{\text{ц}}$ – частота ударов в минуту.

Электромагнитная ударная машина в повторно-кратковременном режиме работы имеет продолжительность включения (ПВ,%), определяемую отношением интервалов работы и всего цикла.

Выражая последующие температуры перегревы машины через предшествующие, получим общее уравнение температуры перегрева ЛЭМД в конце k -го цикла:

$$\tau_{\max.k} = \tau_y \left[1 - \exp\left(-\frac{t_p^*}{T}\right) \right] \frac{1 - \exp\left(-k \frac{t_{\text{ц}}^*}{T}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{ц}}^*}{T}\right)}, \quad (10)$$

где $t_{\text{ц}}^*$, t_p^* – время работы и время цикла при ПВ, %.

$$t_p^* = t_{\text{ц}}^* \frac{\text{ПВ}}{100}; \quad t_{\text{ц}}^* = \frac{3600}{m}, \quad (11)$$

где m – число включений.

Коэффициент перегрузки в повторно-кратковременном режиме:

$$k_p = \frac{\Delta P_{\text{ц}}}{\Delta P_d} = \frac{k_o \cdot A_y (1 - \eta)}{t_p \eta},$$

где $\Delta P_{\text{ц}}$ – мощность потерь за время цикла $t_{\text{ц}}$.

С учётом $t_{\text{ц}} = 60/n_y$ получим:

$$k_p = \frac{k_o \cdot n_y \cdot A_y (1 - \eta)}{60 \eta}. \quad (12)$$

Полагая в (10) $k = \infty$ и $\tau_y / \tau_{\max.k} = k_p$, с учётом (11) и (12) для повторно-кратковременного режима работы ЛЭМД запишем выражение для предельно-допустимой частоты ударов:

$$n_y = \frac{60 \eta}{k_o \cdot A_y (1 - \eta)} \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{3600}{mT}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{3600 \text{ПВ}}{mT \cdot 100}\right)} \right] \quad (13)$$

или

$$n_y = \frac{60 \eta}{k_o \cdot A_y (1 - \eta)} \cdot \frac{100}{\text{ПВ}} \quad \text{при } t_{\text{ц}}^* \ll T. \quad (14)$$

$$n_{\max(250 \text{ Дж})} = \frac{2911}{0,4} \ln \left\{ 1 - \frac{6,8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,4}{1,42 \cdot 10^{-2} \cdot 250 \cdot A_y (1 - 0,4)} \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{0,4}{2911}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{6,8 \cdot 10^{-2}}{2911}\right)} \right] \right\}^{-1} = 567,$$

$$\text{где } k_o = \frac{1}{k_m (\tau_{\text{доп}} - \tau_o) S_n} = \frac{1}{10(90-25) \cdot 0,108} = 1,42 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}^{-1}$$

Для второго и третьего случаев максимальное число последовательных рабочих ходов якоря, соответственно, составит:

$$n_{\max(200 \text{ Дж})} = 716 \text{ уд.}$$

$$n_{\max(150 \text{ Дж})} = 971 \text{ уд.}$$

Из соотношения $m = n_{\max}(A)/n$,

где m – количество забиваемых стержней:

$$m(A_y = 250 \text{ Дж}) = 567/48 = 11,8;$$

Результаты

Рассчитаем, учитывая условия нагрева, режим работы машины с импульсным ЛЭМД для погружения стержней, учитывая свойства грунта, в который погружение одного стержня при энергии удара $A_y = 250 \text{ Дж}$ происходит за 48 ударов, при $A_y = 200 \text{ Дж}$ – за 56 ударов, а при $A_y = 150 \text{ Дж}$ – за 110 ударов. Коэффициент заполнения цилиндрической обмотки $k_3 = 0,9$. Срабатывание якоря происходит за $t = 6,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}$, время цикла $t_{\text{ц}} = 0,4 \text{ с}$. Предельно допустимая температура нагрева обмотки с медной шиной и хлопчатобумажной изоляцией $\tau_{\text{доп}} = 90^\circ \text{ С}$. Внутренний и наружный диаметры обмотки $d = 120 \text{ мм}$, $D = 160 \text{ мм}$ соответственно, длина обмотки $h = 180 \text{ мм}$. Обмотка находится при температуре $\tau_o = 25^\circ \text{ С}$, коэффициент поверхностной теплоотдачи $k_m = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$. К.П.Д. ЛЭМД $\eta = 40\%$.

Определим постоянную времени нагрева обмотки:

$$T = \frac{c \gamma V k_3}{k_m S_n} = 390 \cdot 8700 \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,9}{10} \cdot 0,108 = 2911 \text{ с},$$

где $V = \pi h (D^2 - d^2)/4 = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ – объем медной шины обмотки;

$S_n = \pi ((D^2 - d^2)/2 + Dh) = 0,108 \text{ м}^2$ – поверхность охлаждения;

γ – удельная плотность меди.

Максимальное значение непрерывных срабатываний якоря до выхода на предельную температуру нагрева обмотки определим согласно выражению (7):

$$m(A_y = 200 \text{ Дж}) = 716/56 = 12,8;$$

$$m(A_y = 150 \text{ Дж}) = 971/110 = 8,8.$$

Таким образом, наиболее предпочтительный режим работы ударной машины соответствует энергии удара $A_y = 200 \text{ Дж}$, так как обеспечивает наибольшее количество ($m = 12$) забиваемых стержней.

Вывод

Для режима непрерывных срабатываний ЛЭМД из условия допустимого нагрева определены энергия A_y и частота n_y ударов якоря электромагнитной ударной машины для погружения стержневых элементов в грунт. Приведенные выражения с учетом принятых допущений применимы для предварительной оценки тепловых режимов работы импульсных электромагнитных машин с ЛЭМД на этапе их проектирования.

Библиографический список

1. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях: монография / К. М. Усанов, В. И. Мошкин, В. А. Каргин, А. В. Волгин. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. – 202 с. – Текст: непосредственный.
2. Каргин, В. А. Совершенствование технологии погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов на объектах АПК использованием переносного импульсного электромагнитного привода: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Каргин В. А. – Саратов: ФГОУ ВПО Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова, 2007. – 21 с. – Текст: непосредственный.
3. Усанов, К. М. Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт / К. М. Усанов, В. А. Каргин. – Текст: непосредственный // Вестник Саратовского госагроуниверситета имени Н. И. Вавилова. – 2005. – № 3. – С. 59-61.
4. Усанов, К. М. Импульсный электромагнитный привод машин с однонаправленным поступательным движением рабочего органа / К. М. Усанов, А. П. Моисеев, В. А. Каргин. – Текст: непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора В. Г. Кобы. – Саратов, 2011. – С. 239-241.
5. Каргин, В. А. Система управления электромагнитной ударной машиной / В. А. Каргин. – Текст: непосредственный // Образовательная среда сегодня и завтра: материалы X Междуна-

родной научно-практической конференции. – 2015. – С. 303-306.

6. Моисеев, А. П. Влияние режимных и конструктивных факторов на выходные показатели импульсного электромагнитного привода / А. П. Моисеев, А. В. Волгин, В. А. Каргин. – Текст: непосредственный // Наука в информационном пространстве: материалы VII Международной научно-практической конференции. – Д.: Изд-во Била К.О., 2011. – Т. 1. – С.46-49.

7. Usanov, K., Volgin, A., Chetverikov, E., Kargin, V., Moiseev, A., Ivanova, Z. (2017). Power electromagnetic strike machine for engineering-geological surveys. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 87. 032049. 10.1088/1755-1315/87/3/032049.

References

1. Usanov, K.M. Lineynye elektromagnitnye dvigateli i privody v impulsnykh protsessakh i tekhnologiyakh: monografiya / K.M. Usanov, V.I. Moshkin, V.A. Kargin, A.V. Volgin. – Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta, 2015. – 202 s.
2. Kargin, V.A. Sovershenstvovanie tekhnologii pogruzeniya prodolno-neustoychivykh stержnevyykh elementov na obektakh APK ispolzovaniem perenosnogo impulsnogo elektromagnitnogo privoda / V.A. Kargin. – avtoref. ... dis. k-ta tekhn. nauk. – Saratov: FGOU VPO Saratovskiy GAU im. N.I. Vavilova, 2007. – 21 s.
3. Usanov, K.M. Silovaya elektromagnitnaya impulsnaya sistema dlya pogruzeniya stержnevyykh elementov v grunt / K.M. Usanov, V.A. Kargin // Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova. – 2005. – No. 3. – S. 59-61.
4. Usanov, K.M. Impulsnyy elektromagnitnyy privod mashin s odonapravlennym postupatelnyy dvizheniem rabochego organa / K.M. Usanov, A.P. Moiseev, V.A. Kargin // Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu so dnya rozhdeniya professora Koby V.G. – Saratov, 2011. – S. 239-241.
5. Kargin, V.A. Sistema upravleniya elektromagnitnoy udarnoy mashinoy / V.A. Kargin // Obrazovatel'naya sreda segodnya i zavtra: materialy X Mezhdunar. nauchno-praktich. konf., 2015. – S. 303-306.

6. Moiseev, A.P. Vliyaniye rezhimnykh i konstruktivnykh faktorov na vykhodnye pokazateli impulsnogo elektromagnitnogo privoda / A.P. Moiseev, A.V. Volgin, V.A. Kargin // Nauka v informatsionnom prostranstve: materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 2011, T. 1. – Dnepropetrovsk: Izd-vo Bila K.O. – S. 46-49.

7. Usanov, K., Volgin, A., Chetverikov, E., Kargin, V., Moiseev, A., Ivanova, Z. (2017). Power electromagnetic strike machine for engineering-geological surveys. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 87. 032049. 10.1088/1755-1315/87/3/032049.

