

УДК 621.318.3

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОДНООБМОТОЧНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРУЖИННЫМ НАКОПИТЕЛЕМ

Мошкин Владимир Иванович,

канд. техн. наук, доцент, зав. каф. энергетики и технологии металлов  
Факультета транспортных систем Курганского государственного университета,  
Россия, 640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25. E-mail: wimosh@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания машин ударного действия с повышенными энергетическими и динамическими показателями для реализации различных импульсных технологий.

**Цель работы:** получение приближенным методом без решения нелинейного дифференциального уравнения движения расчетных выражений энергетических и динамических характеристик однообмоточного импульсного линейного электромагнитного двигателя с пружинным накопителем при условии безударного холостого хода и на основе анализа полученных характеристик выявление особенностей исследуемой конструктивной схемы.

**Методы исследования.** В основу рекомендуемого в данной работе метода аналитического исследования положен принцип взаимности для электромеханических систем. Он позволяет приближенно и достаточно просто определить кинетическую энергию и динамическое тяговое усилие линейного электромагнитного двигателя по его статическим характеристикам. Эта энергия составляет половину разности между интегральной работой электромагнитного двигателя и энергией, связанной с противодействующим усилием. Теоретические исследования подтверждены экспериментально.

**Результаты.** Полученные расчетные выражения основных энергетических и динамических характеристик позволяют выявить возможности исследуемой конструктивной схемы однообмоточного импульсного линейного электромагнитного двигателя с пружинным накопителем при условии безударного холостого хода и в дальнейшем сравнить между собой различные конструктивные схемы с однообмоточными двигателями при проектировании электромагнитных приводов. При работе электромагнитного двигателя в режиме непрерывных ходов теоретически выявлены предельные частота ходов и ударная мощность, которые ограничивают производительность машины для реализации импульсных технологий. Установлены условия безударного холостого хода. Проанализированы преимущества и недостатки конструктивной схемы импульсного линейного электромагнитного двигателя с пружинным накопителем. Благодаря возможности получения безударного холостого хода исследуемая конструктивная схема с пружинным накопителем может найти применение в качестве электромагнитного привода, например, в вакуумных выключателях, тогда как наиболее распространенная конструктивная схема такого же электромагнитного двигателя с возвратной пружиной не способна обеспечить безударный холостой ход привода, и поэтому менее эффективна.

### Ключевые слова:

Импульсный линейный электромагнитный двигатель, электропривод, энергия удара, пружинный накопитель, якорь, тяговое усилие.

К настоящему времени накоплен опыт теоретических, экспериментальных и эксплуатационных исследований импульсных линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) в составе машин для импульсных технологий, свидетельствующий о многообразии конструктивных схем, которые отличаются способом организации возвратно-поступательного движения якоря (бойка) [1–12].

В работе [13] получены энергетические и динамические характеристики одной из распространенных конструктивных схем однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной. В такой схеме рабочий ход совершается при участии электромагнитных сил обмотки, а холостой – с помощью возвратной пружины [14].

В составе машин для импульсных технологий также используется конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем энергии (рис. 1), обладающая рядом особенностей по сравнению со схемой с возвратной пружиной. В ней холостой ход совершается при участии электромагнитных сил обмотки двигателя с одновременным запасанием потенциальной энергии в сжатой накопительной пружине – 1 (рис. 1). Рабочий ход машины происходит за счет накопленной энергии этой пружины, а также гравитации.

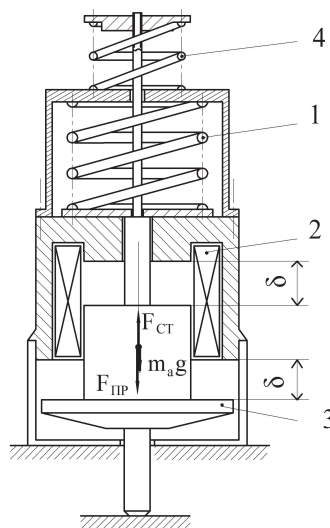


Рис. 1. Конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем: 1 – накопительная пружина; 2 – обмотка возбуждения; 3 – якорь; 4 – вспомогательная пружина

Fig. 1. Schematic construction of a single-winding linear electromagnetic motor with a spring drive: 1 is the storage spring; 2 is the excitation winding; 3 is the anchor; 4 is the secondary spring

В работе [15] рассмотрены эти две конструктивные схемы однообмоточных ударных машин для погружения электродов в грунт и экспериментально получены их динамические характеристики, причём в этих схемах одна и та же пружина использована как для совершения холостого хода в первой из них, так и для рабочего хода во второй. Полученные таким образом динамические характеристики рассмотренных схем позволили сравнить их между собой. Однако экспериментальные динамические характеристики для рассмотренных схем получены при условии равенства конечных скоростей якоря как при рабочем, так и при холостом ходах. В этих случаях избыточная накопленная кинетическая энергия якоря при холостых ходах будет преобразовываться в шум и тепловые потери при работе двигателя, снижая его энергетические показатели и надёжность. В настоящей работе исследуется наиболее распространённый режим импульсного ЛЭМД, при котором конечные скорости якоря, в отличие от [15], существенно отличаются: при рабочих ходах они значительно выше, чем при холостых ходах.

Цель исследования – получить приближенным методом расчетные выражения энергетических и динамических характеристик однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем и на основе их анализа выявить возможности исследуемой конструктивной схемы. Будем считать, как и в [13, 15], что двигатель расположен вертикально, начальная скорость движения его якоря равна нулю, при холостом ходе машины противодействующее якорю усилие накопительной пружины  $F_{\text{пр}}$  пропорционально его перемещению  $\delta$ , характеристики питающего импульса напряжения и пружины неизменны, имеется соответствие окончания и появления тока в обмотке моментам останова якоря, совершающего рабочий или холостой ход. Кроме того, в обесточенном состоянии обмотки – 2 и нижнем (исходном) по схеме на рис. 1 положении якоря – 3 его вес уравновешен вспомогательной пружинкой – 4. С её помощью устанавливают исходное положение якоря с усилием начального поджатия  $F_0$  накопительной пружины, у которой жесткость  $c$  неизменна на всем перемещении якоря, массой пружин пренебрегаем.

Двигатели с такой конструктивной схемой используются в приводе машин прессового и штамповочного оборудования [8], ударных машин для погружения в грунт металлических электродов [15], в составе электромагнитного привода, например в вакуумных выключателях, отключение которых происходит за счёт потенциальной энергии, предварительно сжатой в период холостого хода накопительной пружины. При доработке этой конструктивной схемы накопительная пружина может работать как на сжатие, так и на растяжение, что обеспечит для привода, например, того же выключателя его безударный ход как на включение, так и на отключение.

Оценим энергетическую и динамическую эффективность рассмотренной конструктивной схемы, выразив кинетическую энергию якоря и его динамические характеристики. Для этого используем известное выражение (1) кинетической энергии якоря ЛЭМД, полученное с помощью принципа взаимности для электромеханических систем без учета потерь в магнитопроводе двигателя от перемещения и вихревых токов, а также потерь, связанных с преодолением сил трения [16–19]. Такое приближенное выражение позволяет найти кинетическую энергию  $A_k$  якоря двигателя по его статическим характеристикам – интегральной работе  $A_n$  и работе  $A_{\text{пр}}$ , связанной с противодействующим усилием:

$$A_k = 0,5(A_n - A_{\text{пр}}). \quad (1)$$

С целью упрощения примем значения статического тягового усилия  $F_{\text{СТ}}(\delta)$  двигателя не зависящими от перемещения  $\delta$ , тогда

$$A_n = \int_{\delta_n}^{\delta_k} F_{\text{СТ}}(\delta) d\delta = F_{\text{СТ}}(\delta_n - \delta_k) = F_{\text{СТ}}\delta,$$

где  $\delta_n, \delta_k$  – начальный и конечный рабочие зазоры;  $\delta = \delta_n - \delta_k$ .

Учитывая, что работа  $A_{\text{пр}}$ , связанная с противодействующим усилием, для данной конструктивной схемы может быть представлена в виде двух слагаемых как  $A_{\text{пр}} = m_a g \delta + A_{\text{пр}}$ , запишем с учётом (1) для этапа холостого хода двигателя выражение кинетической энергии якоря  $A_k$ :

$$A_k = 0,5(F_{\text{СТ}}\delta - m_a g \delta - A_{\text{пр}}), \quad (2)$$

$$A_{\text{пр}} = \int_{\delta_n}^{\delta_k} F_{\text{пр}}(\delta) d\delta = 0,5c\delta^2 + F_0\delta, \quad (3)$$

где  $m_a$  – масса якоря;  $A_{\text{пр}}$  – потенциальная энергия, запасаемая в накопительной пружине при ее деформации на величину перемещения  $\delta$  под действием электромагнитных сил обмотки ЛЭМД; второе слагаемое  $F_0\delta$  в выражении (3) учитывает энергию, связанную с усилием начального поджатия этой пружины. Тогда (2) с учетом (3) представим в виде:

$$A_k = 0,5m_a g \delta (F_{\text{СТ}^*} - 1 - 0,5c_* - F_{0^*}),$$

где  $F_{\text{СТ}^*} = F_{\text{СТ}}/(m_a g)$  – относительное статическое тяговое усилие;  $F_{0^*} = F_0/(m_a g)$  – относительное усилие начального поджатия пружины;  $c_* = c\delta/(m_a g)$  – относительная жесткость накопительной пружины.

Для нахождения динамической (движущей) силы тяги  $F_d$  импульсного ЛЭМД на этапе холостого хода машины представим кинетическую энергию якоря (2) в виде алгебраической суммы двух слагаемых:

$$A_k = \int_{\delta_n}^{\delta_k} F_d(\delta) d\delta - (A_{\text{пр}} + m_a g \delta), \quad (4)$$

где первое слагаемое характеризует вклад обмотки ЛЭМД в создание кинетической энергии якоря на

данном этапе, второе – уменьшение этой энергии и переход ее в потенциальные энергии пружины и положения якоря. Приравняв правые части (2) и (4), с учетом (3) получим в относительной форме интересное нас выражение динамической силы тяги двигателя:

$$F_{д*} = F_{д} / (m_{а}g) = 0,5(F_{СТ*} + 0,5c_{*} + F_{0*} + 1). \quad (5)$$

Кинетическая энергия (энергия удара)  $A_{у}$  машины во время рабочего хода будет определяться потенциальными энергиями положения якоря и состояния пружины. При ограниченном перемещении  $\delta$  получим выражение энергии  $A_{у} = m_{а}g\delta + A_{пр}$ , которое с учетом (3) примет вид:

$$A_{у} = m_{а}g\delta(0,5c_{*} + F_{0*} + 1)$$

или в относительной форме:

$$A_{у*} = A_{у} / (m_{а}g\delta) = 0,5c_{*} + F_{0*} + 1. \quad (6)$$

Как видно из (6), при неизменном перемещении  $\delta$  энергия удара (кинетическая энергия) определяется жесткостью  $c$  пружины и усилием  $F_0$  ее начального поджатия, то есть только параметрами пружины.

Если принять, что для этапа холостого хода машины при полностью возбуждаемом и равном  $\delta$  перемещении якоря его кинетическая энергия  $A_{к}$ , определяющая выбег, должна к концу перемещения отсутствовать, то из (2) для  $A_{к}=0$  получим:

$$F_{СТ}\delta = m_{а}g\delta + A_{пр},$$

откуда с учетом (3) получаем соотношение, связывающее энергию удара, статическую силу тяги, массу подвижных частей, жесткость и усилие начального поджатия пружины при условии  $A_{к}=0$ , то есть при условии безударного холостого хода:

$$F_{СТ} = m_{а}g + 0,5c\delta + F_0$$

или в относительной форме:

$$F_{СТ*} = 1 + 0,5c_{*} + F_{0*}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что каждому значению жесткости и усилия начального поджатия пружины и массы подвижных частей соответствует определенное значение статической силы тяги ЛЭМД, при котором выбег якоря отсутствует. Если это усилие  $F_{СТ*} > 1 + 0,5c_{*} + F_{0*}$ , то при ограниченном перемещении якоря избыток его кинетической энергии при холостом ходе машины будет преобразовываться в другие виды энергии, например в механическую при ударе якоря о детали конструкции ЛЭМД, и рассеиваться в тепло. Величина энергии удара при этом не изменится, однако КПД двигателя упадет, повысится шум и снизится надежность привода. Если  $F_{СТ*} < 1 + 0,5c_{*} + F_{0*}$ , то величина перемещения якоря станет меньше  $\delta$ , а полезная энергия (например, энергия удара) понизится. Кроме того, для некоторых приводов необходимо обеспечить заданное перемещение  $\delta$ , чтобы, например, взвести накопительную пружину. Для работоспособности исследуемой конструктивной схемы машины для импульсных технологий должно суще-

ствовать соответствие между параметрами пружинного накопителя и статическим тяговым усилием импульсного ЛЭМД. Следовательно, регулировочные свойства такой конструктивной схемы ограничены верхним пределом, при котором полезная энергия будет неизменной.

Для исследуемой конструктивной схемы существуют области допустимых значений параметров в виде ограничений, для которых выполняется (7):

$$F_{0*} \geq 0; c_{*} \geq 1; F_{СТ*} > 1. \quad (8)$$

На рис. 2 представлены зависимости относительных энергии удара  $A_{у*}$  и статического тягового усилия  $F_{СТ*}$  ЛЭМД от жесткости пружины  $c_{*}$ , силы ее начального поджатия  $F_{0*}$ , полученные из выражений (6) и (7) и при условиях (8), причем минимальное значение конструктивного параметра  $c_{*}=1$  обозначено кружочками.

Анализ этих зависимостей, имеющих линейный характер изменения, показывает, что с ростом жесткости пружины при неизменном значении силы начального поджатия необходимо повышать статическое тяговое усилие ЛЭМД, и энергия удара ЛЭМД также будет расти.

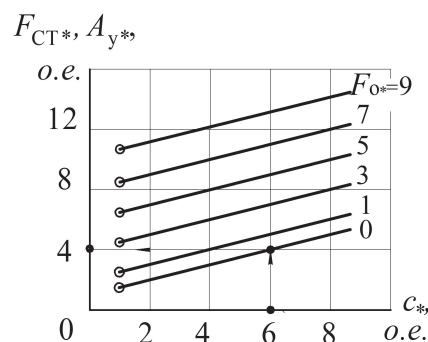


Рис. 2. Влияние жесткости возвратной пружины и усилия её начального поджатия на энергию удара и статическое тяговое усилие

Fig. 2. Influence of return spring stiffness and tension of its initial pressure on impact energy and static tractive force

По графикам рис. 2 или по (7) можно производить настройку конструктивной схемы: при заданных конструктивных параметрах  $c_{*}$  и  $F_{0*}$  легко определить необходимый режимный параметр  $F_{СТ*}$  двигателя, например, при  $c_{*}=6$  и  $F_{0*}=0$  получим  $F_{СТ*}=4$ .

Динамические характеристики рассматриваемой машины будут определяться этапами рабочего и холостого ходов. Так как движение якоря происходит под действием падающей по перемещению силы, то на этапе холостого хода дифференциальное уравнение движения якоря ЛЭМД для рассматриваемой конструктивной схемы машины имеет следующий вид:

$$m_{а} \frac{d^2\delta}{dt^2} = F_{нх} - c\delta, \quad (9)$$

где  $F_{нх}$  – начальное значение силы, движущей якорь (динамической силы) на этапе холостого хода, которое с учетом (5) и для  $\delta=0$  будет:

$$F_{\text{нх}} = F_{\text{д}} = 0,5(F_{\text{СТ}} + F_0 + m_a g).$$

Время движения при холостом ходе  $t_{\text{хх}}$  найдено в [20]:

$$t_{\text{хх}} = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{F_{\text{кх}}}{F_{\text{нх}}} \right), \quad (10)$$

где  $F_{\text{нх}}, F_{\text{кх}}$  – начальное и конечное значения силы, движущей якорь при холостом ходе.

Решение уравнения движения для нашей конструктивной схемы на этапе холостого хода от  $t=0$  до  $t=t_{\text{хх}}$  при отсутствии затухания получено в [20]:

$$\begin{aligned} \delta(t) &= \frac{F_{\text{нх}}}{c} + \frac{F_{\text{кх}}}{c} \sin \left( \sqrt{\frac{c}{m_a}} t - \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= \delta_{\text{нр}} + \delta_{\text{пр}} \sin \left( \sqrt{\frac{c}{m_a}} t - \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\delta_{\text{нр}} = \frac{F_{\text{нх}}}{c}$  – значение принужденной составляющей  $\delta(t)$  для уравнения (9);  $\sqrt{c/m_a}$  – собственная круговая частота колебаний якоря. Тогда закон изменения скорости движения якоря найдём после дифференцирования (11):

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{F_{\text{кх}}}{c} \sqrt{\frac{c}{m_a}} \cos \left( \sqrt{\frac{c}{m_a}} t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (12)$$

По условию в конечной точке при  $t=t_{\text{хх}}$  скорость движения якоря должна быть равна нулю, следовательно, из (12) получим:

$$t_{\text{хх}} = \pi \sqrt{\frac{m_a}{c}}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что время движения якоря на этапе холостого хода в явном виде не зависит от статического тягового усилия  $F_{\text{СТ}}$  импульсного ЛЭМД, а определяется только массой якоря и жесткостью накопительной пружины, хотя сам холостой ход совершается под действием этой силы  $F_{\text{СТ}}$ . В действительности согласно уравнению (7), полученному для режима безударного холостого хода машины, статическая сила тяги должна быть согласована со свойствами пружинного накопителя (параметры  $F_0$  и  $c$ ). Поэтому время  $t_{\text{хх}}$  может быть выражено двояко: либо через тяговое усилие  $F_{\text{СТ}}$ , либо без него. То же относится и ко времени рабочего хода  $t_{\text{рх}}$ , поскольку энергетически рабочий ход машины с рассматриваемой конструктивной схемой обусловлен предшествующим ему холостым ходом. Покажем это, представив, например, выражение (13) для  $t_{\text{хх}}$  с учетом (7) в относительной форме и приняв за базисную величину время  $T_1$  свободного падения якоря с высоты  $\delta$ :

$$T_1 = \sqrt{2\delta/g}.$$

Получим время холостого хода  $t_{\text{хх}}$ , выраженное через усилие  $F_{\text{СТ}}$ :

$$t_{\text{хх}^*} = \frac{t_{\text{хх}}}{T_1} = \frac{\pi}{2\sqrt{F_{\text{СТ}^*} - F_{0^*} - 1}}, \quad (14)$$

а затем через жесткость накопительной пружины :

$$t_{\text{хх}^*} = \frac{t_{\text{хх}}}{T_1} = \frac{\pi}{\sqrt{2c_*}}.$$

Подставив (13) в (10), получим значение конечной силы тяги  $F_{\text{кх}} = -F_{\text{нх}}$ , означающее, что якорь первую половину пути движется ускоренно, вторую – замедленно. На этапе холостого хода происходит «зарядка» пружинного накопителя.

На этапе рабочего хода, когда обмотка возбуждения импульсного ЛЭМД обесточена, дифференциальное уравнение движения якоря для рассматриваемой конструктивной схемы машины будет иметь вид, аналогичный (9):

$$m_a \frac{d^2\delta}{dt^2} = F_{\text{нр}} - c\delta,$$

где  $F_{\text{нр}} = c\delta + F_0 + m_a g$  – начальное значение движущей силы на этапе рабочего хода, обусловленное накопительной пружиной, усилием начального поджатия и гравитацией. Конечное значение движущей силы на этом этапе  $F_{\text{рп}}$  определяется силой тяжести якоря и усилием начального поджатия пружины, то есть  $F_{\text{рп}} = m_a g + F_0$ . Тогда с учетом конечного  $F_{\text{рп}}$  и начального  $F_{\text{нр}}$  усилий, а также условия (7) время движения якоря при рабочем ходе  $t_{\text{рх}}$  якоря также определим двумя способами из уравнения (10):

$$\begin{aligned} t_{\text{рх}} &= \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{1 + c_* / (F_{\text{СТ}^*} - 0,5c_*)} \right); \\ t_{\text{рх}} &= \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{1 + c_* / (1 + F_{0^*})} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Представим выражения (15) для  $t_{\text{рх}}$  и время цикла двигателя  $t_{\text{ц}} = t_{\text{хх}} + t_{\text{рх}}$  в относительной форме соответственно:

$$\begin{aligned} t_{\text{рх}^*} &= \frac{t_{\text{рх}}}{T_1} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2c_*}} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{1 + c_* / (F_{\text{СТ}^*} - 0,5c_*)} \right); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} t_{\text{ц}^*} &= \frac{t_{\text{ц}}}{T_1} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2c_*}} \left( \frac{3\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{1 + c_* / (F_{\text{СТ}^*} - 0,5c_*)} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

На рис. 3 приведены построенные по (14) и (16) зависимости относительных времен холостого и рабочего ходов рассматриваемой машины от относительных значений жесткости пружины накопителя и статического тягового усилия ЛЭМД при условии (7), учитывающем начальное поджатие пружины. Кривые  $t_{\text{рх}^*}$  для заданных значений же-

сткости  $c_*$  со стороны меньших значений  $F_{СТ*}$  ограничены точками (кружочками на рис. 3), в которых значение усилия начального поджатия равно нулю и выполняется условие (7). Аналогично кривые  $t_{х.х*}$  для заданных значений  $F_{0*}$  со стороны меньших значений  $F_{СТ*}$  ограничены точками, в которых жесткость  $c_*=1$  и выполняется условие (7). Анализ этих зависимостей указывает на большую в 2–5 раз продолжительность холостого хода, который выполняется с участием электромагнитного тягового усилия  $F_{СТ}$ , по сравнению с рабочим в диапазоне изменения жесткости  $c_*$  от 1 до 6–8. Так, для  $c_*=8$  и  $F_{0*}=0$  согласно (7) получим  $F_{СТ*}=5$ . Следовательно, низкое быстродействие ЛЭМД при холостом ходе по сравнению с рабочим объясняется невысоким значением развиваемого двигателем тягового усилия  $F_{СТ*}$  для указанного диапазона жесткости  $c_*$  и при условии безударного холостого хода машины, что снижает динамические свойства данной конструктивной схемы.

Время рабочего хода при жесткости  $c_*=const$  с ростом  $F_{СТ*}$  падает ещё и за счёт роста усилия  $F_{0*}$ , так как запасаемая потенциальная энергия пружины за счет увеличения усилия начального поджатия также возрастает. По сравнению с холостым ходом рабочий ход совершается значительно динамичнее, поскольку он происходит при начальном движущем усилии, превосходящем конечное, что теоретически установлено в [20] и подтверждено экспериментально в [15]. Это обстоятельство удобно использовать для таких технологических операций, как, например, отключение вакуумных выключателей.

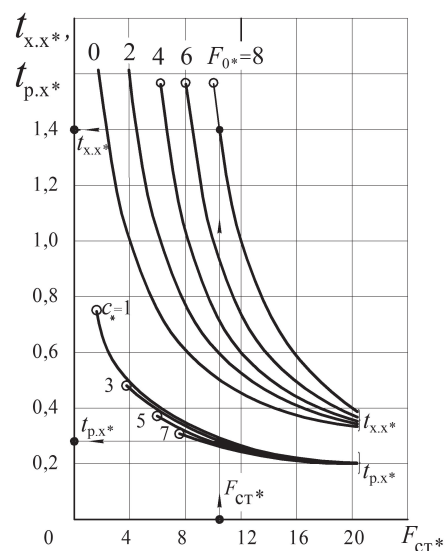


Рис. 3. Влияние жесткости пружины и статического тягового усилия на времена холостого и рабочего ходов

Fig. 3. Influence of spring stiffness and static tractive force on time of idle and operating strokes

При работе импульсного ЛЭМД в режиме непрерывных ходов определим относительную частоту ходов  $n_*$  в минуту, используя (17):

$$n_* = \frac{60}{t_{Ц*}} = \frac{60\sqrt{2c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{СТ*} - 0,5c_*)}\right)}. \quad (18)$$

На рис. 4 представлены зависимости относительной частоты ходов в минуту, построенные по выражению (18) и при выполнении условия (7). Из них следует, что с ростом жесткости пружины  $c_*$  и тягового усилия  $F_{СТ*}$  частота ходов машины также растет. При этом одну и ту же частоту ходов можно получить при определенных сочетаниях  $F_{СТ*}$ ,  $c_*$  и  $F_{0*}$ .

Для конкретных рекомендаций по выбору рациональных значений параметров  $F_{СТ*}$ ,  $c_*$  и  $F_{0*}$  необходимо привлечь дополнительные критерии оценки, например, постоянство энергии удара, ограничение кинетической энергии якоря в конце холостого хода и др.

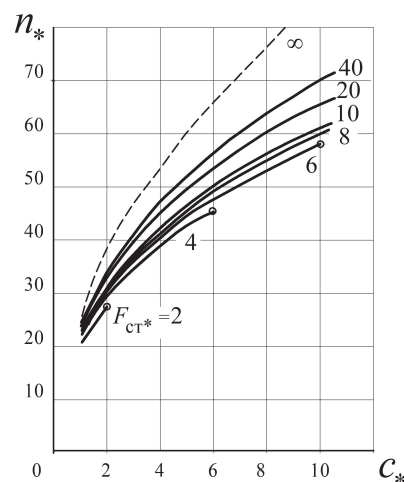


Рис. 4. Влияние жесткости пружины и статической силы тяги на частоту ходов

Fig. 4. Influence of spring stiffness and static tractive force on stroke frequency

Из анализа зависимостей (18), изображенных на рис. 4, следует вывод о существовании предельной частоты ходов рассматриваемой конструктивной схемы при заданных значениях энергий удара, статической силы тяги ЛЭМД, жесткости пружины или усилия ее начального поджатия. Попытка повышения частоты ходов, например, за счет увеличения частоты следования питающих обмотку ЛЭМД импульсов напряжения источника питания, приводит к снижению энергии удара, что наблюдалось в ходе экспериментов [13]. Резервом для повышения частоты ходов могут служить другие конструктивные схемы, например с двухобмоточным ЛЭМД [21].

На основе формул (6), (18) и с учётом (7) получим выражение относительной ударной мощности двигателя для режима непрерывных ходов:

$$P_{y*} = A_{y*} n_* = \frac{60 F_{СТ*} \sqrt{2c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{СТ*} - 0,5c_*)}\right)},$$

и представим его в виде семейства кривых функций параметров  $F_{ст*}$  и  $c_*$  на рис. 5.

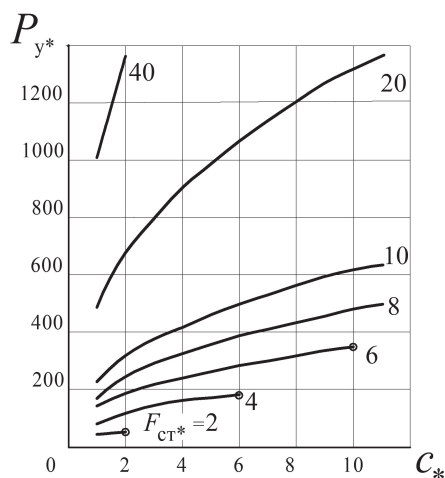


Рис. 5. Влияние жесткости пружины и статического тягового усилия на ударную мощность машины

Fig. 5. Influence of spring stiffness and static tractive force on impact machine capacity

Из анализа этих зависимостей следует, что ударная мощность машины растет с увеличением как статической силы тяги ЛЭМД, так и жесткости пружины накопителя. При этом существует для каждой совокупности параметров  $F_{ст*}$ ,  $c_*$  и  $F_{0*}$  предельное значение ударной мощности машины, ограниченное точками, в которых  $F_{0*}=0$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1970. – 260 с.
2. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденция развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 37–43.
3. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Comparison of geometrically similar electromagnet systems by means of the constancy condition of heat criterion // Russian Electrical Engineering. – 2011. – V. 82. – Iss. 12. – P. 651–652.
4. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor / V.Yu. Neyman, L.A. Neyman, A.A. Petrova, A.A. Skotnikov, O.V. Rogova // Russian Electrical Engineering. – 2011. – V. 82. – Iss. 6. – P. 328–331.
5. Ивашин В.В., Певчев В.П. Короткоходовой импульсный электромагнитный двигатель сейсмоисточника: монография. – Saarbrücken, Германия: LAP – Lambert Academic Publishing GmbH&Co.KG, 2011. – 157 с.
6. Malinin L.I., Neyman V.Yu. Limiting power characteristics of direct-current electromagnetic motors // Russian Electrical Engineering. – 2009. – V. 80. – Iss. 12. – P. 701–706.
7. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выборе конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы. Коллективная монография / под. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–170.

Машины, выполненные по рассмотренной конструктивной схеме, характеризуются ограниченной возможностью регулирования энергии удара с помощью устройства питания и управления из-за необходимости замены и регулирования пружины накопителя. При наличии фиксатора конструкция (рис. 1) позволяет сохранять механическую энергию после «зарядки» механического аккумулятора и использовать её, например, на объектах без электроснабжения [15].

#### Выводы

1. Полученные приближенные расчетные выражения энергетических и динамических характеристик позволяют выявить возможности конструктивной схемы однообмоточного импульсного ЛЭМД с пружинным накопителем при условии безударного холостого хода и в дальнейшем сравнить между собой различные конструктивные схемы с однообмоточными двигателями при проектировании электромагнитных приводов.
2. Для работоспособности исследуемой схемы с пружинным накопителем и при условии безударного холостого хода должно существовать соответствие между параметрами пружинного накопителя и статическим тяговым усилием импульсного ЛЭМД. При работе в режиме непрерывных ходов существует предельная частота ходов и ударная мощность, которые ограничивают производительность импульсной машины.

8. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.
9. Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н. Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
10. Линейный электромагнитный двигатель: пат. РФ № 2405237; заявл. 27.05.09; опубл. 27.11.10, Бюл. № 33.
11. Певчев В.П., Ивашин В.В. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей: Монография. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
12. Ugarov G.G., Moshkin V.I., Massad A.K. The Influence of Holding Device Anchor Parameters on the Holding Force Magnitude of an Integrated Linear Electromagnetic Motor / The International Journal of Engineering And Science (IJES). – 2014. – V. 3. Iss. 4. – P. 01–06.
13. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной // Вестник СГТУ. – 2012. – № 2 (66). – Вып. 2. – С. 129–135.
14. Линейный электромагнитный двигатель с удержанием якоря: пат. РФ на полезную модель № 59342; заявл. 31.07.06; опубл. 10.12.06, Бюл. № 34.
15. Усанов К.М., Каргин В.А., Трубенкова И.В. Динамическая эффективность однообмоточных электромагнитных ударных машин с различными рабочими циклами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 12 (74). – С. 67–70.
16. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 446 с.

17. Ольсон Г. Динамические аналогии. – М: Изд-во иностр. лит., 1947. – 291 с.
18. Милых А.Н., Шидловский А.К. Принцип взаимности и обратимость явлений в электротехнике. – Киев: Наукова думка, 1967. – 316 с.
19. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Использование принципа взаимности при исследовании и расчёте энергетических характеристик линейных электромагнитных двигателей // Задачи динамики электрических машин. – Омск: Изд-во ОмПИ, 1988. – С. 120–128.
20. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. О рациональной форме движущих сил, заданных как функции перемещения. – Курган: Курган. машиностр. ин-т, 1984. – 15 с. – Информэлектро, № 318 эт-84.
21. Электромагнитный пресс: пат. РФ № 2026792; заявл. 19.06.90; опубл. 20.01.95, Бюл. № 2.

Поступила 19.01.2015 г.

UDC 621.318.3

## ENERGY AND DYNAMIC EFFICIENCY OF SINGLE-WINDING LINEAR ELECTROMAGNETIC MOTORS WITH A SPRING DRIVE

Vladimir I. Moshkin,

Kurgan State University, 25, Gogol street, Kurgan, 640669, Russia.

E-mail: wimosh@mail.ru

*Relevance of the work is caused by the need to develop the impact machines with the raised power and dynamic indicators for implementing various pulse technologies.*

**The main aim** of the research is to obtain the calculation expressions of power and dynamic performance of single-winding pulsed linear electromagnetic motors with spring energy store using the approximate method without solving nonlinear differential equations of motion under condition of unaccented idling; to identify the features of the constructive scheme based on the analysis of the characteristics obtained.

**Research methods.** The principle of reciprocity is the basis for a method of analytical research recommended in the work for electro-mechanical systems. It allows approximately and rather easy defining kinetic energy and dynamic traction effort of the linear electromagnetic motor by its static characteristics. This energy makes a half of difference between integrated operation of electromagnetic motor and energy connected with counteracting effort. Theoretical researches are proved experimentally.

**Results.** The obtained design expressions of the main power and dynamic characteristics allow revealing the possibilities of the constructive scheme of a single-winding pulsed linear electromagnetic motor with a spring store under condition of unaccented idling and comparing various constructive schemes with the single-winding engines when designing electromagnetic drives. The authors revealed theoretically the frequency of courses and impact power which limit the productivity of pulsed machine at operation of electromagnetic motor in a mode of continuous courses and determined the conditions of unaccented idling. The paper analyzes the advantages and shortcomings of the constructive scheme of the pulsed linear electromagnetic engine with a spring store. Thanks to possibility of obtaining unaccented idling, the given constructive scheme with a spring store can be applied as the electromagnetic drive, for example, in vacuum switches. The most widespread constructive scheme of the same electromagnetic engine with a returnable spring is not capable of providing unaccented idling of the drive and therefore it is less effective.

### Key words:

*Pulsed linear electromagnetic motor, electric drive, impact energy, spring drive, anchor traction.*

### REFERENCES

1. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic impact machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.
2. Ugarov G.G., Neyman V.Yu. Tendentsiya razvitiya i primeneniya ruchnykh udarnykh mashin s elektromekhanicheskim preobrazovaniem energii [Trend of developing and applying portable impact machines with electromechanical energy transformation]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2002, no. 2, pp. 37–43.
3. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Comparison of geometrically similar electromagnet systems by means of the constancy condition of heat criterion. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, Iss. 12, pp. 651–652.
4. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, Iss. 6, pp. 328–331.
5. Ivashin V.V., Pevchev V.P. *Korotkokhodovoy impulsny elektromagnitnyy dvigatel seysmoistochnika: monografiya* [Short-stroke engine pulsed electromagnetic seismic source: Monograph]. Saarbrücken, Germany, LAP – Lambert Academic Publishing GmbH&Co.KG, 2011. 157 p.
6. Malinin L.I., Neyman V.Yu. Limiting power characteristics of direct-current electromagnetic motors. *Russian Electrical Engineering*, 2009, vol. 80, Iss. 12, pp. 701–706.
7. Neyman V.Yu. K voprosu o ratsionalizatsii rabochikh protsessov i vybora konstruktivnykh skhem elektromagnitnykh udarnykh mashin [On the issue of simplification of procedure and selection of structural schemes of electromagnetic impact machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NGTU Publ., 2004. pp. 155–170.

8. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Lvitsyn A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
9. Ryashentsev N.P., Ryashentsev V.N. *Elektromagnitny privod lineynykh mashin* [Electromagnetic drive linear machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 153 p.
10. Neyman V.Yu., Smirnova Yu.B., Petrova A.A., Evreinov D.M. *Lineyny elektromagnitnyy dvigatel* [A linear electromagnetic motor]. Patent RF, no. 2405237, 2009.
11. Pevchev V.P., Ivashin V.V. *Proektirovanie moshchnykh korotkokohtovykh impulsnykh elektromagnitnykh dvigateley* [Designing powerful short-pulsed electromagnetic motors: Monograph]. Tolyatti, TGU Press, 2012. 142 p.
12. Ugarov G.G., Moshkin V.I., Massad A.K. The Influence of Holding Device Anchor Parameters on the Holding Force Magnitude of an Integrated Linear Electromagnetic Motor. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2014, vol. 3, Iss. 4, pp. 01–06.
13. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Energeticheskaya i dinamicheskaya effektivnost odnoobmotochnykh lineynykh elektromagnitnykh dvigateley s vozvratnoy pruzhinoy [Power and dynamic efficiency of linear electromagnetic engines with one winding and the returnable spring]. *Vestnik SGTU*, 2012, no. 2 (66), Iss. 2, pp. 129–135.
14. Moshkin V.I., Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A. *Lineyniy elektromagnitnyy dvigatel s uderzhanem yakorya* [Linear electromagnetic motor with holding anchors]. Patent RF, no. 59342, 2006.
15. Usanov K.M., Kargin V.A., Trubenkova I.V. Dinamicheskaya effektivnost odnoobmotochnykh elektromagnitnykh udarnykh mashin s razlichnymi rabochimi tsiklami [Dynamic efficiency of electromagnetic two-winding drum machines with different operating cycles]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2010, no. 12 (74), pp. 67–70.
16. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. *Elektromagnitny postoyannogo toka* [DC electromagnets]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960. 446 p.
17. Olson G. *Dinamicheskie analogii* [Dynamic analogy]. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1947. 291 p.
18. Milyakh A.N., Shidlovskiy A.K. *Printsip vzaimnosti i obratimost yavleniy v elektrotekhnike* [The principle of reciprocity and reversibility of phenomena in electrical engineering]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1967. 316 p.
19. Moshkin V.I., Ugarov G.G. *Ispolzovanie printsipa vzaimnosti pri issledovanii i rashchete energeticheskikh kharakteristik lineynykh elektromagnitnykh dvigateley* [Using the principle of reciprocity when studying and calculating the energy performance of linear electromagnetic motors]. *Zadachi dinamiki elektricheskikh mashin* [Problems of electric machine dynamics]. Omsk, OmPI Press, 1988. pp. 120–128.
20. Moshkin V.I., Ugarov G.G. *O ratsionalnoy forme dvizhushchikh sil, zadannykh kak funktsii peremeshcheniya* [About the rational form of the driving forces specified as a function of displacement]. Kurgan, 1984. 15 p. *Informelektro*, no. 318, et-84.
21. Maer E.F., Batalov A.G., Moshkin V.I., Popov I.P. *Elektromagnitnyy press* [Electromagnetic press]. Patent RF, no. 2026792, 1995.

Received: 19 January 2015.