

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕССА С МАЛЫМ ХОДОМ ПЛУНЖЕРА

Ю. Б. Ефимова

Новосибирский Государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Представлено исследование влияния геометрических параметров линейного электромагнитного двигателя пресса с малым ходом плунжера (якоря), используемого при выполнении ремонтно-восстановительных работ горно-шахтного оборудования, на его силовые характеристики и эффективность. Пресс на базе линейного электромагнитного двигателя надежен, мобилен, экологичен, энергоэффективен, не требует высококвалифицированного персонала для обслуживания. Проведен анализ влияния геометрических размеров электродвигателя пресса на его удельные силовые характеристики с использованием численного моделирования магнитного поля в среде FEMM и разработан алгоритм определения геометрических размеров с сохранением теплового габарита обмоток для работы электромагнитного пресса в условиях естественного воздушного охлаждения, а также с учетом материала магнитопровода и его степени насыщения. Произведен расчет двух прессов с максимальным усилием прессования 10 кН и сравнение их основных показателей с прессом той же мощности, используемым в промышленности. Показано, что рациональный выбор геометрических параметров пресса на этапе предварительного проектирования с учетом особенностей технологического процесса, таких как гиперболическая тяговая характеристика с резким увеличением усилия к концу хода плунжера и насыщение магнитопровода, вызванное малым ходом якоря, позволяет улучшить значения удельного максимального тягового усилия и работы в более чем полтора раза без уменьшения при этом КПД.

Ключевые слова: линейный электромагнитный пресс, ремонтно-восстановительные работы, оптимизация геометрии, численное моделирование, насыщение магнитопровода, силовые и энергетические характеристики, малый ход плунжера, гиперболическая характеристика сопротивления материалов.

Для цитирования: Ефимова Ю. Б. Выбор рациональных геометрических параметров линейного электромагнитного пресса с малым ходом плунжера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 115–128. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_115.

Rational geometric parameters selection of a linear electromagnetic press with low plunger stroke

Yu. B. Efimova

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The article presents a study of the geometric parameters influence on its power characteristics and efficiency of a press linear electromagnetic motor with a low plunger (armature) stroke used in the repair and restoration of mining equipment. The press based on a linear electromagnetic motor is reliable, mobile, environmentally friendly, energy efficient, does not require highly qualified personnel for maintenance. The analysis of the geometrical dimensions influence of the press electric motor on its specific power characteristics was carried out using numerical modeling of the magnetic field in the FEMM environment, and an algorithm for determining the geometric dimensions has been developed, while maintaining the thermal dimension of the windings for the operation of an electromagnetic press in conditions of natural air cooling, as well as taking into account the material of the magnetic circuit and its degree of saturation. The calculation of two presses with a maximum pressing force of 10 kN was made and their main indicators were compared with a press of the same power used in industry. It is shown that the geometric parameters rational choice of the press in preliminary design, taking into account the technological process, such as the hyperbolic thrust characteristic with a sharp increase in the force towards the end of the plunger stroke and the magnetic circuit saturation caused by the armature low stroke, allows to improve the values of the specific maximum tractive effort and work by more than one and a half times without reducing the efficiency.

Key words: Linear electromagnetic press, Repair and restoration works, Geometry optimization, Numerical modeling, Core saturation, Power and energy characteristics, Small plunger stroke, Hyperbolic resistance characteristic of materials.

For citation: Efimova Yu. B. Rational geometric parameters selection of a linear electromagnetic press with low plunger stroke. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):115–128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_115.

1. Введение

В горном деле при выполнении ремонтно-восстановительных работ горно-шахтного оборудования, отличающегося большими массогабаритными характеристиками и невозможностью транспортировки на ремонтные заводы, ремонтные организации часто проектируются и размещаются в непосредственной близости к горно-шахтным комбинатам. Одними из наиболее распространенных ремонтных операций при производстве небольших деталей горных машин, их замене и закреплении являются операции холодного безударного прессования: осадки, клеймения, обжатия, гибки, штамповки, для которых применяются прессы импульсного действия малых и средних мощностей [1].

В труднодоступных районах размещения горных комбинатов и шахт при устройстве ремонтных мастерских существуют следующие проблемы: снижение мощностей используемого

оборудования в связи с ограниченным или автономным энергоснабжением, отсутствие высококвалифицированных кадров, низкий уровень автоматизации проектирования, необходимость высокой экологичности производства ремонтных работ [2]. Все это предъявляет особо жесткие требования к энергоэффективности, надежности и простоте обслуживания используемого прессового оборудования.

Электродвигатели для прессов импульсного действия малой и средней мощности имеют различные исполнение вращающегося и линейного принципа действия [3,4]. Прессы на базе электродвигателей вращающегося исполнения требуют наличия дополнительных узлов и механизмов для преобразования вращающегося движения в поступательное, что снижает надежность прессы. Кроме того, существует опасность 2-кратного увеличения пускового тока под воздействием

электродвижущей силы, возникающей в обмотке статора при выбеге электродвигателя по инерции в случае кратковременных снижений или отключений напряжения питания при их последующем самозапуске, а контроль напряжения в электрической сети на горном предприятии имеет важное значение для устойчивой работы электротехнического оборудования [5].

Не менее важным является экологическая безопасность используемого на горно-шахтном предприятии оборудования, что особенно значимо в рамках реализации нацпроекта «Экология» в 2018–2024 гг. [6], частью которого является поиск «наилучших доступных технологий», в качестве которых можно предложить линейные электромагнитные прессы. Они не имеют гидравлических и пневматических звеньев, подключаются к электрической сети горного предприятия или автономному источнику электропитания и практически полностью перерабатываются после истечения срока службы.

В последнее время в качестве двигателей исполнительных механизмов импульсного действия активно применяются линейные синхронные реактивные двигатели [7,8], которые получили название «линейный электромагнитный двигатель». Конструкция линейного электромагнитного двигателя схожа с конструкцией однофазного вращающегося синхронного реактивного двигателя при условии замены вращающегося ротора, размещенного в воздушном зазоре, на ферромагнитный плунжер (якорь), перемещающийся поступательно, тогда вместо электромагнитного момента будет возникать электромагнитная сила, перемещающая якорь в направлении уменьшения воздушного зазора. При движении якоря такого двигателя изменяется рабочий зазор и, соответственно, индуктивность обмотки. Электромагнитные двигатели

указанного принципа действия в настоящее время используются в горно-шахтном оборудовании в конструкциях перфораторов и вибротранспортных машин [9].

Электромагнитные прессы на базе линейных электромагнитных двигателей осуществляют прямое преобразование электроэнергии в механическую работу, это уменьшает их массогабаритные показатели, следовательно, увеличивает удельные силовые и энергетические показатели [10,11]. Кроме этого, они экологичны, надежны, энергоэффективны, так как используют питание в виде однополупериодных импульсов напряжения только в периоды выполнения импульсных операций удара, прессования, а обратный ход совершают под действием возвратной пружины либо силы тяжести и не требуют высококвалифицированного персонала для обслуживания из-за простоты кинематической схемы. Гиперболическая силовая тяговая характеристика линейных электромагнитных прессов соответствует графикам зависимостей сопротивления материалов деформированию: при сжатии материала противодействующее усилие возрастает, однако при этом уменьшается воздушный зазор в магнитопроводе прессы, и усилие, развиваемое прессом, также возрастает.

Проведенный сравнительный анализ существующего прессового оборудования разных типов приводов малых и средних мощностей показал, что при увеличении мощности линейного (цилиндрического) электромагнитного двигателя прессы с комбинированным якорем, двумя рабочими зазорами и стопом (рис. 1) уменьшается его КПД из-за влияния магнитных потоков рассеяния, и ограничил исследования в следующих диапазонах параметров:

– величина перемещения δ плунжера с закрепленным на его стержне с радиусом R_0 рабочим инструментом прессы от 0,5 до 50 мм;

- максимальное усилие, развиваемое прессом, $F_{\max} \leq 100$ кН;
- значения полезной энергии от 0,1 до 10^4 Дж;
- масса до 15 тонн;
- мощность электропривода до 10 кВт.

Наиболее экономичным и легкорееализуемым способом повышения удельных силовых показателей линейных электромагнитных прессов является оптимизация геометрических параметров магнитопровода [12]. Однако при выборе рациональных соотношений геометрических параметров в научных работах принималось допущение о длительном режиме работы линейного электромагнитного двигателя и постоянстве магнитного потока по длине магнитопровода, без учета значительного насыщения некоторых его участков, что не соответствует операциям прессования [13]. В линейном электромагнитном двигателе прессового оборудования механическая работа совершается при малом перемещении плунжера $\delta \leq R_1$, когда величина перемещения плунжера не превышает его радиус R_1 , и неучет насыщения стальных участков магнитопровода приводит к ошибке определения интегральной работы на интервале хода до 100 %, так как на последнем этапе тяговой характеристики при воздушном зазоре, стремящемся к нулю, электромагнит работает со значительным насыщением, увеличиваются потери на гистерезис и вихревые токи.

Таким образом, отсутствие методики расчета, точно отражающей электромагнитные процессы с учетом особенностей технологического процесса при его эксплуатации, не позволяет спроектировать электромагнитный двигатель пресса, соответствующий требуемому усилию прессования.

Целью настоящего исследования является анализ влияния геометрических

параметров линейного электромагнитного двигателя пресса на его удельные силовые характеристики и выбор рациональных геометрических соотношений с учетом особенностей технологического процесса при его эксплуатации.

2. Методика исследований

Для выбора оптимальных конструктивных параметров автором был разработан алгоритм проектного расчета линейных электромагнитных двигателей конструкции, приведенной на рис. 1, работающих в приводах прессов с малым ходом якоря (плунжера), питаемых однополупериодными импульсами напряжения $U \leq 500$ В, при значениях тока установившегося процесса $I \leq 200$ А, протекающего по катушке с обмоткой высотой L_1 и внешним радиусом R_2 , равным внутреннему радиусу статора, при ее естественном воздушном охлаждении.

В результате предварительной оценки с использованием численного моделирования магнитного поля в среде FEMM, которая в настоящее время является одной из общепризнанных программ моделирования, точно описывающего электромагнитные процессы в статическом и динамическом режимах [14,15]. Было установлено, что заметное влияние на удельные характеристики оказывает (рис. 1): высота стопа h_3 , внешний радиус двигателя R_3 , высота дисковой части якоря h_2 и высота полюса h_1 , причем степень влияния геометрических величин зависит от степени насыщения магнитопровода. Область варьирования геометрических параметров была выбрана с учетом сохранения условий теплоотдачи сравниваемых вариантов. Предварительно были определены диапазоны изменения выбранных параметров по отношению к основным геометрическим размерам прессов:

$$0 \leq \frac{h_3}{L_1} \leq 1; R_2 \leq \frac{R_3}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2}} \leq 1,2;$$

$$0 \leq \frac{h_2}{R_1} \leq 2; 0 \leq \frac{h_1}{R_1} \leq 2; \frac{\delta}{R_1} \leq 1. \quad (1)$$

Исходные данные для расчета:

- требуемое максимальное усилие прессования F_{\max} , определяемое из графика сопротивления обрабатываемого материала деформациям для конкретного технологического процесса;
- требуемый технологическим процессом ход якоря, равный начальному (максимальному) значению воздушного зазора магнитной системы δ_{\max} , мм;
- напряжение питания обмотки U , В;
- продолжительность включения линейного электромагнитного двигателя пресса.

Равенство условий теплоотдачи сравниваемых вариантов исполнений в процессе получения оптимальных соотношений моделирования обеспечивалось сохранением удельного теплового габарита катушки в пределах $3 \leq k \leq 5$, что соответствует условиям естественного воздушного охлаждения (2):

$$k = \frac{V_{\text{Cu}}}{S_{\text{i\ddot{o}e}}} = \frac{W \cdot S}{1,6(R_2 - R_1 + L_1)}, \quad (2)$$

где V_{Cu} – объем, занимаемый медным проводником, мм³; $S_{\text{i\ddot{o}e}}$ – поверхность охлаждения, мм²; S – поперечное сечение голого проводника, мм²; $(R_2 - R_1)$ – толщина обмотки, мм (см. рис. 1); 1,6 – среднестатистический экспериментальный коэффициент.

Полученные с использованием моделирования в FEMM семейства кривых были перестроены в зависимости геометрических величин от относительной длины рабочего зазора для разных значений тока в случаях, когда максимальна удельная сила тяги и когда максимальна удельная работа.

Расчет геометрических параметров ЛЭМД начинается с определения радиуса якоря:

$$R_1 = k_{\delta_0} \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot F_{\max}}{\pi B_i^2}}, \quad (3)$$

где $k_{\delta_0} = 1,05 \dots 1,15$ – коэффициент, обусловленный технологическим воздушным зазором в режиме притянутого якоря; B_i – индукция насыщения материала магнитопровода, Тл.

Для цилиндрических втяжных электромагнитов существует рациональное отношение радиуса якоря к внешнему радиусу катушки r_1 / r_2 , при котором при всех прочих равных условиях вес электромагнита получается наименьшим, зависящее только от коэффициента электрического заполнения

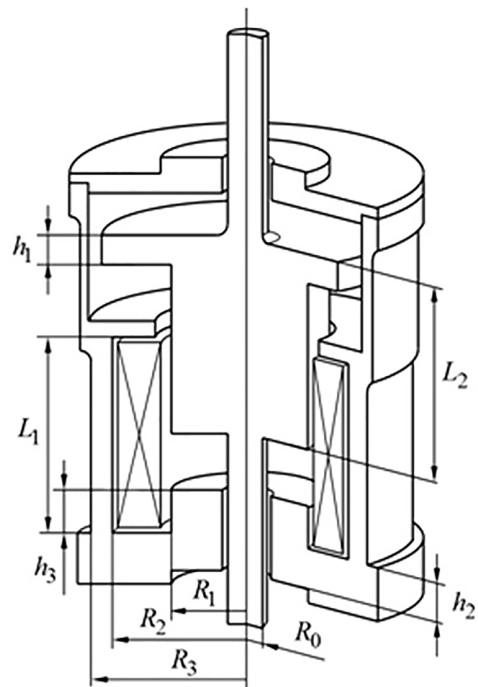


Рис. 1. Конструктивные части и геометрические размеры линейного электромагнитного двигателя пресса

Fig. 1. Structural parts and geometrical dimensions of the linear electromagnetic press motor

обмотки медью F_{electr} , которое выбирается в соответствии с технологией изготовления катушки и обмоточными параметрами. Данное соотношение представлено на рис. 2.

В соответствии с проведенными исследованиями для совмещения высоких удельных силовых характеристик и КПД значение максимального тока в динамическом (переходном) режиме i_{max} рекомендуется принимать $i_{max} \leq 15$ А. По рис. 3 находится отношение максимального значения тока в динамическом режиме к значению установившегося тока i_{max}/I , рассчитывается установившийся ток. Для неу-

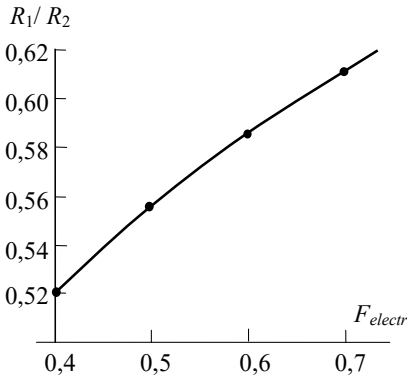


Рис. 2. Зависимости R_1/R_2 от коэффициента электрического заполнения обмотки медью F_{electr} .

Fig. 2. Dependences of R_1/R_2 on the copper winding electrical fill factor F_{electr}

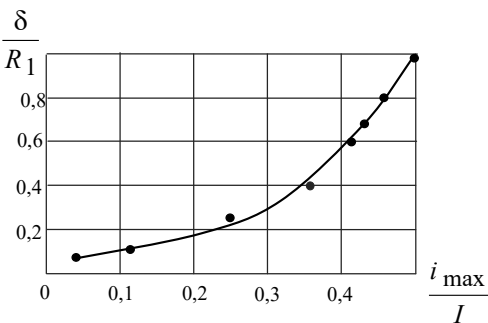


Рис. 3. График для выбора соотношения i_{max}/I

правляемого движения значение тока установившегося процесса I и максимальное значение тока за время движения i_{max} определяется зависимостью, представленной на рис. 3, и отношение i_{max}/I не превышает 0,5 в рассматриваемом диапазоне перемещений.

Рассчитывается отношение числа витков обмотки n к сечению проводника S :

$$\frac{n}{S} = \frac{R}{\rho \left[2\pi \left(R_1 + \frac{R_2 - R_1}{2} \right) \right]} \quad (4)$$

Находится минимальное значение длины катушки L_1 при условии естественного воздушного охлаждения:

$$L_1 \geq \frac{n}{1,6 \cdot k \cdot S} - (R_2 - R_1), \quad (5)$$

где $3 \leq k \leq 5$ — удельный тепловой габарит катушки (2).

Для заданного соотношения i_{max}/I и i_{max} по рис. 4 выбирается относительная высота стопа h_3/L_1 для случаев, когда технологический процесс требует максимальной удельной силы тяги $F^* = F/m$ (сплошные линии) или максимальной удельной работы $A^* = A/m$ (штриховые линии), где F — усилие в каждой точке рабочего воздушного зазора, A — полезная механическая работа на интервале рабочего хода, m — масса активных материалов ЛЭМД.

Далее находится минимальное конструктивно реализуемое значение длины катушки:

$$L_1 \geq \frac{1,5 \cdot \delta_{max}}{1 - \frac{h_3}{L_1}} \quad (6)$$

Уточняется поперечное сечение проводника и рассчитывается плотность тока в проводнике j :

$$S = \sqrt{\frac{(R_2 - R_1) \cdot l_c \cdot F_{electr}}{1,6 k \cdot (R_2 - R_1 + L_1)}} \text{ и } j = \frac{i_{\max}}{S}, \quad (7)$$

которая сравнивается с допустимой $j \leq j_{\text{д}}$ и, в зависимости от типа катушки и предполагаемого режима работы, подбирается класс изоляции обмоточного провода. В случае необходимости корректируется значение тока в динамическом (переходном) режиме i_{\max} и повторяется расчет (1) – (6).

Из ряда стандартных размеров подбирается ближайший по площади поперечного сечения круглый или прямоугольный провод. Уточняется расчет и по соотношению (4) определяется предварительное число витков обмотки n .

Проверяется одновременное выполнение условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{electr} = \frac{n \cdot S}{(R_2 - R_1) \cdot L_1} = 0,4 \dots 0,75 \\ \frac{L_1 - h_3}{\delta_{\max}} > \frac{3}{2} \\ k = \frac{n}{1,6 S \cdot (R_2 - R_1 + L_1)} = 3 \dots 5 \\ j \leq j_{\text{а}} \end{array} \right. \quad (8)$$

При невыполнении хотя бы одного условия из (8) корректируется число витков обмотки n и повторяется расчет обмоточных данных катушки (4) – (8).

Находится внешний радиус магнитопровода R_3 по графикам рис. 5 и минимальный из условий прочности радиус стержня R_0 . Находятся остальные геометрические размеры магнитопровода из проведенных ранее исследований, опубликованных в работах [16,17]: толщина полюса в пределах соотношения $h_p / r_1 = 0,3 \dots 0,6$, толщина диска якоря в пределах соотношения $h_2 / R_1 = 0,3 \dots 1$, внешний радиус магнитопровода в диапазоне $R_3 / R_1 = 1,4 \dots 1,7$. Для магнитопровода с насыщением, которое возникает при протекании больших токов через обмотку и (или) при малом перемещении плунжера (якоря), оптимальный выбор соотношений геометрических размеров более критичен. Например, при выборе высоты диска якоря по общим рекомендациям проектирования электромагнитов без учета проведенных исследований и при минимальном ходе плунжера значение удельной работы может уменьшиться в 2,5 раза по сравнению с максимально

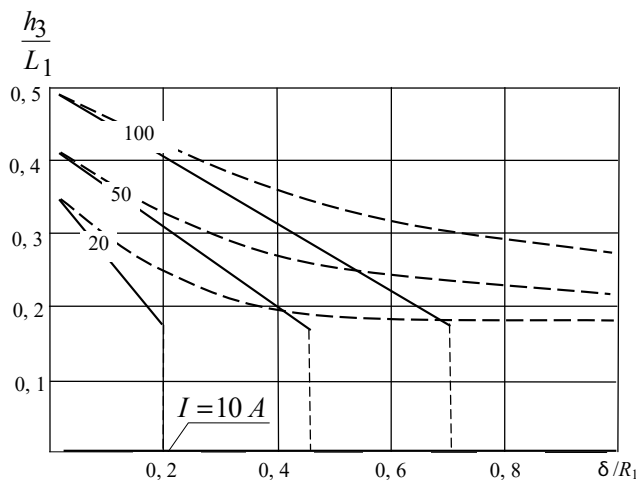


Рис. 4. Рациональные значения высоты стопа h_3 при разных токах

Fig. 4. Rational values of the height of the stopping element h_3 at different currents

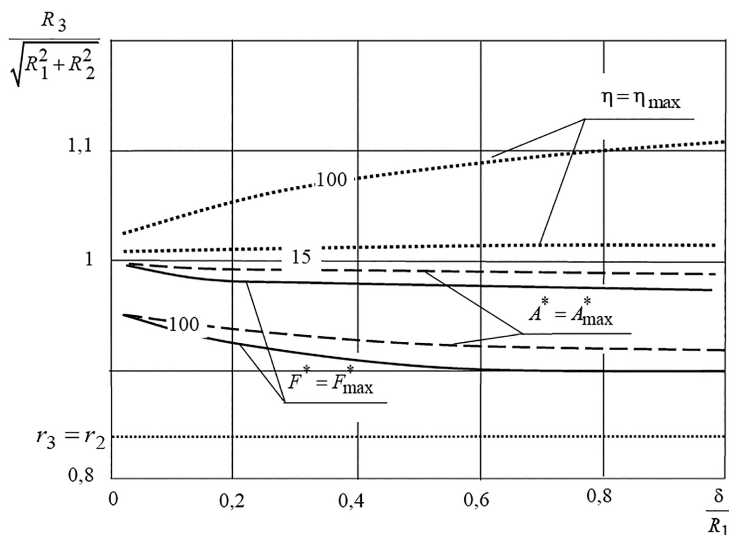


Рис. 5. Рациональные значения внешнего радиуса магнитопровода R_3 при разных токах
 Fig. 5. Rational values of the magnetic circuit outer radius R_3 at different currents

возможной удельной работой в заданных габаритах при заданном тепловом факторе.

Находятся значения масс активных материалов пресса: стали, меди, массы якоря m_A и общей массы активных частей всего двигателя, $m = m_{st} + m_{Cu}$.

Для расчета статической тяговой характеристики существуют аналитические и численные методы [18, 19], однако для определения удельных показателей электромагнитного двигателя пресса описываемой конструкции в области малых зазоров с учетом насыщения стали расчет возможен лишь при пошаговом определении магнитных сопротивлений ферромагнитных участков каждого в отдельности, а не всей магнитной цепи целиком, и при отказе от принятого в теории электрических машин допущения о постоянстве магнитного потока вдоль всей силовой линии потока. Так как в области малых воздушных зазоров магнитная система электромагнита насыщена, электромагнит работает при индукции, соот-

ветствующей участку колена кривой намагничивания и в непосредственной близости за ним, где основную роль играет магнитное сопротивление ферромагнитных участков магнитной цепи. Такой подход к расчету тяговой характеристики линейного электромагнитного двигателя пресса, приведенного на рис. 1, была разработана автором и опубликована в [20]. После построения статической тяговой характеристики проверяется ее соответствие графику деформации материала: тяговая характеристика ЛЭМД должна проходить выше графика деформации в каждой точке рабочего зазора. Если конечная сила тяги меньше требуемой, повышается напряжение источника и (или) выполняется переход на больший габарит магнитопровода и повторяется расчет геометрических параметров и обмоточных данных.

На заключительном этапе производится расчет интегральных характеристик ЛЭМД: удельной конечной силы тяги, удельной интегральной работы за цикл и КПД.

3. Результаты

По приведенной в статье методике (1)–(8) проектировались электромагнитные прессы с одинаковым требуемым максимальным усилием $F_{max}=10$ кН. Первый — с заданной тяговой силой в минимально возможных габаритах (столбец 2 таблицы), второй — с оптимальным совмещением удельных силовых показателей (отношения силы тяги к массе активных материалов) и КПД (столбец 3 таблицы), технико-экономические показатели которых далее сопоставлялись с разработанным ранее [1] и применяющимся в промышленности прессом ПЭМ-1 (столбец 1 таблицы).

Активные части (якорь, являющийся одновременно плунжером, и магнито-

провод) всех трех вариантов изготовлены из конструкционной стали Ст.3. Использована одинаковая пружина с коэффициентом жесткости 431 Н/м. Напряжение источника для питания обмотки сохранялось равным $U = 250$ В.

Расчет потенциальной работы, потребляемой энергии и потерь за цикл осуществлялся численным моделированием в среде FEMM. Результаты численного моделирования позволили построить динамические тяговые характеристики (рис. 6) и графики скорости перемещения якоря $v(t)$ (рис. 7) сравниваемых прессов. Затем были рассчитаны: потребляемая из сети мощность за время одного цикла и полезная работа за цикл, а также потери мощности: активные

Таблица

Основные параметры сравниваемых прессов
The main parameters of the compared presses

Параметры Parameters	Тип пресса		
	1	2	3
Геометрические размеры, мм / Geometric dimensions, mm			
Радиус якоря (плунжера) R_1	33,5	33	33
Внутренний радиус статора R_2	48	55	55
Внешний радиус статора R_3	58	60	63
Высота катушки с обмоткой L_1	100	38	65
Высота стопа h_3	16	7,5	16
Высота диска h_2	12	20	15
Высота полюса h_1	12	15	13
Обмоточные данные/ Winding data			
Число витков катушки n	780	350	770
Диаметр провода d , мм	1,04	1,14	1,18
Масса, кг/ Weight, kg			
Масса активных частей двигателя, m	10,1	5,7	8,3
Масса якоря, m_A	4	3	3
Масса стали, m_{st}	8,1	4,8	6,2
Масса меди, m_{Cu}	2	0,9	2,1
Энергетические показатели за цикл Energy indicators per cycle			
Удельная сила тяги F^* , кН/кг	0,32	0,99	0,51
Удельная работа A^* , кДж/кг	2,1	7,4	3,3
КПД, %	32	19	32

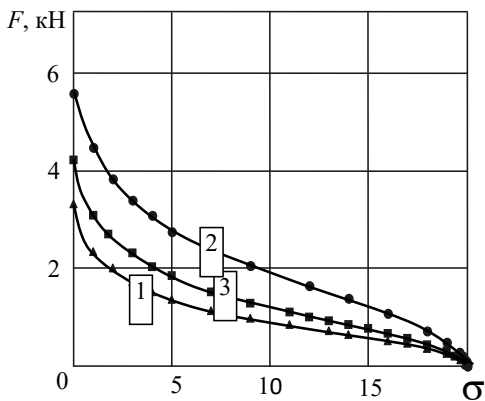


Рис. 6. Динамические тяговые характеристики двигателей
 Fig. 6. Dynamic thrust characteristics of engines

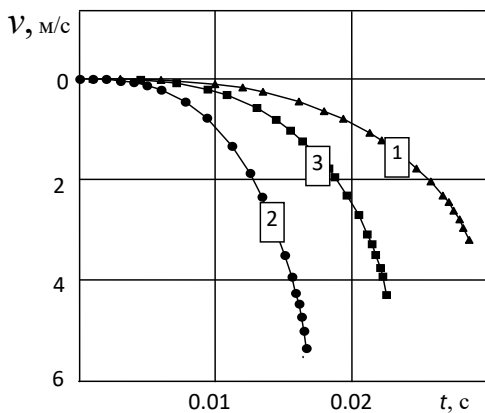


Рис. 7. Графики скорости перемещения якоря
 Fig. 7. Anchor movement speed graphs

потери — в меди обмотки и в стали магнитопровода, и реактивные магнитные потери. Далее проводился расчет коэффициента полезного действия, удельной работы за цикл (работы, отнесенной к массе активных материалов). Сравнение удельных показателей трех прессов одинаковой мощности представлены в таблице.

4. Обсуждение результатов

Установленная зависимость силы тяги и интегральной работы за цикл, отнесенных к массе активных материалов электромагнитного пресса

(удельные показатели) от соотношений геометрических размеров частей его магнитопровода имеет максимум, изменяющийся в зависимости от степени насыщения магнитопровода: графики зависимости удельных силовых параметров прессов от соотношений геометрических размеров линейного электромагнитного двигателя, приведенных в (1), представляют собой кривые с экстремумом, что позволяет говорить о существовании оптимальных соотношений геометрических параметров. При заданном определенном значении тока наблюдается сдвиг экстремума (максимума) удельных силовых характеристик: при уменьшении рабочего хода плунжера δ — в сторону увеличения размеров h_2 , h_1 и R_3 . Это говорит о влиянии насыщения магнитопровода на силу тяги: с увеличением насыщения материала магнитопровода необходимо увеличить его сечение для прохождения магнитного потока, обеспечивающего требуемую силу тяги. Для рассматриваемых электромагнитных прессов с ограниченным и заданным тепловым габаритом катушки насыщение большей части магнитопровода наступает при протекании по обмотке тока $I \geq 15A$.

Таким образом, при насыщенном магнитопроводе невозможно одновременно добиться максимальных удельных силовых показатели и максимальных энергетических: увеличение силы тяги, потенциальной работы и КПД произойдет при увеличении сечения магнитопровода для уменьшения потоков рассеяния, а это увеличит вес пресса и, соответственно, уменьшит удельные показатели.

Следует заметить, что рекомендации по выбору соотношений геометрических параметров на основании настоящего исследования отличаются от приводимых ранее, в связи с разными типами

технологических процессов, для которых проектируются электродвигатели. Так, рациональное значение внешнего радиуса магнитопровода, равное $R_3^2 = R_1^2 + R_2^2$ (см. рис. 5), соответствует оптимальной на всем протяжении хода якоря только при ненасыщенном магнитопроводе (ударные технологии) с большим ходом рабочего инструмента $\delta \gg R_1$ (см. рис. 5 при токе $I < 15A$), когда значение потенциальной работы достигается за счет увеличения хода якоря, в отличие от безударных прессовых технологических процессов, для которых выбор рационального значения внешнего радиуса магнитопровода должен производиться по рис. 5.

То же касается и выбора толщины диска полюса и якоря электромагнитного двигателя, которые для электромагнитных прессов с малым перемещением плунжера нерационально проектировать по общим рекомендациям теории электрических машин с одинаковым сечением магнитопровода на пути магнитного потока, т.е. по соотношению $h_1 = h_2 = R_1/2$, так как данная рекомендация соответствует максимальной работе в заданных габаритах магнитопровода только при постоянном зазоре. Данная рекомендация будет работать, в частности, для ударных электромагнитных машин, перфораторов, с большими перемещениями рабочего инструмента, так как потенциальная работа формируется за счет большого хода якоря. Поэтому полученные в настоящей работе данные и соотношения не противоречат предыдущим экспериментальным исследованиям, а расширяют их на класс электромагнитных устройств с коротким ходом, где перемещение меньше половины толщины магнитопровода.

В магнитопроводе, работающем при индукциях в области насыщения материала при малых воздушных зазорах $\delta/R_1 \leq 0,2$, максимум удельных силовых

показателей достигается при $R_2 = R_3$, т.е. рабочий магнитный поток является полным рассеянием, так как замыкается по воздуху. Поэтому нерационально выбирать рабочую индукцию электромагнитного пресса на протяжении всего перемещения рабочего инструмента за коленом основной кривой намагничивания. Однако и устранение насыщения на всем протяжении хода приведет к необоснованному увеличению габарита и массы активных материалов пресса. Поэтому рекомендуемой областью индукций является область колена кривой намагничивания.

С учетом полученных при выполнении для анализа данных диапазон мощностей прессовых машин с малым ходом якоря, для которых допустимы повышенные потери энергии ради максимальных силовых характеристик, надежности и простоты исполнения, должен быть ограничен 10 кВт.

5. Выводы

Анализ приведенных в статье данных показал, что при выборе геометрических параметров по представленным соотношениям возможно улучшить значения максимального тягового усилия и работы более чем в полтора раза без уменьшения при этом КПД (см. таблицу, вариант 1). А в случае ограничения габаритов техническим заданием на пресс возможно улучшить значения максимального тягового усилия в 3 раза (см. таблицу, вариант 2), однако при этом КПД уменьшится в 1,7 раз. Разработанная методика расчета, включающая расчет конструктивных частей электромагнитного двигателя пресса, обмоточных данных, расчет тяговых характеристик в статике и динамике, удельных показателей и КПД, рекомендуется для применения в научной и производственной практике для разработки новых прессов в указанном диапазоне хода плунжера и расчетной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дрыгин М. Ю. Анализ систем технического обслуживания и ремонта горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 2 (148). — С. 35–43. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-35-43.

2. Кузнецов П. М., Хорошко Л. Л. Цифровизация процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 10. — С. 195–205. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205.

3. Акарачкин С. А., Анненков Ю., Ивашутенко А. С. и др. Радиальный магнитно-импульсный пресс совмещенной электродинамической и индукционной системы // *Электричество*. — 2012. — № 6. — С. 65–69.

4. Boldea I. Electric generators and motors: An overview // *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2017, vol. 1, no. 1, pp. 3–14. DOI 10.23919/TEMS.2017.7911104.

5. Лащенков М. Б. Влияние самозапуска мощных двигателей на систему электропитания // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 1. — С. 134–140. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-134-140.

6. Закондырин А. Е. Наилучшие доступные технологии в горнодобывающем секторе: актуальные проблемы и пути их решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6-1. — С. 55–64. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-55-64.

7. Нейман Л. А., Нейман В. Ю. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий // *Электротехника*. — 2014. — № 12. — С. 45–49.

8. Boldea L. N. Tutelea W. Xu and Pucci M. Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs: An Overview // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018, vol. 65, no. 9, pp. 7504–7515. DOI 10.1109/TIE.2017.2733492.

9. Афанасьев А. И., Сулов Д. Н. Оценка энергетической эффективности вибровозбудителей резонансных вибротранспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 1. — С. 126–132. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-126-132.

10. Neyman V. Yu., Smirnova Yu. B. Power press for nonpolluting industry // IFOST 2007. Pros. the 2 intern. Forum on strategic technology, Oct. 3–5, Ulanbaatar, Mongolia. — pp. 662–664. DOI:10.1109/IFOST.2007.4798688.

11. Amoros J. G., Andrada P. Sensitivity Analysis of Geometrical Parameters on a Double-Sided Linear Switched Reluctance Motor // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010, vol. 57, no. 1, pp. 311–319. DOI 10.1109/TIE.2009.2032208.

12. Kashanskyi Y. V. Criteria-Parametric Analysis of the Magnetic Core Geometric Dimensions Influence on the Operating Mode of the Device for Impact Pressing of Ceramic Powders of a New Design // *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology*. 2021, pp. 307–312. DOI 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570044.

13. Simonov B. F., Neiman V. Y., Neiman L. A., Kordubailo A. O. Simulation modeling of operation of downhole vibration exciter EM drive // *Journal of Mining Science*. — 2020. — vol. 56, iss.v3, pp. 435–444. DOI: 10.1134/S1062739120036726.

14. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Calculation of the Vibration Activity of Design Elements of a Synchronous Impact Electromagnetic Machine with a Striker Inertial Reversal // *Russian Electrical Engineering*. 2021, vol. 92, no. 6, pp. 302–307. DOI: 10.3103/S1068371221060043.

15. Kaluzhskij D. L., Efimova Ju. B., Kharitonov A. S., Kulikov A. D. Low Noise Synchronous Drive Based on the Slotless Electric Motor // *APEIE 2018. Pros. the 14 intern. Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering*, Oct. 2–6, 2018, Novosibirsk, Russia. — pp. 152–158. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545778.

16. Ефимова Ю. Б., Нейман В. Ю. Исследование влияния высоты стопа на силовые характеристики электромагнитного пресса // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2006. — № 1. — С. 222–224.

17. Ефимова Ю. Б., Шабанов А. С., Морозов П. В., Зонов В. Н. Постановка задачи оптимального выбора геометрических параметров электромагнитных двигателей // Проблемы современной науки и образования. — 2016. — № 2 (44). — С. 81–85.

18. He M., Li W., Peng J., Yang J. Multi-layer quasi three-dimensional equivalent model of axial-flux permanent magnet synchronous machine // *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2021, vol. 5, no. 1, pp. 3–12. DOI 10.30941/CESTEMS.2021.00002.

19. Markovic M., Jufer M. and Perriard Y. Analytical Force Determination in an Electromagnetic Actuator // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008, vol. 44, no. 9, pp. 2181–2185. DOI 10.1109/TMAG.2008.888573.

20. Ефимова Ю. Б., Ланни Ф. Э., Пауль О. Э. Способ учета влияния насыщения участков магнитопровода на характер распределения магнитного потока электромагнитного пресса // Новое в российской электроэнергетике. — 2017. — № 5. — С. 60–69. **MIAB**

REFERENCES

1. Drygin M. Yu. Analysis of technical maintenance systems and repair of mining equipment. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2020, no. 2 (148), pp. 35–43. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-35-43.

2. Kuznetsov P. M., Horoshko L. L. Digitization of processes for the restoration of crushing and grinding equipment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 10, pp. 195–205. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205.

3. Akarachkin S. A., Annenkov Ju., Ivashutenko A. S. Radial-magnetic impulse press of the combined electrodynamic and induction system. *Electrical Technology Russia*. 2012, no. 6, pp. 65–69. [In Russ].

4. Boldea I. Electric generators and motors: An overview. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2017, vol. 1, no. 1, pp. 3–14. DOI: 10.23919/TEMS.2017.7911104.

5. Lashchenov M. B. Effect of self-starting of high-power motors on power supply system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no.1, pp. 134–140. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-134-140.

6. Zakondyrin A. E. Best available techniques in mining industry: topical issues and solution methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 020;(6-1):55-64. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-55-64.

7. Neiman L. A., Neiman V. Yu. Linear synchronous electromagnetic machines for low-frequency shock technologies. *Russian Electrical Engineering*. 2014, no. 12, pp. 45–49. [In Russ].

8. Boldea L. N. Tutelea W. Xu and Pucci M. Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs: An Overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018, vol. 65, no. 9, pp. 7504–7515. DOI: 10.1109/TIE.2017.2733492.

9. Afanasiev A. I., Suslov D. N. Evaluation of energy efficiency of resonance conveyor vibration exciters. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no.1, pp. 126–132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-126-132.

10. Neyman V. Yu., Smirnova Yu. B. Power press for nonpolluting industry. *IFOST 2007. Pros. the 2 intern. Forum on strategic technology, Oct. 3–5, Ulanbaatar, Mongolia*. 2007, pp. 662–664. DOI:10.1109/IFOST.2007.4798688.

11. Amoros J. G., Andrada P. Sensitivity Analysis of Geometrical Parameters on a Double-Sided Linear Switched Reluctance Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010, vol. 57, no. 1, pp. 311–319. DOI: 10.1109/TIE.2009.2032208.

12. Kashanskyi Y. V. Criteria-Parametric Analysis of the Magnetic Core Geometric Dimensions Influence on the Operating Mode of the Device for Impact Pressing of Ceramic

Powders of a New Design. *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology*. 2021, pp. 307–312. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570044.

13. Simonov B. F., Neiman V. Y., Neiman L. A., Kordubailo A. O. Simulation modeling of operation of downhole vibration exciter EM drive. *Journal of Mining Science*. 2020, vol. 56, iss. 3, pp. 435–444. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739120036726.

14. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Calculation of the Vibration Activity of Design Elements of a Synchronous Impact Electromagnetic Machine with a Striker Inertial Reversal. *Russian Electrical Engineering*. 2021, vol. 92, no. 6, pp. 302–307. DOI: 10.3103/S1068371221060043.

15. Kaluzhskij D. L., Efimova Ju. B., Kharitonov A. S., Kulikov A. D. Low Noise Synchronous Drive Based on the Slotless Electric Motor. *APEIE 2018. Pros. the 14 intern. Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, Oct. 2–6, Novosibirsk, Russia*. 2018, pp. 152–158. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545778.

16. Efimova Yu. B., Neiman V. Yu. Study of the influence of the stopping element height on the electromagnetic press power characteristics. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2006, no. 1, pp. 222–224. [In Russ].

17. Efimova Yu. B., Shabanov A. S., Morozov P. V., Zonov V. N. Statement of the problem of optimal choice of electromagnetic motors geometric parameters. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya*. 2016, no. 2 (44), pp. 81–85. [In Russ].

18. He M., Li W., Peng J., Yang J. Multi-layer quasi three-dimensional equivalent model of axial-flux permanent magnet synchronous machine. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2021, vol. 5, no. 1, pp. 3–12. DOI: 10.30941/CESTEMS.2021.00002.

19. Markovic M., Jufer M. and Perriard Y. Analytical Force Determination in an Electromagnetic Actuator. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008, vol. 44, no. 9, pp. 2181–2185. DOI: 10.1109/TMAG.2008.888573.

20. Efimova Yu. B., Lappi F. E., Paul O. E. A method for taking into account the influence of saturation of magnetic circuit sections of the distribution of the electromagnetic press magnetic flux. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike*. 2017, no. 5, pp. 60–69. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ефимова Юлия Борисовна — канд. техн. наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники НГТУ, <https://orcid.org/0000-0002-9536-9710>, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, e-mail: u_b_efimova@mail.ru;

Для контактов: *Ефимова Юлия Борисовна*, e-mail: u_b_efimova@mail.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Efimova Yu. B., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, NSTU, <https://orcid.org/0000-0002-9536-9710>, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Novosibirsk State Technical University”, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia, e-mail: u_b_efimova@mail.ru.

For contacts: *Efimova Yu. B.*, e-mail: u_b_efimova@mail.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

