

СИЛОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕССА ДЛЯ РЕМОНТА ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ю. Б. Ефимова

Новосибирский Государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г.
Новосибирск, 630073, Россия

Аннотация: В статье исследовано влияние величины и формы импульса источника напряжения линейного электромагнитного пресса с малым ходом плунжера (якоря), используемого при выполнении ремонтно-восстановительных работ горно-шахтного оборудования, на его динамические силовые характеристики. Проведен анализ доступных в условиях горнодобывающего предприятия источников постоянного и синусоидального напряжения, на базе которых без применения преобразовательных устройств возможна эксплуатация линейного электромагнитного пресса. Выявлен по критерию максимальной удельной интегральной работы за цикл и максимальной результирующей силой, действующий на якорь в процессе движения, оптимальный источник питания – источник синусоидальной формы с однополупериодным выпрямлением и отсечкой по переднему фронту. Проведено моделирование синхронного линейного электромагнитного двигателя пресса в программе численного моделирования электромагнитных полей при питании от источника напряжения частотой 50 Гц и указанной формы импульса с амплитудой от 100В до 3кВ. На основании полученных в результате моделирования данных построены динамические характеристики пресса: время трогания, время движения, полное время срабатывания, а также ток и результирующая сила в момент трогания, амплитуда тока в процессе движения в зависимости от напряжения источника. Установлено, что по критерию высоких удельных силы и интегральной работы за цикл источник синусоидального напряжения промышленной частоты величиной 1кВ с его дальнейшим однополупериодным выпрямлением и отсечкой по переднему фронту показывает наилучшие результаты.

Ключевые слова: линейный импульсный электромагнитный пресс, ремонтно-восстановительные работы, оптимизация, численное моделирование, динамические характеристики, малый ход плунжера, промышленный источник напряжения.

Для цитирования: Ефимова Ю. Б. Силовые динамические характеристики линейного электромагнитного пресса для ремонта горного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 64–75. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_64.

Selecting a voltage source for a linear electromagnetic press under the mining enterprise

Yu. B. Efimova

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract: The article presents a study of the influence of the magnitude and shape of the pulse of the voltage source of the linear electromagnetic press motor with a small stroke of the plunger (anchor), used in the performance of repair and restoration work of mining equipment, on its dynamic power characteristics and efficiency. The press based on a linear electromagnetic motor is reliable, mobile, environmentally friendly, energy efficient, does not require highly qualified personnel for maintenance. A line of DC and sinusoidal voltage sources available in the conditions of a mining enterprise is given, on the basis of which, without the use of complex converters, it is possible to design and further operate a synchronous linear electromagnetic press. By means of numerical simulation, the dynamic characteristics of the press were built when powered by different types of sources, and, according to the criterion of high power and energy characteristics, a source of sinusoidal voltage of industrial frequency of 1 kV was selected with its further one-half-wave rectification and cutoff along the leading edge.

Key words: linear impulse electromagnetic press, repair and restoration works, optimization, numerical simulation, dynamic characteristics, plunger small stroke, industrial voltage source.

For citation: Efimova Yu. B. Selecting a voltage source for a linear electromagnetic press under the mining enterprise. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):64–75. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_64.

1. Введение

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

Синхронные линейные электромагнитные прессы (рис. 1) наилучшим образом удовлетворяют критериям работы в данных условиях в диапазоне мощностей до 10кВт, а именно: энергоэффективность, надежность, простота обслуживания и экологичность, нетребовательность к высококвалифицированным кадрам. Гиперболиче-

ская 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 [2].

Достоинством линейных электродвигателей импульсного действия также является прямое преобразование электрической энергии, подаваемой на обмотку, в силовой импульс плунжера, передаваемого в нагрузку [3] за меньшее время, чем при использовании электродвигателей вращающегося действия. Силовым электромагнитным импульсным прессам свойственно преобразование электрического импульса от источника напряжения, действующего некоторое продолжительное время, в кратковременный механический импульс давления (прессования) со значительно большим уровнем мощности, передаваемой в нагрузку. Таким

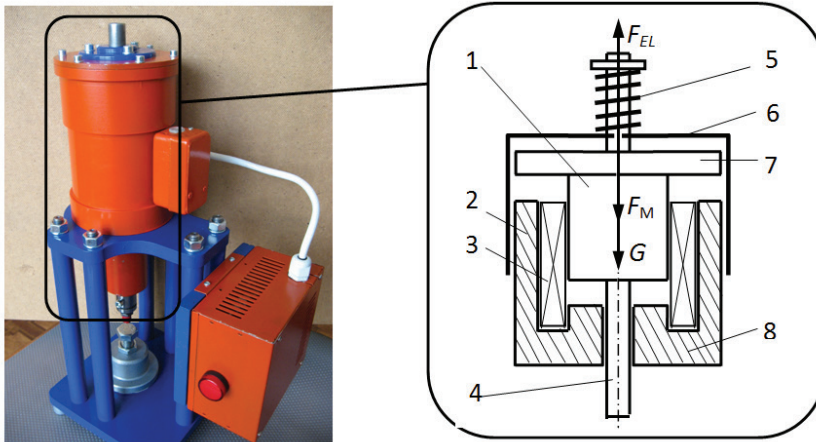


Рис. 1. Внешний вид синхронного электромагнитного пресса и основные элементы синхронного линейного двигателя пресса: 1 – якорь; 2 – статор; 3 – обмотка; 4 – стержень для передачи энергии прессования; 5 – возвратная пружина; 6 – корпус, 7 – диск якоря, 8 – полюс, и основные силы, действующие на якорь: $F_M(t)$ – электромагнитная сила, $G(t)$ – сила тяжести, $F_{EL}(t)$ – сила упругости возвратного механизма (пружины).

Fig. 1. Appearance of a synchronous electromagnetic press and the main elements of a synchronous linear press motor: 1 – anchor; 2 – stator; 3 – winding; 4 – rod for transferring pressing energy; 5 – return spring; 6 – housing, 7 – armature disk, 8 – pole, and the anchor acting main forces: $F_M(t)$ – electromagnetic force, $G(t)$ – gravity, $F_{EL}(t)$ – elastic force of the return mechanism (spring).

образом, одним из значимых факторов, влияющих на силовые и энергетические характеристики и эффективность работы пресса, кроме соотношений геометрических размеров, обуславливающих структуру электромеханической системы [4], также являются форма и длительность импульса питающего напряжения. Условия эксплуатации прессового оборудования на горнодобывающих предприятиях накладывают ограничения в выборе источника импульсов напряжения [5, 6].

На территории горнодобывающих предприятий используются следующие источники питания [7, 8]:

- источники постоянного тока напряжением 600В, 825В, 1650 В и 3300 В (в местах примыкания предприятия к железнодорожным путям РАО РЖД),
- источники переменного напряжения, причем мощные потребители

работают на уровне среднего напряжения сетей переменного тока величиной 6 кВ, 10 кВ и 35 кВ, а вблизи подстанции напряжение доходит до 1000 В.

Исследования влияния формы импульса напряжения питания на коэффициент полезного действия (КПД), силовые характеристики и значение интегральной работы за цикл линейных электромагнитных двигателей ударных устройств и перфораторов показали, что оптимальной формой напряжения для получения максимального КПД является положительная полуволна синусоиды с отсечкой по заднему фронту, а для получения максимальных удельных значений силы тяги и работы – прямоугольный импульс напряжения [9, 10]. Однако прессовым безударным устройствам с коротким ходом рабочего инструмента (отсутствие времени разгона бойка под собственной мас-

сой якоря) требуется достаточно большое значение тока в начале движения бойка с увеличением тока в момент соприкосновения с деталью и плавное снижение тока при завершении прессования, поэтому было предложено использование положительной полуволны синусоиды промышленной линейки номинальных напряжений частотой 50 Гц, имеющихся на горнодобывающем предприятии, с отсечкой по переднему фронту. Таким образом, на переднем фронте импульса возникает переходной процесс, длительность которого сопоставима со временем работы пресса, и установившееся значение тока в таких системах не достигается никогда.

Целью данной работы является исследование динамических характеристик электромагнитного пресса и возможностей повышения интегральной работы за цикл и максимального значения результирующей силы, действующий на якорь в процессе движения, путем управления питающим импульсом напряжения, подаваемым на обмотку.

2. Методика исследований

Существующая классическая теория электрических машин, основанная на уравнениях магнитостатики Максвелла [11], позволяет производить расчет конструктивных элементов разных типов электрических машин, в том числе и рассматриваемых в настоящей статье синхронных линейных электродвигателей, для работы в установившихся режимах. При этом классическая теория не показывает высоких и надежно ожидаемых значений интегральной работы за цикл прессования и максимальной результирующей силы, действующей на якорь в процессе движения, при проектировании устройств, работающих преимущественно в пере-

ходных динамических режимах, например, синхронных линейных электродвигателей с коротким ходом. Связано это с изменяющейся на протяжении хода плунжера величиной активно-индуктивного сопротивления электродвигателя, что не позволяет использовать принятое в электростатике и большинстве методик проектирования электрических машин условие о постоянстве магнитного потока по длине силовой линии. Также в статье [12] на примере тяговых электродвигателей постоянного тока указана принципиальная недопустимость расчетов силовых параметров электродвигателей пропорционально среднеквадратичному значению тока в катушке в случае нестационарного движения, т.к. «... в данном случае термины «действующее» и «среднеквадратичное» значение тока перестают быть синонимами». Данный вывод можно распространить на синхронные электродвигатели, работающие в динамических нестационарных (переходных) режимах. То есть оптимальные соотношения геометрических параметров электродвигателей, полученные для статических установившихся режимов работы, для электромагнитных устройств, работающих в динамических режимах, могут быть рассмотрены только как расчет варианта первого приближения.

Поэтому на первом этапе исследования для выбора оптимальных конструктивных параметров линейных электромагнитных двигателей, а именно — радиусов и длин участков магнитопровода статора и ротора, размера обмоточного окна и обмоточных данных, обеспечивающих заданную силу тяги, была использована методика проектного расчета, разработанная автором ранее и опубликованная в [13]. В данной методике в качестве исходных для проектирования параме-

тров задаются: требуемая максимальная сила тяги, определяемая из графика сопротивления обрабатываемого материала деформациям для конкретного технологического процесса, требуемый технологическим процессом ход якоря, равный начальному (максимальному) значению воздушного зазора магнитной системы, напряжение питания обмотки и продолжительность включения линейного электромагнитного двигателя пресса. Методика предназначена для проектирования линейных электромагнитных двигателей, работающих в приводах прессов конструкции, приведенной на рис. 1, питаемых однополупериодными импульсами напряжения, при значениях тока установившегося процесса до 200 А и естественном воздушном охлаждении.

На втором этапе исследований были определены в качестве выходных параметров для анализа влияния напряжения источника питания на работу пресса следующие динамические характеристики, которые зависят от начального положения плунжера, графика напряжения питающей электрической сети, характеристик пружины или иного возвратного механизма, начальной противодействующей силы, приложенной к якорю, массы плунжера совместно с рабочим инструментом и от числа витков обмотки возбуждения:

- полезная работа A , Дж;
- максимальная скорость якоря в процессе движения v_{\max} , м/с;
- амплитудное значение тока в обмотке в процессе движения якоря i_{\max} , А;
- ток в обмотке в момент трогания якоря (далее по тексту — ток трогания) i_{st} , А;
- время от начала подачи на обмотку импульса напряжения до момента трогания якоря (далее по тексту — время трогания) t_{st} , с;

- время движения якоря t_{mov} , с;
- полное время срабатывания пресса $t_{\max} = t_{st} + t_{mov}$, с;
- результирующая сила в момент трогания F_{st} , Н, и максимальное значение результирующей силы в процессе движения F_{\max} , Н.

Мгновенные характеристики синхронного линейного электромагнитного пресса — зависимости напряжения u и источника питания, тока i , протекающего по отмотке, от времени t (рис. 2) были получены численным моделированием магнитного поля методом конечных элементов в среде программы «Finite Element Method Magnetics» (FEMM) [14], которая в настоящее время является основной общепризнанной возможностью для исследования синхронных электрических машин различного исполнения без изготовления их прототипов [15–20]. В программном продукте была создана осесимметричная модель линейного электромагнитного двигателя с размерами, рассчитанными по методике проектного расчета с заданными характеристиками магнитных и немагнитных материалов. Программа позволяет как получать картину электромагнитного поля, так и рассчитывать линейные и объемные интегралы, в частности, электромагнитную силу, действующую на якорь.

На якорь синхронного линейного электромагнитного двигателя пресса броневое типа действует результирующая сила $F(t)$, являющаяся алгебраической суммой механических и электромагнитных сил (рис. 1):

$$F(t) = F_M(t) + G(t) + F_{EL}(t) + F_A(t), \quad (1)$$

где $F_M(t)$ — электромагнитная сила, возникающая из-за изменения магнитного поля в якоря в процессе его движения; $G(t)$ — сила тяжести, действующая на якорь; $F_{EL}(t)$ — сила упругости

возвратного механизма (пружины), действующая на якорь; $F_A(t)$ — сила Ампера, вызванная взаимодействием магнитного поля с вихревыми токами в якоре.

Расчет силы, воздействующей на якорь, тока, протекающего в обмотке, вихревых токов, наводимых в якоре и статоре, дает возможность определить траекторию движения якоря, время, через которое произойдет удар, скорость в момент удара. Данные характеристики для модели линейного электромагнитного двигателя пресса представлены на рис. 2. По рассчитанным характеристикам далее могут быть вычислены: потребляемая и полезная мощность, магнитные потери, а также тепловые потери в обмотке, якоре и статоре, КПД. Мощности, потери и КПД в настоящем исследовании количественно не оценивались.

3. Результаты

В рамках данного исследования была проведена серия численных экспериментов для определения мгновенных значений тока и напряжения, возникающих при ускорении движения якоря (плунжера) и жестко связанного с ним магнитным полем рабочего инструмента линейного электромагнитного пресса в переходном режиме работы системы. До подачи на обмотку импульса якорь (плунжер) удерживался в крайнем верхнем положении пружинной. При подаче на обмотку импульса напряжения по обмотке начинает протекать ток, который создает тяговое усилие. При достижении тягового электромагнитного усилия, превышающего сумму сил сопротивления движению, якорь трогается, и промежуток времени от момента подачи импульса на обмотку до начала движения якоря обозначен как «время трогания t_{st} ». Далее якорь совершает движение

на интервале рабочего хода за «время движения t_{mov} ». Исследования динамического режима работы проводились с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля в объеме линейного электромагнитного пресса. Модель включала в том числе и конструктивные элементы, корпус и рабочий инструмент пресса. Для обеспечения эффективного ускорения якоря с закрепленным рабочим инструментом необходимо, чтобы время движения не превышало длительность импульса питающего напряжения, что легко обеспечивается за счет малого рабочего зазора.

Форма и длительность импульса питающего напряжения, принятого для исследования, изображены на рис. 2, который может быть получен путем однополупериодного выпрямления промышленного источника напряжения частоты 50 Гц и отсечки по переднему фронту до необходимой длительности. В процессе исследования форма и длительность импульса источника сохранялись постоянными, а изменялась величина значения напряжения в интервале $100 \text{ В} \leq U_{max} \leq 3000 \text{ В}$.

По мгновенным характеристикам изменения тока, напряжения, силы, и скорости во времени, полученным для амплитудных значений напряжения источника в интервале $100 \text{ В} \leq U_{max} \leq 3000 \text{ В}$, далее были определены: время трогания $t_{st}(U)$, время движения $t_{mov}(U)$ и полное время срабатывания $t_{max}(U)$, а также ток $i_{st}(U)$ и сила $F_{st}(U)$ в момент трогания, амплитуда тока в процессе движения $i_{max}(U)$. Указанные зависимости приведены на рис. 3.

Из рис. 3. видно, что зависимости $t_{mov}(U)$ и $t_{max}(U)$ при увеличении напряжения источника имеют гиперболический вид с асимптотой $t_{mov} = 0,00406 \text{ с}$ и $t_{max} = 0,00571 \text{ с}$, и при увеличении напряжения выше $U = 2000 \text{ В}$ изменя-

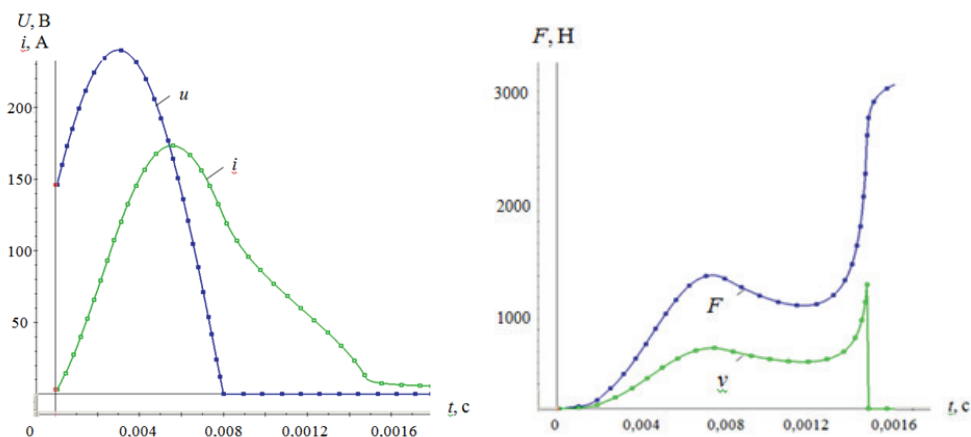


Рис. 2. Мгновенные характеристики синхронного линейного электромагнитного пресса: зависимости напряжения u источника питания, тока i , протекающего по отмотке, результирующей силы F , действующей на якорь, и скорости движения якоря v от времени
 Fig. 2. Instant characteristics of a synchronous linear electromagnetic press: the dependence of the voltage u of the power source, the current i flowing through the winding, the resulting force F acting on the anchor, and the speed of the anchors v from time

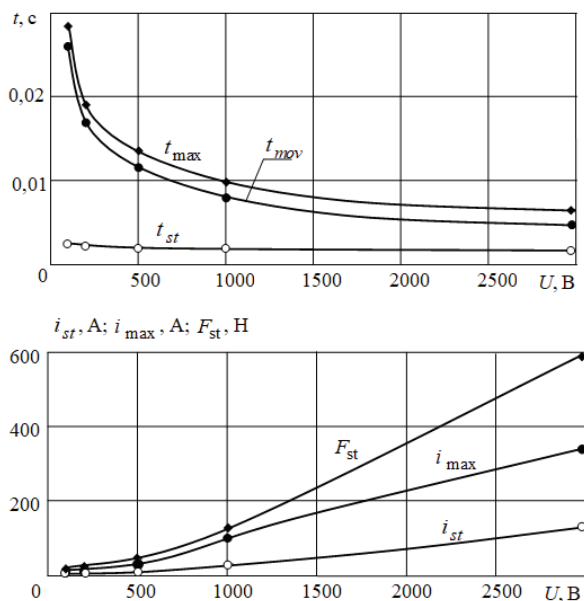


Рис. 3. Зависимости от напряжения U источника питания синусоидальной формы с однополупериодным выпрямлением и отсечкой по переднему фронту времени трогания t_{st} , времени движения t_{mov} , полного времени срабатывания t_{max} , а также тока i_{st} и силы F_{st} в момент трогания, амплитуды тока в процессе движения i_{max} синхронного линейного электромагнитного пресса
 Fig. 3. Dependences from the voltage of a sinusoidal power source with half-wave rectification and cutoff at the leading edge of starting time $t_{st}(U)$, driving time $t_{mov}(U)$, total (maximum) response time $t_{max}(U)$ on the effective value of the source voltage, as well as the current $i_{st}(U)$ and the force $F_{st}(U)$ at the moment of starting and the current amplitude during the movement $i_{max}(U)$ of the synchronous of a linear electromagnetic press

ются не более чем на 5%, что сопоставимо с погрешностью моделирования. Зависимость $t_{st}(U)$ также убывает, стремясь к значению $t_{st} = 0,00163$ с, и при увеличении напряжения выше $U = 2000$ В остается величиной постоянной в пределах погрешности моделирования. Из рис. 4 видна нелинейность $i_{st}(U)$, $F_{st}(U)$ и $i_{max}(U)$ при увеличении напряжения питания. Объясняется это тем, что по мере увеличения питающего напряжения, а следовательно, и токов $i_{st}(U)$ и $i_{max}(U)$, пропорционально $i_{st}^2(U)$, возрастает и сила в момент трогания $F_{st}(U)$, приближаясь к параболической зависимости.

По полученной серии мгновенных характеристик изменения тока, напряжения, силы, и скорости во времени для амплитудных значений напряжения источника в интервале $100 \text{ В} \leq U_{max} \leq 3000 \text{ В}$ также были рассчитаны динамические характеристики синхронного линейного электромагнитного пресса (рис. 4): максимальное значение силы в процессе движения $F_{max}(U)$, максимальная скорость движения якоря $v_{max}(U)$, полезная интегральная работа

$$A(U) = \int_0^h F(x) dx, \text{ где } F(x) \text{ — усилие}$$

при текущем перемещении x , h — интервал рабочего хода плунжера.

4. Обсуждение результатов

Тип и форма импульса питающего напряжения влияет как на форму кривой тока, протекающего по обмотке, соответственно, на действующее значение этого тока, так и на силовые характеристики. То есть путем изменения параметров импульса питающего напряжения можно воздействовать на эффективность работы электромагнитного пресса.

Однако существует такая особенность энергопреобразования в импульсных синхронных линейных электродвигателях, что условию получения максимального КПД противоречит условие получения максимальной полезной работы и энергии прессования.

Вид полученных динамических характеристик $v_{max}(U)$, $F_{max}(U)$ и $A(U)$ можно объяснить следующим образом: с увеличением напряжения источника в интервале $100 \text{ В} \leq U_{max} \leq 3000 \text{ В}$ увеличивается ток и сила в момент трогания — начала движения якоря. Конструкция двигателя и масса якоря сохранялись постоянными, поэтому

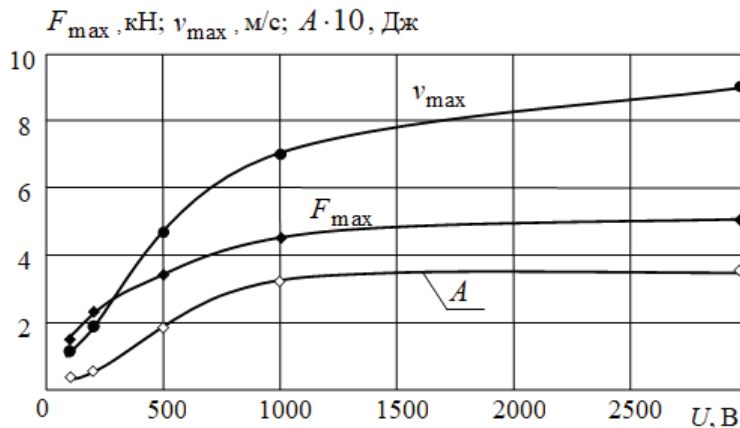


Рис. 4. Динамические характеристики синхронного линейного электромагнитного пресса
 Fig. 4. Dynamic characteristics of a synchronous linear electromagnetic press

при одинаковом ходе якоря, одинаковой массе якоря и одинаковой противодействующей силе увеличение электромагнитной силы ведет к увеличению скорости якоря в момент соприкосновения плунжера с обрабатываемой деталью $v_{max}(U)$, а также интегральной работы за цикл $A(U)$. При дальнейшем увеличении импульсного напряжения источника $U_{max} \geq 3000$ В, несмотря на то, что ток в обмотке на интервале движения и скорость якоря будут продолжать увеличиваться, однако и противодействующая сила Ампера также будет расти, поэтому электромагнитной силы будет недостаточно для движения якоря с более высокой скоростью в конечном положении и повышения его кинетической энергии.

Однако существенного увеличения силовых динамических характеристик и значительного снижения времени срабатывания можно добиться путем увеличения подводимого напряжения только до $U=1000$ В. Дальнейшее увеличение напряжения питания приводит к неоправданному росту среднего значения тока на интервале движения, при этом максимальное значение силы и интегральная работа практически не меняются. Такой режим приведет к резкому увеличению тепловых потерь, снижению КПД, удельных силовых показателей и увеличению стоимости изготовления и обслуживания пресса.

5. Заключение

В исследовании проведено моделирование математической модели син-

хронного линейного электромагнитного двигателя пресса в программе численного моделирования электромагнитных полей FEMM при питании от источника синусоидального напряжения частотой 50 Гц с однополупериодным выпрямлением и отсечкой по переднему фронту. Амплитудное значение напряжения указанной формы изменялось от 100 В до 3 кВ. Аналитический расчет таких устройств представляет сложность в связи с несинусоидальной формой импульса напряжения и нелинейной магнитной системой линейного электромагнитного пресса. Поэтому на основании полученных моделированием данных построены динамические характеристики пресса в зависимости от напряжения источника: времени трогания, времени движения, полного времени срабатывания, а также тока и силы в момент трогания, амплитуды тока в процессе движения. Установлено, что источник синусоидального напряжения промышленной частоты величиной 1 кВ с его дальнейшим однополупериодным выпрямлением и отсечкой по переднему фронту показывает наиболее высокие удельные значения результирующей силы и интегральной работы за цикл среди других типов промышленных источников, доступных на горнодобывающем предприятии.

Поэтому источник напряжения электрической промышленной сети 1 кВ рекомендован как оптимальный для работы синхронного линейного электромагнитного пресса в условиях горнодобывающего предприятия.

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. Ефимова Ю. Б., Лаппи 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.

3. Boldea L. N. Tutelea W. Xu and M. Pucci. 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.

4. 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.

5. Simonov B. F., Neiman V. Y., Neiman L. A., A. O. Kordubailo Simulation modeling of operation of downhole vibration exciter EM drive // *Journal of Mining Science*. – 2020. – Vol. 56, iss. 3. – P. 435–444. DOI: 10.1134/S1062739120036726.

6. Нейман В. Ю., Нейман Л. А., Лаппи С. Ю. Математическое моделирование динамических процессов электромагнитного вибровозбудителя для технологических машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12–2. – С. 203–216. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_203.

7. Малафеев С. И., Малафеев С. С. К анализу энергетических процессов в питающей сети при работе карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3. – С. 126–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.

8. Кузнецов С. М., Лисицын П. С. Совершенствование защиты тяговой сети горнодобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12–2. – С. 157–173. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_157.

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

10. Нейман Л. А., Нейман В. Ю. Динамическая модель работы электромагнитного ударного механизма электрического перфоратора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12–2. – С. 190–202. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_190.

11. Lindell I. V. *Methods for Electromagnetic Field Analysis*, 1st Ed., IEEE Press, New York, 1992, 290 p.

12. Малинин Л. И., Нейман В. Ю. К расчету интегральных характеристик тока и момента тягового электропривода с контактной сетью // *Электричество*. – 2012. – № 10. – С. 53–58.

13. 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.

14. Meeker D. *Finite Element Method Magnetics: User`s Manual*, available at: www.femm.info, 2023.

15. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and lowfrequency vibrations generation systems // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

16. Крутиков К. К., Рожков В. В. Особенности моделирования электрического и магнитного поверхностного эффекта от переменных электромагнитных полей в FEMM // *Электричество*. – 2020. – № 8. – С. 51–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-51-57.

17. Shevchenko V. P., Babychuk O. B., Boltenkov V. O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex // *Applied aspects of information technology*. 2019, vol. 2(4), pp. 317–327.

18. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi, M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles // *Mathematics*. 2023, vol. 11, p. 536. DOI: 10.3390/math11030536.

19. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption // *Energies*. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

20. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex // *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8072. DOI: 10.3390/en14238072. **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. 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].

3. Boldea L. N., Tutelea W. Xu and M. Pucci. 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.

4. Kashanskiy 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.

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

6. Neiman V. YU., Neiman L. A., Lappi S. YU. Mathematical modeling of dynamic processes of electromagnetic vibration exciter for technological machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no.12–2, pp. 203–216. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_22_0_203.

7. Malafeev S. I., Malafeev S. S. On the analysis of energy processes in the supply network during the operation of a mining excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no.3, pp. 126–137. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.

8. Kuznetsov S. M., Lisitsyn P. S. Improving the protection of the traction network of mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no.12–2, pp. 157–173. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_157.

9. 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].

10. Neiman L. A., Neiman V. Yu. Dynamic model of the operation of the electromagnetic impact mechanism of an electric perforator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no.12–2, pp. 190–202. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_190.

11. Lindell I. V. *Methods for Electromagnetic Field Analysis*. IEEE Press, New York, 1995, 290 p.

12. Malinin L. I., Neiman V. Yu. On the calculation of the integral characteristics of the current and torque of a traction electric drive with a contact network. *Electricity*. 2012, no. 10, pp. 53–58. [In Russ].

13. Efimova Yu. B. Choice of rational geometric parameters of a linear electromagnetic press with a small stroke of the plunger. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no.12–2, pp. 115–128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_115.

14. Meeker D. Finite Element Method Magnetics: User's Manual. Available at: www.femm.info, 2023.

15. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and low-frequency vibrations generation systems. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

16. Krutikov K. K., Rozhkov V. V. Features of modeling the electrical and magnetic surface effect from alternating electromagnetic fields in FEMM. Electricity. 2020, no. 8, pp. 51–57. [In Russ]. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-51–57.

17. Shevchenko V. P., Babiychuk O. B., Boltenkov V. O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex. Applied aspects of information technology. 2019, vol. 2(4), pp. 317–327.

18. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Qi, M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. *Mathematics*. 2023, vol. 11, p. 536. DOI: 10.3390/math11030536.

19. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies*. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

20. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8072. DOI: 10.3390/en14238072.

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, Российская Федерация, 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, Russian Federation, e-mail: u_b_efimova@mail.ru.

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

The author declares no conflict of interest.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 20.07.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 20.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.

