

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.313.282.2

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И МАТЕРИАЛА КОРПУСА НА ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БРОНЕВЫХ СОЛЕНОВИДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ МОЛОТОВ

Б. Ф. Симонов¹, В. Ю. Нейман², А. О. Кордубайло¹

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: Simonov_BF@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный технический университет,
E-mail: nv.nstu@ngs.ru, просп. Карла Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия*

Исследовано влияние корпуса и направляющей, а также их материалов на тяговые характеристики электромагнитов, входящих в конструкцию электромагнитных молотов. Оценены значения силы тяги электромагнитов без полюса со стороны рабочего зазора при положительных и отрицательных рабочих зазорах.

Электромагнитный молот, катушка, ток, рабочий зазор, направляющая, боек, корпус, полюс

DOI: 10.15372/FTPRPI20210210

В современных технологических процессах машины и механизмы, использующие электромагнитные приводы возвратно-поступательного движения, занимают важное место. Это трамбовки, бутобои, прессы, бетоноломы, молоты и другие установки [1–4]. Многие из этих машин, в частности электромагнитные молоты, построены на основе броневых соленоидных одно-, двух- или многосекционных электромагнитов постоянного тока [5–7]. При проектировании и изготовлении таких молотов используют различные конструктивные схемы электромагнитных приводов и способы реализации их рабочих циклов. Применяемые методики проектирования достаточно точно позволяют судить о степени рациональности использования активных материалов в случае классических схем электромагнитных приводов. Любые отклонения от устоявшихся классических схем, а также любая замена традиционных материалов исполнительных элементов конструкции магнитной цепи может существенно влиять на тяговые характеристики электромагнитного привода. Возникает необходимость в исследовании влияния параметров конструктивных элементов магнитной цепи на тяговые характеристики броневых соленоидных электромагнитов постоянного тока с целью оценки их воздействия на рабочие процессы, технологичность изготовления и себестоимость [8–11].

Цель настоящей работы — изучение влияния материала направляющей, по которой перемещается якорь электромагнита, и корпуса молота на тяговые характеристики электромагнитов.

Конструктивная схема электромагнита, входящего в структуру электромагнитного молота, показана на рис. 1. Полагаем, что катушка содержит W витков и запитывается постоянным током I . Исследования проводились для варианта конструкции, при котором длина бойка L_b и длина корпуса L_k много больше длины катушки. Традиционно в электромагнитных машинах возвратно-поступательного движения направляющую 3 изготавливают из немагнитных материалов. В ручных машинах используют полимерные материалы, в электромагнитных — нержавеющую сталь 1X18H9T, 1X18H10T. Это дорогостоящий и труднообрабатываемый вязкий материал, поэтому в работе представлены исследования на математических и физических моделях.

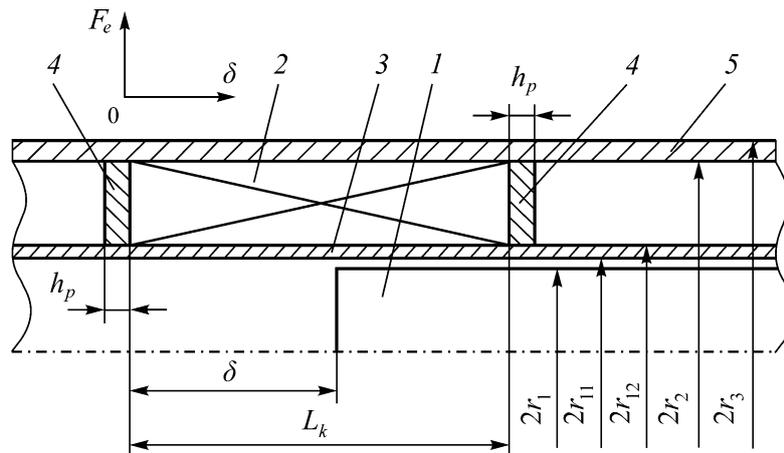


Рис. 1. Общая структура электромагнита в конструкции электромагнитного молота: 1 — боек; 2 — катушка; 3 — направляющая; 4 — полюса; 5 — корпус. Геометрические параметры: r_1 — радиус бойка; $\Delta_n = r_{12} - r_{11}$ — толщина направляющей; $\Delta_k = r_2 - r_3$ — толщина корпуса; h_p — высота полюса; δ — рабочий зазор электромагнита; L_k — длина катушки

Для двух моделей электромагнитов, выполненных согласно конструктивной схеме на рис. 1, рассчитаны тяговые характеристики $F_e(I, \delta)$ с немагнитной (из стали 1X18H9T) и магнитной (из стали Ст20) направляющими. Расчет статических характеристик проводился по методике [12, 13], основанной на конечно-элементном моделировании магнитного поля. Параметры обеих моделей приведены в таблице. Результаты расчета сопоставлялись с экспериментальными исследованиями.

Параметры моделей электромагнитов

Вариант	r_1	r_{11}	r_{12}	r_2	r_3	Δ_n	Δ_k	Δ_n / r_1	L_k	h_p	W	I
	мм								мм	вит.	А	
1	44.25	46	49	92.5	98	3.5	5.5	0.068	430	15	1110	30.50
2	348	350	358	478	483	8	5	0.023	1200	70	1360	160, 270, 500

На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные тяговые характеристики для электромагнита по варианту 1 с немагнитной направляющей при постоянных токах катушки $I=30, 40, 50$ А. Расхождение результатов расчета и эксперимента не превышает 5%, что свидетельствует о высокой точности используемой методики и возможности ее применения для инженерных расчетов электромагнитных сил в системах броневых соленоидных электромагнитов.

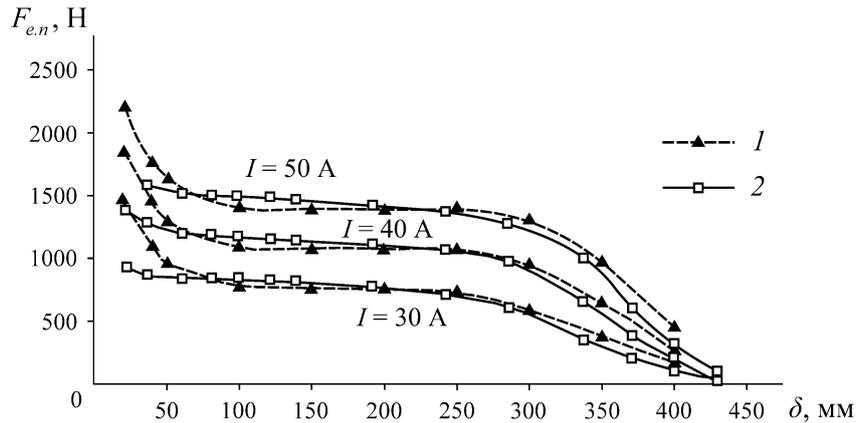


Рис. 2. Статические тяговые характеристики (расчетные 1 и экспериментальные 2) электромагнита, выполненного по варианту 1, с немагнитной направляющей из материала 1X18H9T. Катушка с проводом 5×2 мм (1110 витков)

На рис. 3 представлены расчетные тяговые характеристики для того же электромагнита с немагнитной и магнитной направляющими. Использование магнитной направляющей вместо немагнитной снижает тяговые характеристики не более чем на 4 %.

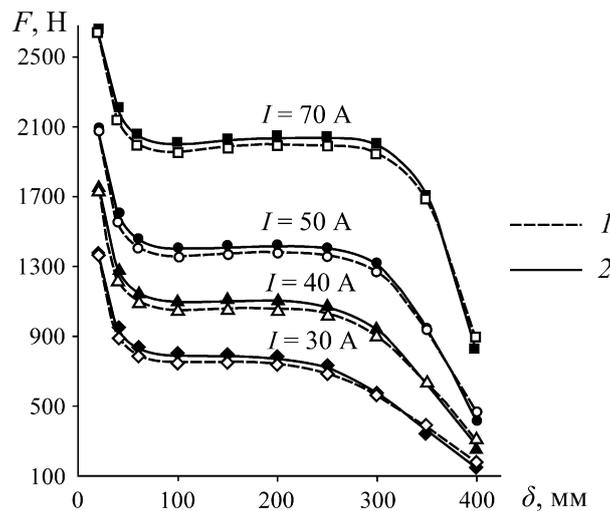


Рис. 3. Расчетные статические тяговые характеристики электромагнита, выполненного по варианту 1, с магнитной направляющей из стали Ст20 (1) и немагнитной из стали 1X18H9T (2). Диаметр бойка 88.5 мм

На рис. 4 приведена расчетная зависимость снижения силы тяги электромагнита от толщины направляющей Δ_n при замене с немагнитной $F_{e.n}$ на магнитную $F_{e.m}$:

$$\Delta F_e = F_{e.n} - F_{e.m}, \quad (1)$$

а также при постоянных токах и рабочих зазорах электромагнита, выполненного по варианту 1 ($\delta = \text{const} \approx L_k / 2 = 150$ мм; $I = \text{const} = 30, 50$ А).

С ростом толщины направляющей значение ΔF_e растет, соответственно электромагнитная сила снижается (рис. 4). При этом ΔF_e практически не зависит от тока катушки. На рис. 5 показаны картины поля в виде линий магнитного потока, полученные по результатам конечно-элементного расчета поля в объеме одной секции соленоидного электромагнита. Расчеты выполнены для фиксированного рабочего воздушного зазора $\delta = 150$ мм.

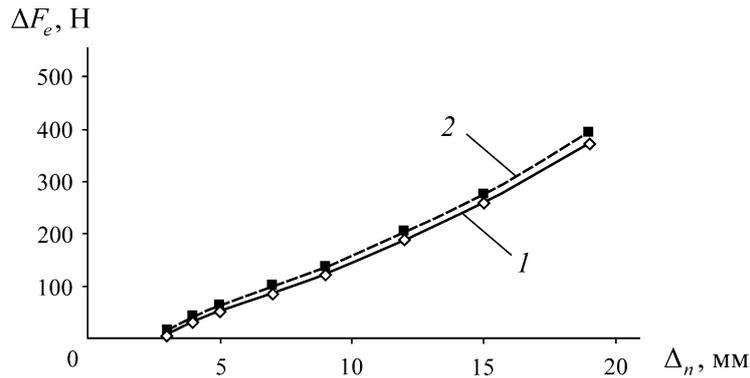


Рис. 4. Зависимость снижения силы тяги электромагнита от толщины магнитной направляющей по сравнению с немагнитной при постоянном рабочем зазоре 150 мм и токе катушки 30 А (1) и 50 А (2)

Предполагалось, что соленоидный электромагнит при построении линий магнитного поля обладает геометрической и магнитной симметрией относительно его оси. При расчетах тяговой характеристики картины поля получено качественное представление относительно распределения основного магнитного потока и потоков рассеяния. Увеличение этих потоков в объеме формирует силовую характеристику электромагнита.

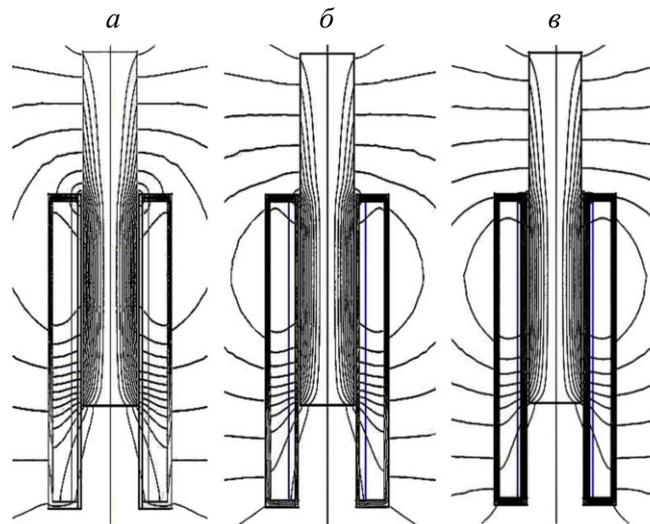


Рис. 5. Картины поля линий магнитного потока секции соленоидного электромагнита для случая немагнитной (а) и магнитной направляющих толщиной 3.5 (б) и 9.0 мм (в)

По данным рис. 4 построена зависимость относительного снижения электромагнитной силы $\Delta F_{e.m} / F_{e.n}$ в функции от толщины направляющей Δ_n / r_1 (рис. 6). Для радиусов бойка $r_1 \leq 100$ мм и относительных размеров направляющей

$$0.0677 \leq \frac{\Delta_n}{r_1} \leq 0.158 \quad (2)$$

снижение электромагнитной силы при $I \leq 30$ А ($IW \leq 33300$ А·вит.) находится в диапазоне $1.6\% \leq F_{e.m} / F_{e.n} \cdot 100\% \leq 11.4\%$. При $I \geq 50$ А ($IW \geq 55500$ А·вит.) это отношение меняется: $0.93\% \leq F_{e.m} / F_{e.n} \cdot 100\% \leq 7.1\%$. С увеличением толщины направляющей ($\Delta_n / r_1 > 0.2$) значение $\Delta F_{e.m} / F_{e.n}$ резко возрастает. Это говорит о нецелесообразности подобной замены материала

ла направляющей с немагнитного на магнитный при значительной ее толщине. Отметим, что при проектировании и изготовлении электромагнитных молотов нецелесообразно выбирать размер направляющей Δ_n и выходить за пределы соотношения (2).

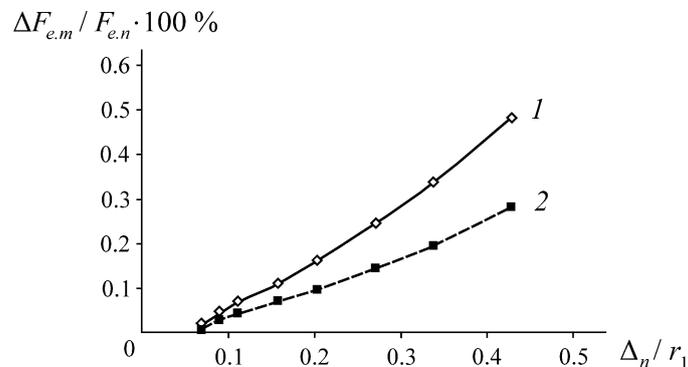


Рис. 6. Зависимость снижения силы тяги электромагнита $\Delta F_{e.m} / F_{e.n} \cdot 100\%$ от толщины направляющей Δ_n / r_1 при ее замене на магнитную вместо немагнитной, а также при постоянном рабочем зазоре 150 мм и токах катушки 30 А (1), 50 А (2)

Результаты проведенных расчетов и экспериментальных исследований тяговых характеристик электромагнитов радиусом $r_1 > 100$ мм, используемых в молоте МЭМ 100 с энергией удара 100 кДж, выполненном по варианту 2 ($r_1 = 348$ мм) при $\Delta_n / r_1 = 0.023$, показали следующее. Тяговые характеристики электромагнита рассчитаны и экспериментально сняты на стенде для переменного рабочего зазора $\delta = \text{var}$ и постоянных токах катушки $I = 160, 270, 500$ А. На рис. 7 представлены экспериментальные тяговые характеристики $F_{e.n}(I, \delta)$ при направляющей, выполненной по традиционному варианту из немагнитного материала (кривые 1–3), а также построены расчетные зависимости для немагнитной $F_{e.n}(I, \delta)$ (кривые 4–6) и магнитной $F_{e.m}(I, \delta)$ (кривые 7–9) направляющих. Видно, что расчетные зависимости от рабочего зазора тяговых усилий электромагнитов для немагнитной и магнитной направляющих при одинаковых токах близки и практически сливаются, если $\delta \leq L_k / 2$.

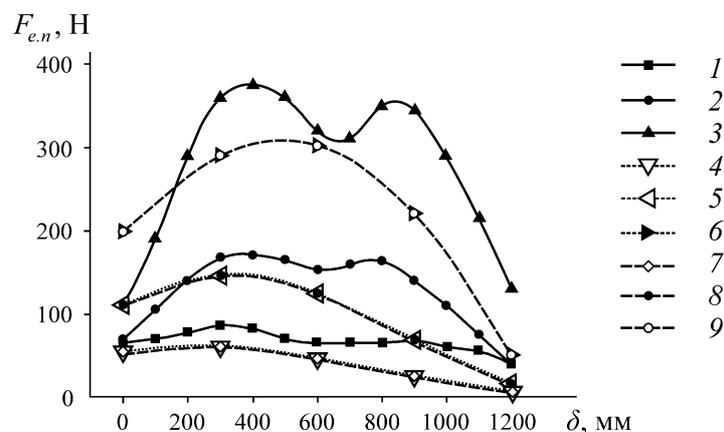


Рис. 7. Тяговые характеристики электромагнита, выполненного по варианту 2, для токов 160 (1), 270 (2), 500 А (3) с немагнитной $F_{e.n}$: 160 (4), 270 (5), 500 А (6) и магнитной $F_{e.m}$: 160 (7), 270 (8), 500 А (9) направляющими

После обработки результатов с использованием выражения (1) на рис. 8 построена зависимость $\Delta F_e / F_{e.n} \cdot 100\% = f(\delta, I)$. Согласно рис. 7 и 8, выявлено, что для больших радиусов бойка $r_1 > 300$ мм при переходе на магнитную направляющую значение $\Delta F_e / F_{e.n} \cdot 100\%$ снижается и не превышает 8% даже при больших зазорах. С уменьшением рабочего зазора электромагнита это отношение снижается до 0.2–3.0%, что связано с сильным насыщением материала направляющей и потерей ее магнитных свойств. Для молотов с энергией удара более 100 кДж и радиусами бойка 300–400 мм целесообразно использовать магнитную направляющую, поскольку обработка направляющей, выполненной из нержавеющей стали 1X18Н9Т, 1X18Н10Т, затруднительна и требует больших денежных затрат.

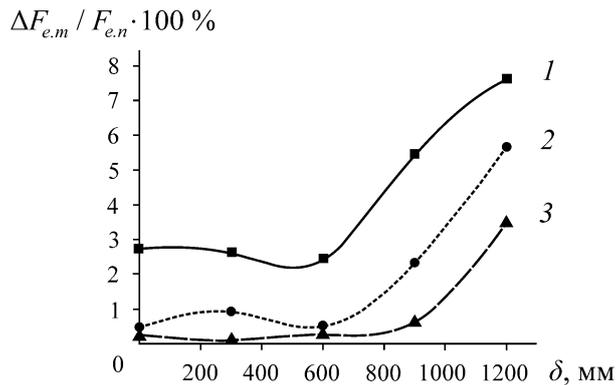


Рис. 8. Зависимость относительной силы тяги электромагнита по варианту 2 $\Delta F_e / F_{e.n} \cdot 100\%$ от рабочего зазора для токов 160 (1), 270 (2), 500 А (3)

Известно, что со стремлением рабочего зазора δ к нулю электромагнитная сила F_e снижается (см. рис. 2, 7). При наличии полюса со стороны рабочего зазора она снижается резко, при его отсутствии — плавно. Для многосекционных молотов [10, 11] с последовательным включением секций по определенному рабочему циклу имеет место соотношение $L_s \ll L_b$ (длина секции много меньше длины бойка $L_b / L_s < 3 - 4$). В таких конструкциях молотов возникают режимы, при которых некоторые секции обмотки включаются, когда боек полностью перекрывает катушку, выходя за ее пределы и образуя рабочий зазор $\delta < 0$ (рис. 9). Для оценки возникающих электромагнитных сил $F_e(I, \delta)$ выполнен их расчет. В качестве примера использован электромагнитный молот МЭМ 800 кДж. Геометрические размеры показаны на рис. 9, число витков 720, 800. Расчет осуществлялся для $I = 100, 200, 400$ А. Из представленных зависимостей следует, что, если $|\delta| \approx 1/4L_s - 1/2L_s$, электромагнитная сила при положительных зазорах в 2–4 раза больше, чем при отрицательных:

$$\frac{F(I, \delta)}{F(I, -\delta)} = 2 - 4, \quad |\delta| = 0.25 - 0.5L_s.$$

Это значит, что электромагнитные силы, действующие на боек от секции длиной L_s , при отрицательных зазорах (бойк выходит за пределы секции) меньше, чем при положительных, а при $\delta = -L_s$ становятся значительно меньше:

$$\frac{F_e(I, \delta = -L_s)}{F_e(I, \delta = L_s / 4)} \ll 1.$$

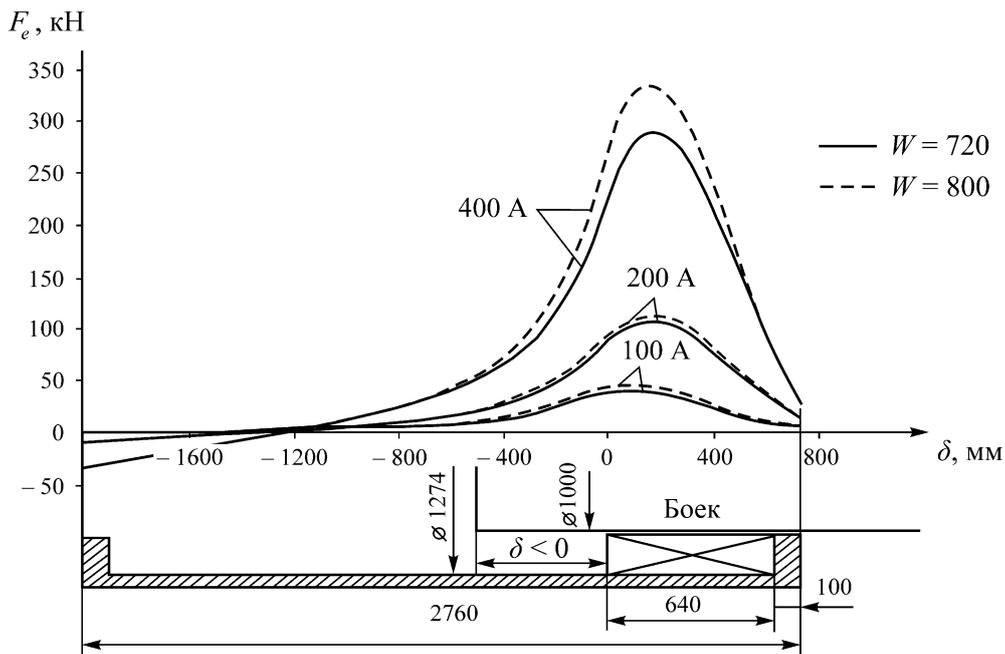


Рис. 9. Тяговые характеристики электромагнита при отрицательных и положительных рабочих зазорах

Воздействие на боек от этой секции практически отсутствует. Для обеспечения требуемого цикла секции в моменты их воздействия на боек с отрицательными рабочими зазорами можно оставлять включенными, тем более если снизить в них протекающий ток при питании от регулируемого преобразователя постоянного тока.

Представляет интерес расчетное исследование, выполненное на модели электромагнита по варианту 1. При одном выбранном значении рабочего зазора $\delta = 150$ мм (посередине рабочего хода якоря) для двух постоянных токов обмотки 30, 50 А посчитаны электромагнитные силы тяги $F_{e.n}$ (направляющая выбрана немагнитной, толщиной 3 мм, как в реальной модели). Кроме того, рассчитаны тяговые усилия F_e для случая отсутствия корпуса и полюсов ($r_2 = r_3, h_p = 0$) и сопоставлены с реальными значениями $F_{e.n}$ при этих же токах. Результаты представлены ниже:

Ток обмотки, А	30	50
Сила тяги электромагнита F_e , Н:		
присутствуют полюса и корпус	771	1394
отсутствуют полюса и корпус	632	1252
ΔF_e , Н	139	142
$\Delta F_e / F_e \cdot 100\%$	18.02	10.18

Таким образом, отсутствие в конструкции электромагнита таких элементов, как полюса и корпус, приводит к снижению тяговых характеристик не более чем на 18 %, при больших токах — не более чем на 10 % в связи с возникновением насыщения элементов магнитопровода. Следовательно, при выборе размеров полюсов и корпуса машин можно учитывать только их прочность и не стремиться обеспечить приближение площади их сечения к сечению бойка.

ВЫВОДЫ

При проектировании броневых соленоидных электромагнитов, используемых в конструкции электромагнитных молотов, следует руководствоваться следующими положениями. Если толщина Δ_n направляющей для перемещения бойка радиусом r_1 удовлетворяет неравенству $0.022 \leq \Delta_n / r_1 \leq 0.0677$, она может быть выполнена как из немагнитного, так и из магнитного материала типа Ст20, Ст30, Ст45. Размеры полюсов электромагнитов и корпуса молота при радиусах бойка $r_1 > 50$ мм незначительно влияют на тяговые характеристики электромагнитов, поэтому могут выбираться только из соображений прочности конструкции, а не сохранения сечения магнитопровода. В многосекционных электромагнитных молотах без полюсов между секциями при длине бойка, значительно большей длины секции катушки, секция при отрицательных значениях рабочего зазора может оставаться включенной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ивашин В. В., Кудинов В. П., Певчев А. К.** Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Изв. вузов. Электромеханика. — 2012. — № 1. — С. 72–75.
2. **Манжосов В. К., Лукутина Н. О., Невенчанная Т. О.** Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. — Фрунзе: Илим, 1985. — 119 с.
3. **Певчев В. П., Ивашин В. В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. — Тольятти: ТГУ, 2012. — 142 с.
4. **Угаров Г. Г., Мошкин В. И.** Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестн. КГУ, Сер. Техн. науки. — 2013. — № 2. — С. 88–90.
5. **Ряшенцев Н. П., Ряшенцев В. Н.** Электромагнитный привод линейных машин. — Новосибирск: Наука, 1985. — 153 с.
6. **Малов А. Т., Ряшенцев Н. П., Малахов А. П., Антонов А. Н., Носовец А. В.** Электромагнитные молоты. — Новосибирск: Наука, 1968. — 128 с.
7. **Ряшенцев Н. П., Угаров Г. Г., Львицин А. В.** Электромагнитные прессы. — Новосибирск: Наука, 1989. — 216 с.
8. **Симонов Б. Ф., Кадышев А. И., Нейман В. Ю.** Исследование статических параметров длинноходовых электромагнитов для молотов // Транспорт: Наука, техника, управление. — 2011. — № 12. — С. 30–32.
9. **Симонов Б. Ф., Нейман В. Ю., Шабанов А. С.** Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 118–126.
10. **Симонов Б. Ф., Кадышев А. И.** Влияние конструктивных элементов на статические тяговые характеристики электромагнитов постоянного тока // ФТПРПИ. — 1987. — № 6. — С. 54–59.
11. **Ряшенцев Н. П., Симонов Б. Ф., Кадышев А. И.** Исследование влияния конструктивных факторов на рабочие процессы электромагнитного молота // Изв. СО АН СССР, Сер. Техн. науки. — 1988. — Вып. 3. — № 11. — С. 73–85.
12. **Буль О. Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM. — М.: Академия, 2005. — 336 с.
13. **Нейман Л. А., Петрова А. А., Нейман В. Ю.** К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора // Изв. вузов. Электромеханика. — 2012. — № 6. — С. 62–64.

Поступила в редакцию 23/ХП 2020

После доработки 10/Ш 2021

Принята к публикации 15/Ш 2021