

УДК 621.313.282

СРАВНЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ТИПОВ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

Новосибирский государственный технический университет

Актуальность исследования обусловлена перспективностью практического использования силовых цилиндрических электромагнитов в конструкциях мощных ударных машин и устройств возвратно-поступательного действия. На основе принятых критериев оценки приводятся результаты сравнительного анализа силовых электромагнитов постоянного тока одного веса и объема с разными профилями магнитной цепи, выполненные методами компьютерного моделирования. Основным критерием оценки принимается предельная работоспособность, характеризующая предельные энергетические параметры силового электромагнита и целесообразность его выбора. В качестве исходных данных рассматриваются варианты конструкций электромагнитов с соотношениями размеров магнитного профиля, соответствующих размерам ранее проведенных экспериментальных исследований с использованием физических моделей. Основные результаты получены методом конечно-элементного моделирования магнитного поля с использованием программы FEMM. На основе единого подхода и единых критериев оценки сравниваемых электромагнитов установлены некоторые различия в абсолютных значениях показателей полученных методами компьютерного моделирования и с помощью созданных физических моделей. Сравнение конструктивных типов силовых электромагнитов указывает на несомненные преимущества электромагнитов с плоским и коническим стопом, а также электромагнитов с плоским якорем без стопа, которые по абсолютным значениям показателя предельной работоспособности имеют примерно одинаковые значения.

Ключевые слова: длинноходовые электромагниты, профиль магнитной цепи, энергия удара, критерии сравнения, предельная работоспособность, конечно-элементное моделирование, магнитное поле.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-4-24-37

Введение

Исследования характеристик различных типов систем силовых электромагнитов и результаты создания на их основе ударных машин и устройств возвратно-поступательного движения сводятся обычно к использованию цилиндрических электромагнитов как обладающих более высокими энергетическими показателями, простой конструкцией и технологичностью в изготовлении [1–3].

В зависимости от конструкции магнитных профилей таких систем электромагнитов тяговая характеристика может иметь различный вид, из чего следует важный вывод о влиянии формы воздушного зазора на

интервале движения якоря на вид их тяговой характеристики [4, 5]. Для увеличения интегральной работы и как конечный результат энергии, сосредоточенной в конце движения, целесообразно иметь тяговую характеристику электромагнита с максимальным тяговым усилием на всем интервале перемещения якоря [6, 7]. Исследованию вопроса влияния формы и расположения рабочего воздушного зазора на внешний вид тяговой характеристики посвящено достаточное количество работ [8–10]. Вызвано это необходимостью выбора типа силового электромагнита, обеспечивающего заданные энергетические параметры [11].

Существующие сегодня подходы сравнения между собой силовых электромагнитов, применяемых в качестве привода машин и устройств ударного действия, сводятся к необходимости воспроизведения его статической тяговой характеристики, т.е. получению зависимости силы тяги от положения якоря, выполняющего функции ударника (бойка) на интервале его движения [12, 13].

Сравнение электромагнитов по статическим тяговым характеристикам следует расценивать как предварительную оценку, в потенциальной способности системы в передаче накопленной кинетической энергии в деформируемую среду, ограничиваясь в выборе лучшего варианта [14].

При этом основные размеры и соотношения, определяющие внутренний профиль магнитной цепи, получаются не в результате расчета [15, 16], а принимаются как исходные на основании рекомендаций, составленных по данным ранее созданных машин, рассчитанных в процессе проектирования, свойства которых были хорошо изучены и усовершенствованы [17].

1. Постановка задачи исследований

В проводимых исследованиях рассматривается один из возможных и менее трудоемких вариантов сравнения силовых цилиндрических электромагнитов постоянного тока, используемых в качестве силового привода машин, и устройств возвратно-поступательного действия, рассмотренный в [18], адаптированный под современные методы компьютерного моделирования и обработки данных.

Количественная оценка различных по конструкции силовых электромагнитов и выводы по их сравнению выполнены в [18] на основе экспериментально полученных статических тяговых характеристик с применением физических моделей. Каждый тип электромагнита с изменяемым профилем магнитной цепи включал в себя одну и ту же базовую конструкцию цилиндрической структуры, состоящую из ярма, верхнего и нижнего полюса и намагничивающей катушки.

Для получения легко сопоставимых данных все электромагниты имели одинаковый вес и объем активных материалов, а тяговые характеристики снимались на постоянном токе при одной и той же намагничивающей силе.

Результаты этих исследований сегодня в форме рекомендаций широко используются в среде разработчиков и являются основополагающим фактором, положенным в основу проектирования машин ударного действия.

В качестве основного критерия оценки здесь используется понятие предельной работоспособности. Чем выше проходит статическая тяговая характеристика на интервале перемещения якоря, тем выше работоспособность электромагнита.

Из основных характеристик сравниваемых типов электромагнитов в [18] следует, что конструкции с коническим и плоским стопом характеризуются меньшей предельной работоспособностью в отличие от варианта без стопа с плоским торцом якоря. Однако на практике известно, что конструкции со стопом обладают более высокой силой тяги по сравнению с аналогичными конструкциями без стопа, а следовательно, большей работоспособностью и большими возможностями в сообщении якорю кинетической энергии.

Для устранения данного противоречия предлагается повторить ранее выполненный эксперимент, не выходя за границы исследований, представленных в [18], применяя для этого современные методы численного моделирования по расчету магнитного поля в объеме, занятом электромагнитом, что расширяет возможности анализа. Обращаем внимание, что в приводимых исследованиях не рассматривается вопрос выбора оптимальных геометрических соотношений размеров типов электромагнитов [19–21]. Исследования ограничены только сравнением подобных силовых электромагнитов между собой, отличающихся только внутренним профилем магнитной цепи. Очевидно, что не все конструкции электромагнитов с заданным профилем и присущими им соотношениями размеров являются оптимальными.

2. Результаты численного моделирования и их анализ

На рис. 1 приведены рассматриваемые конструкции электромагнитов с различными профилями магнитной цепи, структурированные в объеме базовой конструкции (рис. 1, а) с одинаковыми размерами диаметра якоря $d_1 = 50$ мм, внутреннего диаметра ярма $d_2 = 120$ мм, внешнего диаметра ярма $d_3 = 130$ мм, длиной катушки $l_k = 225$ мм, высотой верхнего и нижнего полюса $h_{\Pi} = 15$ мм и одинаковой намагничивающей силой катушки $I_w = 14\,400$ А.

Воздушный зазор δ и соответствующая ему величина перемещения якоря для электромагнитов без стопа (рис. 1, а, з) измерялись от внешней поверхности нижнего полюса. Для конического и плоского стопа (рис. 1, б, в) воздушный зазор δ равнялся расстоянию между торцами плоского бойка и стопа.

В таблице приведены размеры внутреннего профиля магнитной цепи исследуемых электромагнитов: b – длина конусной части якоря и стопа; h – полная высота стопа; h_1 – высота конусной части стопа; d – диаметр конусной части торца якоря и стопа; α – угол при вершине конуса.

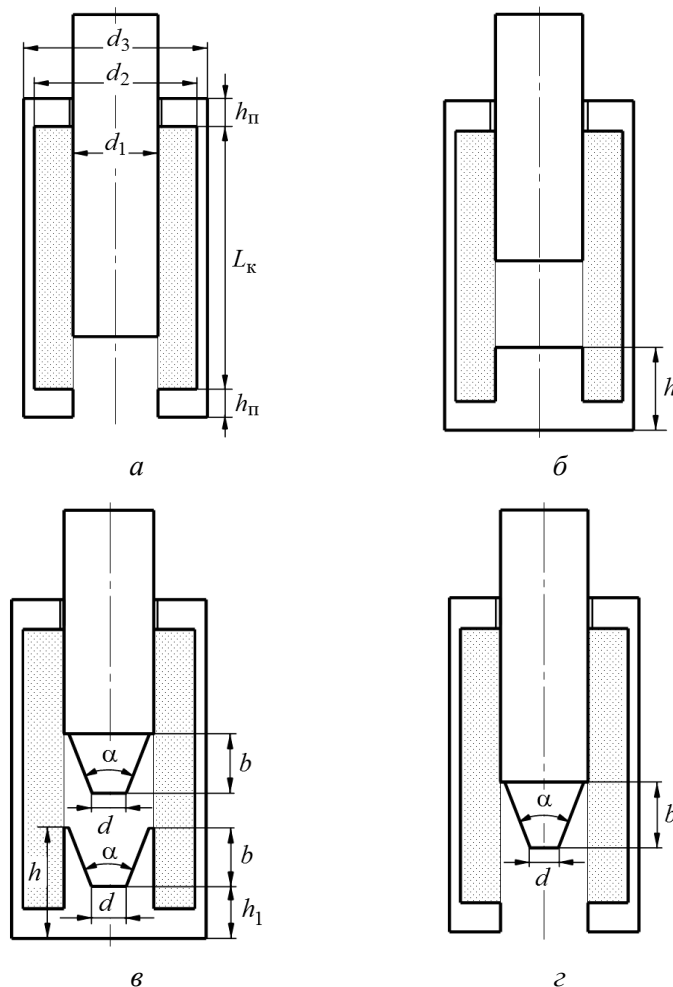


Рис. 1 – Профили магнитных цепей силовых электромагнитов

Fig. 1 – Profiles of magnetic circuits of power electromagnets

Размеры внутреннего профиля магнитной цепи электромагнита
Dimensions of the internal profile of the magnetic circuit of the electromagnet

№ п/п	Профиль рис. 1	Размеры профиля					Характеристика магнитного профиля
		α , град	d , мм	b , мм	h , мм	h_1 , мм	
1	г	10	30	116			Якорь конический без стопа $d = \text{const}; b = \text{var}$
2	г	20	30	58			
3	г	30	30	37			
4	г	40	30	27			
5	в	10	30	116	136	20	Якорь конический со стопом $d = \text{const}; b = \text{var}$
6	в	20	30	58	78	20	
7	в	30	30	37	57	20	
8	в	40	30	27	47	20	

Окончание таблицы / The End Table

№ п/п	Профиль рис. 1	Размеры профиля					Характеристика магнитного профиля
		α , град	d , мм	b , мм	h , мм	h_1 , мм	
9	з	10	41	47			Якорь конический без стопа $b = \text{const}; d = \text{var}$
10	з	20	32	47			
11	з	30	24	47			
12	з	40	15	47			
13	в	10	41	47	67	20	Якорь конический со стопом $b = \text{const}; d = \text{var};$ $h = \text{const}; h_1 = \text{const}$
14	в	20	32	47	67	20	
15	в	30	24	47	67	20	
16	в	40	15	47	67	20	
17	б						Якорь плоский без стопа
18	б				2		Якорь и стоп с плоскими торцами
19	б				15		
20	б				36		
21	б				67		
22	б				82		
23	б				97		
24	б				118		
25	б				138		
26	б				148		

В качестве критериев оценки при сравнении разных типов силовых электромагнитов были определены [18]:

– предельная работоспособность (основной критерий) $A_{\text{пред}} = \int_0^{\delta_{\text{опт}}} f_{\text{эм}} d\delta$,

где $f_{\text{эм}}$ – величина электромагнитного усилия; $\delta_{\text{опт}}$ – оптимальный воздушный зазор;

– максимальная условная полезная работа $A_{\text{усл max}} = f_{\text{эм}} \delta_{\text{опт}}$;

– разность работ $A_{\text{пред}} - A_{\text{усл max}} = A_{\text{к}}$.

Полагая, что полная (максимальная) работоспособность A_{max} определяется как площадь, ограниченная соответствующей кривой тяговой характеристики и осью абсцисс по всему возможному диапазону перемещения якоря, то предельная работоспособность $A_{\text{пред}}$ ограничивается перемещением якоря величиной $\delta_{\text{опт}}$.

Оптимальное значение величины $\delta_{\text{опт}}$ соответствует такому воздушному зазору, при котором условная работа, равная произведению электромагнитного усилия на величину воздушного зазора, принимает максимальное значение.

При определении предельной работоспособности $A_{\text{пред}}$ для каждого типа электромагнита возможный диапазон перемещения бойка ограничивается оптимальным значением воздушного зазора $\delta_{\text{опт}}$.

Для качественно представленной на рис. 2 статической тяговой характеристики максимальная условная полезная работа $A_{\text{усл. max}}$ соответствует заштрихованной площади S_{01470} . Предельная работоспособность $A_{\text{пред}}$ – площади S_{023470} .

При этом максимально возможную работоспособность A_{max} определяет площадь по всей заштрихованной области (рис. 2).

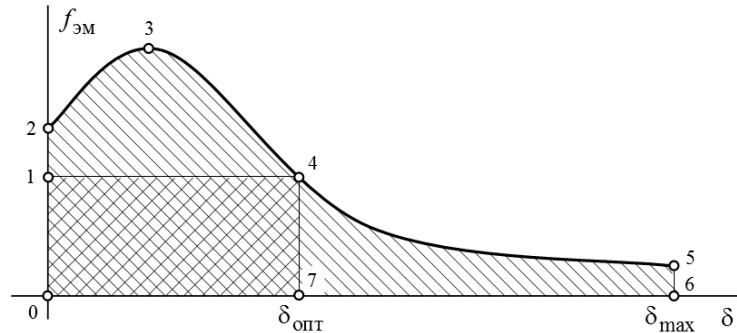


Рис. 2 – Статическая тяговая характеристика электромагнита

Fig. 2 – Static traction characteristic of an electromagnet

Выбор критериев, удовлетворяющих требованиям сравнения электромагнитов с целью обоснования наиболее пригодного для ударных машин авторы исходят из возможного сообщения якорю кинетической энергии.

Считается, что в общем случае предельная работа расходуется на сообщение кинетической энергии якорю для приведения его в движение. Величина этой энергии

$$\int_0^{\delta_{\text{опт}}} f_{\text{эм}} d\delta = \frac{mv^2}{2},$$

где m – масса якоря; v – скорость якоря.

Для машин ударного действия, у которых сила тяжести якоря соизмерима с электромагнитной силой, выражение работы при движении якоря и вертикальном расположении электромагнита

$$\int_0^{\delta_{\text{опт}}} f_{\text{эм}} d\delta = \frac{mv^2}{2} + G\delta,$$

где G – вес якоря.

Работа, затрачиваемая на преодоление противодействующей силы при подъеме якоря (при ее постоянной величине) является некоторой условной работой, равной величине $A_{\text{усл}} = G\delta$.

В таком случае предельную работоспособность можно представить как

$$A_{\text{пред}} = A_{\text{к}} + A_{\text{усл}}.$$

При подъеме якоря она накапливает потенциальную энергию, равную $A_{\text{усл}} = G\delta$, которая в процессе работы переходит в кинетическую энергию и реализуется в виде удара.

Соответственно максимум потенциальной энергии характеризует возможную работоспособность $A_{\text{усл max}}$ в накоплении потенциальной энергии. Следовательно, другая составляющая работы A_k расходуется на ускорение якоря при его подъеме.

Расчет статических тяговых характеристик электромагнитов с заданным магнитным профилем (см. таблицу) выполнен с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля, учитывающего конфигурацию и нелинейность магнитной цепи, потоки рассеяния, с использованием программы FEMM [22, 23]. Применение данной программы позволяет достичь необходимой точности расчета тяговой характеристики электромагнита с заданной конфигурацией магнитной цепи и заменить трудоемкий процесс физического моделирования [24, 25].

В процессе моделирования значения статических тяговых усилий для различных положений якоря определялись через интегральные характеристики поля [26].

Влияние профилей магнитной цепи на абсолютные значения тяговых характеристик здесь не приводятся. Однако, как это следует из анализа полученных расчетных зависимостей, характер их поведения в зависимости от магнитного профиля существенно отличается.

Далее полученные расчетные зависимости при помощи одномерной сплайн-интерполяции представлялись в виде функции, заданной аналитически, что позволило автоматизировать дальнейший процесс расчета критериев оценки электромагнитов в среде MathCAD и снизить вероятность ошибки [27–29].

Окончательные результаты расчетов относительно установленных критериев для силовых электромагнитов с различными магнитными профилями представлены на рис. 3. Нумерация по оси абсцисс (рис. 3) соответствует нумерации позиций, характеризующих магнитных профиль, указанный в таблице.

Сравнение характеристик электромагнитов, приведенных в [18], полученных с использованием физических моделей, с характеристиками, рассчитанными методами компьютерного моделирования, указывает на их некоторые различия в абсолютных значениях.

Так, по критерию предельной работоспособности $A_{\text{пред}}$ конструкция электромагнита с плоским якорем без стопа (поз. 17 на рис. 3) уступает по значениям этого показателя аналогичным системам электромагнита с коническим (поз. 7 и поз. 8 на рис. 3) и плоским (поз. 18–22 на рис. 3) стопом, что противоречит выводам в [18].

Следует отметить, что несомненным преимуществом электромагнита с магнитным профилем, содержащим якорь без стопа, и применением данного конструктивного исполнения в мощных машинах ударного действия заключается в более простой конструкции и технологичности в изготовлении.



Рис. 3 – Характеристики сравниваемых электромагнитов

Fig. 3 – Characteristics of the compared electromagnets

По критерию максимальной условной работы $A_{усл. max}$ также имеются различия в абсолютных значениях этого показателя по всем типам электромагнитов, однако наблюдается тенденция в их качественном поведении.

Закключение

Сравнение конструктивных типов силовых электромагнитов с соотношениями линейных размеров $2L_k/d_1 = 9$ указывает на несомненные преимущества электромагнитов с плоским и коническим стопом, а также электромагнитов с плоским якорем без стопа, которые по абсолютным значениям показателя предельной работоспособности имеют примерно одинаковые значения, находящиеся в пределах $A_{пред} = 36,3...38,7$ Дж.

Определенный интерес представляет сравнение аналогичных конструкций силовых цилиндрических электромагнитов одного веса и объема с соотношениями размеров $2L_k/d_1 > 9$, что может являться предметом для дальнейших исследований и решением актуальной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 2. – С. 88–90.

2. **Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А.** Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитных машин для импульсных технологий // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2011. – С. 271–277.
3. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Скотников А.А.** Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.
4. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
5. **Ивашин В.В., Певчев В.П.** Анализ влияния неравномерности зазора мощного электромагнитного двигателя на развиваемую механическую силу и энергию // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 9–12.
6. **Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н.** Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
7. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
8. **Геча В.Я., Мильшин А.Ю.** Определение тягового усилия и динамических характеристик цилиндрического электромагнита с различной формой штока // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 1. – С. 2–7.
9. **Оганесян А.Т.** Расчет тягового электромагнитного усилия длинноходового электромагнита // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 6. – С. 28–31. – DOI: 10.17213/0136-3360-2014-6-28-31.
10. **Нейман Л.А.** К решению задачи рационального выбора электромагнитного двигателя заданного габарита и веса на основе численного эксперимента // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4 (53). – С. 184–190.
11. **Певчев В.П., Ивашин В.В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольяти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
12. **Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.
13. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Линейные синхронные электромагнитные машины ударного действия. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 480 с.
14. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
15. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310–313.
16. **Лобов Б.Н.** Сравнение параметров оптимальных электромагнитов переменного тока // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 2 (120). – С. 12–15.
17. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
18. Электромагнитные молоты / А.Т. Малов, Н.П. Ряшенцев, А.В. Носовец, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.П. Малахов, А.Н. Антонов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 269 с.

19. **Татевосян А.А., Татевосян А.С.** Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 121–132.
20. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников, О.В. Рогова // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50–53.
21. Оптимизация геометрии линейных электромагнитных двигателей с использованием конечноэлементного моделирования магнитного поля / Ю.Г. Соловейчик, В.Ю. Нейман, М.Г. Персова, М.Э. Рояк, Ю.Б. Смирнова, Р.В. Петров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 24–28.
22. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
23. **Нейман В.Ю., Петрова А.А.** Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 2 (52). – С. 101–108.
24. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.
25. **Милых В.И., Полякова Н.В.** Определение электромагнитных параметров и фазовых соотношений в турбогенераторах автоматизированным расчетом магнитного поля в программной среде FEMM // Электротехника и электромеханика. – 2016. – № 1. – С. 26–32. – DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.05.
26. **Нейман Л.А., Петрова А.А., Нейман В.Ю.** К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 62–64.
27. **Ракитин В.И.** Руководство по методам вычислений и приложения MATHCAD. – М.: Физматлит, 2005. – 264 с.
28. **Дьяконов В.П.** Mathcad 8-12 для студентов. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 632 с.
29. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 1 (58). – С. 246–256. – DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-246-256.

COMPARISON OF DESIGN TYPES OF POWER ELECTROMAGNETS BASED ON A NUMERICAL EXPERIMENT

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

Novosibirsk State Technical University

The relevance of the study is due to the prospects for the practical use of power cylindrical electromagnets in the designs of powerful impact machines and reciprocating devices. Based on the adopted evaluation criteria, the results of a comparative analysis of DC power electromagnets of the same weight and volume with different magnetic circuit profiles are presented performed using computer modeling methods. The main evaluation criterion is the ultimate performance characterizing the ultimate energy parameters of the power electromagnet and the feasibility of its selection. As initial data, variants of elec-

tromagnet designs with ratios of magnetic profile dimensions corresponding to the dimensions of previously conducted experimental studies using physical models are considered. The main results are obtained by the method of finite element modeling of the magnetic field using the FEMM program. Based on a unified approach and unified evaluation criteria for the compared electromagnets, some differences in the absolute values of the indicators obtained by computer modeling methods and with the help of the created physical models are established. A comparison of the design types of power electromagnets indicates the advantages of electromagnets with a flat stop and a conical stop, as well as electromagnets with a flat anchor without a stop, which have approximately the same values in absolute values of the maximum performance indicator.

Keywords: long-stroke electromagnets, magnetic circuit profile, impact energy, comparison criteria, ultimate performance, finite element modeling, magnetic field.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-4-24-37

REFERENCES

1. Ugarov G.G., Moshkin V.I. Perspektivy razvitiya silovykh elektromagnitnykh impul'snykh sistem [Prospects for the development of power electromagnetic pulse systems]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskaya nauka* = *Bulletin of Kurgan State University. Series: Technical Sciences*, 2013, no. 2, pp. 88–90.
2. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. [Trends in the development of synchronous two-winding electromagnetic machines for impulse technologies]. *Aktual'nye problemy energetiki APK* [Actual problems of power engineering of the agroindustrial complex]. Materials II International scientific-practical conference. Saratov, 2011, pp. 271–277. (In Russian).
3. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Skotnikov A.A. Strukturnyy analiz sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya [Structural analysis of synchronous electromagnetic impact machines]. *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy* [Automated electromechanical systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 106–120.
4. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privody dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drive for pulse technology and vibroimpulsnykh]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* = *Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
5. Ivashin V.V., Pevchev V.P. Analiz vliyaniya neravnomernosti zazora moshchnogo elektromagnitnogo dvigatelya na razvivaemuyu mekhanicheskuyu silu i energiyu [Analysis of the influence of unevenness of the gap of a powerful electromagnetic motor on the developed mechanical force and energy]. *Elektrotehnika* = *Russian Electrical Engineering*, 2010, no. 9, pp. 9–12. (In Russian).
6. Ryashentsev N.P., Ryashentsev V.N. *Elektromagnitnyi privod lineinykh mashin* [Electromagnetic drive of linear machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 153 p.
7. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazatelei odnoobmotochnykh impul'snykh ustroystv s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Ways to improve the energy performance of single-winding pulsed devices with electromagnetic excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* = *Transportation: Science, Technology, Management*, 2010, no. 8, pp. 29–31.
8. Gecha V.Ya., Mil'shin A.Yu. Opredelenie tyagovogo usiliya i dinamicheskikh kharakteristik tsilindricheskogo elektromagnita s razlichnoi formoi shtoka [Determination of traction force and dynamic characteristics of a cylindrical electromagnet with a stop of different shape].

- tion of traction force and dynamic characteristics of a cylindrical electromagnet with different rod shapes]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* = *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2013, no. 1, pp. 2–7.
9. Hovhannisyan A.T. Raschet tyagovogo elektromagnitnogo usiliya dlinnokhodovogo elektromagnita [Calculation of the tractive electromagnetic force of the long stroke solenoid]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* = *Russian Electromechanics*, 2014, no. 6, pp. 28–31. DOI: 10.17213/0136-3360-2014-6-28-31.
 10. Neyman L.A. K resheniyu zadachi ratsional'nogo vybora elektromagnitnogo dvigatelya zadannogo gabarita i vesa na osnove chislennogo eksperimenta [Towards solving the problem of rational selection of an electromagnetic motor of a given size and weight based on a numerical experiment]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 4 (53), pp. 184–190.
 11. Pevchev V.P., Ivashin V.V. *Proektirovanie moshchnykh korotkokhodovykh impul'snykh elektromagnitnykh dvigatelei* [Designing powerful pulsed electromagnetic short-stroke engine]. Tol'yatti, Togliatti State University Publ., 2012. 142 p.
 12. Usanov K.M., Ugarov G.G., Moshkin V.I. *Lineinyi impul'snyi elektromagnitnyi privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive the machine with autonomous-powered]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2006. 284 p.
 13. Neyman L.A., Neyman V.Yu. *Lineinye sinkhronnye elektromagnitnye mashiny udarnogo deistviya* [Linear synchronous electromagnetic impact machines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2021. 480 p.
 14. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyanie sootnoshenii glavnykh razmerov elektromagnitov na znacheniya konstruktivnogo faktora i pokazatelya ekonomichnosti [The influence of the ratios of the main dimensions of electromagnets on the values of the design factor and the efficiency index]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.
 15. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. O metodike k vyboru tipa elektromagnita po znacheniyam konstruktivnogo faktora [About the method of choosing the type of electromagnet according to the values of the design factor]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* = *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2011, no. 2, pp. 310–313.
 16. Lobov B.N. Cravnenie parametrov optimal'nykh elektromagnitov peremennogo toka [Comparison of parameters of optimal alternating current electromagnets]. *Gor-noe oborudovanie i elektromekhanika* = *Mining Equipment and Electromechanics*, 2016, no. 2 (120), pp. 12–15.
 17. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic presses]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
 18. Malov A.T., Ryashentsev N.P., Nosovets A.V., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malahov A.P., Antonov A.N. *Elektromagnitnye moloty* [Electromagnetic hammers]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 269 p.
 19. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Raschet optimal'nykh parametrov elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya [Calculation of optimal parameters of an electromagnetic drive of oscillatory motion]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 121–132.

20. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82 (6), pp. 328–331. DOI: 10.3103/S1068371211060095. Translated from *Elektrotehnika*, 2011, no. 6, pp. 50–53.
21. Soloveichik Yu.G., Neiman V.Yu., Persova M.G., Royak M.E., Smirnova Yu.B., Petrov R.V. Optimizatsiya geometrii lineinykh elektromagnitnykh dvigatelei s ispol'zovaniem konechnoelementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [The optimization of linear electromagnetic motor geometry using finite element magnetic field modeling]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2005, no. 2, pp. 24–28.
22. Bul' O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Calculation methods for magnetic systems of electrical apparatus: Magnetic circuits, fields and the FEMM program], Moscow, Akademiya Publ., 2005. 336 p.
23. Neyman V.Yu., Petrova A.A. Modelirovanie v FEMM magnitnogo polya dlya rascheta tyagovykh kharakteristik elektromagnitnykh dvigatelei postoyannogo toka [Modeling in FEMM of magnetic field for calculation of traction characteristics of electromagnetic DC motors]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 2 (52), pp. 101–108.
24. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Raschet pokazatelya ekonomichnosti silovogo elektromagnita postoyannogo toka s pomoshch'yu modelirovaniya magnitnogo polya [Calculation of the efficiency index of a DC power electromagnet using magnetic field modeling]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie = Transport: Science, Technology, Management*, 2008, no. 6, pp. 21–24.
25. Milykh V.I., Polyakova N.V. Opredelenie elektromagnitnykh parametrov i fazovykh sootnoshenii v turbogeneratorakh avtomatizirovannym raschetom magnitnogo polya v programmnoi srede FEMM [Determination of electromagnetic parameters and phase relationships in turbogenerators by automated calculation of the magnetic field in the FEMM software environment]. *Elektrotehnika i elektromekhanika = Electrical Engineering and Electromechanics*, 2016, no. 1, pp. 26–32. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.05.
26. Neyman L.A., Petrova A.A., Neyman V.Yu. K otsenke vybora tipa elektromagnita po znacheniyu konstruktivnogo faktora [To assess the choice of the type of electromagnet based on the value of the design factor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2012, no. 6, pp. 62–64.
27. Rakitin V.I. *Rukovodstvo po metodam vychislenii i prilozheniya MATHCAD* [MATHCAD computational methods and applications guide]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 264 p.
28. D'yakonov V.P. *Mathcad 8-12 dlya studentov* [Mathcad 8-12 for students]. Moscow, Solon-Press Publ., 2005. 632 p.
29. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Povyshenie tochnosti analiticheskogo rascheta radial'nykh sil odностороннего магнитного притяжения некоаксимальных элементов магнитопровода [Improving the accuracy of analytical calculation of radial forces of one-sided magnetic attraction of non-coaxial elements of a magnetic circuit]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 1 (58), pp. 246–256. DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-246-256.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и технологии. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna (b. 1966) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Electrotechnological Units Department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machines and technologies. She is the author of 150 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman31@gmail.com).



Нейман Владимир Юрьевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовые электромагнитные импульсные системы. Опубликовано более 300 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: nv_nstu@mail.ru).

Neyman Vladimir Yurievich (b. 1960), Doctor of Sciences (Eng.), professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests cover power electromagnetic pulse systems. More than 300 scientific papers have been published.. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: nv_nstu@mail.ru).

*Статья поступила 10 сентября 2025 г.
Received September 10, 2025*

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Cravnenie konstruktivnykh tipov silovykh elektromagnitov na osnove chislennogo eksperimenta [Comparison of design types of power electromagnets based on a numerical experiment]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2025, no. 4 (69), pp. 24–37. DOI: 10.17212/1727-2769-2025-4-24-37.