

УДК 621.313.282

К решению задачи рационального выбора электромагнитного двигателя заданного габарита и веса на основе численного эксперимента*

Л.А. НЕЙМАН

Рассмотрено влияние профиля магнитной цепи на выходные характеристики электромагнитного двигателя, полученные с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля. Показаны различия в эффективности использования сравнимых структур электромагнитных двигателей одного габарита и веса из условия экономичности.

Ключевые слова: электромагнитный двигатель, профиль магнитной цепи, магнитное поле, конечно-элементное моделирование, численный эксперимент, тяговая характеристика, механическая работа, показатель добротности, конструктивный фактор.

ВВЕДЕНИЕ

В различных технологических процессах широкое применение, как менее энергоемкие, находят высокоэффективные вибрационные и виброударные процессы. При этом одновременно возрастают требования к эффективности и качеству электроприводов, предназначенных для возбуждения колебаний.

Обусловленные относительной простотой конструкции, управляемостью и надежностью в качестве электроприводов хорошо зарекомендовали себя электромагнитные двигатели, основу которых составляют силовые электромагниты цилиндрической структуры, обладающие среди различных типов более высокими силовыми и энергетическими показателями.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В зависимости от выполняемых технологических операций к электромагнитам, используемым в качестве исполнительных силовых устройств, могут предъявляться разные и порой противоречивые требования. Прежде всего, это низкое энергопотребление, высокая или ограниченная скорость перемещения якоря в конце хода, высокое значение усилия на интервале движения якоря, большой ход якоря, ограничения по массогабаритным показателям и т. д.

Анализ существующих типов электромагнитов показывает, что заданные требования могут быть частично удовлетворены, например, за счет особой конструкции исполнения магнитной системы. В практике разработки подобных устройств находят применение различные способы нахождения наиболее оптимальных вариантов конструкций [1–3]. В случае, если рациональный тип и, соответственно, форма магнитной системы электромагнита заведомо известны, задача многовариантного анализа с выбором лучшего из нескольких вариантов не вызывает затруднений. При этом основные соотношения и размеры, от которых в значительной степени определяется эффективность конструкции электромагнита, могут быть точно определены на основании уже существующих рекомендаций. Даже если эти рекомендации весьма приближительны или вообще отсутствуют (например, электромагниты с нетрадиционной структурой магнитной цепи), то выбор оптимальных геометрических соотношений – дело только времени.

Анализ существующих типов электромагнитов приводит к основному выводу о том, что при конструировании должны существовать определенные положения, соответствующие не-

* Статья получена 13 мая 2013 г.

которому виду оптимальной функции в формировании за счет пространственной геометрии взаимодействующих элементов внутренней структуры магнитной цепи.

К одним из таких положений следует отнести повышение глубины модуляции индуктивности при движении якоря за счет исполнения магнитной системы с резко неоднородными по магнитным свойствам участками, повышение магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре за счет наибольшей концентрации магнитного поля, снижение магнитных сопротивлений и т. д.

Учитывая существующее многообразие типов электромагнитов также очевидно, что при нулевом рабочем воздушном зазоре конструктивно их отличает только длина средней силовой линии на пути замыкания основного магнитного потока.

В данной работе выполнен сравнительный анализ цилиндрических электромагнитов одного габарита и веса активных материалов и показано влияние профиля магнитной цепи через широко используемые в практике выходные показатели, полученные с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля.

При снятии статических тяговых характеристик изменениям подвергались только профили магнитной цепи, определяющие ее конфигурацию. Остальные параметры электромагнитов, включая внешние размеры и объемы, занятые активными материалами, на протяжении всего эксперимента не изменялись.

Для получения сопоставимых данных все исследуемые профили электромагнитов имели одинаковую марку стали, равный вес ($m = 11$ кг), и сечения участков магнитной цепи на пути основного потока. Количество витков катушки $w = 1200$, ток $I = 4$ А. Величина рабочего воздушного зазора изменялась в одних пределах $x = 0 \dots 35$ мм. Тяговые характеристики снимались при одних значениях намагничивающих сил. Принятые меры должны обеспечить идентичность условий охлаждения и нагрева.

Структурированные в объеме базовой конструкции типовые профили магнитной цепи исследуемых электромагнитов в виде расчетных моделей, полученные по результатам конечно-элементного моделирования, приведены на рис. 1. Несмотря на разнообразие конструктивных исполнения, все электромагниты в своей основе имеют магнитные системы с втяжным или притягивающимся якорем, работающие на продольном или поперечном магнитном потоке, или их сочетании. В конечном положении якоря все электромагниты принимают одинаковый профиль магнитной цепи. Снятие статических тяговых характеристик и их обработка по результатам численного эксперимента осуществлялась по методике, приведенной в [4, 5]. На рис. 1 приведены конечные результаты построения картин поля в виде линий магнитного потока, полученные по результатам численного расчета активного объема созданных моделей с помощью конечно-элементного моделирования в FEMM [6–10].

Влияние профилей магнитной цепи созданных моделей (рис. 1) на статические тяговые характеристики в связи с ограничениями по объему представляемой работы здесь не приводятся. Однако, как это следует из анализа полученных зависимостей, характер изменения силы в функции положения якоря и ее максимальное значение имеют существенные различия.

По результатам численного эксперимента на рис. 2 приведены кривые относительных значений тяговых усилий, определяемых через отношение абсолютных значений тяговых усилий к тяговому усилию электромагнита с профилем магнитной цепи по рис. 1, з, как обладающего наибольшим значением тягового усилия в конце рабочего хода якоря. Величины ходов якоря на рис. 2 представлены через относительный параметр $\xi = x/d_{\text{я}}$, равный отношению величины рабочего воздушного зазора x к диаметру якоря $d_{\text{я}}$. Из полученных кривых, соответствующих максимальным значениям отношения $f^* = f/f_{\text{max}}$, можно получить предельные величины ходов якоря для каждой формы электромагнита.

Как следует из рис. 2, на интервале величины ходов якоря $\xi = 0,005 \dots 0,052$ по максимальным значениям тягового усилия преобладают электромагниты с конструктивным профилем магнитной цепи, выполненные по рис. 1, з (прямая 8). С увеличением величины рабочего воздушного зазора на интервале $\xi = 0,052 \dots 0,093$ по максимальным значениям тягового усилия преобладают электромагниты с конструктивной формой магнитной цепи, выполненные по

рис. 1, *д* (кривая 9), а на интервале $\xi > 0,093$ преобладают электромагниты, выполненные по рис. 1, *к* (кривая 5).

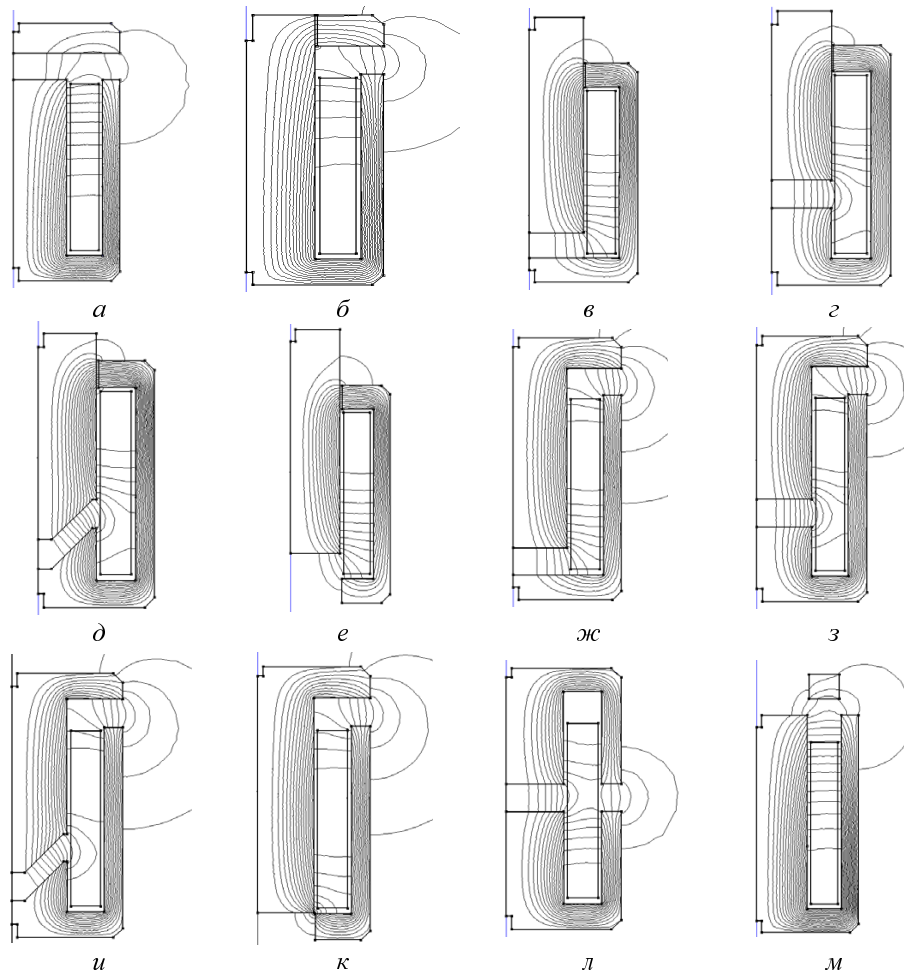


Рис. 1. Профили магнитных систем электромагнитов

Для электромагнитов с одним в области электромеханического преобразования энергии рабочим воздушным зазором (рис. 1, *б*, *в*, *г*, *д*, *е*) на интервале величины ходов якоря $\xi = 0,005 \dots 0,067$ преобладают электромагниты с конструктивной формой магнитной цепи, выполненные по рис. 1, *г*, а на интервале $\xi = 0,067 \dots 0,159$ максимальным значениям усилия соответствуют электромагниты с формой магнитной цепи по рис. 1, *д*.

Для фиксированных положений якоря в заданном интервале относительных значений $\xi = 0,005 \dots 0,18$ (рис. 2) тяговые усилия электромагнитов с различными профилями магнитной цепи могут отличаться в 2...10 и более раз.

Для количественной оценки сравниваемых типов электромагнитов между собой использовались показатели, наиболее полно отражающие современные тенденции преимущественного применения в задачах проектирования.

Результаты проведенного анализа сведены в таблицу. Полная механическая работа $A_{\text{п}}$ определялась как площадь, ограниченная соответствующей кривой тяговой характеристики и осью абсцисс в пределах перемещения якоря $x = 0 \dots 35 \text{ мм}$. Под максимальной условной полезной работой $A_{\text{у}}$ понималось максимальное значение произведения электромагнитной силы

на величину хода якоря, соответствующего данной силе. Оптимальная величина рабочего воздушного зазора определялась по максимальной условной полезной работе. Этой же величине рабочего воздушного зазора соответствует оптимальная для получения максимальной работы сила $F_{\text{опт}}$. Полезная механическая работа при оптимальном ходе A_M определялась соответствующей площадью, ограниченной тяговой характеристикой и осью абсцисс в пределах установленного хода якоря.

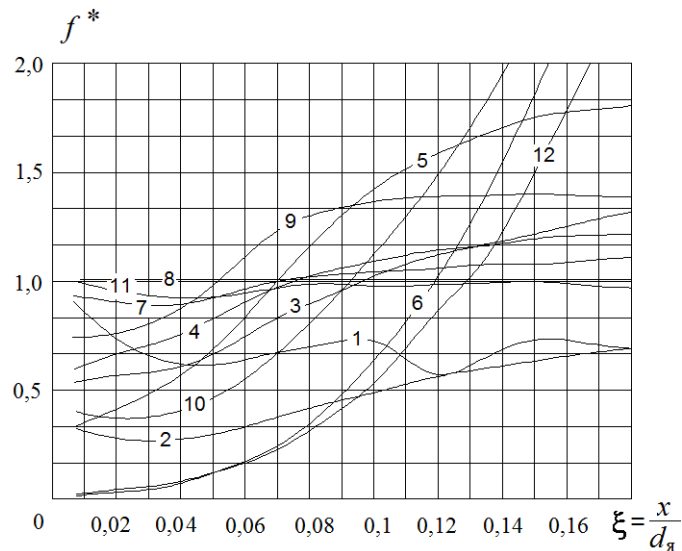


Рис. 2. Кривые относительных тяговых усилий электромагнитов с различным профилем магнитной цепи

Для сравнительной оценки в отношении расхода активных (конструкционных) материалов использовался показатель добротности, определяемый как отношение веса электромагнита к максимальной условной полезной работе [6, 8]

$$D(x) = \frac{M_{\text{эм}}}{A_y}.$$

Значение конструктивного показателя (фактора) определялось как отношение корня квадратного из оптимальной силы к величине оптимального рабочего хода $x_{\text{опт}}$ [1, 6]

$$K\Phi = \frac{\sqrt{F_{\text{опт}}}}{x_{\text{опт}}}.$$

Из таблицы видно, что приводимые показатели рассматриваемых профилей магнитной цепи электромагнитов при условии одинакового габарита, веса и нагрева могут существенно отличаться друг от друга по абсолютным значениям. Электромагниты имеют различия не только по максимальной условной полезной работе, которая может изменяться в пределах $A_y = 2,32...11$, но и в полной механической работе $A_M = 7,89...22,06$ при различных значениях оптимальной силы $F_{\text{опт}} = 483...3296$ Н и оптимальной величины хода якоря $x_{\text{опт}} = 2...13,9$ мм. Относительно пределов изменения конструктивного фактора, который находится в диапазоне величин $K\Phi = (1,9...24,9) \cdot 10^3 \sqrt{\text{Н/м}}$, можно утверждать, что по данному показателю электромагниты по экономическим показателям сравнимы с традиционными магнитными системами с плоской и конусной формой втяжного якоря [1].

Таблица

Характеристики электромагнитов

№ п/п	Профиль магнитной цепи, рис. 3	Полная механическая работа	Максимальная условная полезная работа	Оптимальный ход якоря	Полезная механическая работа при оптимальном ходе	Оптимальная сила для получения максимальной работы	Отношение полезной механической работы при оптимальном ходе к полной механической работе	Отношение полезной механической работы при оптимальном ходе к максимальной условной полезной работе	Добротность		Конструктивный фактор	
									$A_{\text{п}},$ Дж	$A_{\text{у}},$ Дж	$x,$ мм	$A_{\text{п}},$ Дж
1	а	16,12	4,96	2	8,51	2473	0,53	1,72	2,22	0,22	24,9	78,6
2	б	7,89	2,32	4,8	4,86	483	0,62	2,1	4,74	0,47	4,6	14,6
3	в	22,06	7,91	2,4	11,32	3296	0,51	1,43	1,39	0,14	23,9	75,6
4	г	18,24	6,33	3,2	9,21	1978	0,51	1,45	1,74	0,17	13,9	43,9
5	д	18,46	6,69	5,8	9,76	1153	0,53	1,46	1,64	0,16	5,9	18,7
6	е	19,49	10,99	13,3	6,98	826	0,52	0,63	1,0	0,1	2,2	6,9
7	ж	21,57	7,08	2,8	11,37	2530	0,53	1,6	1,55	0,16	18,0	57,0
8	з	21,08	7,3	2,4	10,89	3041	0,52	1,5	1,5	0,15	23,0	72,8
9	и	21,9	7,71	3,7	11,34	2084	0,55	1,55	1,43	0,14	12,3	38,9
10	к	19,6	11,0	13,9	14,66	791	0,74	1,33	1,0	0,1	2,0	6,3
11	л	17,8	5,17	3,7	8,53	1398	0,48	1,65	2,13	0,21	10,1	31,9
12	м	9,31	9,45	13,8	6,41	684	0,69	0,68	1,16	0,12	1,9	6,0

Из таблицы следует, что для электромагнитов с фиксацией якоря в конце рабочего хода полезная механическая работа для оптимального хода превышает условную полезную работу $A_M/A_y = 1,32...2,1$. Для электромагнитов, имеющих свободный выбег якоря, это отношение находится в пределах значений $A_M/A_y = 0,63...0,68$. Последнее свидетельствует о том, что условная полезная работа для систем электромагнитов со свободным выбегом якоря всегда превышает потенциальную механическую работу, что объясняется видом тяговой характеристики. Существенно отличаются исследуемые электромагниты (см. табл.) по показателю добротности, который изменяется в пределах $D(x) = 1,0...4,74$ кг/Дж, что может быть объяснено только не оптимальной геометрией магнитной цепи при заданных габаритах.

Для определения значений конструктивных факторов, соответствующих максимально возможным тяговым усилиям, расчет электромагнитов с заданным профилем магнитной цепи по описанной методике следует проводить для ряда вариантов с произвольно выбранными геометрическими параметрами, из которых затем может быть определен наилучший вариант с точки зрения минимального веса активных материалов или минимальной добротности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты этого исследования показывают следующее.

Целесообразно определять области рациональных значений конструктивных факторов из анализа расчетных тяговых характеристик, полученных с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля, что упрощает решение задачи многовариантного поиска.

Для одинаковых условий работы при заданных габаритах и весе активных материалов значения конструктивного фактора и добротности электромагнитов существенно зависят от профиля магнитной цепи.

Оптимальный для получения максимальной условной полезной работы ход якоря и профиль магнитной цепи электромагнита взаимосвязаны и характеризуются определенной величиной конструктивного фактора.

Полученные величины конструктивных факторов, соответствующих наибольшему выигрышу по усилию, для электромагнитов с каноническим (традиционным) профилем магнитной цепи находятся в пределах рационального применения, рекомендованных другими авторами.

Величины конструктивных факторов при заданных условиях работы (см. табл.) могут не соответствовать максимально возможным тяговым усилиям, и их следует рассматривать как ориентировочные ввиду недостаточного набора статистических данных.

Для профилей магнитных цепей с механической фиксацией якоря в конце хода полезная механическая работа при оптимальном ходе в среднем в 1,5 раза (см. табл.) превышает условную полезную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Казаков Л.А.** Электромагнитные устройства радиоэлектронной аппаратуры / Л.А. Казаков. – М.: Сов. радио, 1978. – 168 с.
- [2] **Никитенко А.Г.** Автоматизированное проектирование электрических аппаратов / А.Г. Никитенко. – М.: Высш. школа, 1983. – 192 с.
- [3] **Рященко Н.П.** Электромагнитные прессы / Н.П. Рященко, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.
- [4] **Нейман В.Ю.** Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока / В.Ю. Нейман, А.А. Петрова // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2008. – № 2 (52). – С. 101–108.
- [5] **Neuman V.Yu.** Calculation of Efficiency of a DC Power Electromagnet for Mechanotronic Systems / V.Yu. Neuman, L.A. Neyman, A.A. Petrova // IFOST 2008: Proceedings of the 3d International Forum on Strategic Technology, June 23–29, 2008 – Novosibirsk, Tomsk. – P. 452–454.
- [6] **Нейман Л.А.** К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора. Изв. вузов. Электромеханика / Л.А. Нейман, А.А. Петрова, В.Ю. Нейман. – 2012. – № 6. – С. 62–64.
- [7] **Нейман В.Ю.** Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Автоматизированные электромеханические системы: [сб. науч. тр.] – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.

[8] **Нейман В.Ю.** К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, О.В. Рогова, А.А. Скотников // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50а–53.

[9] **Evreinov D.M.** Design factor comparison for geometrically similar cores of electromagnets / D.M. Evreinov, L.A. Neyman, V.I. Yu. Neyman, A.A. Petrova, J.B. Smirnova // IFOST 2009: Proceedings of the 4 th International Forum on Strategic Technology, October 21-23, 2009, Ho Chi Minh City, Vietnam. – P. 182–184.

[10] **Нейман В.Ю.** О допустимой погрешности при сравнении подобных электромагнитов по значениям конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, Д.М. Евреинов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2011. – № 12. – С. 36–37.

REFERENCES

- [1] Kazakov L.A. Jelektromagnitnye ustrojstva radiojelektronnoj apparatury. – M.: Sov. radio, 1978. – 168 s.
- [2] Nikitenko A.G. Avtomatizirovannoe proektirovanie jelektricheskikh apparatov. – M.: Vyssh. shkola, 1983. – 192 s.
- [3] Rjashencev N.P., Ugarov G.G., L'vicyn A.V. Jelektromagnitnye pressy. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1989. – 216 s.
- [4] Nejman V.Ju., Petrova A.A. Modelirovanie v FEMM magnitnogo polja dlja rascheta tjagovykharakteristik jelektromagnitnykh dvigatelej postojannogo toka // Sbornik nauchnykh trudov NGTU. 2008. № 2 (52). S. 101–108.
- [5] Neyman V.I., Neyman L.A., Petrova A.A. Calculation of Efficiency of a DC Power Electromagnet for Mechanotronic Systems // IFOST 2008: Proceedings of the 3d International Forum on Strategic Technology, June 23-29, 2008, Novosibirsk, Tomsk. P. 452–454.
- [6] Nejman L.A., Petrova A.A., Nejman V.Ju. K ocnke vybora tipa jelektromagnita po znacheniju konstruktivnogo faktora. Izv. vuzov. Jelektromehanika. – 2012. – № 6. S. 62–64.
- [7] Nejman V.Ju., Nejman L.A., Petrova A.A. Vlijanie sootnoshenij glavnykh razmerov jelektromagnitov na znachenija konstruktivnogo faktora i pokazatelja jekonomichnosti // Avtomatizirovannye jelektromehaniicheskie sistemy: [sb. nauch. tr.]. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2011. – S. 177–187.
- [8] Nejman V.Ju. i dr. K voprosu ucheta glavnykh razmerov pri vybore tipa jelektromagnita po znacheniju konstruktivnogo faktora / V.Ju. Nejman, L.A. Nejman, A.A. Petrova, O.V. Rogova, A.A. Skotnikov // Jelektrotehnika. – 2011. – № 6. – S. 50а–53.
- [9] Evreinov D.M. and other. Design factor comparison for geometrically similar cores of electromagnets / D.M. Evreinov, L.A. Neyman, V.I. Yu. Neyman, A.A. Petrova, J.B. Smirnova // IFOST 2009: Proceedings of the 4 th International Forum on Strategic Technology, October 21-23, 2009, Ho Chi Minh City, Vietnam. P. 182–184.
- [10] Nejman V.Ju. i dr. O dopuskaemoj pogreshnosti pri sravnenii podobnykh jelektromagnitov po znachenijam konstruktivnogo faktora / Nejman V.Ju., Nejman L.A., Petrova A.A., Evreinov D.M. Transport: nauka, tehnika, upravlenie. 2011. № 12. S. 36–37.

Нейман Людмила Андреевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – линейные синхронные электромагнитные преобразователи силовых импульсов. Имеет более 50 научных трудов. E-mail: neyman31@gmail.com

L.A. Neyman

Numerical experiment on electromagnetic motor rational choice with respect to its dimensions and weight

Cylinder electromagnets of the same dimensions and active materials weight have been compared. It has been shown how the magnetic circuit influences on electromagnet output parameters. The analysis results have been obtained by finite-element simulation of magnetic field in the developed design models with basic profiles of differently configured magnetic systems. The numeric experiment results have been used for building the traction force – operating air gap size plot. The static traction performances have been calculated for fixed armature position.

The considered types of electromagnets have been compared with the modern criterions actual for design problems. Active materials consumption has been compared by energy factor defined as the electromagnet weight–maximal relative effective capacity ratio. The considered electromagnets application limits have been exacted with respect to well-known design factor. It has been shown the considered electromagnet magnetic circuit profiles parameters can be different from each other when their dimensions, weight and heating mode are the same. The main conclusion is electromagnets design factor and energy factor extremely depends on the magnetic circuit profile type when operation conditions, dimensions and active materials weight are similar.

Key words: electromagnetic motor, electromagnetic motor parameters, magnetic circuit profile, magnetic field, finite-element simulation, numerical experiment, traction performance, mechanical work, energy factor, design facto.