

УДК 621.318.3

## **Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода\***

Л.А. НЕЙМАН<sup>1</sup>, В.Ю. НЕЙМАН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: neyman@ngsl.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: nv.nstu@ngs.ru

Актуальность исследований обусловлена повышением точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения цилиндрических некоаксиальных элементов магнитопровода. Необходимость в повышении точности расчета радиальных сил касается областей, занятых нерабочими технологическими зазорами, образованными в местах сопряжения поверхностей подвижных силовых элементов конструкции электромагнитного двигателя с другими неподвижными составными элементами магнитопровода. Типичным примером такого сопряжения является технологический зазор между поступательно движущимся якорем и охватывающей его поверхностью неподвижного полюса, что характерно для многих конструкций электромагнитных двигателей броневой цилиндрической структуры.

Основная цель исследований – оценка точности используемых в инженерной практике расчетных формул и снижение погрешности аналитических расчетов сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных ферромагнитных элементов магнитопровода.

На основе численного эксперимента в программе FEMM дана оценка точности используемых на практике формул для расчета сил, возникающих при сопряжении поверхностей некоаксиальных цилиндрических ферромагнитных элементов магнитопровода.

Получено новое более точное решение для определения сил одностороннего притяжения. В основе полученных новых формул для расчета усилия рассматривается точное решение для магнитной проводимости некоаксиальных ферромагнитных цилиндров, учитывающее картину распределения поля в плоскостях, перпендикулярных осям цилиндров. Новые выражения позволяют повысить точность вычислений и расширить диапазоны их использования в задачах проектирования линейных электромагнитных двигателей и устройств на их основе.

**Ключевые слова:** силы одностороннего магнитного притяжения, электромагнитный двигатель, технологический зазор, некоаксиальные элементы магнитопровода, конечно-элементное моделирование, повышение точности расчета, электромагнитная машина, электропривод, электромагнитное поле, магнитная проводимость, эксцентриситет

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-246-256

---

\* Статья получена 21 октября 2014 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых виброударных технологий и применение для этих целей линейных электромагнитных машин, генерирующих большие по величине и кратковременные по длительности усилия, вызывает необходимость совершенствования инженерных методик по их расчету [1–12].

При проектировании линейных электромагнитных машин различного технологического назначения наряду с выбором формы и размеров рабочего воздушного зазора, оказывающего существенное влияние на статические и динамические характеристики электропривода, также уделяется особое внимание вопросу выбора формы и размеров технологических зазоров, создающих дополнительное магнитное сопротивление на пути основного магнитного потока [13, 14]. В особенности это касается нерабочих технологических зазоров, образованных в местах сопряжения поверхностей подвижных силовых элементов конструкции, обусловленных неточностями обработки и сборки с другими составными элементами магнитопровода [15–19].

Типичным примером такого сопряжения является технологический зазор между поступательно движущимся якорем и охватывающей его поверхностью неподвижного полюса, что характерно для многих конструкций электромагнитных двигателей броневой цилиндрической структуры.

Несмотря на то что зазор между указанными поверхностями стремятся выполнить до определенной величины минимальным, эксцентричное расположение цилиндрического якоря в отверстии полюса, выполненного большим диаметром, неизбежно приводит к появлению радиально направленной силы одностороннего магнитного притяжения. Появление этой силы обусловлено неравномерностью магнитного поля, сосредоточенного в области нерабочего зазора. Количественная оценка величины этой силы впервые была озвучена в работах известных авторов [21, 22].

Для определения силы одностороннего магнитного притяжения электромагнитных устройств широкое распространение на практике получила формула А.В. Гордона и А.Г. Сливинской [22], а также ее различные модификации [23–25].

В то же время имеется мнение о приближенном характере получаемых по этим формулам решений [26]. Следует также признать, что имеющиеся в научной литературе сведения по этому вопросу явно недостаточны.

Попытка в [27] оценить точность применяемых на практике формул [21, 22] ограничилась только сравнением получаемых относительных погрешностей вычисления между собой.

Цель исследований – оценка точности используемых в инженерной практике расчетных формул и снижение погрешности аналитических расчетов сил одностороннего магнитного притяжения цилиндрических некоаксиальных ферромагнитных элементов магнитопровода линейных электромагнитных машин.

## 1. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ РЕШЕНИЙ

В основе существующей формулы [22] для силы одностороннего притяжения рассматривается решение для магнитной проводимости свободного от объема пространства, занятого системой из двух некоаксиальных ферромаг-

нитных цилиндров с учетом картины поля в плоскостях, перпендикулярных оси цилиндров (рис. 1).

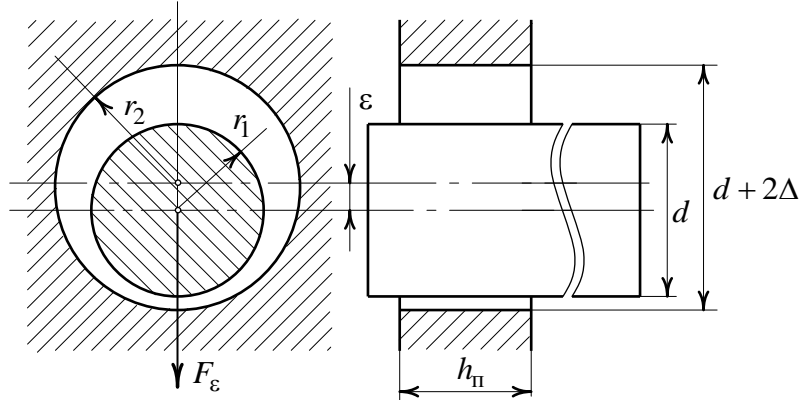


Рис. 1. Расчетная область нерабочего зазора при некоаксиальном расположении ферромагнитных цилиндров

Ограничиваясь только случаем, представляющим интерес для большинства практических устройств, когда  $2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2 \ll 1$ , в решении используется упрощенное выражение для магнитной проводимости

$$\Lambda_\varepsilon = \frac{\mu_0 \pi d h_\Pi}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}}$$

и ее производной по величине эксцентриситета

$$\frac{d\Lambda_\varepsilon}{d\varepsilon} = \frac{\mu_0 \pi d h_\Pi}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}} \frac{\varepsilon}{\Delta^2 - \varepsilon^2},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\Delta$  – величина технологического зазора при коаксиальном расположении цилиндров.

С учетом последнего в [22] приведено конечное выражение для усилия одностороннего притяжения от величины эксцентриситета

$$F_\varepsilon = \frac{(Iw)^2}{2} \frac{\mu_0 \pi d h_\Pi}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}} \frac{\varepsilon}{\Delta^2 - \varepsilon^2}, \quad (1)$$

где  $Iw$  – намагничивающая сила, зависящая от количества витков катушки и протекающего по виткам тока.

Выражая магнитный поток  $\Phi_\varepsilon$  нерабочего зазора и индукцию в его сечении  $B_\varepsilon$  через значение намагничивающей силы

$$\Phi_\varepsilon = Iw\Lambda_\varepsilon = \frac{Iw \mu_0 \pi d h_\Pi}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}},$$

$$B_\varepsilon = \frac{4\Phi_\varepsilon}{\pi d^2} = \frac{4Iw \mu_0 h_\Pi}{d\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}},$$

и подставив в (1), предварительно выразив значение намагничивающей силы, также следует

$$F_{\varepsilon} = \frac{\Phi_{\varepsilon}^2}{2\mu_0\pi d h_{\text{п}}} \frac{\varepsilon}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}}, \quad (2)$$

$$F_{\varepsilon} = \frac{B_{\varepsilon}^2 d^3 \pi}{32\mu_0 h_{\text{п}}} \frac{\varepsilon}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}}. \quad (3)$$

Таким образом, для определения силы одностороннего магнитного притяжения можно воспользоваться одним из приведенных выражений (1)–(3), которые являются идентичными.

При условии равенства сечений по магнитному потоку  $h_{\text{п}} = d/4$  на основании имеющихся (1)–(3) формул можно использовать одно из следующих выражений:

$$F_{\varepsilon} = \frac{(Iw)^2}{8} \frac{\mu_0\pi d^2}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}} \frac{\varepsilon}{\Delta^2 - \varepsilon^2},$$

$$F_{\varepsilon} = \frac{2\Phi_{\varepsilon}^2}{\mu_0\pi d^2} \frac{\varepsilon}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}},$$

$$F_{\varepsilon} = \frac{B_{\varepsilon}^2 d^2 \pi}{8\mu_0} \frac{\varepsilon}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}}.$$

Проверка точности аналитического расчета выполнялась по выражению (3) посредством сравнения с результатами численного эксперимента с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля в программе FEMM [28, 29].

В качестве объекта исследования рассматривается область нерабочего воздушного зазора, образованного между цилиндрической поверхностью якоря и охватывающей его поверхностью отверстия неподвижного полюса, в конструкции электромагнитного двигателя броневого цилиндрической структуры с размерами расчетной области (рис. 1):  $d = 28,8$  мм;  $\Delta = 0,7$  мм;  $h_{\text{п}} = 7,5$  мм в заданном диапазоне изменения эксцентриситета  $\varepsilon = 0,1 \dots 0,6$  мм.

В этом случае величина  $2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2 = (0,31 \dots 1,2) \cdot 10^{-3}$ , что намного меньше единицы.

Результаты аналитического расчета радиального усилия с использованием формулы (3) и численного эксперимента приведены в табл. 1. Соответствие приведенных (табл. 1) и ряда других данных, не представленных в работе, отражают удовлетворительную точность аналитического расчета магнитной цепи при относительно малых значениях эксцентриситета.

Таблица 1

## Результаты расчета и численного эксперимента

Эксцентриситет, $\text{м} \cdot 10^{-3}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Радиальное усилие, Н (аналитический расчет)	7,27	14,9	23,9	35,1	51,4	83,9
Радиальное усилие, Н (численный эксперимент)	6,97	14,6	23,7	35,7	52,6	78,1
Относительная погрешность вычислений, о.е.	0,041	0,02	0,008	0,017	0,023	0,069

## 2. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА УСИЛИЯ ОДНОСТОРОННЕГО ПРИТЯЖЕНИЯ

Учитывая факт того, что при выводе (1)–(3) авторами [22] было использовано упрощенное выражение магнитной проводимости, то точность полученных таким образом решений зависит от установленных соотношений размеров и взаимного расположения некоаксиальных ферромагнитных поверхностей. При неудачном соотношении размеров это может приводить к серьезным ошибкам в определении радиальных сил магнитного притяжения.

Для устранения данного недостатка следует воспользоваться точным решением для проводимости, которая в соответствии с рис. 1 согласно [22, 30] может быть представлена в виде

$$\Lambda_{\varepsilon} = \frac{2\pi\mu_0 h_{\Pi}}{\ln \left[ a - b\varepsilon^2 + \sqrt{(a - b\varepsilon^2)^2 - 1} \right]}, \quad (4)$$

$$\text{где } a = \frac{r_1^2 + r_2^2}{2r_1 r_2}; \quad b = \frac{1}{2r_1 r_2}.$$

Тогда производная проводимости по величине эксцентриситета

$$\frac{d\Lambda_{\varepsilon}}{d\varepsilon} = \frac{4\pi\mu_0 \varepsilon b h_{\Pi}}{\ln \left[ \lambda(\varepsilon) + \sqrt{\lambda(\varepsilon)^2 - 1} \right]^2 \sqrt{\lambda(\varepsilon)^2 - 1}}, \quad (5)$$

$$\text{где } \lambda(\varepsilon) = a - b\varepsilon^2.$$

С учетом выражения для производной проводимости (5) усилие одностороннего магнитного притяжения запишется в виде

$$F_{\varepsilon} = \frac{(Iw)^2 2\pi\mu_0 \varepsilon b h_{\Pi}}{\ln \left[ \lambda(\varepsilon) + \sqrt{\lambda(\varepsilon)^2 - 1} \right]^2 \sqrt{\lambda(\varepsilon)^2 - 1}}. \quad (6)$$

Величина магнитного потока  $\Phi_\varepsilon$  нерабочего зазора и индукция в его сечении  $B_\varepsilon$  с учетом (4) равна

$$\Phi_\varepsilon = Iw \Lambda_\varepsilon = \frac{Iw 2\pi\mu_0 h_{\text{П}}}{\ln \left[ \lambda(\varepsilon) + \sqrt{\lambda(\varepsilon)^2 - 1} \right]}, \quad (7)$$

$$B_\varepsilon = \frac{\Phi_\varepsilon}{2\pi r_1 h_{\text{П}}} = \frac{Iw \mu_0}{r_1 \ln \left[ \lambda(\varepsilon) + \sqrt{\lambda(\varepsilon)^2 - 1} \right]}, \quad (8)$$

Предварительно выразив величину намагничивающей силы из (7) и (8) и подставив в (6), также получим

$$F_\varepsilon = \frac{\Phi_\varepsilon^2 \varepsilon b}{2\pi\mu_0 h_{\text{П}} \sqrt{\lambda(\varepsilon)^2 - 1}}, \quad (9)$$

$$F_\varepsilon = \frac{2\pi B_\varepsilon^2 r_1^2 \varepsilon b h_{\text{П}}}{\mu_0 \sqrt{\lambda(\varepsilon)^2 - 1}}. \quad (10)$$

Полученные выражения (6), (9) и (10) являются точным решением для определения силы одностороннего магнитного притяжения, и в отличие от (1)–(3) погрешность получаемых решений не зависит от установленных соотношений размеров и величины эксцентриситета.

В качестве примера в табл. 2 приведены значения относительной погрешности определения силы одностороннего притяжения по формуле (3) и при точном решении по формуле (10) в зависимости от величины  $2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2$  для значений  $r_2 = 50$  мм,  $r_1 = 38...49$  мм,  $\varepsilon = 0,5$  мм (рис. 1).

Таблица 2

Относительная погрешность вычисления

$2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$6,11 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,024	0,05
$\frac{F_\varepsilon^{(3)} - F_\varepsilon^{(10)}}{F_\varepsilon^{(10)}} 100\%$	1,0	3,09	5,26	7,53	9,89	13,63

Из табл. 2 следует, что при значениях  $2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2 \ll 1$  расчет по формулам (3) и (10) практически совпадает. Относительная погрешность расчета силы одностороннего притяжения по формуле (3) возрастает с увеличением отношения  $2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2$ . При этом с ростом указанного отношения расчет по формуле (3) завышает значения усилий одностороннего притяжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что расчет сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных цилиндрических элементов магнитопровода по имеющим место формулам (1)–(3) при определенных соотношениях размеров и эксцентриситете имеет относительно высокую точность для практических расчетов.

Приведенные результаты расчета и сделанные на их основе выводы справедливы при  $2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2 \leq 1,2 \cdot 10^{-3}$ . При больших значениях указанной величины использование упрощенного выражения магнитной проводимости некоаксиальных ферромагнитных цилиндров приводит к большим погрешностям вычислений.

Погрешность получаемых решений сил одностороннего магнитного притяжения по вновь полученным выражениям (6), (9) и (10) существенно не зависит от соотношений размеров и величины эксцентриситета ферромагнитных поверхностей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанов К.М., Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во КГУ, 2006. – 283 с.
2. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
3. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. – 2010. – Vol. 46, iss. 6. – P. 656–665. – doi: 10.1007/s10913-010-0083-9.
4. Pevchev V.P. The use of micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81, iss. 4. – P. 213–216. – doi: 10.3103/S1068371210040103.
5. Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator // Journal of Mining Science. – 2009. – Vol. 45, iss. 4. – P. 372–381. – doi: 10.1007/s10913-009-0047-0.
6. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. – 2010. – Vol. 46, iss. 6. – P. 656–665. – doi: 10.1007/s10913-010-0083-9.
7. 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. 50а–53.
8. Нейман Л.А. К решению задачи рационального выбора электромагнитного двигателя заданного габарита и веса на основе численного эксперимента // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4. – С. 184–190.
9. Нейман Л.А., Скотников А.А., Нейман В.Ю. Исследование нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 50–54.
10. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
11. Нейман Л.А. Анализ процессов энергопреобразования в однокатушечной синхронной электромагнитной машины с двухсторонним выбегом бойка // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 112–116.
12. 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: Изд-во СГАУ, 2011. – С. 271–277.

13. Максимов А.И. Оптимальные размеры стыка магнитной цепи броневое электромагнита // Электротехника. – 1973. – № 3. – С. 56–57.
14. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
15. Усанов К.М., Каргин В.А. Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2005. – № 3. – С. 59–61.
16. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
17. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. К выбору основных базисных размеров линейных электромагнитных двигателей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2011. – Т. 8, № 3. – С. 108–111.
18. Кудинов А.К., Певчев В.П. Составление схем замещения электромагнитных систем // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 32–36.
19. Казаков Л.А. Электромагнитные устройства радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское Радио, 1978. – 168 с.
20. Ямпольский Ю.Г. О проектировании оптимальных линейных импульсных электродинамических двигателей возвратно-поступательного движения // Электротехника. – 1990. – № 2. – С. 51–55.
21. Ротерс Г.К. Электромагнитные механизмы: пер. с англ. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 522 с.
22. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
23. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука, 1987. – 160 с.
24. 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, 1968. – 128 с.
25. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
26. Ушаков В.П. Экспериментальное определение радиальных сил электромагнитного молота // Электрические импульсные системы: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1976. – С. 29–31.
27. Польщиков С.А., Угаров Г.Г. К расчету сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных ферромагнитных цилиндров // Импульсные линейные электрические машины: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 25–29.
28. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с. – (Высшее профессиональное образование).
29. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechatronic systems // IFOST 2008: Proceedings of the 3d International Forum on Strategic Technology, June 23–29, 2008, Novosibirsk, Tomsk. – Novosibirsk, 2008. – P. 452–454. – doi: 10.1109/IFOST.2008.4602851.
30. Соболев С.Н. Расчет и конструирование низковольтной электрической аппаратуры. – М.: Высшая школа, 1972. – 264 с.

*Нейман Людмила Андреевна*, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – линейные синхронные электромагнитные преобразователи для низкочастотных ударных технологий. Имеет более 60 научных трудов. E-mail: neyman@ngs.ru, neyman31@gmail.com.

*Нейман Владимир Юрьевич*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – силовые электромагнитные импульсные системы. Имеет более 200 публикаций. E-mail: nv.nstu@ngs.ru.



***Improvement of the analytical calculation accuracy of radial forces of one-sided magnetic attraction of non-coaxial magnetic core elements\****

L.A. NEYMAN<sup>1</sup>, V.Yu. NEYMAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: neyman@ngs.ru

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: nv.nstu@ngs.ru

A calculation accuracy of non-coaxial magnetic core elements of one-sided magnetic attraction radial forces should be improved for volumes occupied by inactive technological gaps in places of conjugation of movable force element surfaces of the electromagnetic motor construction with other stationary magnetic core elements. An example of such conjugation is a technological gap between a progressively moving armature and a stationary pole surface around it. This conjugation is typical of many shell core cylindrical electromagnetic motor constructions.

The main purpose of the investigation is to estimate the accuracy of formulas used in engineering practice and reduce an error of analytical calculation of non-coaxial magnetic core ferromagnetic elements of one-sided magnetic attraction forces.

The simulation in FEMM has given the estimation accuracy of practically used formulas for calculating forces generated by the conjugation of non-coaxial magnetic core cylinder ferromagnetic elements

A more accurate solution to find one-sided attraction forces has been derived. The newly-obtained formulas to calculate these forces are based on the exact solution for magnetic conductance of non-coaxial ferromagnetic cylinders with respect to field distribution in planes perpendicular to cylinder axes. These new expressions permit improving calculation accuracy as well as expanding their application to the design of linear electromagnetic motors and devices with them.

**Keywords:** one-sided magnetic attraction, electromagnetic motor, technological gap, non-coaxial magnetic core elements, finite-element simulation, calculation accuracy improvement, electromagnetic machine, electric drive, electromagnetic field, magnetic conductivity, eccentricity

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-246-256

**REFERENCES**

1. Usanov K.M., Moshkin V.I., Ugarov G.G. *Lineinyi impul'snyi elektromagnitnyi privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear electromagnetic pulse drive autonomous power supply]. Kurgan, KGU Publ., 2006. 284 p.
2. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privody dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drives for impulse and vibroimpulse technologies]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – Russian Electromechanics. Universities' News*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
3. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, iss. 6, pp. 656–665. doi: 10.1007/s10913-010-0083-9. Translated from *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2010, no. 6, pp. 77–87.
4. Pevchev V.P. The use of micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, iss. 4, pp. 213–216. doi: 10.3103/S1068371210040103. Translated from *Elektrotehnika*, 2010, no. 4, pp. 55–59.
5. Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator. *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 372–381. doi: 10.1007/s10913-

---

\* Received 21 October 2014.

009-0047-0. Translated from *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2009, no. 4, pp. 76–85.

6. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 656–665. doi: 10.1007/s10913-010-0083-9. Translated from *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2010, no. 6, pp. 77–87.

7. Neiman V.Yu., Neiman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. K voprosu ucheta glavnykh razmerov pri vybore tipa elektromagnita po znacheniyu konstruktivnogo faktora [On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2011, no. 6, pp. 50a–53. (In Russian).

8. Neiman L.A. K resheniyu zadachi ratsional'nogo vybora elektromagnitnogo dvigatelya zadannogo gabarita i vesa na osnove chislennogo eksperimenta [Numerical experiment on electromagnetic motor rational choice with respect to its dimensions and weight]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 4, pp. 184–190.

9. Neiman L.A., Skotnikov A.A., Neiman V.Yu. Issledovanie nagreva elektromagnitnogo dvigatelya v perekhodnykh rezhimakh [Electromagnetic motor heating transient analysis]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – Russian Electromechanics. Universities' News*, 2012, no. 6, pp. 50–54.

10. Neiman L.A., Neiman V.Yu. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny so svobodnym vybegom boika [Operation cycle of double winding synchronous electromagnetic machine with]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – Russian Electromechanics. Universities' News*, 2013, no. 6, pp. 48–52.

11. Neiman L.A. Analiz protsessov energopreobrazovaniya v odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s dvukhstoronnim vybegom boika [Analysis of energy conversion in a single/winding synchronous electromagnetic machine with two/side head running/out]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk polytechnic university*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 112–116.

12. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Skotnikov A.A. [Tendencies in developing synchronous double-winding machines for pulse technologies]. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktualnye problemy energetiki APK"* [Proceedings of the II International research and training conference "Current problems of power engineering". Saratov, SGAU Publ., 2011, pp. 271–277.

13. Maksimov A.I. Optimal'nye razmery styka magnetnoi tsepi bronevogo elektromagnita [The optimum size of the junction of the magnetic circuit of the electromagnet armor]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1973, no. 3, pp. 56–57.

14. Ljubchik M.A. *Optimal'noe proektirovanie silovykh jelektromagnitnykh mekhanizmov* [Optimal design of power electromagnetic mechanisms]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 392 p.

15. Usanov K.M., Kargin V.A. Silovaya elektromagnitnaya impul'snaya sistema dlya pogruzheniya sterzhnevyykh elementov v grunt [Power electromagnetic pulse system for inserting rod elements into soil]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova – The Bulletin of Saratov state agrarian university in honor of N.I. Vavilov*, 2005, no. 3, pp. 59–61.

16. Chunikhin A.A. *Elektricheskie apparaty* [Electric devices]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 720 p.

17. Moshkin V.I., Ugarov G.G. K vyboru osnovnykh bazisnykh razmerov lineinykh elektromagnitnykh dvigatelei [By choosing a fundamental base dimensions of linear electromagnetic motors]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – News of the Volgograd state technical university*, 2011, vol. 8, no. 3, pp. 108–111.

18. Pevchev V.P., Kudinov A.K. Sostavlenie skhem zameshcheniya elektromagnitnykh sistem [Equivalent circuits of electromagnetic systems]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 32–36.

19. Kazakov L.A. *Elektromagnitnye ustroystva radioelektronnoi apparatury* [Electromagnetic devices for radioelectronic equipment]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1978. 168 p.

20. Yampol'skii Yu.G. O proektirovani optimal'nykh lineinykh impul'snykh elektrodinamicheskikh dvigatelei vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya [On the design of optimal linear pulse motor electrodynamic reciprocating motion]. *Elektrotehnika – Soviet electrical engineering*, 1990, no. 2, pp. 51–55.
21. Roters H.C. *Electromagnetic Devices*. New York, Wiley, 1941. 561 p. (Russ. ed.: Roters G.K. *Elektromagnitnye mekhanizmy*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1949. 522 p.).
22. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. *Elektromagnitny postoyannogo toka* [DC Electric Magnets]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960. 447 p.
23. Ryashentsev N.P., Miroshnichenko A.N. *Vvedenie v teoriyu energopreobrazovani elektromagnitnykh mashin* [Introduction to the theory of electromagnetic energy conversion systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 160 p.
24. Malov A.T., Ryashentsev N.P., Nosovets A.V., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malakhov A.P., Antonov A.N. *Elektromagnitnye moloty* [Electromagnetic hammers]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1968. 128 p.
25. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsyn A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
26. Ushakov V.P. [Experimental determination of the radial forces of the electromagnetic hammer]. *Sbornik nauchnykh trudov "Elektricheskie impul'snye sistemy"* [Collection of scientific works of Electrical impulse systems]. Novosibirsk, IGD SO AN SSSR Publ., 1976, pp. 29–31. (In Russian)
27. Pol'shchikov S.A., Ugarov G.G. [On the calculation of forces of a unilateral magnetic pull of not coaxial ferromagnetic cylinders]. *Impul'snye linejnye jelektricheskie mashiny* [Collection of scientific works of Pulsed linear electrical machines]. Novosibirsk, IGD SO RAN Publ., 1991, pp. 25–29.
28. Bul' O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Methods for calculating the magnetic systems of electrical apparatus. Magnetic circuit, field and program FEMM]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 336 p.
29. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechatronic systems. *IFOST 2008: Proceedings of the 3d International Forum on Strategic Technology*, June 23–29, 2008, Novosibirsk, Tomsk, IEEE, 2008, pp. 452–454. doi: 10.1109/IFOST.2008.4602851
30. Sobolev S.N. Raschet i konstruirovani nizkovol'noi elektricheskoi apparatury [Calculation and design of low-voltage electrical equipment]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972. 264 p.