

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ УЧЕТА УСИЛИЯ ОДНОСТОРОННЕГО МАГНИТНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ

Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, neyman@ngs.ru

Аннотация — На основе численного эксперимента дана оценка точности используемых на практике формул для расчета сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных ферромагнитных элементов магнитопровода.

Ключевые слова — усилие одностороннего магнитного притяжения, некоаксиальные элементы магнитопровода, точность аналитического расчета, численный эксперимент.

Вопросы, связанные с совершенствованием конструкций линейных электромагнитных машин, как наиболее пригодных для реализации импульсных технологий, по-прежнему сохраняют свою актуальность [1-6].

При конструировании 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 выбору технологических зазоров, создающих дополнительное магнитное сопротивление на пути замыкания основного магнитного потока [7, 8]. В особенности это касается нерабочих технологических зазоров, образованных в местах сопряжения поверхностей подвижных силовых элементов конструкции.

Типичным примером такого сопряжения является технологический зазор между поступательно движущимся цилиндрическим якорем и охватывающей его поверхностью неподвижного полюса, что характерно для многих конструкций электромагнитных двигателей броневой цилиндрической структуры. Эксцентричное расположение якоря по отношению к отверстию в полюсе, выполненного большим диаметром, неизбежно приводит к появлению радиального усилия одностороннего магнитного притяжения. Количественная оценка величины этой силы впервые была озвучена в работах известных авторов [9, 10].

Для определения силы одностороннего магнитного притяжения электромагнитных устройств широкое распространение на практике получила формула А.В. Гордона и А.Г. Сливинской [10], а также ее различные модификации [11 - 13].

Оценить точность применяемых на практике формул в работе [14] авторы ограничились только сравнением получаемых относительных погрешностей вычисления между собой.

В проведенных исследованиях авторы поставили своей целью оценить точность используемых на практике расчетных формул, на основе численного эксперимента.

В основе существующей формулы [10] для силы одностороннего притяжения рассматривается решение для магнитной проводимости свободного от объема пространства, занятого системой из двух некоаксиальных ферромагнитных цилиндров с учетом картины поля в плоскостях перпендикулярных оси цилиндров (рис. 1).

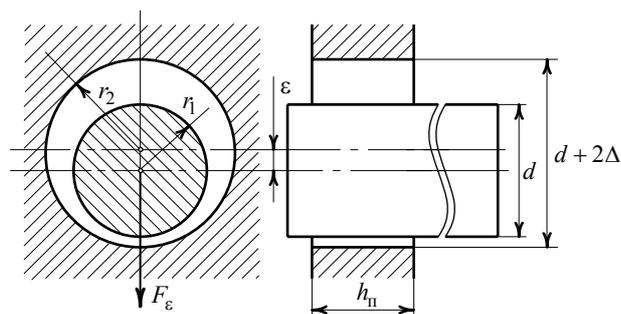


Рис. 1. Расчетная область нерабочего зазора при некоаксиальном расположении ферромагнитных цилиндров

Ограничиваясь только случаем, представляющим интерес для большинства практических устройств, когда $2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2 \ll 1$, в [10] приведено приближенное выражение для усилия одностороннего притяжения от величины эксцентриситета и его различные модификации

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

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

$$F_\varepsilon = \frac{B_\varepsilon^2 d^3 \pi}{32\mu_0 h_n} \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{\Delta^2 - \varepsilon^2}}, \quad (3)$$

где Iw - намагничивающая сила, зависящая от количества витков катушки и протекающего по виткам

тока; Φ_ε , B_ε - магнитный поток и индукция, выраженные через значение намагничивающей силы; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Для определения силы одностороннего магнитного притяжения можно воспользоваться одним из приведенных выражений (1-3), которые являются идентичными.

Проверка точности аналитического расчета выполнялась по выражению (3) посредством сравнения с результатами численного эксперимента с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля в программе FEMM [15, 16].

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 броневой 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 $\varepsilon = 0,1$ К 0,6 мм.

В этом случае величина

$$2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2 = (0,31\text{К} 1,2) \cdot 10^{-3},$$

что намного меньше единицы.

Расчет и построение картины линий магнитного потока производились в стационарном плоскопараллельном магнитном поле.

При выполнении численного эксперимента из-за сложности реализации в построении модели рассматривался её альтернативный вариант, ограниченный только областью нерабочего зазора и образующих его торцевых цилиндрических поверхностей якоря и неподвижного полюса. Методика такого построения в программе подробно описана в [15].

Для получения более равномерного по длине распределения индукции в немагнитном рабочем зазоре модели аналогичного его распределению в нерабочем зазоре электромагнитного двигателя обязательным условием эксперимента является необходимость создания во внутреннем объеме неподвижного полюса зон возбуждения в виде магнитных полюсов, образованных расточкой, подобной статору машины переменного тока. Число выполненных зон однозначно определяет равномерность распределения индукции.

Картина поля линий магнитного потока расчетной области модели, при $\varepsilon = 0$, после запуска и расчета программой показана на рис. 2.

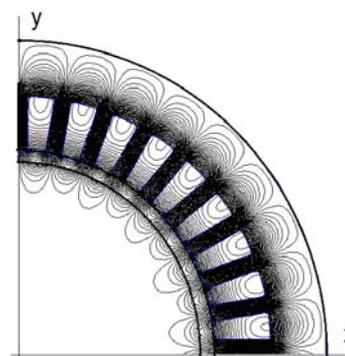


Рис. 2. Картина поля линий магнитного потока модели

В качестве первого этапа исследований была осуществлена оценка распределения индукции в нерабочем зазоре.

В соответствии с рекомендациями [17] производился гармонический анализ кривой распределения магнитной индукции, и определялось её среднеквадратичное значение, используемое далее для аналитического расчета.

Расчет радиальной силы одностороннего притяжения в заданном диапазоне изменения эксцентриситета для различных положений сердечника якоря осуществлялся через интегральные характеристики поля в режиме параметров блока по средневзвешенному тензору натяжения.

Для уменьшения влияния неравномерности насыщения магнитных полюсных зон образующей поверхности неподвижного полюса (рис. 2) на результаты исследования расчет усилия производился при пониженном значении индукции в нерабочем зазоре $B_\varepsilon = 0,45$ Тл, соответствующей осесимметричному расположению якоря.

Результаты аналитического расчета радиального усилия с использованием формулы (3) и численного эксперимента сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты сравнения радиальных усилий аналитического расчета и численного эксперимента

Эксцентриситет ε , м $\cdot 10^{-3}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Радиальное усилие F_ε , Н (аналитический расчет)	7,27	14,9	23,9	35,1	51,4	83,9
Радиальное усилие F_ε , 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

Соответствие приведенных в таблице 1 результатов аналитического расчета и численного эксперимента,

отражает точность вычислений при использовании выражения (3).

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что имеющие место формулы (1-3) при определенных соотношениях размеров и эксцентриситете обладают относительно высокой точностью практических расчетов при определении сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных цилиндрических элементов магнитопровода.

Показано, что при значениях относительной величины $2(\Delta^2 - \varepsilon^2)/d^2 > 1,2 \cdot 10^{-3}$ использование приближенного выражения (3) для расчета радиальных усилий приводит к значительным погрешностям вычислений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ №2405237, H02K33/02. Линейный электромагнитный двигатель [Текст] / Д.М. Евреинов, В.Ю. Нейман, А.А. Петрова, Ю.Б. Смирнова; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU) - № 2009120231; заявл. 27.05.09; опубл. 27.11.10, Бюл. № 33 - 1 с. : ил.
2. Патент РФ №111799, B25D13/00. Электромагнитная машина ударного действия [Текст] / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Скотников; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU) - № 2011128342; заявл. 08.07.11; опубл. 27.12.11, Бюл. № 36 - 1 с. : ил.
3. Патент РФ № 2455145, B25D13/00. Линейный электромагнитный двигатель ударного действия [Текст] / Д.М. Евреинов, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU) - № 2010147781; заявл. 23.11.10; опубл. 10.07.12, Бюл. № 19 - 1 с. : ил.
4. Патент РФ № 2491701, МПК H02K 33/12, B25D 13/00. Синхронный электромагнитный ударный механизм [Текст] / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Скотников; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU) - № 2011149247; заявл. 02.12.11; опубл. 27.08.13, Бюл. № 24 - 1 с. : ил.
5. Патент РФ № 2472243, H01F 7/06, H01F 7/08, H02K 33/12, H02K 33/18. Способ управления двухкатушечным электромагнитным двигателем ударного действия [Текст] / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU) - № 2011123809; заявл. 10.06.11; опубл. 10.01.13, Бюл. № 1 - 1 с. : ил.
6. Патент РФ № 2486656, МПК H02K 33/12, H02P 25/02, H01F 7/18. Способ управления двухкатушечным электромагнитным двигателем возвратно-поступательного движения [Текст] / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU) - № 2012106040; заявл. 20.02.12; опубл. 27.06.13, Бюл. № 18 - 1 с. : ил.
7. Максимов А.И. Оптимальные размеры стыка магнитной цепи бронированного электромагнита // Электротехника, 1973. - № 3. - С. 56 – 57.
8. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия. 1974. – 392 с.
9. Ротерс Г.К. Электромагнитные механизмы. М.: Госэнергоиздат. 1949. – 522 с.
10. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1960. – 447 с.
11. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука. 1987. – 160 с.
12. Электромагнитные молоты // Малов А.Т., Ряшенцев Н.П. и др. – Новосибирск: Наука. 1968. – 128 с.
13. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука. 1989. – 216 с.
14. Польщиков С.А., Угаров Г.Г. К расчету сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных ферромагнитных цилиндров // Импульсные линейные электрические машины. Новосибирск: ИГД СО АН СССР. 1991. – С. 25 – 29.
15. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учебное пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 336 с.
16. Neyman V. Yu. Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechanotronic systems / V. Yu. Neyman., L.A. Neyman, A.A. Petrova // IFOST 2008: Proceedings of the 3-d International Forum on Strategic Technology, June 23-29 2008, Novosibirsk, Tomsk, P.452 - 454.
17. Малинин Л. И. Теория цепей современной электротехники : Учеб. пособие// Л. И. Малинин, В. Ю. Нейман. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. - 347 с.