

УДК 621.538

Использование кромочной энергии магнитного поля для повышения эффективности магнитных систем электромеханических устройств

С.М. Перминов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: psm@upm.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время при проектировании магнитных систем электромеханических устройств кромочный эффект полюсов не учитывается. Перераспределение кромочной энергии магнитного поля полюсов позволит повысить эффективность и технико-экономические показатели большинства выпускаемых электромеханических устройств. Как правило, магнитная энергия зон с высокой плотностью энергии магнитного поля, существующих около кромок полюсов магнитных систем электромеханических устройств, не используется в работе этих устройств, поэтому ее можно перераспределить, направив на увеличение полезной энергии устройства.

Материалы и методы: Для определения параметров и картины распределения магнитного поля магнитной системы датчика угла динамически настраиваемого гироскопа используется математическое моделирование магнитного поля магнитной системы на основе метода конечных элементов.

Результаты: Оценивается величина проявления кромочного эффекта в магнитной системе конкретного электромеханического устройства. Анализируется его влияние на работу устройства. Устанавливается необходимость его учета на этапе проектирования устройства.

Выводы: В результате проведенных численных экспериментов показано, что удельная энергия магнитного поля около кромок полюсов может превышать среднюю удельную энергию поля рабочего зазора магнитной системы гироскопа, закругление кромок полюсов позволяет снизить кромочную энергию магнитного поля и перераспределить ее в пользу энергии рабочего зазора. Получено увеличение рабочего магнитного потока рассматриваемого гироскопа на 4,8 %.

Ключевые слова: кромочный эффект, энергия магнитного поля, математическое моделирование, метод конечных элементов.

Usage of Magnetic Field Edge Energy for Increasing Magnetic Systems Efficiency of Electromechanical Devices

S.M. Perminov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: mizonov@home.ivanovo.ru

Abstract

Background: At the present time the edge effect is not taken into account when the magnetic systems of electromechanical devices are designed. The edge energy redistribution of the magnetic field of poles allows to increase the efficiency and technical and economical indicators of most part of produced electromechanical devices. Near the poles edges of the magnetic systems of electromechanical devices there are areas with high density of magnetic field energy. As a rule, magnetic energy of these areas is not used in operation of electromechanical devices, that is why it should be redistributed by means of increasing the device net energy.

Materials and Methods: The mathematical simulation method of magnetic field of magnetic system based on the finite elements method is used to calculate the parameters and describe the distribution scheme of magnetic field of magnetic system in the angle-data transmitter of dynamically adjusted gyroscope.

Results: The author estimates the size of the edge effect in magnetic field of the specific electromechanical device. The influence of the edge effect on the device operation is analyzed. The author proves that it is necessary to account it at the designing stage of the device.

Conclusions: According to the numerical experiments it was proved that specific energy of magnetic field near the poles edge can exceed the average specific energy of field of the specific gap of the gyroscope magnetic system. The poles edge curving allows to decrease the edge energy of magnetic field and to redistribute it in favour of the specific gap energy. The increasing of the operational magnetic flow of the examined gyroscope by 4,8 % is received.

Key words: edge effect, the magnetic field energy, mathematical simulation, finite element method.

Постановка задачи. При экспериментальном исследовании магнитного поля около магнитных полюсов был выявлен всплеск напряженности магнитного поля у кромок полюсов [1]. Дальнейшие исследования на основе моделирования поля ме-

тодом конечных элементов [2] показали, что около кромок полюсов магнитных систем существует высоко градиентное магнитное поле, где напряженность поля может значительно превышать напряженность поля в равномерном зазоре. На величину

неоднородности поля у кромки полюса влияет геометрическая характеристика рассматриваемой магнитной системы и уровень насыщения используемых материалов.

При проектировании магнитных систем электромеханических устройств, таких как электрические машины, электрические аппараты, электродинамические громкоговорители и другие приборы, кромочный эффект полюсов, как правило, в настоящее время не учитывается [3–8]. Ниже ставится задача оценить величину проявления кромочного эффекта в магнитной системе конкретного электромеханического устройства, проанализировать его влияние на работу устройства, определить необходимость его учета на этапе проектирования устройства.

Конструкция исследуемой магнитной системы. Для исследования выбрана магнитная система датчика угла динамически настраиваемого гироскопа (рис. 1) [8].

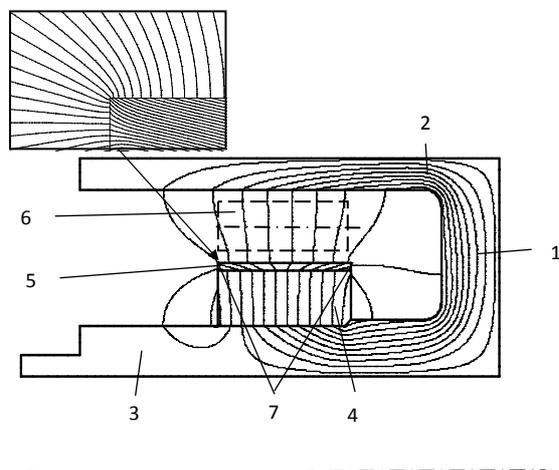


Рис. 1. Картина распределения линий векторного магнитного потенциала в магнитной системе динамически настраиваемого гироскопа

Магнитная система динамически настраиваемого гироскопа состоит из кольцевого магнитопровода 1 с П-образным аксиальным сечением, выполненным из магнитомягкого материала. Магнитопровод имеет два выступа – внешний 2 и внутренний 3. На внутреннем выступе магнитопровода закреплен кольцевой магнит 4 с радиальной намагниченностью. На наружной поверхности магнита расположен полюсный наконечник 5, выполненный из магнитомягкого материала. Постоянный магнит с полюсным наконечником образует с внешним выступом магнитопровода рабочий зазор 6. По окружности в рабочем зазоре расположены четыре катушки датчика угла, которые жестко закреплены на статоре динами-

чески настраиваемого гироскопа (положение катушек в рабочем зазоре показано на рис. 1 пунктирной линией). Взаимодействие тока катушек с магнитным полем рабочего зазора лежит в основе работы датчика угла динамически настраиваемого гироскопа. Сила взаимодействия катушек с полем рабочего зазора пропорциональна величине тока I в проводниках катушки и индукции B в рабочем зазоре:

$$F = I \times B.$$

Полюсный наконечник 5 имеет прямоугольные кромки 7, около которых, согласно исследованиям [2], существуют зоны с повышенной напряженностью магнитного поля.

Метод исследования магнитного поля.

Определение параметров магнитного поля в рассматриваемой магнитной системе выполнялось численным методом – методом конечных элементов. Метод универсален, при использовании не требует сложных математических преобразований, позволяет рассматривать области со сложной геометрией, учитывать нелинейные свойства и насыщение магнитных материалов. При расчете поля использовалась расчетная сетка с переменной плотностью. В области кромок полюсного наконечника и рабочего зазора размеры элементов сетки были минимальными, на границах области – на два порядка крупнее. Общее количество узлов сетки составляло около 750 000.

Результаты расчета поля. В результате расчета поля с указанными выше исходными данными получена картина распределения линий векторного магнитного потенциала в исследуемой области (рис. 1). Линии поля у кромки полюса имеют повышенную концентрацию, что указывает на наличие повышенной напряженности.

Считается, что в пределах рабочего зазора индукция примерно одинаковая. В реальности в разных зонах рабочего зазора индукция может существенно различаться. В результате расчета магнитного поля системы найдено распределение индукции в рабочем зазоре около полюсного наконечника 5, около внутренней поверхности выступа 2 и на средней линии зазора (рис. 2). Около кромок полюсного наконечника существует поле повышенной напряженности, удельная энергия магнитного поля превышает среднюю удельную энергию магнитного поля рабочего зазора. На создание поля высокой напряженности на кромках полюсного наконечника расходуется энергия постоянного магнита 4. В то же время витки катушки с током находятся вне зоны повышенной напряженности поля, поэтому магнитная энергия этих зон не участвует в создании силы взаимодействия магнитного поля рабочего зазора с обмоткой статора гироскопа.

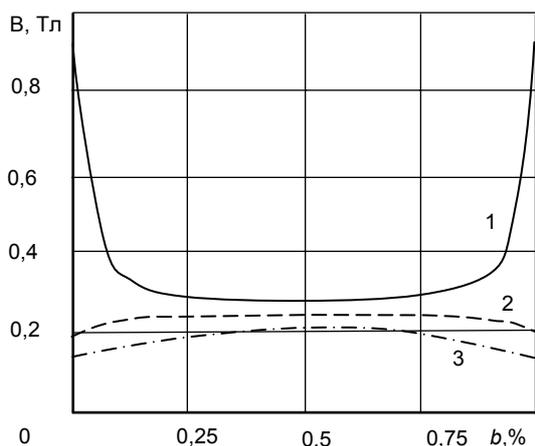


Рис. 2. Распределение индукции в рабочем зазоре магнитной системы гироскопа (b – ширина полюсного наконечника): кривая 1 – около полюсного наконечника; кривая 2 – на средней линии; кривая 3 – около внешнего выступа

Если ликвидировать эти зоны повышенной напряженности поля, то энергия магнитного поля системы перераспределится, что должно привести к повышению индукции в рабочем зазоре и росту электромагнитной силы гироскопа. Использование данного способа в рассматриваемой магнитной системе гироскопа показало, что закругление кромок полюсного наконечника приводит к повышению индукции в рабочем зазоре. На рис. 3 приведено распределение индукции на средней линии рабочего зазора в системе с прямоугольными кромками полюсного наконечника (кривая 1) и в системе с закругленными кромками полюсного наконечника (кривая 2).

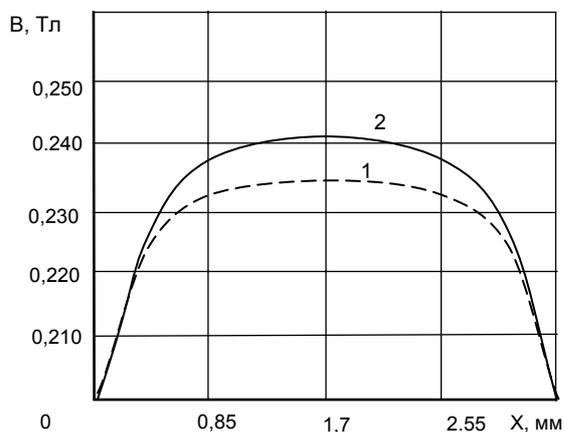


Рис. 3. Распределение индукции на средней линии рабочего зазора магнитной системы гироскопа: 1 – система с прямоугольными кромками; 2 – система с закругленными кромками

Уровень снижения кромочного эффекта зависит от радиуса закругления кромок полюсного наконечника. Соответственно, радиус закругления влияет на индукцию в рабочем зазоре. В результате проведенного численного эксперимента были построены зависимости средней индукции на средней линии рабочего зазора и силы взаимодействия катушки с магнитным полем

рабочего зазора от радиуса закругления кромки (рис. 4). Данные характеристики подтверждают, что закругление кромок полюсного наконечника приводит к повышению эффективности магнитной системы. Максимальный прирост индукции на средней линии рабочего зазора за счет закругления кромок составил около 4,8 %. Анализ полученных зависимостей (рис. 4) показывает, что существует оптимальная величина радиуса закругления кромок, при которой магнитные силы взаимодействия тока катушки с полем рабочего зазора максимальны.

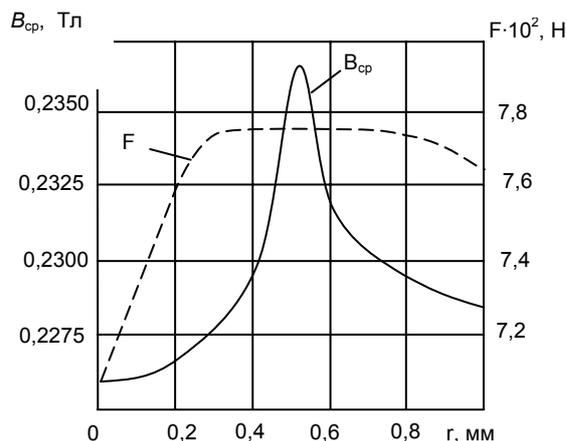


Рис. 4. Влияние радиуса закругления кромки на среднюю индукцию в зазоре – B_{cp} и силу взаимодействия катушки с полем рабочего зазора – F

Заключение

Кромочные эффекты магнитного поля существуют во всех магнитных системах электро-механических устройств, где имеются кромки на полюсах. Как правило, кромочная энергия магнитного поля не участвует в создании пондеромоторных сил и ее можно считать паразитной составляющей. На создание магнитного поля повышенной напряженности у кромок расходуется электрическая или магнитная энергия источника поля. Перераспределяя кромочную энергию, можно повышать эффективность магнитных систем и электро-механических устройств в целом. Одним из простейших способов перераспределения кромочной энергии является закругление кромок. Технологически закругление кромок – операция простая и не трудоемкая. Ее введение в технологический процесс изготовления магнитных систем практически не отразится на их себестоимости. Поэтому закругление кромок полюсов магнитных систем можно рекомендовать для большинства выпускаемых электро-механических устройств. Единственное, что необходимо предварительно выполнить – определить наиболее оптимальный радиус закругления кромок.

Список литературы

1. **Перминов С.М.** Кромочные эффекты в магнитном поле: мат-лы междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии». Т. 4. – Иваново, 2011. – С. 174–175.
2. **Перминов С.М.** Исследование кромочных эффектов магнитного поля с учетом нелинейных свойств магнитных материалов методом математического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 4. – С. 30–32.
3. **Вольдек А.И.** Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
4. **Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф.** Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.
5. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. – М., 2005. – 288 с.
6. **Буль Б.К.** Основы теории и расчета магнитных цепей. – М.: Энергетик, 1964. – 454 с.
7. **Эфрусси М.М.** Громкоговорители и их применение. – М.: Энергия, 1976. – 144 с.
8. **Виноградов Г.М., Кривошеев С.В.** Динамически настраиваемые гироскопы. – Казань, 2008. – 92 с.

References

1. Perminov, S.M. Kromochnye efekty v magnitnom pole [Edge effects in a magnetic field]. *Materialy XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii»* [Edge Effects of Magnetic Field: Materials of International Scientific and Technical Conference «State and Development Perspectives of Electrical Technology»]. Ivanovo, 2011, vol. 4, pp. 174–175.
2. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 4, pp. 30–32.
3. Vol'dek, A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. Leningrad, Energiya, 1974. 840 p.
4. Kopylov, I.P., Klokov, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of Electrical Machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 2005. 767 p.
5. Bul', O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov* [Calculation Methods of Magnetic Systems of Electric Devices]. Moscow, 2005. 288 p.
6. Bul', B.K. *Osnovy teorii i rascheta magnitnykh tsepey* [Fundamentals of Magnetic Circuits Theory and Calculations]. Moscow, Energetik, 1964. 454 p.
7. Efrussi, M.M. *Gromkogovoriteli i ikh primeneniye* [Loudspeakers and Their Application]. Moscow, Energiya, 1976. 144 p.
8. Vinogradov, G.M., Krivosheev, S.V. *Dinamicheski nastraivaemye giroskopy* [Dynamically Adjustable Gyroscopes]. Kazan, 2008. 92 p.

Перминов Сергей Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
заведующий проблемной научно-исследовательской лабораторией прикладной феррогидродинамики,
кандидат технических наук, докторант кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-99-92,
e-mail: psm@urpm.ispu.ru