

УДК 621.538

Исследование кромочных эффектов магнитного поля с учетом нелинейных свойств магнитных материалов методом математического моделирования

С.М. Перминов, канд. техн. наук

Представлены результаты исследования методом математического моделирования магнитного поля около кромки полюса в системе полюс – зазор магнитопроводящий вал. Показано, что около кромки полюса существует всплеск напряженности магнитного поля. Построены зависимости распределения напряженности магнитного поля в зоне, прилегающей к кромке. Анализируется влияние геометрической характеристики и насыщения материала полюса на величину неоднородности напряженности поля.

Ключевые слова: высоко градиентное магнитное поле, кромочный эффект, математическое моделирование.

Edge Effects Research of Magnetic Field according to Nonlinear Properties of Magnetic Materials by using Mathematical Simulation

S.M. Perminov, Candidate of Engineering

The author presents the research results of magnetic field near the edge of the pole in the pole – gap – magnetically conductive shaft system, received with the mathematical simulation method. The author proves that there is the strength burst of the magnetic field near the edge. The author develops the dependences of strength distribution of the magnetic field in the area near the edge. The influence of geometric characteristics of the material and the saturation of the pole on the value of nonuniformity of the field are analyzed.

Key words: heavy gradient magnetic field, edging effect, mathematical simulation.

При исследовании магнитного поля в зазоре магнитожидкостного уплотнения магнитопроводящего вала обнаружены зоны с повышенной напряженностью поля около кромок зубцов [1]. Проведенный эксперимент [2] подтвердил, что у кромки полюса напряженность поля значительно превышает напряженность в рабочем зазоре. Наличие зон с повышенной напряженностью поля в зазорах устройств, где присутствует магнитная жидкость, отрицательно сказывается на процессах, происходящих в магнитной жидкости, и в конечном итоге на ресурсе таких механизмов. Поэтому представляет интерес исследование закономерностей распределения магнитного поля в околокромочных зонах. В работе ставится задача оценить величину отклонения напряженности поля на кромках полюсов от базовой напряженности поля в зазоре, определить границы распространения зон повышенной напряженности, понять, какие факторы влияют на напряженность поля в этих зонах, найти способы снижения проявлений кромочного эффекта.

Исследование выполнялось методом математического моделирования магнитного поля у кромки полюса, образующего воздушный зазор с поверхностью магнитопроводящего вала. Рассматривалась плоскопараллельная картина поля.

На рис. 1 показана геометрия исследуемой области. Полюс имеет ребро К, образованное пересечением двух поверхностей ДК и КЕ полюса. В электростатике данное ребро принято называть кромкой [3], поэтому при рассмотрении магнитного поля сохраним устоявшийся термин – кромка.

Величину зазора между полюсом и поверхностью вала обозначим δ , ширину полюса t , угол между образующими кромку поверхностями

ψ , а смежный с ним α . Рассматриваемую геометрию исследуемой зоны зададим в относительных единицах. Геометрия в относительных единицах называется геометрической характеристикой [3]. Такая характеристика – удобный параметр для сравнения однотипных конструкций.

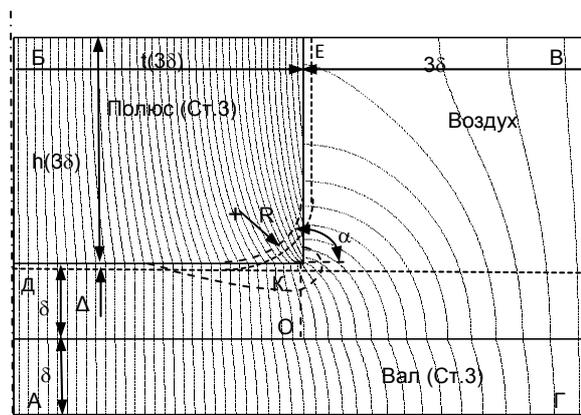


Рис. 1. Распределение линий потока в расчетной области

За базовую геометрическую величину принимаем зазор δ . Ширину полюса выбираем $t = 6\delta$ из тех соображений, чтобы в зазоре был гарантированный участок с однородным магнитным полем. Высоту полюса задаем равной $h = 3\delta$. Полюс и вал выполнены из ферромагнитного материала, имеющего нелинейную кривую намагничивания – сталь Ст.3 с индукцией насыщения 2,1 Тл.

Рассматриваемая задача решалась численным методом – методом конечных элементов. Метод универсален, при использовании не требует сложных математических преобразований, позволяет рассматривать области со сложной геометрией, оперативно менять форму поверхностей отдельных участков, учитывать на-

сыщение магнитных материалов, что важно при решении большинства задач магнитостатики. Исходя из выбранного метода, граничные условия задавались следующим образом: на границе АВ векторный магнитный потенциал A постоянен и равен 0 и на границе ВГ магнитный потенциал A постоянен и определяется из условия, чтобы индукция однородного поля в зазоре составляла $B = 0,1$ Тл. Задавая низкую индукцию в зоне однородного поля зазора, реализуем условие отсутствия насыщения материала полюса и вала. На границах БВ и АГ касательное поле $H_\delta = 0$.

Расчетная сетка имела переменную густоту. В области кромки полюса размеры элементов сетки были минимальными, их стороны составляли около $0,0001\delta$, на границах области – $0,05\delta$, количество узлов сетки менялось в зависимости от рассматриваемой геометрической характеристики и доходило до 420000, при размерах расчетной области $(6 \times 5)\delta$.

Напряженность магнитного поля около кромки полюса напрямую связана с величиной напряженности поля в зазоре δ , поэтому нагляднее напряженность представлять в относительных единицах:

$$H' = H / H_B, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля в рассматриваемой точке пространства; H_B – базовая напряженность поля в зазоре, определяемая как $H_B = U / \delta$,

где U – магнитодвижущая сила, создающая поле в зазоре; δ – величина равномерного зазора.

Максимальное значение относительной напряженности H' в рассматриваемой области или на рассматриваемом участке назовем коэффициентом неоднородности

$$k_H = H'_{\max}. \quad (3)$$

Коэффициент неоднородности служит мерой отклонения поля от однородного.

На рис. 2 представлены кривые распределения относительной напряженности магнитного поля в зазоре у поверхности полюса и поверхности вала.

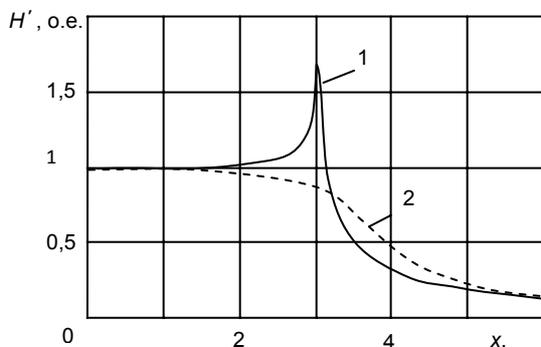


Рис. 2. Распределение относительной напряженности поля: 1 – около поверхности полюса ($\Delta = 0,95\delta$); 2 – на поверхности полюса

Поблизости от кромки полюса наблюдается всплеск напряженности магнитного поля (кривая 1). Напряженность поля на пике кривой 1 в 1,7 раза превышает напряженность поля в равномерном зазоре. Около поверхности вала никаких отклонений напряженности поля напротив кромки не наблюдается.

На рис. 3 показано изменение относительной напряженности поля при перемещении от вала к кромке полюса на линии, лежащей в плоскости ЕК. Зона повышенной напряженности поля начинается на расстоянии $\approx 0,3\delta$ от поверхности полюса.

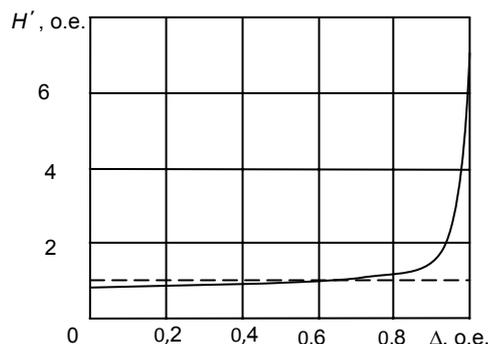


Рис. 3. Распределение относительной напряженности поля в зазоре на линии кромки

Величина максимальной напряженности более чем в 6 раз превышает напряженность поля в равномерном зазоре. Но надо отметить, что такая высокая напряженность существует в непосредственной близости у поверхности полюса, практически на границе раздела сред, и стремительно снижается при удалении от границы.

Поэтому при анализе параметров поля в околоромочной зоне необходимо фиксировать расстояние от поверхности полюса или кромки, на котором рассматривается напряженность или индукция. Обозначим это расстояние как Δ .

На рис. 1 в зазоре δ пунктирной линией обозначена граница зоны повышенной напряженности поля около кромки. Зона имеет вытянутую форму от кромки к середине полюса. Глубина распространения зоны в направлении вала составляет около 30 % от величины зазора δ . Градиенты напряженности поля в околоромочных зонах на порядок выше, чем градиенты поля, создаваемые зубцами в зазоре магнитоэлектрического уплотнения, которые, в свою очередь, считаются очень высокими. Если рассматривать поле вблизи кромки полюса, то наибольший градиент напряженности поля наблюдается вдоль поверхности ЕК при стремлении к точке К. Учитывая такую особенность поля у кромки, ромочный эффект может использоваться как способ создания высокоградиентных магнитных полей.

На величину ромочного эффекта влияет геометрическая характеристика и магнитные свойства используемых материалов.

На рис. 4 показано влияние угла между образующими кромку плоскостями на коэффициент неоднородности поля. Чем острее кромка, тем выше неоднородность поля в прилегающей зоне. Зависимость коэффициента неоднородности от угла имеет характер, близкий к линейному.

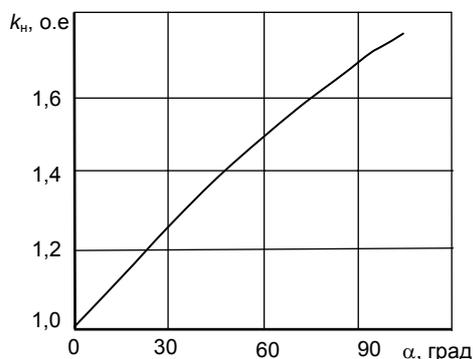


Рис. 4. Влияние угла α на коэффициент неоднородности поля ($\Delta = 0,05\delta$)

Индукция в сечении полюса распределяется неравномерно, о чем можно судить по линиям поля на рис. 1. Индукция в кромке полюса значительно выше индукции в средней части полюса. При малом магнитном потоке и отсутствии насыщения стали индукция на острие кромки почти на порядок превышает индукцию в средней части полюса. При росте потока, проходящего через полюс, сталь кромки полюса начинает входить в состояние насыщения при $B_{\delta} \approx 0,2$ Тл. Чем выше средняя индукция в зазоре, тем больший участок кромки входит в насыщение. Насыщение стали снижает неоднородность напряженности поля у кромки полюса.

На рис. 5 показана зависимость коэффициента неоднородности поля от индукции в средней части зазора.

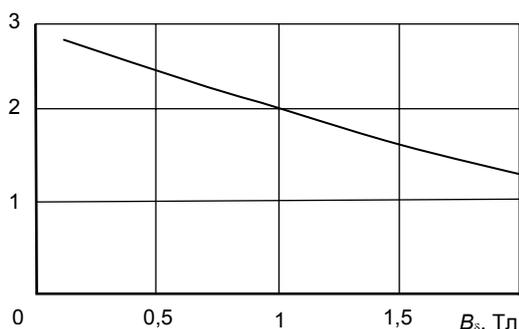


Рис. 5. Зависимость коэффициента неоднородности поля от индукции в зазоре ($\Delta = 0,01\delta$)

Значение коэффициента неоднородности при высоком насыщении стали уменьшается, напряженность поля в зазоре выравнивается.

В магнитных системах различных электро-механических устройств зоны повышенной напряженности у кромок могут играть как положительную, так и отрицательную роль. В случаях, когда высокая напряженность поля у кромок магнитных

систем в устройстве нежелательна, кромки можно закруглять (рис. 1, пунктирная линия). Это приводит к снижению неоднородности поля. Способ закругления кромок как мера борьбы с высокими градиентами электростатического поля на кромках был использован немецким ученым В. Роговским еще в 20-х годах прошлого века [4]. Расчеты магнитного поля у кромки полюса показали, что чем больше радиус закругления кромки, тем равномернее индукция в зазоре (рис. 6).

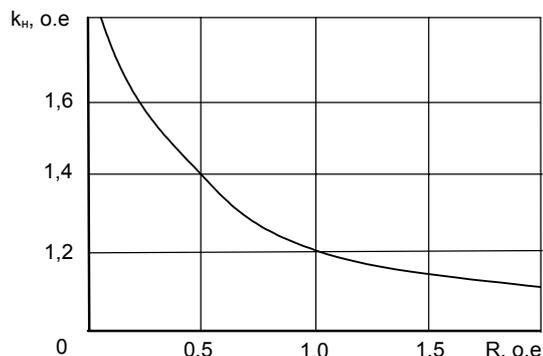


Рис. 6. Влияние радиуса закругления кромки на коэффициент неоднородности поля ($\Delta = 0,01\delta$)

Полностью устранить кромочные эффекты закруглением кромок невозможно. Даже при радиусе закругления, равном величине зазора δ и более, неоднородность поля не исчезает (рис. 6).

Таким образом, моделирование магнитного поля на кромках полюсов магнитных систем с учетом нелинейных свойств магнитных материалов на основе метода конечных элементов показало:

- около кромок полюсов магнитных систем существует высокоградиентное магнитное поле, напряженность которого может значительно превышать напряженность поля в равномерном зазоре;
- на величину неоднородности поля влияет геометрическая характеристика рассматриваемой магнитной системы и уровень насыщения используемых материалов;
- закругление кромок полюсов существенно снижает неоднородность поля, но полностью кромочный эффект не устраняет.

Список литературы

1. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, Ю.И. Страдомский, С.М. Перминов. – Иваново, 2010. – 184 с.
2. 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.
3. Резвых К.А. Расчет электростатических полей в аппаратуре высокого напряжения. – М.: Энергия, 1967. – 120 с.
4. Rogowski W. Die elektrische Festigkeit am Rand des Plattenkondensators // Arch. Elektrotechnik. – 1926. – Bd. 12. – S. 1.

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) 38-57-98,
e-mail: psm@urpm.ispu.ru