

Совершенствование зубца магнитожидкостного уплотнения

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время в магнитожидкостных уплотнениях получили распространение зубцы-концентраторы прямоугольной формы, отличающиеся простотой и технологичностью. Исследования выявили у зубцов прямоугольной формы недостатки – невысокую удерживающую способность и повышенный магнитный поток рабочего зазора. Устранение указанных недостатков представляет как научный, так и практический интерес.

Материалы и методы: Исследования выполнены путем моделирования магнитного поля методом конечных элементов с использованием дифференцированной конечно-элементной сетки из полумиллиона треугольных элементов с учетом нелинейной зависимости свойств магнитных материалов от напряженности магнитного поля.

Результаты: На основе анализа распределения векторного магнитного потенциала и напряженности поля в рабочем зазоре предложен способ трансформации формы вершины зубца – закругление кромок. Найдены зависимости перепада напряженности поля в рабочем зазоре от радиуса закругления кромок. Показано, что с увеличением радиуса закругления эффективность зубца увеличивается и снижается рабочий магнитный поток.

Выводы: Предложенный способ трансформации формы вершины зубца позволяет перераспределить магнитный поток в зубце и в рабочем зазоре и повысить эффективность зубца. Установлено, что поверхность вершины зубца, имеющая в сечении полукруг, обеспечивает наиболее высокий результат из существующего многообразия закруглений.

Ключевые слова: магнитожидкостное уплотнение, магнитное поле, максимально удерживаемый перепад давлений, прямоугольные зубцы, закругление кромок.

Improvement of magnetic fluid seal tooth

S.M. Perminov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: psm@upm.ispu.ru, elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: Rectangular teeth-concentrators currently used in magnetic fluid seals are simple and easy to produce. The studies have revealed that rectangular teeth have a few drawbacks: a low retaining power and a high magnetic flux in the working gap. Eliminating these defects is important both scientifically and practically.

Materials and Methods: The study was based on magnetic field simulation by the finite-element method including a differentiated finite-element mesh containing half a million triangular elements and taking into account the non-linear dependence of the properties of magnetic materials on magnetic field strength.

Results: Based on the analysis of distribution of magnetic vector potential and magnetic field strength in the working gap, we have developed a technique of changing the form of the tooth top by chamfering the edge. We have also determined the dependence of magnetic field differential in the working gap on the edge chamfering radius. It has been shown that a bigger radius makes a tooth more efficient and reduces the working gap.

Conclusions: The suggested technique of transforming the tooth top makes it possible to redistribute magnetic flux in the tooth and the working gap and to increase the tooth efficiency. It has been determined that the tooth top surface with a semicircle in the cross-section provides the highest result among the available variety of roundings.

Key words: magnetic fluid seal, magnetic field, maximum pressure differential held, rectangular teeth, edge chamfering.

Исследование магнитного поля в рабочем зазоре магнитожидкостного уплотнения (МЖУ) с зубцами прямоугольной формы [1] показало, что выполнение зубцов малой толщины не позволяет достичь высоких перепадов напряженности магнитного поля и, соответственно, удерживаемых перепадов давлений из-за значительного снижения магнитной индукции при переходе от основания зубца к его вершине. Использование зубцов с увеличенной толщиной повышает перепад напряженности поля в зазоре, но такие зубцы существенно увеличивают рабочий магнитный по-

ток и собственный момент трения уплотнения. В связи с этим необходимо найти способ снижения магнитных потоков в рабочем зазоре при сохранении удерживающей способности прямоугольных зубцов.

Метод решения задачи. Поставленная задача решается методом математического моделирования магнитного поля в рабочем зазоре МЖУ. Используется метод конечных элементов. На основе анализа картины распределения векторного магнитного потенциала и напряженности поля в рабочем зазоре предлагается видоизменить форму вершины зубца

и проследить последующую трансформацию магнитного поля. При расчетах учитываются нелинейные свойства материала зубца. Принимается, что магнитная жидкость в зазоре отсутствует. На рис. 1 показана исходная геометрия зубца и расчетная область. Граничные условия задавались следующим образом: на границе АБ векторный магнитный потенциал А постоянен и равен 0, и на границе ВГ магнитный потенциал А постоянен и определяется исходя из заданной средней индукции в зазоре. На границах БВ и АГ касательное поле равно нулю: $H_{\sigma} = 0$. Расчетная сетка имела дифференцированный характер распределения элементов, с наименьшими элементами в области минимального зазора и более крупными у границ расчетной области, количество элементов расчетной сетки колебалось в пределах 300–800 тысяч в зависимости от ширины зубца.

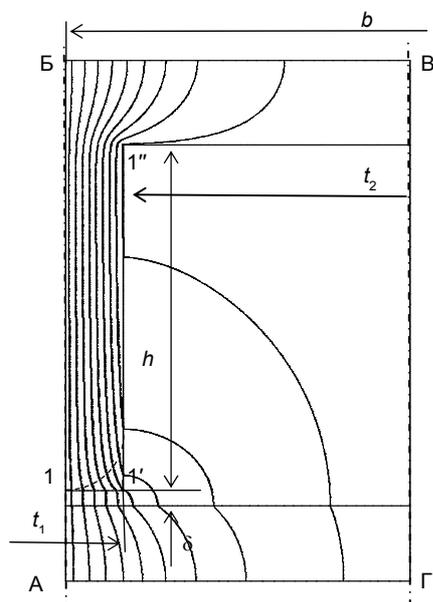


Рис. 1. Зубец прямоугольной формы

Геометрические параметры исследуемых прямоугольных зубцов. Геометрические параметры зубцов принято выражать в относительных единицах. За базовую величину принимается минимальная величина рабочего зазора (рис. 1). Основными геометрическими параметрами прямоугольного зубца являются: ширина зубца b , толщина t_1 , высота h , ширина канавки $t_2 = b - t_1$. В [1] найдены наиболее оптимальные размеры канавок между зубцами. Из найденного диапазона параметров выбрана и зафиксирована геометрическая характеристика канавки: $t_2 = 30\delta$, $h/t_2 = 0,8$. В численном эксперименте меняются толщина t_1 и форма вершины зубца.

Целевая функция. В [2–11] показано, что для повышения удерживаемого зубцом перепада давлений необходимо увеличивать перепад экстремальных напряженностей магнитного поля на поверхности вала под зубцом:

$$\Delta H = H_{\max} - H_{\min}, \quad (1)$$

где H_{\max} и H_{\min} – максимальная и минимальная напряженности магнитного поля в рабочем зазоре под зубцом около поверхности вала.

Изменяя параметры прямоугольного зубца необходимо повысить перепад напряженности поля под зубцом при заданной средней индукции в зазоре.

Магнитный поток зубца и его составляющие. Магнитный поток зубца можно разбить на две составляющие: поток, выходящий из горизонтальной образующей поверхности зубца (рис. 1, участок 1–1'), и поток, выходящий из вертикальной образующей поверхности зубца (рис. 1, участок 1'–1''). Магнитный поток, выходящий из участка 1–1', пропорционален его ширине $-t_1$ и максимальной индукции в зазоре:

$$V_{\max} \approx \mu_0 H_{\max} t_1. \quad (2)$$

Магнитный поток на участке 1'–1'' выходит из полюса неравномерно. На рис. 2 показано распределение индукции около данной поверхности.

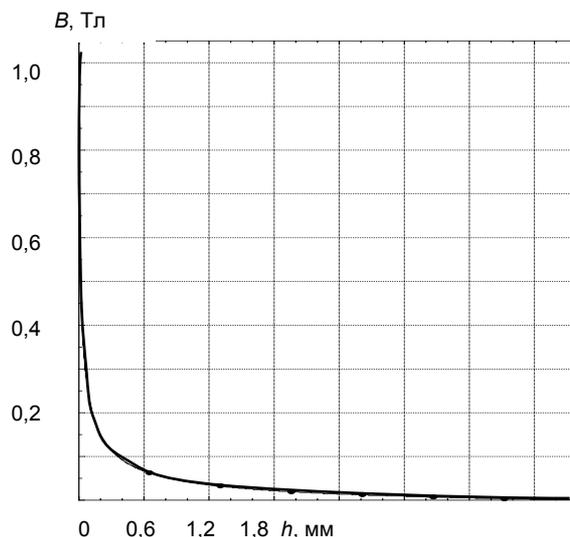


Рис. 2. Изменение индукции около боковой образующей прямоугольного зубца (1'–1'')

Основная часть магнитного потока, выходящего с боковой поверхности, сосредоточена у вершины зубца. Непосредственно у кромки, образованной пересечением вертикальной и горизонтальной образующих поверхностей зубца, наблюдается всплеск индукции. Кромка на полюсах магнитных систем обладает высокой рассеивающей способностью и выбрасывает через себя магнитный поток, значительно превышающий потоки с прилегающих поверхностей [2–3]. Расчеты показали, что с 10 % боковой поверхности, примыкающей к вершине зубца, выходит более половины потока. Такой характер распределения потоков, выходящих с боковой поверхности зубца, приводит к стремительному уменьшению индукции в зубцах малой толщины в направлении от основания к его вершине [1],

снижению максимальной напряженности в рабочем зазоре и удерживающей способности зубца. Уменьшить падение индукции по высоте зубца можно путем увеличения толщины зубца, но это сопровождается ростом магнитного потока, выходящего с горизонтальной образующей поверхности 1–1', что отрицательно отражается на размерах источника магнитного поля МЖУ.

Исследование зубца с закругленными кромками. Снизить кромочные магнитные потоки можно за счет изменения формы вершины зубца. Выполним закругление кромки зубца (рис. 1, пунктирная линия) и рассмотрим влияние радиуса закругления на параметры поля в зазоре. На рис. 3 показана зависимость влияния радиуса закругления кромки на перепад напряженности поля в рабочем зазоре при средней индукции $B_{cp} = 0,1$ Тл. Прямоугольный зубец имеет толщину $t_1 = 12\delta$.

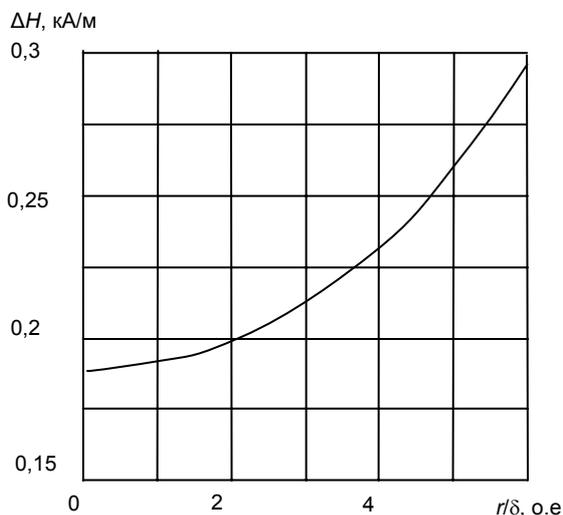


Рис. 3. Влияние радиуса закругления кромки на перепад напряженности поля в рабочем зазоре

С увеличением радиуса закругления наблюдается постоянный рост перепада напряженности поля в рабочем зазоре, причем рост продолжается до предельно возможного значения радиуса закругления, равного половине толщины зубца. Для зубца с прямоугольной вершиной и зубца с максимальным радиусом закругления кромки рассчитано распределение индукции на оси зубца (рис. 4, где кривая 1 соответствует зубцу с прямоугольной формой вершины, кривая 2 – зубцу с закругленной формой вершины). В зубце с прямоугольной вершиной при движении к рабочему зазору наблюдается устойчивое снижение индукции, что не позволяет достичь высоких значений максимальной напряженности поля в зазоре. В зубце с закругленной вершиной индукция вместо устойчивого падения в определенный момент начинает расти, и увеличение индукции происходит на протяжении всего конечного

участка до высшей точки поверхности вершины зубца. Поверхность вершины зубца, имеющая в сечении полукруг, позволяет достичь максимальной напряженности магнитного поля в зазоре на поверхности вала.

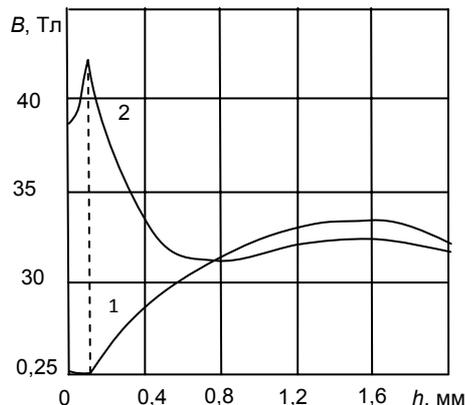


Рис. 4. Изменение индукции на оси прямоугольного зубца от вершины к основанию: 1 – прямоугольная вершина зубца; 2 – закругленная вершина зубца

Величина положительного эффекта от закругления вершины должна зависеть от толщины зубца. Поэтому было смоделировано магнитное поле ряда зубцов различной толщины с прямоугольной и закругленной формой вершины. На рис. 5 показана зависимость процентного увеличения перепада напряженности магнитного поля под зубцом при закруглении его вершины для зубцов различной толщины. Зависимость имеет практически прямолинейный характер, т.е. положительный эффект от закругления вершины зубца прямо пропорционален толщине зубца. Чем толще прямоугольный зубец, тем больше прибавка удерживаемого перепада давления от закругления. Так если для зубца толщиной $t_1 = 5\delta$ прибавка составляет 20 %, то для зубца толщиной $t_1 = 20\delta$ она возрастает до 80 %.

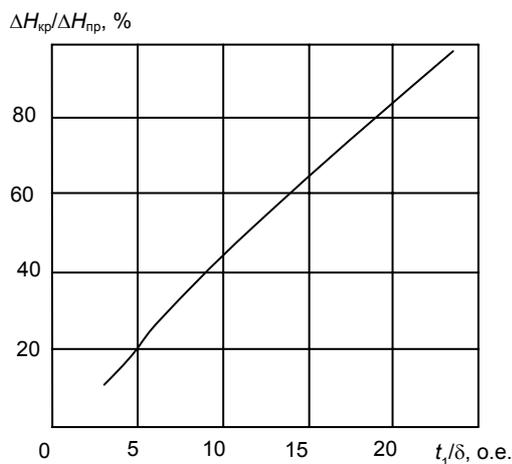


Рис. 5. Зависимость роста удерживающей способности зубца от его толщины при закруглении вершины

Влияние величины магнитного потока на поле в зазоре и удерживающую способность зубца. Приведенные выше исследования были выполнены при средней индукции в рабочем зазоре 0,1 Тл, при которой отсутствует насыщение стали в любой зоне рассматриваемой области, а на магнитное поле в зазоре влияет только геометрия образующих рабочей зазор магнитопроводящих поверхностей. Но сохранит ли эффективность зубец с закругленной вершиной, когда сталь зубца начнет входить в состояние насыщения? На рис. 6 показаны зависимости перепада напряженности поля от средней индукции в рабочем зазоре для зубцов с прямоугольной и закругленной вершинами толщиной $t_1 = 12\delta$. Анализ кривых показывает, что процессы насыщения стали участков зубца с закругленной вершиной начинают проявляться при средней индукции чуть выше 0,5 Тл, с прямоугольной вершиной – выше 0,7 Тл. Во всем диапазоне изменения средней индукции перепад напряженности поля в зазоре, а следовательно, и удерживающая способность зубца с закругленной вершиной остаются существенно выше, чем у зубца с прямоугольной вершиной. Если исходить из задачи создания МЖУ на заданный перепад давлений, то, согласно полученным данным (рис. 6), зубец с закругленной вершиной будет обеспечивать требуемую величину перепада давлений при магнитном потоке в рабочем зазоре на 40 % меньше, чем зубец с прямоугольной вершиной. Это позволяет пропорционально снизить размеры источника магнитного поля и МЖУ в целом.

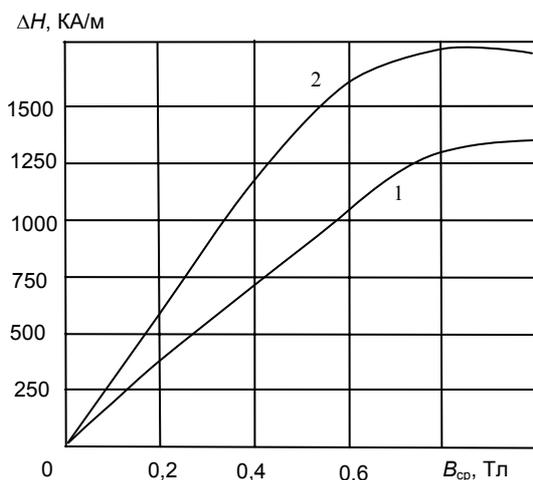


Рис. 6. Зависимости перепада напряженности поля под прямоугольным зубцом толщиной $t_1 = 12\delta$ от средней индукции в зазоре: 1 – прямоугольная вершина зубца; 2 – закругленная вершина зубца

Заключение

Прямоугольный зубец прост и технологичен в изготовлении, но обладает недостатками. Один из них – невысокая удерживающая

способность, второй – повышенная средняя индукция рабочего зазора. Последний недостаток обуславливает увеличение размеров источника магнитного поля и уплотнения в целом, а также повышенные моменты трения. Проведенные исследования показали, что значительная часть магнитного потока проходит через зону кромки на вершине зубца. Закругление кромок позволяет перераспределить магнитный поток в зубце и в рабочем зазоре, что приводит к повышению удерживающей способности зубца и снижению рабочего магнитного потока. Поверхность вершины зубца, имеющая в сечении полукруг, является наиболее эффективной из существующего многообразия закруглений.

Список литературы

1. **Перминов С.М.** Исследование магнитного поля и удерживающей способности рабочего зазора магнитожидкостного уплотнения с зубцами прямоугольной формы // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1. – С. 32–36.
2. **Михалев Ю.О., Орлов Д.В., Страдомский Ю.И.** Исследование феррожидкостных уплотнений // Магнитная гидродинамика. – 1979. – № 3. – С. 69–79.
3. **Магнитные жидкости в машиностроении** / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др.; под общ. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
4. **Такетоми С., Такидзуми С.** Магнитные жидкости. – М.: Мир, 1993. – 272 с.
5. **Розенцвейг Р.** Феррогидродинамика. – М.: Мир, 1989. – 356 с.
6. **Kim C.K., Mikhalev Y.O.** Comparative study on the friction torque of highspeed magnetic fluid seals for ultra high vacuum // Тезисы докладов VII Междунар. Плесской конф. по магнитным жидкостям, Россия, г. Плес. – Иваново, 1996. – С. 146–147.
7. **Орлов Д.В., Страдомский Ю.И.** Расчет поля и статического удерживающего давления магнитожидкостного уплотнения // Вопросы теории и расчета электрических машин и аппаратов. – Иваново, 1975. – С. 35–45.
8. **Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С.** Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 279 с.
9. **Фертман В.Е.** Магнитные жидкости. Справочное пособие. – Минск: Выш. шк., 1988. – 184 с.
10. **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.

References

1. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 1, pp. 32–36.
2. Mikhalev Yu.O., Orlov, D.V., Stradomskiy, Yu.I. *Maghnitnaya gidrodinamika*, 1979, no. 3, pp. 69–79.
3. Mikhalev, Yu.O., Orlov, D.V., Myshkin, N.K. *Maghnitnye zhidkosti v mashinostroenii* [Magnetic fluids in machine building]. Moscow, Mashinostroenie, 1993. 272 p.
4. Taketomi, S., Takidzumi, S. *Maghnitnye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow, Mir, 1993. 272 p.
5. Rozentsveyg, R. *Ferrohidrodinamika* [Ferrohydrodynamics]. Moscow, Mir, 1989. 356 p.
6. Kim, C.K., Mikhalev, Yu.O. Comparative study on the friction torque of highspeed magnetic fluid seals for ultra high vacuum. *Tezisy докладov VII Mezhdunarodnoy Pleskoy konferentsii po maghnitnym zhidkostyam* [Proceedings of the 7th Plyoss International Conference on magnetic fluids]. Ivanovo, 1996, pp. 201–203.
7. Orlov, D.V., Stradomskiy, Yu.I. Raschet polya i staticheskogo uderzhivayushchego davleniya maghnitnozhidkostnogo uplotneniya [Calculation of the field and static retaining pressure of magnetic fluid seal]. *Voprosy teorii i rascheta elek-*

tricheskikh mashin i apparatov [Theory and calculation of electrical machinery and apparatus]. Ivanovo, 1975, pp. 35–45.

8. Berkovskiy, B.M., Medvedev, V.F., Krakov, M.S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow, Khimiya, 1989. 279 p.

9. Fertman, V.E. *Magnitnye zhidkosti. Spravochnoe posobie* [Magnetic fluids. Reference manual]. Minsk, Vysshaya shkola, 1988. 184 p.

10. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 4, pp. 30–32.

Перминов Сергей Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории
прикладной феррогидродинамики,
телефон (4932) 38-57-98,
e-mail: psm@upm.ispu.ru