

УДК 621.538

Исследование распределения параметров магнитного поля в элементах магнитной системы магнитожидкостного герметизатора классической конструкции

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: Вопросы распределения параметров магнитного поля в элементах магнитных систем магнитожидкостных герметизаторов классической конструкции и степень использования свойств применяемых магнитных материалов в настоящее время остаются недостаточно изученными. Это не позволяет научно обоснованно выполнять их проектирование и достигать высоких технических показателей данных систем.

Материалы и методы: Моделирование магнитного поля магнитной системы магнитожидкостного герметизатора классической конструкции выполнено методом конечных элементов с использованием дифференцированной конечно-элементной сетки из миллиона треугольных элементов.

Результаты: Найдено распределение параметров магнитного поля в элементах (магните, полюсных приставках, зубцах, валу) магнитной системы герметизатора классической конструкции. Показано, что в полюсных приставках у основания зубцов наблюдаются сильно выраженные колебания индукции. Определено, что в валу индукция максимальна у поверхности и снижается в направлении его оси (разница индукций на поверхности и внутри может достигать 50 %), на малой глубине существует неравномерное распределение индукции, обусловленное перераспределением магнитного потока зубцами полюсной приставки. Установлено, что перераспределение магнитного потока зубцами может вызывать насыщение стали локальных участков вала. Найдено, что магнитная жидкость в зазоре находится в насыщенном состоянии, ее магнитная проницаемость изменяется в диапазоне от 1,02 до 1,16 о.е., в классической конструкции герметизатора магнит реализует только часть максимально возможной энергии.

Выводы: Моделирование магнитного поля позволяет выявить основные закономерности распределения параметров магнитного поля в элементах магнитной системы магнитожидкостного герметизатора классической конструкции, определить степень использования свойств магнитных сред.

Ключевые слова: магнитожидкостный герметизатор, магнитное поле, распределение индукции, магнитное насыщение.

Researching Parameters Distribution of Magnetic Field in Magnetic Elements of Classical Magnetic Sealer

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

Abstract

Background: The distribution issues of magnetic field parameters in the elements of magnetic systems of classical magneto-liquid sealers and the degree of using the characteristics of applied magnetic materials are not studied enough. Thus, it is impossible to design them scientifically and achieve the high technical characteristics of these systems.

Materials and Methods: Magnetic field modeling of the magnetic system of the classical magneto-liquid sealer is carried out by means of the finite-element method with using the differentiated finite-element net of one million triangular elements.

Results: The distribution of magnetic field parameters in the magnetic system elements (magnet, pole-top boxes, teeth, shaft) of classical magneto-liquid sealers is presented. It is shown that in the pole-top boxes at the base of the teeth strong induction fluctuations are observed. It is determined that the induction is maximum in the shaft at the surface and decreases in the direction of its axis (the difference of induction on the surface and inside can reach 50 %). There is an uneven distribution of the induction due to the redistribution of magnetic flux between teeth of pole boxes on the small depth. It is found out that the redistribution of magnetic flux by teeth can cause saturation of the local steel of shaft sections. It is also proved that the magnetic fluid in the gap is in the saturated state, its magnetic permeability ranges from 1,02 to 1,16 pu, so, in the classical sealers magnet only implements just a part of its maximum possible energy.

Conclusions: The modeling of the magnetic field has allowed to determine the main parameters of the distribution of the magnetic field in the magnetic system elements of classical magneto-liquid sealers as well as identify the degree of using the properties of magnetic environments.

Key words: magneto-liquid sealer, magnetic field, distribution of induction, magnetic saturation.

В работах [1, 2] была исследована картина распределения векторного магнитного потенциала магнитоэластического герметизатора классической конструкции (рис. 1). Показано соотношение основных магнитных потоков магнитной системы, определен уровень и характер распределения напряженности магнитного поля в рабочем зазоре и окружающей магнитную систему простроне. В данной работе, которая является продолжением работ [1, 2], ставится задача исследовать характер распределения индукции и напряженности поля в элементах магнитной системы и оценить уровень нагруженности используемых в герметизаторе магнитных сред.

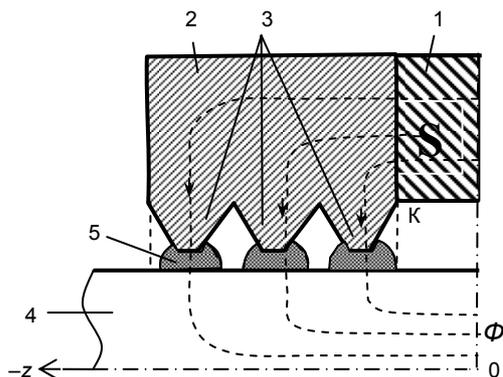


Рис. 1. Магнитная система магнитоэластического герметизатора классической конструкции

Распределение индукции в полюсных приставках. Характер распределения магнитной индукции в полюсных приставках зависит от свойств источника магнитного поля – постоянного магнита 1 (рис. 1), геометрии полюсной приставки 2 и зубцов 3, количества последних, диаметра вала 4. На рис. 2 показано распределение индукции в коаксиальных сечениях полюсной приставки, выполненных с различным радиусом.

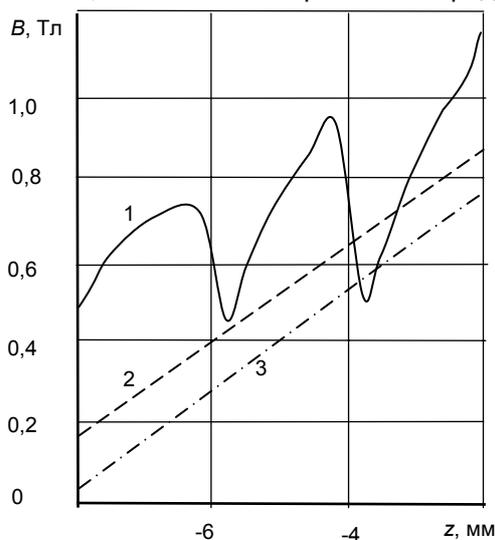


Рис. 2. Распределение индукции в коаксиальных сечениях полюсной приставки: 1 – $r_p = 11,7$ мм; 2 – $r_p = 14,7$ мм; 3 – $r_p = 15,6$ мм

Можно выделить следующие закономерности. Индукция в полюсной приставке плавно снижается в радиальном направлении от внутренней поверхности полюсной приставки к наружной, в аксиальном – от магнита к наружной торцевой поверхности полюсной приставки. В сечении, выполненном у основания зубцов, наблюдается существенная неравномерность распределения индукции (рис. 2, кривая 1). В данном сечении максимум индукции расположен на границах соседних зубцов, минимум смещен от границ в сторону магнита на 10–15 % величины зубцового деления. Наиболее нагруженным участком в магнитном отношении является зона полюсной приставки, прилегающая к внутренней кромке магнита (рис. 1, точка К).

Распределение индукции в зубах полюсных приставок. Коническая форма зуба приводит к концентрации магнитного потока на пути его продвижения к рабочему зазору и, соответственно, к повышению индукции в стали зуба. Изменение индукции по высоте зуба происходит по нелинейной зависимости. На рис. 3 показано изменение индукции на оси симметрии зуба в направлении от вершины зуба к его основанию.

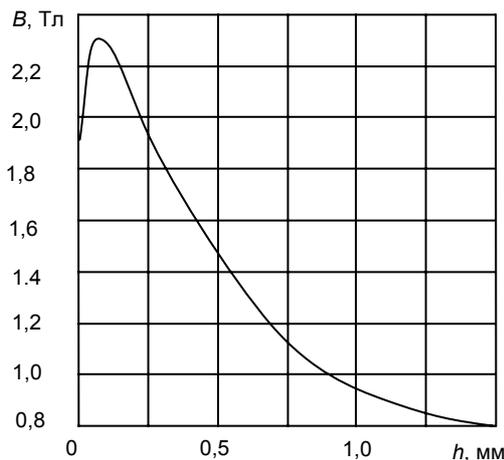


Рис. 3. Распределение индукции по высоте зуба

На кривой рис. 3 имеется максимум, отстоящий на малом расстоянии от острия зуба. Характер этой зависимости определяется геометрией зуба и, в первую очередь, углом между боковыми образующими зуба. В коаксиальных сечениях зуба, выполненных для различных радиусов, индукция по ширине зуба также не постоянна. В сечении, проходящем через основание зуба, максимум индукции смещен от оси зуба в сторону магнита. В сечении, проходящем через среднюю часть зуба, максимум индукции наблюдается на оси симметрии зуба. В сечении, выполненном около площадки острия зуба, на оси симметрии расположен минимум кривой (рис. 4). Максимальная индукция в стали зуба наблюдается около ребер на острие (здесь сталь находится в глубоко насыщенном состоянии).

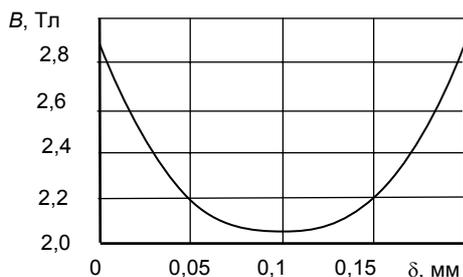


Рис. 4. Распределение индукции в зубце вдоль площадки зубца

Распределение индукции в валу. Индукция в валу зависит от следующих параметров: диаметра вала, размеров магнита и его магнитных свойств, геометрии магнитной системы. На рис. 5 показано распределение индукции в сечении вала, совпадающем с плоскостью симметрии магнитной системы. Индукция максимальна у поверхности вала и снижается в направлении его оси, разница индукций на поверхности и внутри в рассматриваемом примере составляет около 50 %.

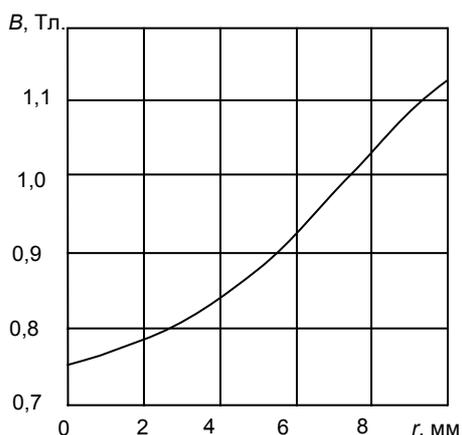


Рис. 5. Распределение индукции в сечении вала, проходящем через нейтральное сечение магнитной системы

На рис. 6 показано распределение индукции в валу вдоль оси на различной глубине ($\Delta = 0,1, 0,5, 1$ и 3 мм) от его поверхности. В валу на малой глубине существует неравномерное распределение индукции, обусловленное перераспределением магнитного потока зубцами полюсной приставки. Анализ кривых показывает, что в данной магнитной системе следы зубцового перераспределения индукции исчезают на глубине около 1 мм. Зубцовое перераспределение потока в отдельных случаях может вызывать насыщение стали локальных участков вала, расположенных под зубцами. Чем крупнее зубец, тем больше вероятность возникновения локального насыщения стали вала.

Распределение индукции в постоянном магните, средняя рабочая точка постоянного магнита. В рассматриваемом МЖГ используется самарий-кобальтовый магнит марки КС-37. Кри-

вая размагничивания магнита выглядит в виде прямой (рис. 7). Если магнит мысленно разбить на множество отдельных элементов, то каждый элемент имеет свою рабочую точку.

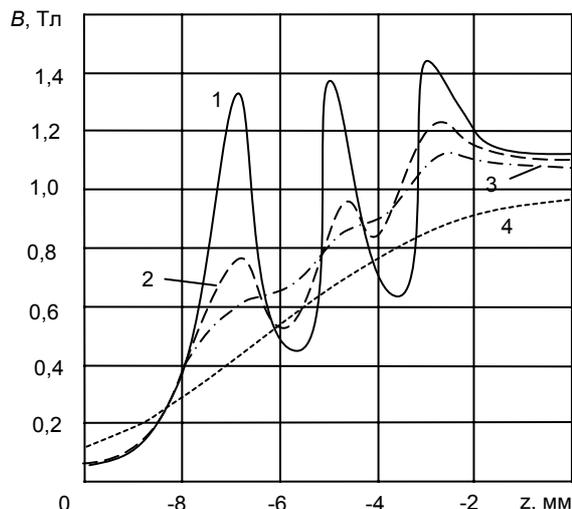


Рис. 6. Распределение индукции в коаксиальном сечении на глубине Δ от поверхности вала: 1 – $\Delta = 0,1$ мм; 2 – $\Delta = 0,5$ мм; 3 – $\Delta = 1$ мм; 4 – $\Delta = 3$ мм

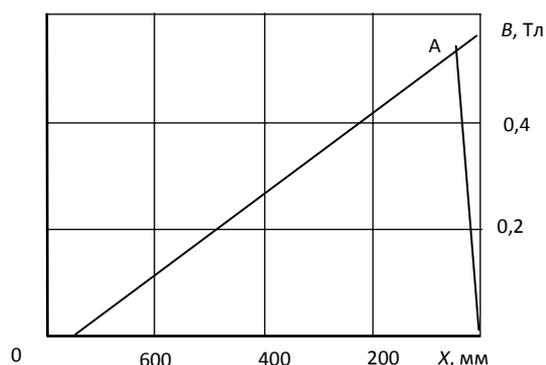


Рис. 7. Средняя рабочая точка постоянного магнита

На рис. 8 показано распределение индукции в нейтральном сечении магнита (кривая 1) и около его торцевой поверхности (кривая 2).

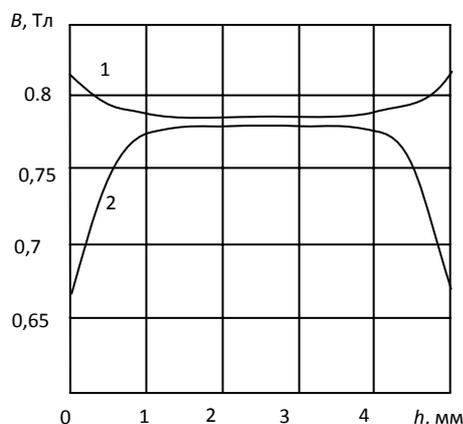


Рис. 8. Распределение индукции в магните: 1 – в нейтральном сечении; 2 – вдоль торцевой поверхности

Распределение индукции в магните имеет сложный характер. Если взять усредненную рабочую точку магнита А (рис. 7), то можно сделать вывод, что данная магнитная система не позволяет магниту отдавать максимум магнитной энергии. Магнитные системы МЖГ для магнитных валов близки к короткозамкнутым системам. Стандартные магниты, выпускаемые промышленностью, для МЖГ не подходят, здесь требуются магниты с иными геометрическими соотношениями.

Магнитное состояние магнитной жидкости в зазоре. Диапазон намагниченности магнитных жидкостей, применяемых в герметизаторах, лежит в пределах $M_s = 20\text{--}60$ кА/м [3–5]. Выбор типа жидкости и ее намагниченности определяется условиями работы герметизатора – уплотняемой средой, скоростью вращения вала, внешними воздействиями и т.д. [6]. В рассматриваемом МЖГ используется жидкость с намагниченностью насыщения $M_s = 40$ кА/м¹. Напряженность поля в рабочем зазоре герметизатора изменяется от 200 до 1600 кА/м, жидкость находится в состоянии насыщения. На рис. 9 показано, как меняется проницаемость жидкости, находящейся в магнито-жидкостной пробке под зубцом, от одной свободной поверхности пробки, расположенной в зоне максимальной напряженности поля, до второй свободной поверхности, расположенной на границе зубцов. Если на поверхности магнито-жидкостной пробки, лежащей со стороны низкого давления, магнитная проницаемость составляет 1,16, то в зоне максимальной напряженности со стороны высокого давления она снижается до 1,02. Приведенные цифры показывают, что проводимость рабочего зазора герметизатора при введении в зазор магнитной жидкости меняется незначительно.

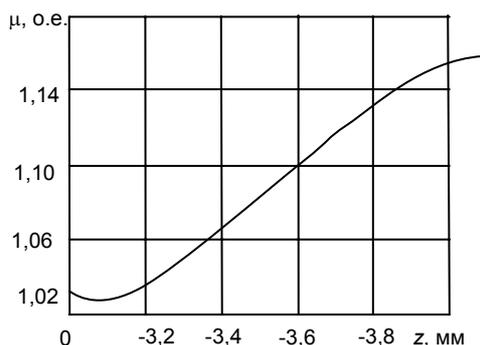


Рис. 9. Распределение относительной магнитной проницаемости магнитной жидкости, находящейся в рабочем зазоре

Результаты эксперимента математического моделирования герметизатора с магнитной жидкостью и без нее показали, что проводимость рабочего зазора для рассматриваемого уплотнения

при введении магнитной жидкости увеличивается на 4 %. Можно предположить, что при использовании МЖ с намагниченностью 20 кА/м проводимость зазора изменится примерно на 2 %, а при использовании МЖ с намагниченностью 60 кА/м – на 6 %. Требуется ли учитывать присутствие магнитной жидкости в рабочем зазоре герметизатора при его проектировании, зависит от поставленной задачи. На стадии предварительных расчетов ее присутствие можно не учитывать, на конечном этапе учитывать необходимо, так как присутствие магнитной жидкости в зазоре перераспределяет магнитный поток в вершине зубца и изменяет уровень насыщения отдельных участков стали, что сказывается на напряженности поля в зазоре и, следовательно, на удерживаемом перепаде давлений.

Заключение

Таким образом, моделирование магнитного поля МЖГ классической конструкции позволило выявить основные закономерности распределения индукции в элементах его магнитной системы. Наиболее нагруженными участками являются зубцы, особенно вершины зубцов, и области вала, лежащие напротив вершин зубцов. Магнитная жидкость в зазоре находится в состоянии насыщения и незначительно влияет на его проводимость. В то же время введение жидкости в зазор перераспределяет индукцию в вершине зубца. Стандартные постоянные магниты, выпускаемые промышленностью, не позволяют магниту отдавать максимум магнитной энергии, для МЖГ требуются магниты с иными геометрическими соотношениями.

Список литературы

1. **Перминов С.М., Казаков Ю.Б.** Исследование магнитного поля магнито-жидкостного герметизатора классической конструкции методом конечных элементов // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1.
2. **Перминов С.М., Полетаев В.А., Пахолкова Т.А.** Исследование магнитного поля рабочего зазора магнито-жидкостного герметизатора классической конструкции // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 5. – С. 42–45.
3. **Орлов Д.В., Перминов С.М., Страдомский Ю.И., Трофименко М.И.** Исследование магнитных характеристик ферромагнитных жидкостей: мат-лы Всесоюз. семинара по проблемам намагничивающихся жидкостей. – М.: МГУ, 1979. – С. 50–51.
4. **Патент** на изобретение РФ, МПК G 01R 33/12. Способ и устройство для измерения намагниченности жидкого вещества, в частности, магнитной жидкости / С.М. Перминов, А.С. Перминова. – № 2402032; Б.И. №29; 2010.
5. **Перминов С.М.** Разработка способа, устройства и методики измерения намагниченности нанодисперсной магнитной жидкости // Вестник ИГЭУ. – 2009. – № 3. – С. 54–57.
6. **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.

References

1. Perminov, S.M., Kazakov, Yu.B. Issledovanie magnitnogo polya magnitozhidkostnogo germetizatora klassicheskoy

¹ Магнитные жидкости. www/ispu.ru – Сайт Проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики ИГЭУ.

konstruktsii metodom konechnykh elementov [Research of the Magnetic Field of Classical Magneto-Liquid Sealer by Means of Finite-Element Method]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 1.

2. Perminov, S.M., Poletaev, V.A., Pakholkova, T.A. Issledovanie magnitnogo polya rabocheho zazora magnitnozhidkostono germetizatora klassicheskoy konstruktsii [Research of the Magnetic Field of the Working gap of classical Magneto-Liquid Sealer]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 42–45.

3. Orlov, D.V., Perminov, S.M., Stradomskiy, Yu.I., Trofimenko, M.I. Issledovanie magnitnykh kharakteristik ferromagnitnykh zhidkostey [Research of Magnetic Characteristics of Ferromagnetic Liquids]. *Materialy Vsesoyuznogo seminara po problemam namagnichivayushchikhsya zhidkostey* [Materials of All Soviet Union Seminar on the Problems of Magnetized Liquids]. Moscow, MGU, 1979, pp. 50–51.

4. Perminov, S.M., Perminova, A.S. *Sposob i ustroystvo dlya izmereniya namagnichennosti zhidkogo veshchestva, v chastnosti, magnitnoy zhidkosti* [Method and Device for Measuring the Magnetization of Liquid Substances, in particular, the Magnetic Liquid]. Patent RF, no. 2402032, 2010.

5. Perminov, S.M. Razrabotka sposoba, ustroystva i metodiki izmereniya namagnichennosti nanodispersnoy magnitnoy zhidkosti [Development of the Method, Device and Measuring Method of Magnetization of Nano-dispersed Magnetic Liquid]. *Vestnik IGEU*, 2009, issue 3, pp. 54–57.

6. Kazakov, Yu. B., Morozov, N.A., Stradomskiy, Yu.I., Perminov, S.M. *Germetizatory na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey i ikh modelirovanie* [Sealers based on Nano-dispersed Magnetic Liquids and their Simulation]. Ivanovo, 2010. 184 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) 38-57-98,
e-mail: psm@upm.ispu.ru