

Исследование магнитного поля рабочего зазора магнито­жидкостного герметизатора классической конструкции

В.А. Полетаев, д-р техн. наук, С.М. Перминов, канд. техн. наук, Т.А. Пахолкова, соиск., А.С. Перминова, студ.

С помощью метода конечных элементов исследуется магнитное поле рабочего зазора магнито­жидкостного герметизатора. Показано распределение напряженности поля вдоль поверхности магнито­проводящего вала, отвечающего за максимальную удерживающую способность рабочего зазора. Обна­ружены всплески напряженности поля около кромок зубцов, определены границы зон повышенной на­пряженности поля.

Ключевые слова: магнито­жидкостный герметизатор, магнитное поле, распределение напряженности в ра­бочем зазоре.

Researching Magnetic Field of Working Gap in Magnetic Fluid Seal of Classic Design

V.A. Poletayev, Doctor of Engineering, S.M. Perminov, Candidate of Engineering, T.A. Pakholkova, Applicant, A.S. Perminova, Student

The authors research the magnetic fluid of working gap in a magnetic fluid seal with the usage of the finite element method. The strength distribution of the electric field along the surface of the magnetically conductive shaft responsible for a maximum holding capacity of the gap is demonstrated. Splashes of electric field strength near the teeth edges are revealed, the boundaries of zones of high field strength are determined.

Key words: magnetic fluid seal, magnetic field, strength distribution in the gap.

Основные характеристики магнито­жидкостного герметизатора (МЖГ) определяются параметрами магнитного поля в рабочем зазоре. В МЖГ традиционной конструкции рабочий зазор образован обращенными друг к другу поверхностями полюсной приставки и вала (рис. 1).

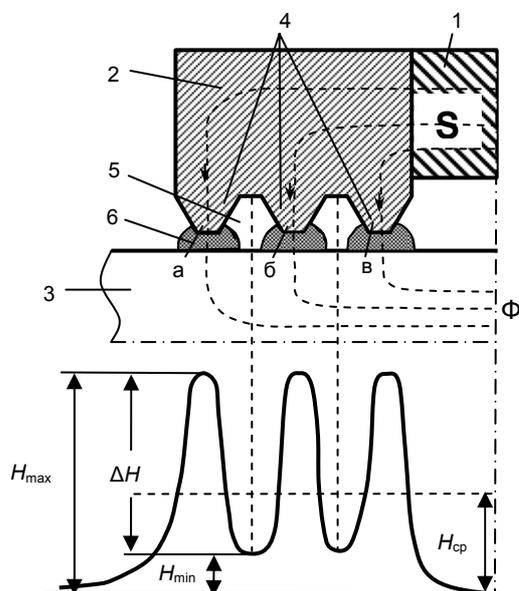


Рис. 1. Распределение напряженности в зазоре

Полюсная приставка и вал выполнены из магнито­мягкого материала, что позволяет, меняя форму их поверхности, влиять на магнитное поле в зазоре. Обычно на поверхности полюсных приставок или вала выполняют последовательно расположенные зубцы одинаковой формы

(рис. 1, а, б, в), которые создают в зазоре резко неоднородное поле с волнообразной формой распределения напряженности поля [1].

Как правило, рабочие зазоры МЖГ лежат в пределах 0,05–0,1 мм. Чем ниже величина зазора, тем меньше габариты герметизатора, спроектированного на заданные параметры. Уменьшение зазора ниже указанного в диапазоне затруднено по технологическим причинам. Точность существующего на сегодняшний день технологического оборудования не позволяет обеспечить приемлемый эксцентриситет вала относительно полюсных приставок. Малая величина зазора долгое время была камнем преткновения на пути исследования магнитного поля рабочего зазора МЖГ. Существующее приборное оборудование не позволяет экспериментально исследовать магнитное поле непосредственно в зазоре герметизатора [2]. Исследование закономерностей распределения поля на физических моделях увеличенного зазора по времени и финансово очень затратно, если учесть, что геометрия рабочей зоны определяется 5–6-ю геометрическими параметрами и магнитными свойствами материалов деталей, образующих зазор [3]. Единственно реальным способом исследования магнитного поля в зазоре МЖГ является способ математического моделирования. За последнее десятилетие методы математического моделирования сделали большой скачок в развитии, не только в возможности работы с большими массивами данных и точности расчета, но и с точки зрения технологичности и быстроты ввода исходных данных, удобства представления и обработки полученных результатов. Это позволяет

провести исследование МЖГ на качественно новом уровне [4].

Рассмотрим более подробно магнитное поле в зазоре, в котором поверхность вала выполнена гладкой, а на поверхности полюсной приставки расположен ряд симметричных трапециевидальных зубцов размерами: $\delta = 0,1$ мм, $b/\delta = 30$, $t_1/\delta = 3$, $t_2/\delta = 6$, $\alpha = \beta = 60^\circ$ (рис. 2).

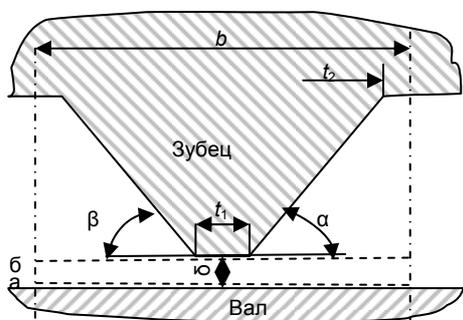


Рис. 2. Расчетная область

Так как все зубцы на полюсной приставке имеют одну и ту же геометрию, то и распределение магнитного поля в зазоре под ними будет одинаковым. Поэтому достаточно рассмотреть магнитное поле под одним из них. Выбираем средний зубец (рис. 1, зубец б).

Расчетная область справа и слева ограничивается границами зубцового деления, нижняя граница проводится на расстоянии 10δ от поверхности вала, а верхняя – на расстоянии 5δ от основания зубца.

Магнитное поле рассчитывалось методом конечных элементов, который позволяет учесть нелинейность магнитных свойств используемых сред и достаточно точно воспроизвести границы раздела сред. Использовалась мелкая расчетная сетка, состоящая из 350000 элементов.

На рис. 3 представлен фрагмент расчетной сетки в зазоре.

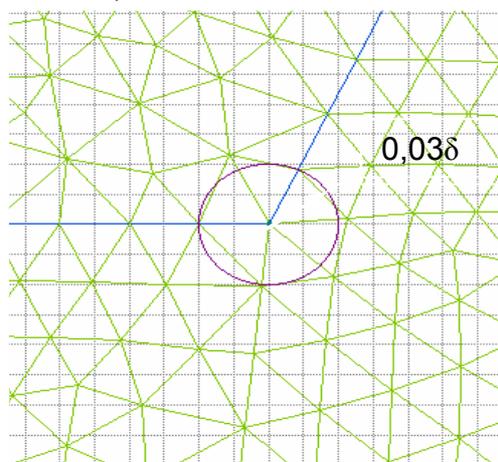


Рис. 3. Элемент расчетной сетки

Площадка зубца длиной 0,3 мм разбивалась на 100 делений, соответствующих сторонам

элементов сетки. Мелкая расчетная сетка позволяет обеспечить более высокую точность расчета и получить подробную информацию о параметрах поля в расчетной области.

На рис. 4, а показано распределение индукции вдоль зазора на расстоянии $0,001$ мм ($0,01\delta$) от поверхности вала.

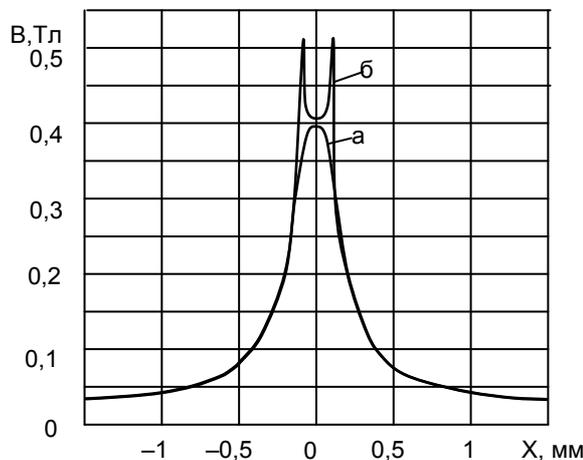


Рис. 4. Распределение индукции в зазоре: а – на расстоянии $0,01\delta$ от поверхности вала; б – на расстоянии $0,9\delta$ от поверхности вала

Средняя индукция в зазоре задавалась равной $0,1$ Тл. По сравнению с равномерным зазором (когда поверхности полюсной приставки и вала гладкие), зубцы позволили значительным образом перераспределить индукцию в зазоре. Индукция плавно возрастает от $B_{\min} = 0,03$ Тл на границе зубцовых делений до максимального значения под кромкой зубца $B_{\max} = 0,39$ Тл и плавно убывает при движении к следующей границе.

Максимальное значение индукции превышает минимальное в 13 раз. Если посмотреть на распределение индукции в сечении, проходящем вблизи поверхности зубца, то можно обнаружить, что оно практически совпадает с предыдущим в областях расположения межзубцовых границ и существенно отличается по форме в зоне минимального зазора.

Кривая распределения индукции меняет свой плавный закругленный вид на седлообразный с двумя острыми пиками. Пики расположены напротив кромок зубца, а низшая точка седлообразной кривой – напротив середины площадки t_1 на зубце. Под кромкой зубца понимается пересечение площадки t_1 и боковой образующей зубца. Для более детального изучения магнитного поля в области минимального зазора зазор был просканирован параллельными сечениями, расположенными на различном удалении от поверхности вала. Было обнаружено, что характер распределения индукции в различных сечениях (рис. 5) меняется постепенно, от вала к зубцу.

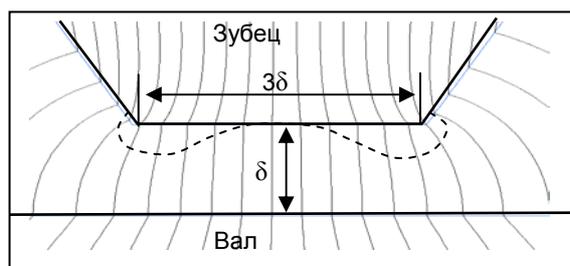


Рис. 5. Геометрия расчетной области и линии магнитного потока

Первое, что можно отметить, индукция на линии симметрии зубца при перемещении от вала к зубцу возрастает. Для рассматриваемой геометрии зубца и заданной средней индукции изменение составляет около 4,5 %. Эта особенность объясняется тем, что линии поля, сконцентрированные зубцом, в зазоре при удалении от зубца рассредоточиваются, что можно наблюдать на рис. 6.

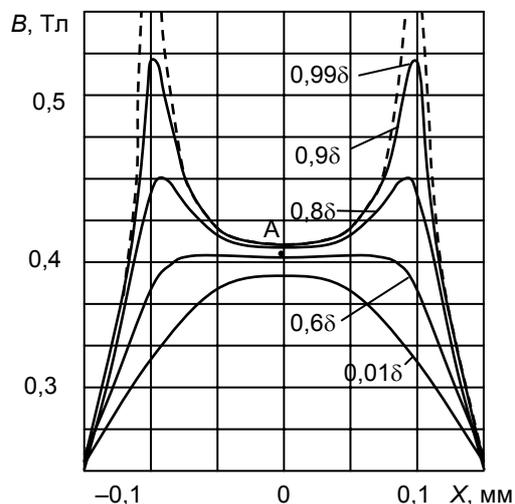


Рис. 6. Распределение индукции в сечениях зазора

Второе, характер распределения индукции вдоль зазора меняется. В сечениях, близких к поверхности зубца, на пике кривой распределения индукции начинают формироваться две локальные выпуклости, расположенные напротив кромок зубца, которые при приближении к зубцу приобретают ярко выраженный характер (рис. 5). Назовем эти выпуклости условно «кромочными горбами». Исследования показали, что с приближением к поверхности зубца высота горбов возрастает. Так, если рассматривать поле в сечении на расстоя-

нии $0,1\delta$ от поверхности полюса, то экстремальное значение индукции на горбе отличается от значения индукции в центре в 1,27 раза. В непосредственной близости к кромке зубца ($0,01\delta$) индукция в зазоре может отличаться от индукции напротив центра зубца в разы. Так, в нашем примере на расстоянии одного микрона от кромки разница индукций составляет 2,2 раза.

Оценим размер данных зон. В рассматриваемом варианте формирование горбов начинается с сечения, отстоящего на $0,4\delta$ от поверхности зубца. Чем ближе к поверхности зубца, тем выше пики индукции и неоднородность поля. Взяв за точку отсчета значение индукции на поверхности зубца в центре площадки t_1 , определяем границы зоны в зазоре, где индукция превышает это предельное значение. На рис. 6 пунктирной линией показаны найденные границы зоны. Размер зон соответствует принятым исходным параметрам рассматриваемого случая. Очевидно, что эти границы будут меняться в зависимости от геометрии зубца, магнитных свойств стали полюса и вала, величины проходящего через зубец магнитного потока.

Таким образом, исследование магнитного поля в рабочем зазоре МЖГ позволило получить подробную информацию о характере распределения параметров поля в зазоре в пределах зубцового деления, выявить зоны повышенной напряженности магнитного поля около кромок зубца, определить форму и размеры их границ, показать характер распределения напряженности в этих зонах.

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. **Большакова И.А., Перминов С.М., Русакова Н.Н.** Измерительное оборудование для магнитоожидкостных систем герметизации на основе миниатюрных датчиков Холла // Мат-лы XIV Междунар. конф. по магнитной гидродинамике. – Латвия, Саласпилс. – 1995.
3. **Страдомский Ю.И., Перминов С.М., Борисов С.С.** Исследование рабочей зоны магнитоожидкостного уплотнения // Мат-лы III Всесоюз. школы-семинара по магнитным жидкостям. – М.: МГУ, 1983. – С. 239–240.
4. **Перминов С.М.** Исследование магнитного поля рабочего зазора магнитоожидкостного герметизатора: сб. науч. тр. XIV Междунар. Плесской конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям, Россия, Плес, 2010. – Иваново, 2010. – С. 385–394.

Полетаев Владимир Алексеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-72,
e-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Перминов Сергей Михайлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, докторант кафедры электромеханики, заведующий проблемной научно-исследовательской лабораторией прикладной феррогидродинамики,
телефон (4932) 38-57-98,
e-mail: psm@upm.ispu.ru

Пахолкова Татьяна Александровна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
соискатель кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-73,
e-mail: tanyrah@mail.ru

Перминова Анастасия Сергеевна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент,
телефон (4932) 38-57-98.