МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

11, ноябрь 2015

УДК 621.793.72

Сравнение распределений магнитного поля в магнетронных распылительных системах, полученных различными методами расчета

Клюева В.А., студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Плазменные энергетические установки»

Научный руководитель: Духопельников Д.В., к.т.н, доцент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Плазменные энергетические установки» <u>duh@power.bmstu.ru</u>

Введение

Одним из самых распространенных методов нанесения покрытий, широко используемых в микроэлектронике, оптике и машиностроении, является магнетронное распыление [1]. В его основе лежит принцип катодного распыления мишени ионами рабочего газа. Разряд в магнетронной распылительной системе (МРС) горит в неоднородных скрещенных электрических и магнитных полях, локализованных у поверхности распыляемой мишени. Метод магнетронного распыления позволяет наносить покрытия практически из любых проводящих материалов и сплавов, а также некоторых диэлектриков [2]. Толщина покрытий может быть от нескольких нанометров до нескольких десятков микрометров. Преимуществом магнетронных распылительных систем являются высокие скорости осаждения покрытия и низкие тепловые нагрузки на подложки [3].

МРС эффективно функционируют при значениях составляющей магнитного поля, параллельной поверхности мишени, равных $B_0 = 0,03...0,1$ Тл [3]. Знание зависимости распределения индукции поля B(x) по высоты x над срезом магнитопровода дает возможность оценить допустимую толщину катода, при которой величина индукции магнитного поля будет иметь необходимое для стабильной работы значение.

Ранее для расчета магнитных систем электрических двигателей и электромагнитов было разработано много инженерных методов. Например, в методе вероятных путей потока используется представление о наиболее вероятной структуре магнитного поля в зазоре и аппроксимация ее простыми фигурами, магнитную проводимость которых легко определить [4]. Следует заметить, что в электрических двигателях и электромагнитах

зазоры в магнитных цепях имеют небольшую, по сравнению с размерами магнитопровода, величину, что значительно упрощает расчеты.

В магнитных системах МРС для определения магнитного поля в пространстве выше среза магнитопровода метод вероятных путей потока непригоден и приходится использовать другие методы расчета магнитного поля. Одним из таких методов является метод вторичных источников [5, 6]. На границе раздела воздух-ферромагнетик вводится слой магнитных зарядов (диполей), поверхностная плотность которых обеспечивает выполнение граничных условий на разделе воздух-ферромагнетик, удовлетворяющих уравнениям Максвелла. По полученному распределению источников магнитного поля вычисляется потенциал магнитного поля и величина индукции магнитного поля в любой точке воздушного зазора.

В настоящее время для расчета распределения индукции магнитного поля, как правило, применяется метод конечных элементов [7], реализованный в современных программных пакетах *ANSYS, ELCUT*. Тем не менее, инженерная практика требует простого аналитического выражения, позволяющего сделать оценочный расчет для предварительного проектирования магнитной системы, определения габаритов магнитопровода и намагничивающей силы.

В работе [8] была получена зависимость распределения индукции магнитного поля над срезом магнитопровода от высоты *x*:

$$B_r(x) = B_0 exp\left(-\frac{2K_B x}{L}\right), \quad (1)$$

где *B*₀ - индукция магнитного поля на срезе магнитопровода; *L* - зазор между полюсами магнитопровода; *K*_B - поправочный коэффициент, зависящий от отношения длины внешней кромки магнитного зазора к длине его внутренней кромки.

Значение К_В определяется по формуле:

$$K_B = 1,1 + 0,25 \frac{L_{GH}}{L_{GHymp}},$$
 (2)

где *L*_{вн} - длина внешней кромки зазора магнитопровода; *L*_{внутр} - длина внутренней кромки зазора магнитопровода.

Поправочный коэффициент K_B был получен при анализе экспериментальных данных и учитывает отклонение действительного значения индукции от значения, полученного из выражения (1).

Эмпирический характер зависимости (2), а также ограниченное число магнитопроводов, для которых проводились измерения магнитного поля, требуют проверки выражения (1) в более широком диапазоне размеров магнитопроводов.

В работе была сравнивались результаты, полученные при помощи зависимости (1), со значениями индукции магнитного поля, полученных методом конечных элементов, реализованного в программе *Infolityca MagNet v*.7.1. Расчет проводился для магнитопроводов разной конфигурации и при различных значениях намагничивающей силы. За основу взяты реальные конструкции, для которых проводились измерения магнитного поля для уточнения значения поправочного коэффициента K_B . Результаты расчета сравнивались со значениями, полученными при помощи зависимости (1).

Расчет

Пример расчетной схемы магнитопровода приведен на рисунке 1. Для проведения расчета необходимо знать геометрические характеристики магнитопровода, а именно: диаметр внешней кромки магнитопровода D_{6H} ; диаметр внутренней кромки магнитопровода D_{6Hymp} . Зная величину диаметров кромок, можем определить длину зазора магнитопровода L, а также длины внешней L_{6H} и внутренней L_{6Hymp} кромок магнитопровода и их отношение L_{6H}/L_{6Hymp} . Помимо геометрических характеристик требуется знать величину намагничивающей силы ωI , выражаемой в ампер-витках.



Рис. 1. Расчетная схема магнитопровода: *L* - зазор между полюсами магнитопровода; *L*_{6н} - длина внешней кромки зазора магнитопровода; *L*_{6нутр} - длина внутренней кромки зазора магнитопровода, *D*_{6н} - диаметр внешней кромки магнитопровода; *D*_{6нутр} диаметр внутренней кромки магнитопровода; *x* - высота над срезом магнитопровода, *r* – расстояние от оси *Ox* (радиус)

Кривая намагничивания для материала магнитопровода (Сталь 3), взятая из программного пакета *Infolityca MagNet v*.7.1, приведена на рисунке 2. Для расчета было взято количество ампер-витков, обеспечивающее не насыщенное состояние магнитопровода.



Рис.2. Кривая намагничивания для Стали 3

В плоскости, параллельной поверхности среза магнитопровода на высоте x_i , определялось распределение $B_r(x)$ по радиусу магнитопровода (рис. 3). За начало координат принималась точка, лежащая на внешней кромке центрального полюса на срезе магнитопровода (рис.4,5). Схема расположения точек с максимальным значением измерения составляющей $B_r(x)$ показана там же. На каждой фиксированной высоте x_i выделялась точка, в которой радиальная составляющая индукции магнитного поля принимала максимальное значение $B_{rmax}(x_i)$. Зависимость радиальной составляющей индукции магнитного поля от высоты строилась по максимальным значениям $B_{rmax}(x_i)$.



Рис. 3. Схема распределения составляющей магнитной индукции *B_r*(*x*) по радиусу магнитопровода *r* на различных высотах *x_i*, *r_i* – радиус, на котором радиальная составляющая индукции магнитного поля принимает максимальное значение *B_{rmax}*(*x_i*)



Рис. 4. Схема расположения точек измерения составляющей $B_r(x)$. Точки соответствующих максимальным значениям составляющей $B_{rmax}(x_i)$ на высоте x_i



Рис. 5. Схема расположения точек измерения составляющей $B_r(x)$ в программе Infolityca MagNet v.7.1

Параметры магнитопровода	№ 1	№ 2	№ 3	Nº 4	Nº 5	Nº 6	Nº 7	Nº 8	<u>№</u> 9
Длина зазора магнитопровода, мм	10	10	10	20	20	20	30	30	30
Диаметр внутренней кромки магнитопровода <i>D_{внутр}</i> , мм	15	30	45	15	30	45	15	30	45
Диаметр внешней кромки магнитопровода $D_{_{6H}}$, мм	35	50	65	55	70	85	75	90	105
Отношение длин кромок, <i>L</i> _{вн} / <i>L</i> _{внутр}	2,3	1,67	1,44	3,66	2,33	1,88	5	3	2,33

Расчет проводился для магнитных систем с параметрами, указанными в таблице

Обсуждение. На рис. 5 показаны зависимости $B_r(x)$, полученные расчетом магнитного поля в программном пакете *Infolityca MagNet v*.7.1 и из выражения (1). Изменение намагничивающей силы влияет только на абсолютное значение индукции магнитного поля. При этом конфигурация магнитного поля остается неизменной, поэтому характер спада радиальной составляющей индукции магнитного поля остается постоянным при различном количестве ампер-витков. Для наглядности графические изображения зависимости $B_r(x)$ строятся для безразмерной величины $\widetilde{B_r}(x)$, которая определяется по формуле:

$$\widetilde{B_r}(x) = \frac{B_{rmax}(x)}{B_{rmax}(0)}.$$
(3)

Использование безразмерной величины $\widetilde{B_r}(x)$ упрощает анализ результатов, так как соотношение (3) остается постоянным для любого магнитопровода вне зависимости от намагничиващей силы.















Рис. 5. Распределение радиальной составляющей индукции магнитного поля по высоте над срезом магнитопровода:1 - $B_r(x)(MagNet)$; 2 - $B_r(x)$ (соотношение (1)). a) L=10 мм, L_{eH}/L_{eHymp} =2,3; б) L=10 мм, L_{eH}/L_{eHymp} =1,67; в) L=10 мм, L_{eH}/L_{eHymp} =1,44; г) L=20 мм, L_{eH}/L_{eHymp} =3,66; д) L=20 мм, L_{eH}/L_{eHymp} =2,33; е) L=20 мм, L_{eH}/L_{eHymp} =1,88; ж) L=30 мм, L_{eH}/L_{eHymp} =5; з) L=30 мм, L_{eH}/L_{eHymp} =3; и) L=30 мм, L_{eH}/L_{eHymp} =2,33

Очевидно, что расчет методом конечных элементов дает систематически завышенные результаты по сравнению с выражением (1). Подобное расхождение результатов может быть объяснено ошибкой расчета или неточностью измерений, проведенных в работе (8) для определения коэффициента K_B .

Аналитическая зависимость (1) дает незначительное отклонение результатов от значений, рассчитанных методом конечных элементов, для точек, находящихся на малых расстояниях от среза магнитопровода. При удалении от магнитопровода расхождение результатов становится более значительным, что можно объяснить большей погрешностью измерений, совершенных в работе (8), в точках, удаленных от среза магнитопровода на 10 мм.

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038, ISSN 2307-0609

Спад значения радиальной составляющей индукции магнитного поля в пространстве носит экспоненциальный характер. При удалении от магнитной системы радиальная составляющая индукции значительно снижается. Значение $B_r(x)$ на расстоянии 10 мм уменьшается в 3 раза по отношению к значению радиальной составляющей индукции на срезе магнитопровода. На скорость падения значения $B_r(x)$ непосредственно влияет длина воздушного зазора между полюсами магнитопровода L: для магнитопроводов с большим значением L характерен более медленный спад $B_r(x)$ в пространстве.

На расхождение результатов, полученных методом конечных элементов и из аналитической зависимости (1), оказывает влияние геометрические характеристики магнитопроводов. При одинаковой длине зазора магнитопровода *L* увеличение отношения длин кромок *L*_{eH}/*L*_{eHymp} приводит к уменьшению отклонения результатов.

Выводы

Полученные результаты показывают, что спад $B_r(x)$ по мере удаления от среза магнитопровода является экспоненциальным и зависит от ширины магнитопроводов и соотношении длины внешних и внутренних кромок магнитопровода.

Выражение (1) применимо для оценки распределения значений индукции магнитного поля $B_r(x)$. При этом программный пакет *Infolityca MagNet v.*7.1 дает систематически завышенные результаты при малых межполюсных размерах магнитопроводов, что может быть связано с неточностью кривой намагничивания материала, с неточностью метода или с ошибкой в измерениях индукции магнитного поля, выполненных в работе [8]. По мере удаления от среза магнитопровода отклонения становятся существенными.

Результаты расчета, проведенные методом конечных элементов, требуют верификации, которую нужно производить на реальных моделях магнитопроводов.

Список литературы

- 1. Кузмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. В 2 ч. Ч.1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.
- 2. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Кириллов Д.В. Трибологические свойства серебряных покрытий, полученных методом магнетронного распыления // Наноинженерия. 2014. № 9 (39). С. 30-32.

- Духопельников Д. В. Магнетронные распылительные системы: учебное пособие. В 2 ч.
 Ч.1. устройство, принципы работы, применение. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 53 с.
- 4. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. М.: Энергия, 1972. 248 с.
- 5. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975. 296 с.
- 6. Никитенко А.Г., Гринчеков В. П., Иванченко А.Н. Программирование и применение ЭВМ в расчетах электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1990. 232 с.
- Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с., ил. [Richard H. Gallagher. Finite elements analysis. Fundamentals. New Jersy: Prentice-Hall, 1975.].
- Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы с электромагнитами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 202 с.