

РАСЧЕТ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОМПЛЕКТНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Байда Е.И., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"

тел./факс (0572) 40-08-55, E-mail: baida@kpi.kharkov.ua

Розглянута математична модель розрахунку квазістационарного електромагнітного поля КРП в спрощеному варіанті. Отримані залежності модуля магнітної індукції та платності вихрових струмів від товщини стінки шафи та матеріалу.

Рассмотрена математическая модель расчета квазистационарного электромагнитного поля КРУ в упрощенном варианте. Получены зависимости модуля магнитной индукции и плотности вихревых токов от толщины стенки шкафа и материала.

В настоящее время большое внимание уделяется электромагнитной совместимости различных электротехнических устройств, уменьшению электромагнитных шумов, а так же вопросам компенсации внешнего электромагнитного поля.

Данной тематике посвящено много статей, в которых данные вопросы подробно рассматриваются с точки зрения теории, однако, конкретным расчетам таких полей внимания уделено недостаточно. Это можно объяснить сложностью таких расчетов даже при достаточно простых геометрических формах областей с током и самого шкафа. Целью данной статьи является расчет электромагнитного поля КРУ в упрощенном, по сравнению с реальным устройством варианте. Для этого необходимо:

- записать расчетные соотношения электромагнитного поля;
- определить допущения и упрощения, принимаемые при решении задачи;
- записать расчетные уравнения в соответствии с принятыми допущениями;
- провести соответствующие расчеты.

В общем виде уравнения электромагнитного поля без учета токов смещения в неподвижной среде:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta}; \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

где \vec{H} - вектор напряженности магнитного поля; $\vec{\delta}$ - суммарная плотность тока; \vec{E} - напряженность электрического поля; \vec{B} - вектор магнитной индукции.

При расчетах электромагнитных полей удобней воспользоваться векторным магнитным потенциалом, определяемым как:

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \quad (2)$$

где \vec{A} - векторный магнитный потенциал, для однозначности которого вводится дополнительное условие $\operatorname{div} \vec{A} = 0$.

Перепишем уравнения (1) в следующем виде:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \vec{A} \right) = \vec{\delta}; \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \vec{A}) \quad (3)$$

Из второго уравнения системы (3) следует, что:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} \varphi = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{E}_{st} \quad (4)$$

где \vec{E}_{st} - сторонняя напряженность электрического поля.

Заменив плотность тока в первом уравнении (3) на напряженность электрического поля, получим:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \vec{A} \right) = -\gamma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\delta}_{st} \quad (5)$$

где $\vec{\delta}_{st}$ - сторонняя плотность тока от внешних источников.

Уравнение (5) является векторным уравнением и распадается на систему из 3^х уравнений. Если учесть, что связь между векторным магнитным потенциалом и магнитной проницаемостью нелинейная, то решение такого уравнения достаточно сложно. В этой связи введем следующие упрощения:

- шины в шкафу расположены перпендикулярно плоскости x-y;
- высота шкафа в направлении токоведущих шин достаточно велика и задачу можно рассматривать как плоскую;
- объекты, размещенные внутри шкафа, являются парамагнетиками;
- процесс рассматривается квазистационарный (установившейся режим синусоидального тока).
- тепловой режим считаем установившемся, т.е. проводимость и магнитная проницаемость от температуры не зависят.

В (5) не учитываем явление гистерезиса, проводя расчет по основной кривой намагничивания.

Следовательно, уравнение (5) описывает распределение магнитного потенциала, как в шкафу, так и в окружающем пространстве. Причем, вне токоведущих шин сторонняя плотность тока равна нулю. В каждой из шин сторонняя плотность тока представляет комплексную величину с учетом фазы. Проводимость в (5) постоянна и зависит от области, в которой происходит вычисление поля.

Расчет проводился для шкафа, внутренний размер которого 700 на 400 мм. Толщина стенок шкафа в начальном варианте 1 мм. Шкаф изготовлен из фер-

ромагнитного материала. Размеры токоведущих шин 150 на 8 мм. Максимальное значение тока каждой фазы 2500А, т.е., максимальная плотность тока в шине $\cong 2,1 \text{ А/мм}^2$. На рис.1 показан шкаф с токоведущими шинами, расположенными у задней стенки шкафа.

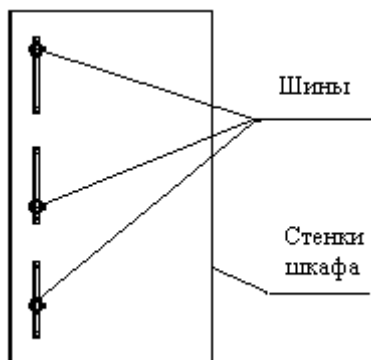


Рис.1. Расположение токоведущих шин внутри шкафа.

На рис. 2 приведен расчет магнитного поля внутри шкафа и распределение плотности тока в токоведущих шинах. Расчет проводился с использованием численных методов [1,2,3].

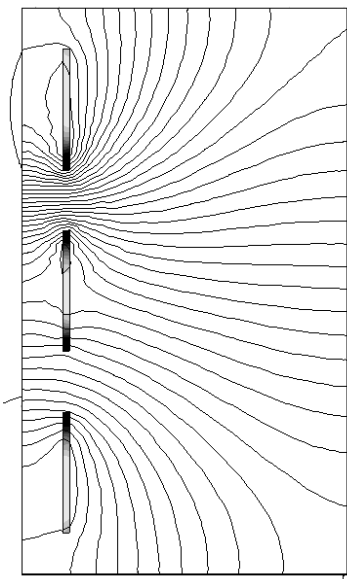


Рис.2. Распределение поля и плотности тока в токоведущих шинах.

Как следует из рис. 2, поле внутри шкафа достаточно неравномерно, а плотности тока в шинах изменяется по закону, показанному на рис. 3.

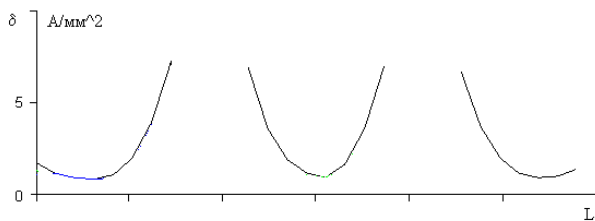


Рис.3. Распределение модуля плотности тока в токоведущих шинах.

Переменное магнитное поле наводит вихревые токи в стенке шкафа. Модуль плотности тока по толщине задней стенки шкафа (максимальная плотность на поверхности, обращенной к шинам) показана на рис. 4.

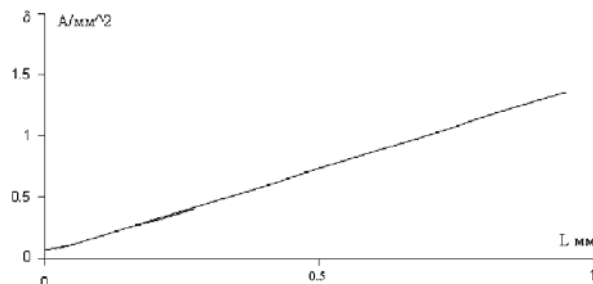


Рис.4. Модуль плотности тока в стенке шкафа при ее толщине 1 мм.

На передней стенке шкафа максимальное значение модуля плотности тока на порядок меньше и равно $0,2 \text{ А/мм}^2$.

Индукция магнитного поля максимальна в левых углах шкафа и достигает значения 1,6 Тл. Максимальная индукция в центре дальней от шин стенке шкафа равна 0,124 Тл. Интерес представляет значения модуля магнитной индукции, значение которой по периметру шкафа на расстоянии 10 см от поверхности приведено на рис. 5 (начало отсчета - левый нижний угол шкафа, направление обхода против часовой стрелки).

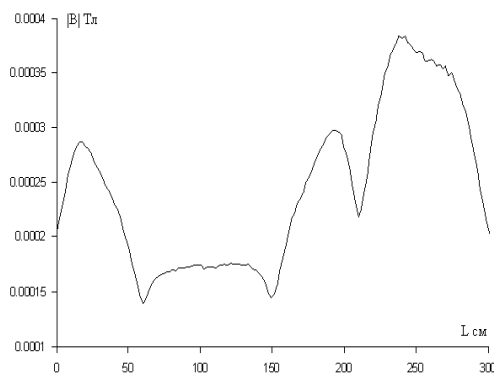


Рис.5. Значение магнитного поля по периметру шкафа на расстоянии 10 см от поверхности при толщине стенки 1 мм.

Уменьшение толщины стенки шкафа до 0,5 мм увеличивает максимальное значение индукции в стенке до 2 Тл.

Распределение индукции по периметру шкафа показано на рис. 6.

Нетрудно заметить, что происходит некоторое увеличение внешнего поля по сравнению с предыдущим случаем. Необходимо отметить, что увеличение толщины стенки до 5 мм так же увеличивает внешнее поле, рис. 7. Если увеличение значения внешнего поля при толщине стенки 0,5 мм связано с уменьшением экранирующего действия за счет резкого уменьшения магнитной проницаемости, то можно предположить, что увеличение внешнего поля при увеличении тол-

щины стенки связано с вихревыми токами в стенке шкафа, распределение которых показано на рис. 8.

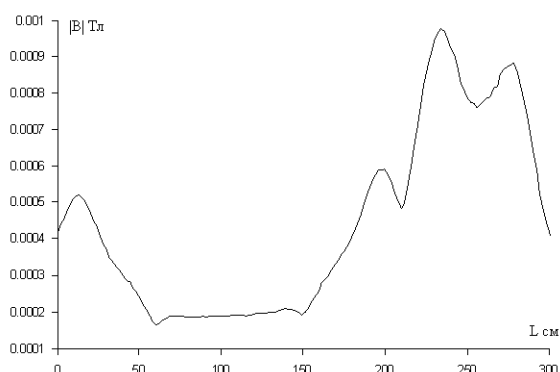


Рис.6. Значение магнитного поля по периметру шкафа на расстоянии 10 см от поверхности при толщине стенки 0.5 мм.

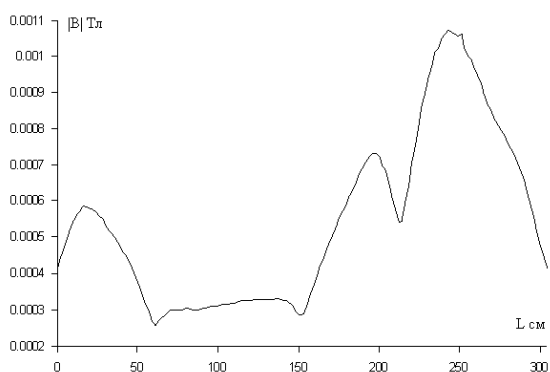


Рис.7. Значение магнитного поля по периметру шкафа на расстоянии 10 см от поверхности при толщине стенки 5 мм.

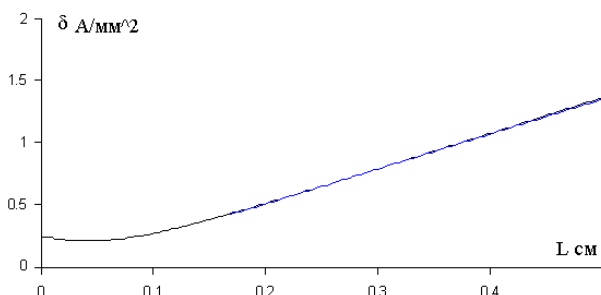


Рис.8. Модуль плотности тока стенке шкафа при ее толщине 5 мм.

Как следует из рис. 4 и рис. 8, значения и закон распределения плотностей тока в стенке практически одинаковы, однако, в более толстой стенке ток больший, чем и можно объяснить увеличение поля.

В результате проведенных расчетов можно предположить, что существует оптимальная, с точки зрения минимума внешнего поля толщина стенки шкафа.

Интерес представляет так же вопрос о характере уменьшения внешнего магнитного поля в зависимости от расстояния, которая для шкафа с толщиной стенки 0.5 мм показана на рис. 9.

В заключении необходимо отметить, что интенсивность поля на поверхности перед внешней стенкой шкафа, по расчетам, практически не зависит от толщины стенки (рис. 5-рис. 7, длина 50 – 150 см). Так же

необходимо отметить, что внешнее поле существенно зависит от удельного сопротивления стенки шкафа, так увеличение удельного сопротивления в 10 раз уменьшает внешнее поле и выравнивает его значения по периметру (см. рис. 10).

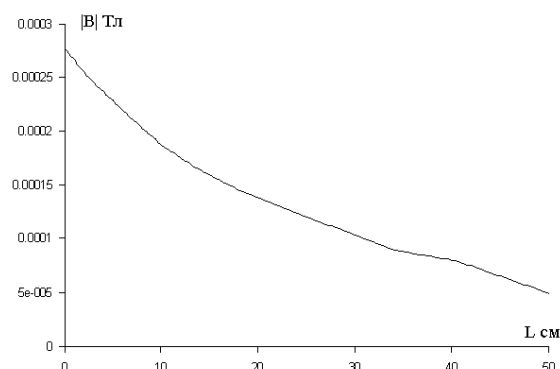


Рис.9. Изменения внешнего поля в зависимости от расстояния до стенки шкафа при толщине стенки 0.5 мм.

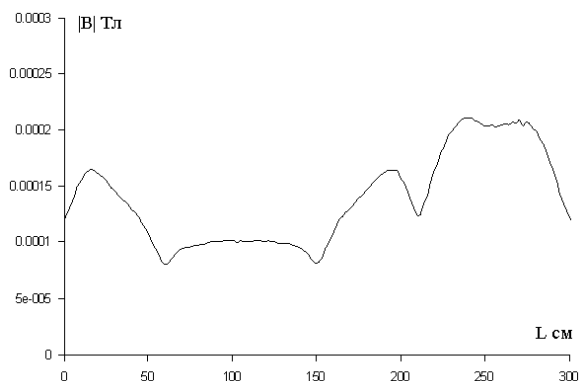


Рис.10. Значение магнитного поля по периметру шкафа на расстоянии 10 см от поверхности при толщине стенки 1 мм и увеличенном в 10 раз удельном сопротивлении материала шкафа.

Таким образом, данная математическая модель позволяет рассчитать электромагнитное поля КРУ, распределение плотности вихревых токов в проводниках и оценить влияние различных параметров конструкции на величину поля.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] П.Сильвестр, Р. Феррари. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. М.: «Мир», 1986. 229 с.
- [2] О.Зенкевич, К. Морган. Конечные элементы и аппроксимация. М.: «Мир», 1986. 381 с.
- [3] Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: «Наука», 1989. 432 с.

Поступила 26.03.04