

## Магнитное экранирование

В.А. Яромлович\*, Г. Шилагарди\*\*, В.И. Прокошин\*\*\*, А.П. Дραπεзо\*  
Л.Баярчимэг\*\*, Х.Цоохүү\*\*

\* Республика Беларусь, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», \*\*Монголия, Монгольский национальный университет, \*\*\* Республика Беларусь, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований

### I. ВВЕДЕНИЕ.

Магнитное экранирование или магнитная защита - защита объекта от негативного воздействия постоянных и переменных магнитных полей. Различают два вида экранирования: пассивное и активное.

Активная защита от помех осуществляется при помощи компенсирующих катушек, создающих магнитное поле, равное по величине и противоположное по направлению полю помехи. Алгебраически складываясь, эти поля компенсируют друг друга. Наиболее известны катушки Гельмгольца, представляющие собой две одинаковые соосные круговые катушки с током, раздвинутые на расстояние, равное радиусу катушек. Достаточно однородное магнитное поле создаётся в центре между ними. Для компенсации по трём пространственным компонентам необходимы минимум три пары катушек.

Пассивное экранирование постоянных и квазистатических магнитных полей осуществляется с помощью магнитомягких ферромагнитных экранов (лист, цилиндр, сфера или оболочка иной формы) из материала с высокой магнитной проницаемостью  $\mu_{\text{экp}}$  низкой остаточной индукцией  $B_r$  и малой коэрцитивной силой  $H_c$ . Принцип действия ферромагнитного экрана, например помещённого в однородное магнитное поле заключается в следующем. Линии индукции внешнего магнитного поля  $B_{\text{внеш}}$  при переходе из среды с  $\mu \ll \mu_{\text{экp}}$  в материал экрана заметно сгущаются, а внутри экрана густота линий индукции уменьшается, т. е. поле внутри оболочки  $B_{\text{внутр}}$  оказывается ослабленным. Ослабление поля характеризуется коэффициентом экранирования  $K = B_{\text{внеш}} / B_{\text{внутр}}$ . Кажущийся очевидным способ улучшения экранирования за счёт утолщения стенки экрана не оптимален. Эффективнее работают многослойные экраны с немагнитными промежутками между слоями. Именно многослойные экраны (внешние слои из магнитных материалов, насыщающихся при высоких значениях  $B_{\text{внеш}}$ , внутренние - из пермаллоя или мю-металла) составляют основу конструкций магнитозащищённых комнат для

биомагнитных, палеомагнитных и др. исследований. Следует отметить, что применение защитных материалов типа пермаллоя связано с рядом технологических трудностей, в частности с тем, что их магнитные свойства при деформациях и значительных нагревах ухудшаются, они практически не допускают сварки, значит изгибов и других механических нагрузок. В современных магнитных экранах широко применяются ферромагнитные металлические стёкла (метглассы), близкие по магнитным свойствам к пермаллою, но не столь чувствительные к механическим воздействиям.

Экраны из материала с высокой электропроводностью например Cu, Al и др. служат для защиты от переменных магнитных полей. При изменении внешнего магнитного поля в стенках экрана возникают индукционные токи, которые охватывают экранируемый объём. Магнитное поле этих токов направлено противоположно внешнему возмущению и частично компенсирует его. Для частот выше 1 Гц коэффициент экранировки  $K$  растёт пропорционально частоте  $f$  и электропроводности материала стенки  $\delta$ . Наиболее тяжело экранировать постоянное магнитное поле.

Магнитные экраны из Cu и Al менее эффективны, чем ферромагнитные, особенно в случае низкочастотного электромагнитного поля, но простота изготовления и невысокая стоимость часто делают их более предпочтительными в применении.

Существует важное отличие активной защиты от магнитных экранов. Магнитные экраны снижают электромагнитное поле во всём объёме, ограниченном экраном, в то время как активная защита устраняет его лишь в локальной области.

Уменьшение влияния магнитных полей в сильной степени определяет возможности проведения точных магнитных измерений. Внешние магнитные поля, например магнитное поле Земли или магнитные поля от электрических сетей и городского транспорта создают сильные помехи для работы высокочувствительной магнитометрической аппаратуры. Поэтому для калибровки

прецизионных магнитметров требуется использование «магниточистых» помещений. Поэтому в настоящей работе решалась задача компьютерного моделирования магнитных экранов для проектирования магниточистых помещений, пригодных для проведения калибровки высокоточных магнитметров. Наиболее часто используемые в практике конфигурации - многослойные экраны сферической или цилиндрической формы. Проблему оптимизации выбора материалов экрана и геометрических размеров экранирующих оболочек легче решать с помощью компьютерного моделирования.

## 2. Компьютерное моделирование магнитных экранов, перспективных для проектирования «магниточистых» помещений.

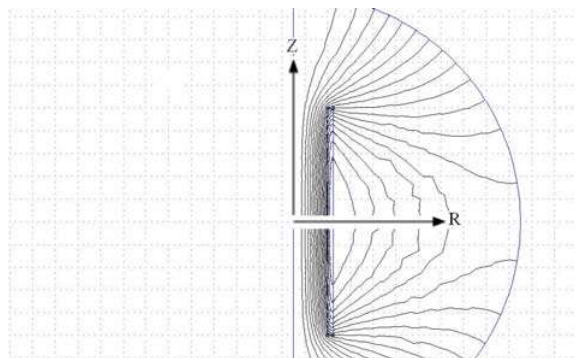
С помощью программы FEMM 4.0 [1] решалось уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала  $A$ , где  $V = \text{rot}A$ , а  $V$  – индукция магнитного поля. Для полного определения функции  $A$  использовалось условие  $\text{div}A = 0$ , которое называется калибровкой Кулона. Уравнение, описывающее магнитные свойства материалов конструкции записывалось в виде  $V = \mu_{\text{экр}} H + \text{gr}$ , где  $\mu_{\text{экр}}$  – магнитная проницаемость вещества экрана, которая являлась функцией  $|V|$ , что и выражает нелинейную связь между полями  $V$  и  $H$  вследствие насыщения магнитного потока (особенно в месте сужения магнитного потока). Здесь  $H$  – напряженность магнитного поля. Для этой модели граничные условия выражались через векторный потенциал. Тангенциальная составляющая  $A=0$  на границе находящейся в бесконечности (т.е. достаточно удаленной), чтобы магнитную энергию можно было полагать равной нулю. На оси симметрии вращения накладывалось условие  $A=0$ , а в плоскостях магнитной и геометрической симметрии  $dA/dn=0$ , т.е. линии потока перпендикулярны этим плоскостям ( $n$  – нормаль). В случае. Когда рассматриваемая область граничит с материалами, проницаемость которых можно считать большой, чем проницаемость внутренних материалов в 1000 раз, то нормальная составляющая  $A_n=0$ . Следует отметить, что для областей, обладающих симметрией вращения, как в нашем случае, условие калибровки Кулона  $\text{div}A = 0$  выполняется автоматически [2]. Конечные элементы, используемые для дискретизации рассматриваемой области имели вид треугольников различных размеров, причем размеры увеличивались при приближении к

границам модели. Общее количество точек, в которых осуществлялся расчет, составлял не менее 50 тысяч. Дискретизация выполнялась автоматически. Постпроцессор решал систему линейных алгебраических уравнений, таким образом, пока сходимость уравнений не уменьшалась до  $10^{-8}$ . Так как конструкция комнаты симметрична относительно продольной оси, то решалась двумерная задача в координатах  $R, Z$  и считалось, что магнитное поле не зависит от угла  $\varphi$ . Ось  $z$  – вертикальная,  $R$  лежит в горизонтальной плоскости. Зависимости  $V(H)$  для магнитных материалов аппроксимировались кубическими сплайнами.

При расчете использовалась имитация внешнего магнитного поля путем введения осесимметричной двумерной модели соленоида больших размеров (соленоида длиной 40 метров и диаметром 12 метров). Индукция магнитного поля внутри соленоида  $V_{\text{внеш}} = V_0$  моделировалась величиной тока обмотки. В отсутствие ферромагнитной обшивки комнаты неравномерность  $V_0$  в пределах высоты комнаты  $H=3\text{м}$  в средней части соленоида не превышала 0,1%, а вдоль диаметра  $D=3\text{метра}$  не превышала - 0,5%. При расчетах использовались магнитные характеристики ферромагнитного материала экрана, т.е. зависимости  $V(H)$ , что эквивалентно изготовлению обшивки из этого материала. Толщина слоя обшивки стали выбиралась равной  $t=2\text{мм}$  из соотношений технологичности. Для расчетов использовались две конфигурации: сфера с  $D=3\text{метра}$ , имеющего 1, или 2, или 3 слоя ферромагнитной обшивки. Расстояние между двумя соседними слоями обшивки  $L=0,5\text{метра}$ , а расстояние при трехслойной обшивке составляло 0,25 м. Другой конфигурацией была цилиндрическая с прямыми углами с  $D=3\text{метра}$  и высотой комнаты  $H=3\text{м}$ , имеющая 1, или 2, или 3 слоя обшивки. Расстояния между соседними слоями обшивки выбирались такими же, как и для сферической конфигурации. Отношение величины индукции магнитного поля соленоида  $V_0 = 12\text{мкТл}$  к величине индукции  $V$  внутри экранированного помещения представляет собой величину коэффициента ослабления  $K$  магнитного потока (или индукции магнитного поля), и является главной характеристикой экранированного помещения.  $V_0$  была направлена вдоль оси  $z$ . Основной задачей при проектировании «магниточистых» помещений любой конфигурации является достижение высоких значений  $K$  при заданных значениях

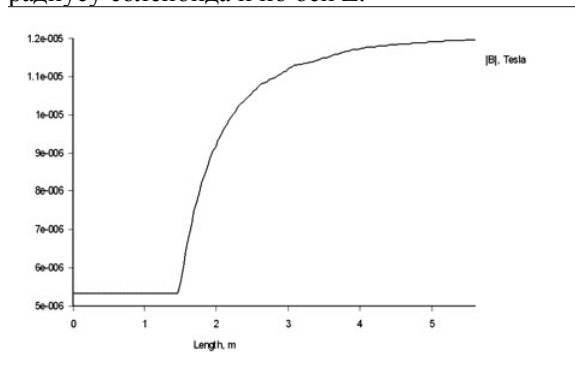
геометрических размеров помещения и минимальной толщине экрана.

Следует отметить что для цилиндрической формы экрана комнаты реализуется при моделировании самый плохой вариант экранирования ( т.е. минимальное значение  $K$ ), когда внешнее магнитное поле направлено вдоль оси цилиндра. Для экранов сферической формы все направления внешнего магнитного поля эквивалентны.

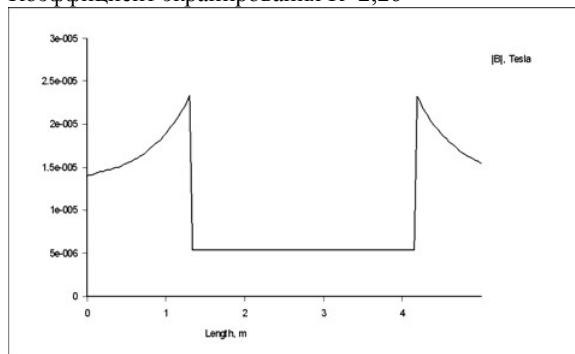


**Рисунок 1** – Изолинии индукции внешнего магнитного поля, создаваемого моделью соленоида и область расчета модели (расстояние между ближайшими точка сетки 1 м)

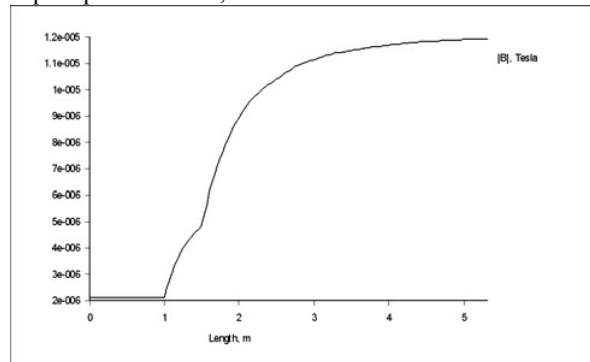
На рисунках №2-5 представлены распределения индукции магнитного поля по радиусу соленоида и по оси  $Z$ .



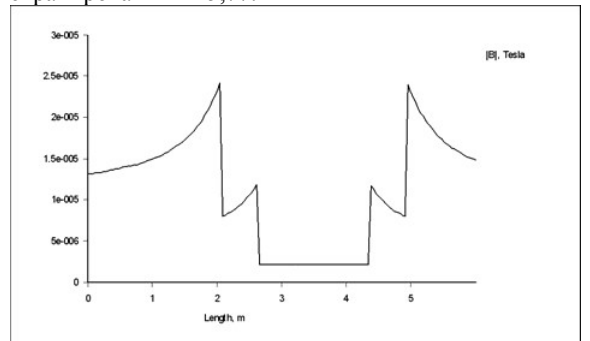
**Рисунок 2-** Распределение индукции магнитного поля по радиусу соленоида начиная от его оси при  $Z=0$ , экран –однослойная сфера с  $D=3\text{м}$  и толщиной  $t = 2$  мм. Материал экрана -сталь 1020. Коэффициент экранирования  $K=2,26$



**Рисунок 3-** Распределение индукции внешнего магнитного поля по оси соленоида, при  $R=0,5$  м. Экран –однослойная сфера с  $D=3\text{м}$  и толщиной  $t = 2$  мм. Материал экрана -сталь 1020. Коэффициент экранирования  $K=2,24$ .



**Рисунок 4-** Распределение индукции магнитного поля по радиусу соленоида начиная от его оси при  $Z=0$ , экран –двухслойная сфера с внешним  $D=3\text{м}$  и толщинами по  $t = 2$  мм. Расстояние между слоями 0,5 м. Материал экрана - сталь 1020. Коэффициент экранирования  $K=5,77$ .



**Рисунок 5-** Распределение индукции внешнего магнитного поля по оси соленоида, при  $R=0,5$  м. Экран –двухслойная сфера с внешним  $D=3\text{м}$  и толщинами по  $t = 2$  мм. Расстояние между слоями 0,5 м. Материал экрана –с таль 1020. Коэффициент экранирования  $K=5,71$ .

В таблице 1 представлены рассчитанные коэффициенты экранирования для трехслойных сфер из различных материалов.

### 3.ВЫВОДЫ

В соответствие с полученными расчетными результатами можно сделать следующие выводы:

- 1) Для получения коэффициента ослабления (экранирования) постоянного магнитного поля как минимум в 10 раз необходимо использовать трехслойную обшивку сферической формы, например из стали 1020, с расстояниями между слоями по 0,25 м и толщинами не менее 2мм. Очевидно, что изготовление трехслойной обшивки с внешним диаметром 3м весьма проблематично.
- 2) При использовании трехслойной обшивки

цилиндрической формы с прямыми углами и при самом неблагоприятном направлении внешних постоянных полей, при использовании стали 1020, с расстояниями между слоями по 0,25 м и толщинами не менее 2мм, внешним диаметром цилиндра 3м и высотой 3м коэффициент экранирования постоянного магнитного поля  $K \approx 5,6$ . Следовательно в промежуточных случаях при использовании закругленных концов обшивки коэффициент экранирования будет находиться в пределах  $5,6 \leq K \leq 10,8$ .

3) При использовании двухслойных и однослойных оболочек экранирования соответствующих форм коэффициент экранирования постоянных магнитных полей значительно менее 10 (при толщинах обшивки 2мм и указанных размерах). Для двухслойных экранирующих оболочек можно добиться увеличения коэффициента экранирования за счет повышения толщины экрана, что приводит к большому расходу ферромагнитного материала. Увеличение толщины экрана менее эффективно, чем увеличение числа ферромагнитных слоев (оболочек).

4) Проблема выбора материала экрана крайне важная. Как видно из таблицы 1 предпочтительно использовать материал с высоким значением начальной магнитной проницаемости, но он имеет достаточно высокую цену. Стали слабо подходят для этих целей. Как уже отмечалось, эффективнее функционируют многослойные экраны с

Таблица 1

промежутками между слоями, для которых коэффициент экранирования приближенно равен произведению коэффициентов для отдельных слоев, т.е.  $K \approx K_1 K_2 K_3$ . Если слои изготовлены из одного материала, то каждый из коэффициентов экранирования пропорционален  $\mu$ , т.е.  $K_1 \sim \mu(H_1)$  и  $K_2 \sim \mu(H_2)$ , а также  $K_3 \sim \mu(H_3)$  (каждая оболочка экрана функционирует в своем внешнем магнитном поле потому магнитные проницаемости разные), что в итоге при трехслойном экране приводит к грубо-ориентировочной зависимости  $K \sim \mu^3$ , что и объясняет столь сильные отличия в коэффициентах экранирования для разных материалов. (В этих формулах  $\mu(H)$  - функция  $H$  и не равна начальной магнитной проницаемости, приведенной в таблице 1 справочно).  $\mu_{нач}$  - показывает ориентировочный уровень  $\mu$  в слабых магнитных полях. Поэтому самым простым критерием выбора материала является выбор материала с высокими значениями  $\mu_{нач}$ .

## II. ЛИТЕРАТУРА

Сайт в Интернете :<http://femm.berlios.de>  
Кулон Ж. -Л., Сабоннадьер Ж.-К. САПР в электротехнике: Пер. с франц. –М.: Мир, 1988.- 203 с.

<b>Конструкция</b> : экран – трехслойная сфера с внешним $D=3$ м и толщинами по $t = 2$ мм. Расстояние между слоями по 0,25 м. <b>Материал экрана</b>	Начальная магнитная проницаемость $\mu_{нач}$ ( $\mu_{нач}$ приведена справочно и в расчетах не использовалась, модель расчета нелинейная)	Рассчитанный коэффициент экранирования <b>K</b>	Индукция насыщения <b>B</b> , Тл
1020 Steel	1000	10,81 - 10,91	2,28
M -45 Steel	1990	13,6	2,30
СТ3 листовая	1447	9,23	2,40
Сталь листовая 1571 ГОСТ 21427.3-75	2786	26,6	-
Сталь 2013	5307	72,7	2,40
Pure Iron	13007	936	2,56
Mu Metal	80040	$1,85 \cdot 10^5$	0,662
Supermalloy	529035	$10,78 \cdot 10^6$	0,785