

# **Поведение ферромагнетика в неоднородном магнитном поле**

**Ишутина Полина Дмитриевна**

Физический факультет. Практикум по электричеству и магнетизму. 3 семестр.

Группа №18305, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

**А. А. Савелов**, к. ф.- м. н., с. н. с. лаборатории МРТ технологии, МТЦ СО РАН

## **Аннотация**

В данной курсовой работе произведена оценка расположения зоны втягивания ферромагнетика в томограф Ingenia 3T. Поле томографа смоделировано при помощи двух коаксиальных соленоидов, в качестве ферромагнетика использована монета. В ходе выполнения работы была обнаружена искомая зона втягивания, вычислена скорость ферромагнетика при попадании на границу этой зоны и достижении центра аппарата.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, неоднородное магнитное поле, ферромагнетик, зона однородности.

Работа выполнена в лаборатории МРТ-технологии Международного томографического центра СО РАН.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ишутина Полина Дмитриевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Поведение ферромагнетика в неоднородном магнитном поле**

Практикум по электричеству и магнетизму, 2 курс, группа №18305

**Научный руководитель:**

\_\_\_\_\_ А.А Савелов

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Преподаватель практикума**

\_\_\_\_\_ И.А. Иванов

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Куратор практикума:**

\_\_\_\_\_ В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

*Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ*

*Научный руководитель*

*Преподаватель практикума*

## **Аннотация**

В данной курсовой работе произведена оценка расположения зоны втягивания ферромагнетика в томограф Ingenia 3T. Поле томографа смоделировано при помощи двух коаксиальных соленоидов, в качестве ферромагнетика использована монета. В ходе выполнения работы была обнаружена искомая зона втягивания, вычислена скорость ферромагнетика при попадании на границу этой зоны и достижении центра аппарата.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, неоднородное магнитное поле, зона однородности, ферромагнетик.

Работа выполнена в лаборатории МРТ-технологии Международного томографического центра СО РАН.

## Оглавление

|                                                                 |   |
|-----------------------------------------------------------------|---|
| 1. Введение.....                                                | 1 |
| 2. Теоретическая часть .....                                    | 2 |
| 2.1 Магнитно-резонансная томография. ....                       | 2 |
| 2.2 Ферромагнетики.....                                         | 3 |
| 3. Экспериментальная часть .....                                | 3 |
| 3.1 Моделирование неоднородного магнитного поля томографа. .... | 3 |
| 3.2 Эксперимент и полученные результаты.....                    | 5 |
| 4. Выводы.....                                                  | 7 |
| 5. Список литературы .....                                      | 7 |

## 1. Введение

Магнитно-резонансная томография – это современный и высокоинформативный метод радиологической диагностики мягких тканей, позволяющий получать качественные изображения в нескольких плоскостях. Существует множество показаний для проведения МРТ, например, заболевания и патологии головного мозга, поражения слуха и нарушения речи, опухоли и кисты. Именно поэтому МРТ является одним из наиболее актуальных методов диагностики на данный момент.

Тем не менее, качество получаемого изображения напрямую зависит от величины магнитного поля томографа. Большое внешнее и внутреннее магнитное поле, в свою очередь, представляет опасность для людей и окружающих предметов. В связи с этим, наряду с показаниями для проведения, МРТ имеет также и множество противопоказаний: наличие у пациента искусственных водителей сердечного ритма, ферромагнитные металлические имплантаты, протезы клапанов сердца, кровоостанавливающие клипсы и прочее. Также немаловажно соблюдение техники безопасности, одним из пунктов которой является запрет на внос в область контролируемого доступа томографа ферромагнетиков, ведь это может привести к серьёзным последствиям вплоть до поломки аппарата. Именно поэтому изучение поведения ферромагнетиков в неоднородном магнитном поле томографа является актуальной задачей.

Цель работы: оценка расположения зоны втягивания ферромагнетика в томограф и изучение поведения ферромагнетика в неоднородном магнитном поле томографа.

Задачи исследования:

1. Моделирование магнитного поля томографа;
2. Определение области, в пределах которой сила притяжения магнитного поля превысит силу тяжести;
3. Вычислить скорость движения ферромагнетика на границе области и внутри аппарата;

## 2. Теоретическая часть

### 2.1 Магнитно-резонансная томография.

Магнитно-резонансная томография – это метод радиологической неинвазивной диагностики, основанный на принципе ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

Аппарат МРТ состоит из магнита, создающего постоянное магнитное поле, в которое помещают пациента, градиентных катушек, порождающих градиентное магнитное поле в центральной части основного магнита, передающих и принимающих радиочастотных катушек. Более подробно строение томографа отображено на Рис.1.

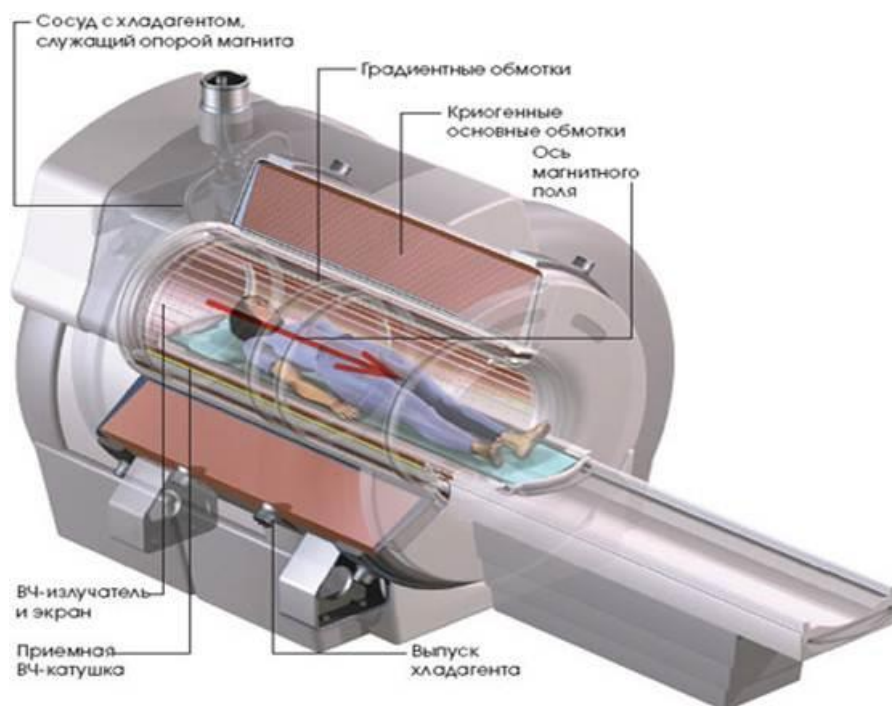


Рис 1. Устройство аппарата МРТ.

Принцип ядерного магнитного резонанса заключается в изменении ядерного магнитного момента частицы посредством воздействия сильного внешнего магнитного поля и регистрации энергии, выделившейся за время возвращения частицы в исходное состояние (период релаксации). Таким образом, очевидно, что качество данных, полученных в ходе проведения томографии, напрямую зависит от величины магнитного поля аппарата.

## 2.2 Ферромагнетики.

Ферромагнетики – это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры [1]. Типичными ферромагнетиками являются металлы Fe, Co, Ni, Gd,, Dy, Ho, Er, Tm.

Внесение ферромагнетика в магнитное поле приводит к его намагничиванию, т. е. увеличению средней намагниченности. Зависимость намагниченности  $M$  от магнитного поля  $H$  для всех магнитоупорядоченных веществ нелинейная, соответственно магнитная восприимчивость  $\chi$  не является константой.

Энергию насыщенного ферромагнетика в сильном магнитном поле можно вычислить с помощью формулы (1).

$$W = \frac{B' * B}{8\pi} \quad (1)$$

## 3. Экспериментальная часть

### 3.1 Моделирование неоднородного магнитного поля томографа.

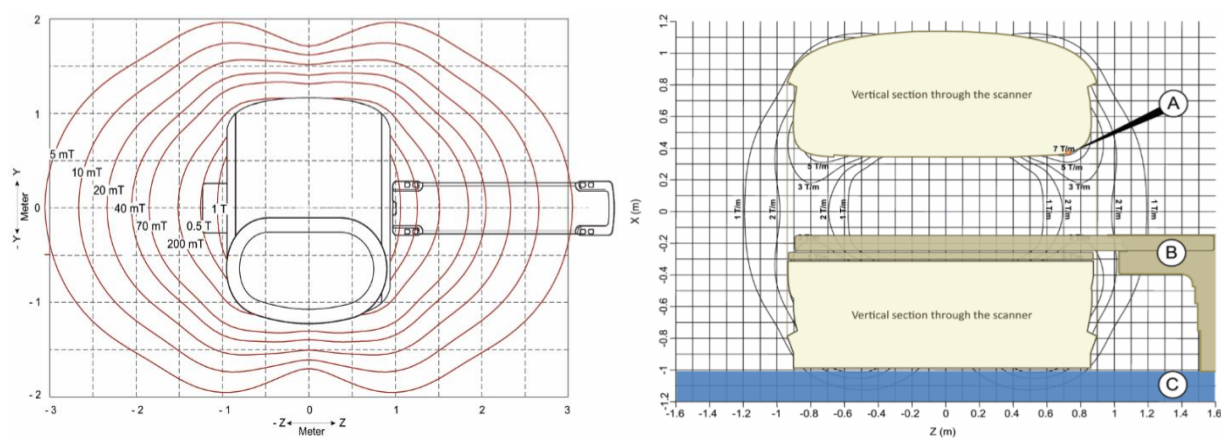


Рис 2. Распределение внутреннего (справа) и внешнего (слева) магнитного поля томографа Ingenia 3T.

На рисунке 2 изображена схема распределения величин внутреннего и внешнего магнитного поля томографа Ingenia 3T в зависимости от расстояния. Из технической документации [5] нам известны линейные размеры аппарата и ток. Эти данные отображены в таблице 1:  $d$  – диа-

Таблица 1. Справочные данные.

|         |     |
|---------|-----|
| $d$ , м | 0,9 |
| $D$ , м | 1,9 |
| $L$ , м | 1,6 |
| $I$ , А | 330 |

метр внутренней области аппарата,  $D$  – его внешний диаметр,  $L$  – длина,  $I$  – ток.

В качестве модели была выбрана система, состоящая из двух коаксиальных соленоидов – основного и экранирующего – с известными линейными размерами и концентрациями витков. Экранирующая катушка намотана поверх основной и имеет меньшие линейные размеры. Катушки принимаем очень тонкими, так что их радиусы считаем примерно равными.

Основная катушка имеет длину  $L$ , экранирующая –  $L_3$ . Радиусы обеих катушек  $r$  примем как половину среднего между  $d$  и  $D$ .

В качестве ферромагнетика в данной работе будет выступать монета Банка России номиналом 10 рублей, которая состоит из стали с латунным гальванопокрытием и является ферромагнетиком. Характеристики монеты отражены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики монеты.

|                                   |                  |
|-----------------------------------|------------------|
| $d'$ , м                          | $2,2 * 10^{-2}$  |
| $h'$ , м                          | $2,2 * 10^{-3}$  |
| $m$ , кг                          | $5,63 * 10^{-3}$ |
| $V$ , м <sup>3</sup>              | $8,4 * 10^{-7}$  |
| $\mu$ , (2 * 10 <sup>-4</sup> Тл) | 100              |

С помощью закона Био-Савара получим выражение (2) для поля, создаваемого соленоидом на оси  $Z$ .

$$B_z = \frac{2\pi I}{c} \left( \frac{N_1}{L} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) - \frac{N_2}{L_3} (\cos \theta_4 - \cos \theta_3) \right), \quad (2)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{Z - \frac{L}{2}}{\sqrt{\left(Z - \frac{L}{2}\right)^2 + r^2}} \quad \cos \theta_2 = \frac{Z + \frac{L}{2}}{\sqrt{\left(Z + \frac{L}{2}\right)^2 + r^2}}$$

$$\cos \theta_3 = \frac{Z - \frac{L-L_3}{2}}{\sqrt{\left(Z - \frac{L-L_3}{2}\right)^2 + r^2}} \quad \cos \theta_4 = \frac{Z + \frac{L-L_3}{2}}{\sqrt{\left(Z + \frac{L-L_3}{2}\right)^2 + r^2}}$$

Введем радиальную ось  $R$ , вдоль которой будем представлять поле соленоидов, используя соответствующую компоненту данной формулы (3). Используя такое приближение, стоит учесть, что на малых дистанциях могут возникнуть расхождения.

$$B_R = \frac{3\pi I r^2}{c R^3} (N_1 - N_2), \quad (3)$$

В формуле (2)  $N_1$  – количество витков основной катушки, а  $N_2$  – экранирующей.

Путём преобразований, переходим в цилиндрическую систему координат, в связи с чем можем считать величину поля независимой от угла поворота из соображений симметрии. Таким образом, поле будет иметь только две ненулевых компоненты  $B = (B_R, 0, B_z)$ .

### 3.2 Эксперимент и полученные результаты.

При помощи полученных формул (2) и (3), было рассчитано поле снаружи соленоидов, принятых в качестве модели. Далее было проведено сравнение полученного в ходе вычислений поля модели с измерениями исходного поля. Опираясь на полученный результат, были подобраны значения  $N_1, N_2$  – 12000 и 5400 соответственно. Важно обратить внимание, что эти значения ничем не ограничены, тогда как значение  $R$  ограничено линейными размерами исходного прибора.

Результаты моделирования поля томографа с помощью коаксиальных соленоидов отображены на Рис.2 и Рис.3.

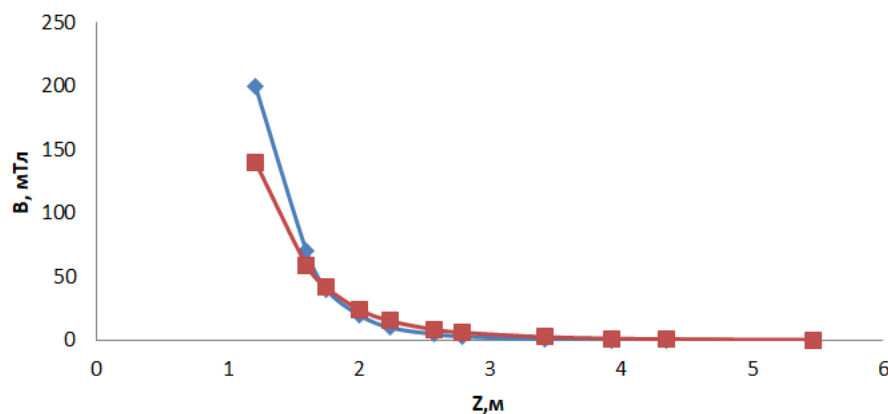


Рис 2. Поле  $B_z$

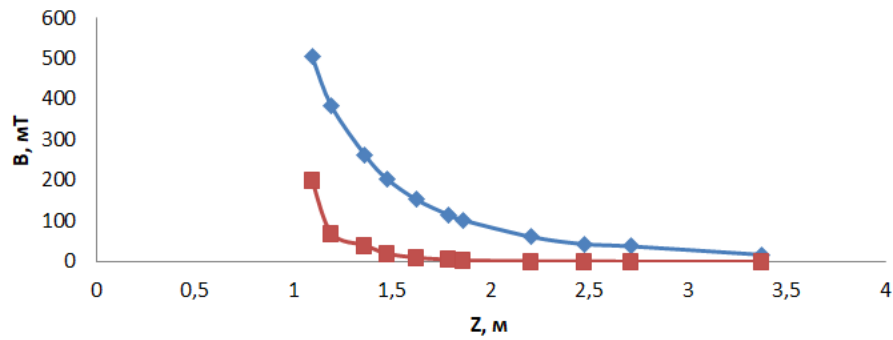


Рис 3. Поле  $B_R$

Полученные значения магнитного поля модели совпадают с величиной магнитного поля томографа с хорошей точностью, так что допускает применение данной модели для анализа поведения ферромагнетика.

Перейдём к анализу поведения ферромагнетика. Полученные выражения (2) и (3) позволяют нам найти величину поля в любой точке пространства (из соображений симметрии). Опираясь на линейные размеры и материал монеты и величину поля, мы можем считать её насыщенным ферромагнетиком. Таким образом, применима формула (1). Подставив в него выражения (2)-(3) и продифференцировав полученное равенство, мы получим выражения (4) и (5) для выражения компонент силы по осям R и Z.

$$F_z = \frac{2\pi I}{c} \left( \frac{N_1}{L} (\cos' \theta_2 - \cos' \theta_1) - \frac{N_2}{L_3} (\cos' \theta_4 - \cos' \theta_3) \right) * 250, \quad (4)$$

$$F_R = \frac{(-9)Ir^2}{cR^4} (N_1 - N_2) * 250, \quad (5)$$

Для оценки границы, находясь на которой сила тяжести станет равна тянущей силе, было проведено сравнение ускорения свободного падения ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ) и отношения тянущей силы к массе ферромагнетика. В ходе вычислений радиус этой границы составил 2,36 м.

В случае начала движения в точке, расположенной на расстоянии 2,36 м от центра аппарата МРТ, монета долетит до его торцевой части за время порядка одной секунды, приобретя при этом скорость вдоль оси Z 2,7 м/с, попав в центральную часть аппарата. Доберется до центра устройства монета приблизительно за 1 секунду и приобретет к этому моменту скорость 8,4 м/с. Компонен-

ту скорости монеты вдоль оси  $R$  точно определить невозможно в связи с выбранным приближением.

#### **4. Выводы**

Таким образом, в ходе выполнения данной работы была произведена оценка расположения зоны втягивания ферромагнетика в томограф Ingenia 3T - это полуовал вокруг торца аппарата с приблизительным радиусом  $R = 2,36$  м. На границе данной области ферромагнетик подобный монете Банка России номиналом 10 рублей будет иметь скорость  $V = 2,7$  м/с, которая вырастет до  $V = 8,4$  м/с при попадании в центр данного аппарата.

#### **5. Список литературы**

- 1) Сивухин Д. В. Общий курс физики. — М.: Наука, 1977. — Т. III. Электричество. — 688 с.
- 2) Callaghan E. E., Maslen S. H. The magnetic field of a finite solenoid. – 1960
- 3) Эрнст Й. Руммени, Петер Раймер, Вальтер Хайндель. Магнитно-резонансная томография тела - 2014. - 847 с.
- 4) Ionel Pavel, Valeriu David, Alexandru Constantin Podaru. A Survey of the Magnetic Field in a MRI Area – 2018.
- 5) MR scanner Ingenia. Technical Description. - Koninklijke Philips Electronics N.V. 2014
- 6) Сергунова К.А., Петряйкин А.В., Гомболевский В.А., Ахмад Е.С., Семенов Д.С., Ким С.Ю., Владзимирский А.В., Морозов С.П. Методические рекомендации по разработке инструкций по охране труда для персонала кабинета (отделения) магнитно-резонансной – М., 2017. – 32 с.