

УДК 621.3.013

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭКРАНОВ. ПОСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ
РАБОТЫ ДЛЯ КУРСА «ТОЭ»****Четвертак Юлия Сергеевна,**

Старший преподаватель

Кафедра «Фундаментальные науки»

Московский Государственный университет им. Баумана

E-mail: juchetvertak@gmail.com

Попова Ирина Сергеевна,

Старший преподаватель

Кафедра «Фундаментальные науки»

Московский Государственный университет им. Баумана

Московский институт стали и сплавов

E-mail: popovais@bmstu.ru

Аннотация

В статье рассмотрена идея разработки лабораторного стенда для измерения и расчета параметров магнитного поля и исследования эффектов экранирования с различными конструкциями экранов, изготовленных из магнитных и немагнитных металлов (железо, медь, алюминий). С помощью компьютерных программ Mathcad и COMSOL Multiphysics построена математическая модель, позволяющая рассчитать величину магнитной индукции. В COMSOL Multiphysics построены графики распределения магнитной индукции вдоль катушки, и построена картина распределения магнитного поля катушки в зависимости от исследуемых материалов (без экрана и с экранами, выполненными из меди, алюминия и железа). Вводные данные и расчетные параметры, постановка задачи и цель лабораторной работы могут варьироваться в зависимости от исследуемой темы, что позволит применять данную работу в рамках различных курсов, таких как «Теоретические основы электротехники», «Теория поля» или «Электротехнические материалы»

Ключевые слова: экранирование, расчет параметров магнитного поля, датчик Холла.**EXPERIMENTAL STUDY AND MATHEMATICAL MODELLING OF THE
MAGNETIC FIELD WHEN USING DIFFERENT TYPES OF SCREENS.
SETTING OF LABORATORY WORK FOR THE COURSE "TOE"****Chetvertak Iuliia Sergeevna,**

MSTU named after N.E. Bauman.

e-mail: juchetvertak@gmail.com / chetvertak@bmstu.ru

Popova Irina Sergeevna,

MSTU named after N.E. Bauman. / University of Science and Technology

popovais@bmstu.ru

ABSTRACT

The paper deals with the idea of developing a laboratory stand for measuring and calculating the magnetic field parameters and studying the shielding effects with different designs of screens made of magnetic and non-magnetic metals (steel, copper, aluminum). Computer modelling has been carried out using Mathcad and COMSOL Multiphysics.

Keywords: shielding, calculation of magnetic field parameters, Hall sensor.

Введение

Современное развитие техники и технологий остро ставит решение проблем, связанных с воздействием электромагнитного поля как на оборудование, так и на биологические объекты. Использование экранирования электромагнитного поля различными материалами, как способ защиты от влияния магнитного поля, позволяет не только решать поставленные задачи, но и проводить новые исследования этих задач. Решение которых позволяет решить вопросы с обеспечением санитарной и техногенной безопасности, с подавлением помех электросвязи, с обеспечением бесперебойной и нормальной работы систем и устройств измерительной техники, средств автоматизации контроля и управления электрическими нагрузками, с электромагнитной совместимости силового и слаботочного оборудования, позволяет снизить вредное и побочное воздействие электромагнитного поля на здоровье человека при его длительном пребывании в производственных и жилых помещениях.

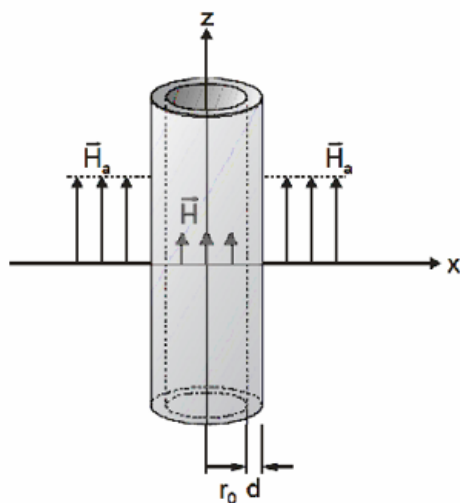
В настоящее время при исследовании влияния электромагнитных полей на биологические объекты и на организм человека разделяют их по ряду характеристик: по частотному диапазону электромагнитных волн, по электрической и магнитной компонентам поля, по уровню напряжения и по другим. С учетом этих характеристик методы и средства борьбы с вредным влиянием электромагнитных полей на различные объекты естественного и антропогенного происхождения стандартизируются (ГОСТ Р 54148-2010 (ЕН 50366:2003), допустимые уровни электромагнитного излучения регулируются «Санитарно-эпидемиологическими требованиями» (СанПиН 2.2.4.1191-03), что указывает на большое значение и важность решения этого аспекта научно-технического прогресса [4].

В статье рассматривается идея разработки лабораторного стенда для измерения и расчета параметров магнитного поля, как базовой модели для исследования эффектов экранирования с различными конструкциями экранов, изготовленных из магнитных и немагнитных металлов (сталь, медь, алюминий) [1], как способа защиты от воздействия магнитного поля промышленной частоты. Экспериментальная схема и базовые элементы [3] были смоделированы и собраны в ТФН им. Бойта (г. Берлин).

Построение математической модели и расчет.

С помощью программы Mathcad и COMSOL Multiphysics [2] была разработана математическая модель [1.2], рассчитывающая следующие физические величины,

построены картины магнитного поля [3,2], позволяющие определить параметры [3,4] (табл1, 2).



моделирование для тонкостенных экранов из меди и железа:

$$r_0 = 28 \text{ мм}, d = 2 \text{ мм}, f = 50 \text{ Гц}, \mu_{(Fe)} = 500, \mu_{(Cu)} = 1$$

$$N_{(Cu)} = 5,9 \cdot 10^7 \text{ СМ/М}, N_{(Fe)} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ СМ/М}$$

$$K_{wCu} = \sqrt{i \cdot 2\pi\mu_0\mu_{Cu}N_{Cu}} = 107,9 + 107j$$

$$K_{wFe} = \sqrt{i \cdot 2\pi\mu_0\mu_{Fe}N_{Fe}} = 993,4 + 993,4j$$

$$K_{Cu} = \frac{k_{wCu} \cdot r_0}{\mu_{Cu}} = 3,022 + 3,022j$$

$$K_{Fe} = \frac{k_{wFe} \cdot r_0}{\mu_{Fe}} = 0,056 + 0,056j$$

$$Q_{Cu} = \frac{1}{\cosh(k_{wCu} \cdot d) + \frac{1}{2}k_{Cu}\sinh(k_{wCu} \cdot d)} = 0,674 - 0,476j$$

$$Q_{Fe} = \frac{1}{\cosh(k_{wFe} \cdot d) + \frac{1}{2}k_{Fe}\sinh(k_{wFe} \cdot d)} = -0,119 - 0,242j$$

$$|Q_{Cu}| = 0,27 \quad |Q_{Fe}| = 0,827$$

Напряженность магнитного поля

$$I = 2 \text{ А}, N = 400 \text{ витков}, \text{ длина } l = 20 \text{ см}$$

$$H_{zs} = N \frac{I}{l} = 4 \text{ КА/М}$$

$$B = \mu_0 H_{zs} = 5,027 \cdot 10^{-3} \text{ Т}$$

Рис 1. Моделирование в программе Mathcad (разработано авторами)

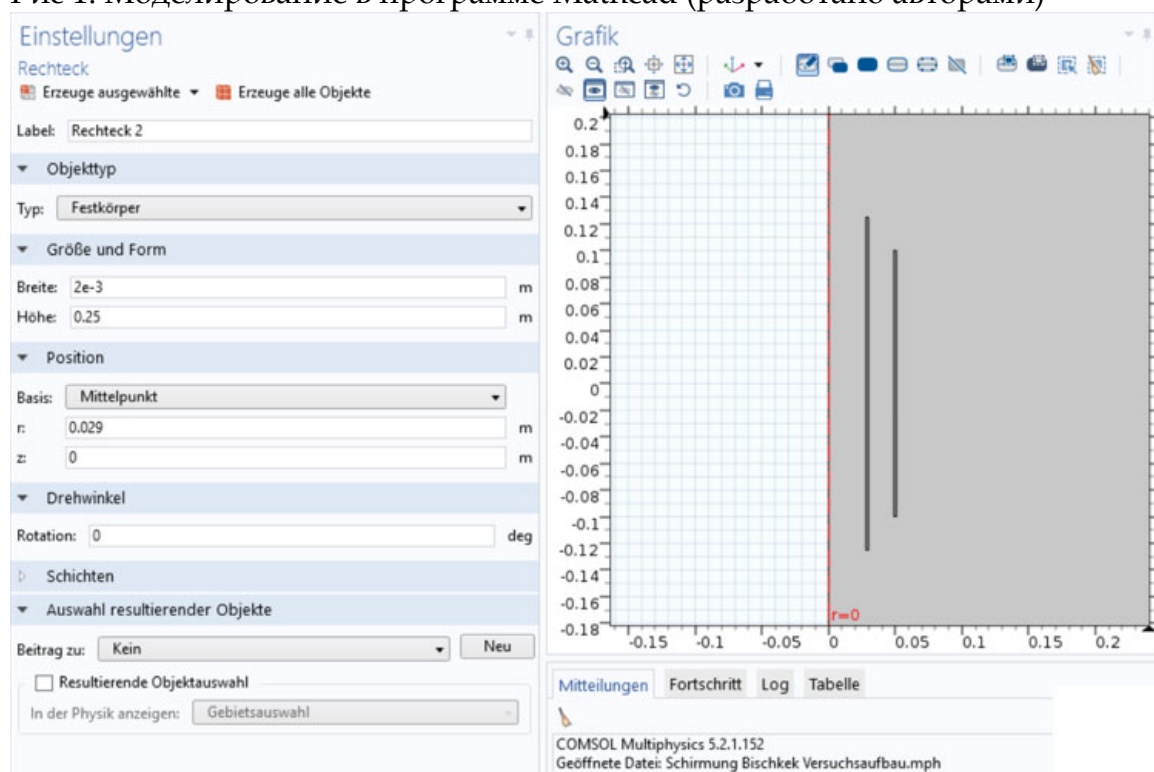


Рис 2. Моделирование в программе COMSOL Multiphysics (работа авторов)

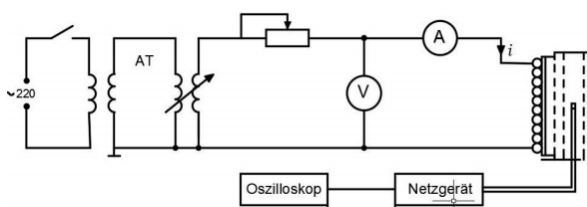
Проведение эксперимента.

Основу эксперимента представляет тестовая катушка, внутрь которой помещаются экраны, выполненные из различных материалов (медь, железо, алюминий) [1]. Параметры элементов указаны в таблице 1

Таблица 1. «Элементы и параметры экспериментальной установки»
(работа, фото авторов)

	<p>Параметры тестовой катушки: Число витков $N = 400$; Длина обмотки $l = 200$ мм; толщина стенки = 2 мм; диаметр $d_r = 2$ мм</p>
	<p>Экраны выполнены из меди, железа и алюминия</p>
	<p>- Датчик Холла, выходное напряжение которого пропорционально магнитной индукции[3].</p>

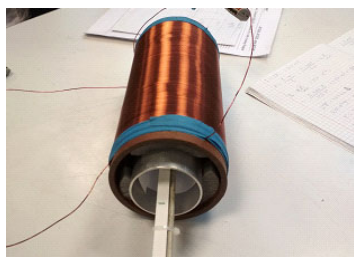
Автотрансформатор и реостат поддерживают значения тока и напряжения постоянными. Блок питания будет подавать на датчик Холла напряжение 5 В и ток 8 мА. Это устройство может легко заменить аккумулятор (рис 3 а, б). Датчик Холла, подключенный к осциллографу, вносится в центр катушки (рис 3 в)[1,3]. На осциллографе фиксируется кривая, по которой рассчитывается магнитная индукция магнитного поля катушки (рис 3, г).



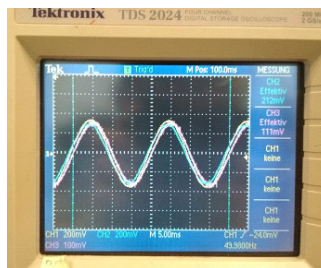
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. «Принципиальная схема и схема проведения эксперимента (фото авторов)

Анализ полученных результатов.

Сравнение результатов моделирования, аналитического расчета и экспериментальных измерений удобнее свести в таблицу (таблица 2), графики приведены на рис 4.

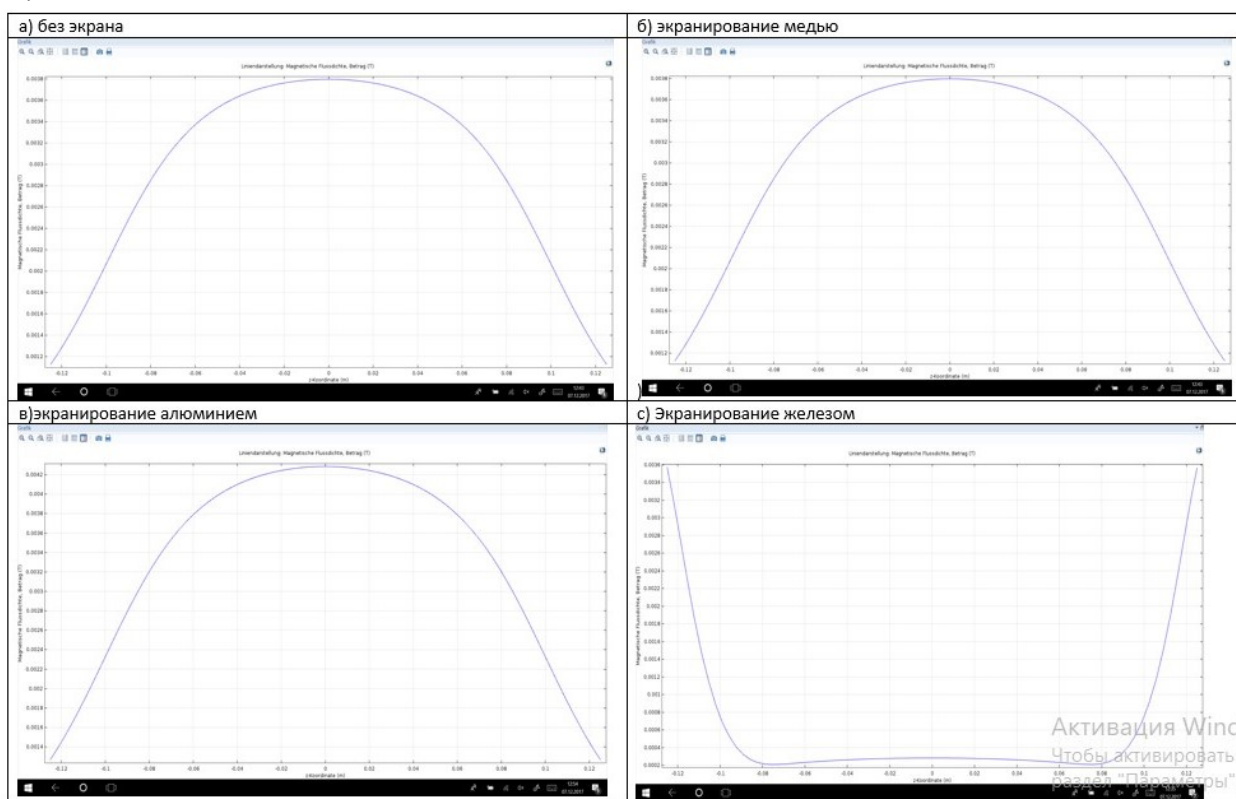


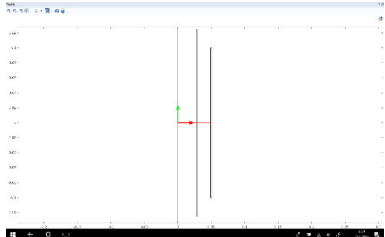
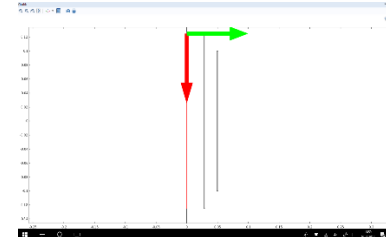
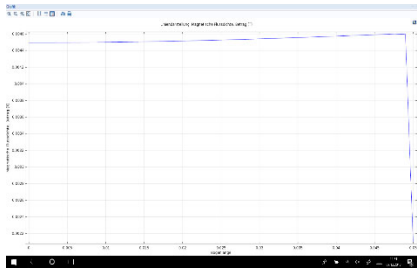
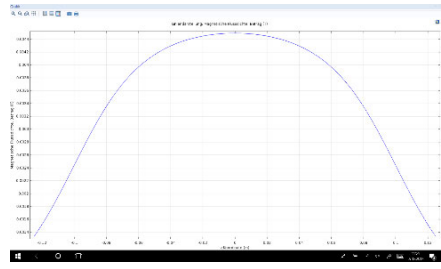
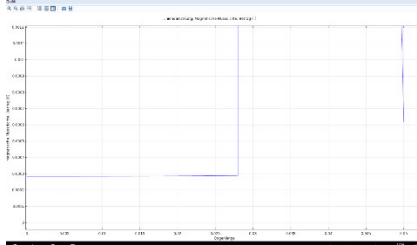
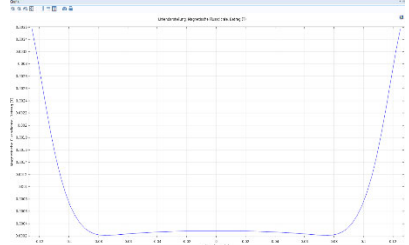
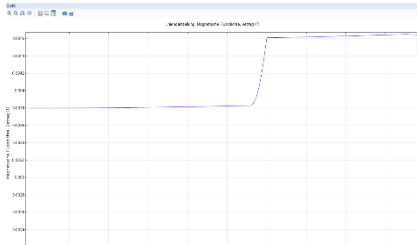
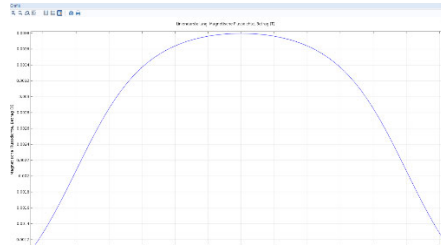
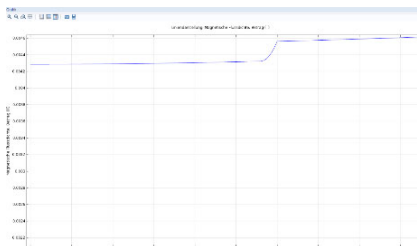
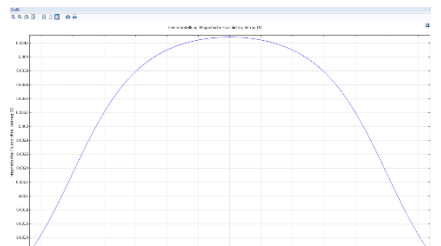
Рис 4 «График распределения магнитной индукции вдоль катушки.

Моделирование в программе «COMSOL Multiphysics» (работа авторов)

Таблица 2 «Сравнение результатов»

Вид экранирования	Параметры экранов	Магнитная индукция, мТ (Расчетное / измеренное)	
Без экрана		5,28	4,48
Экранирование железом	$\mu_r = 825$ Гн/м, Проводимость $1e7$ См/м	0,28	0,298
Экранирование медью	$\mu_r = 1$ Гн/м, Проводимость $6e7$ См/м	3,8	3,87
Экранирование алюминием	$\mu_r = 1$ Гн/м Проводимость $3e7$ См/м	4,28	4,44

Таблица 2. «Сравнение результатов» (графики- работа авторов)

<p>Определение магнитной индукции</p>	<p>Радиальное расположение, $z=0$</p> 	<p>Аксиальное расположение $r=0$.</p> 	<p>Магнитная индукция, мТ (Расчетное /измеренное)</p>
<p>Без экрана</p>			<p>5,028/ 4,48</p>
<p>Экранирование железом $\mu_r = 825$ Гн/м, Проводимость $1e7$См/м</p>			<p>0,28/ 0,298</p>
<p>Экранирование медью. $\mu_r = 1$Гн/м, Проводимость $6e7$См/м</p>			<p>3,8 / 3,87</p>
<p>Экранирование алюминием. $\mu_r = 1$Гн/м Проводимость $3e7$См/м</p>			<p>4,28/ 4,44</p>

Программа COMSOL Multiphysics позволяет также не только построить картину распределения магнитного поля вдоль исследуемой катушки (без экрана и с экраном), но и получить значения магнитного потока [2] (рис 5).

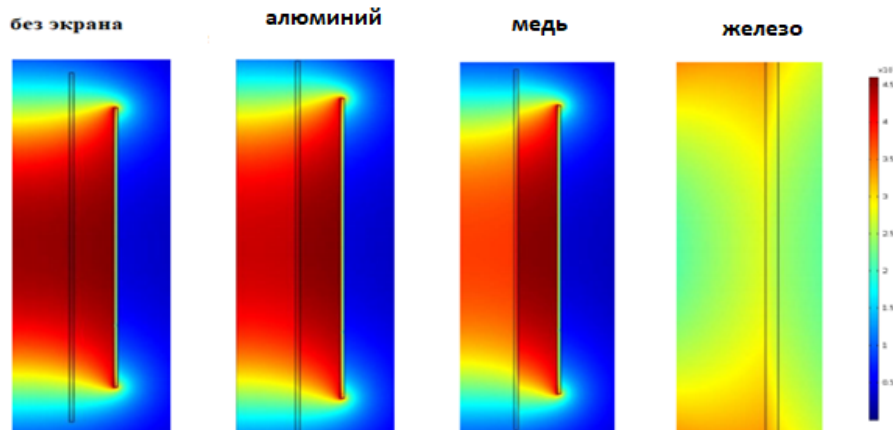


Рис.5. «Картина распределения магнитного поля катушки в зависимости от исследуемых материалов. Моделирование с помощью COMSOL Multiphysics». (работа авторов)

Заключение

Результаты проведенного эксперимента совпадают с аналитическим расчетом, поэтому параметры изготовленных элементов (катушки индуктивности с расчетным количеством витков, и размеры экранов из различных материалов) можно использовать для создания лабораторной работы для курса «Теоретические основы электротехники», «Теория поля» или «Электротехнические материалы» [2]. Вводные данные и расчетные параметры, постановка задачи и цель лабораторной работы могут быть изменены в зависимости от исследуемой темы, приобретения необходимого навыка или изучаемого курса и дисциплины. При внедрении лабораторной работы в учебный процесс можно расширить исследуемую задачу в зависимости от частоты источника, параметров материалов или геометрии экранов. Полученные знания и навыки помогут студентам и будущим специалистам при дальнейшем обучении и применении знаний на практике для улучшения способов или материалов защиты от вредного воздействия магнитных полей промышленных частот.

Список литературы:

1. Огорелков Б.И. Татевосян А.С. Кропотин В.О. Экспериментальное исследование и математическое моделирование экранирования электромагнитного поля промышленной частоты/ Омский научный вестник №3 (147) 2016. С 8-15.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: учеб. / Л. А. Бессонов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1973 с 246-300.
3. Prof. Dr.-Ing. Sven Hille Beuth Hochschule für Technik Berlin Skript Elektrostatisches Feld, 2017 S. 147-188.
4. В.И. Милых, И.В. Поляков, Н.В. Полякова, Е.И. Штангеев Расчетно-экспериментальное тестирование программы FEMM и преодоление проблем её использования для расчета магнитного поля электрических машин/Электротехника и Электромеханика. -2004. -№ 3. -С. 38-43.

References:

1. Ogorelkov B.I., Tatevosyan A.S., Kropotin V.O. Experimental Study and Mathematical Modeling of Shielding of an Industrial Frequency Electromagnetic Field / Omsk Scientific Bulletin No. 3 (147) 2016. Pp. 8-15.
2. Bessonov, L.A. Theoretical Foundations of Electrical Engineering: textbook / L.A. Bessonov. - 6th ed., revised and enlarged. - Moscow: Higher. school, 1973, pp. 246-300.
3. Prof. Dr.-Ing. Sven Hille Beuth Hochschule für Technik Berlin Skript Elektrostatisches Feld, 2017 Pp. 147-188.
4. V.I. Milykh, I.V. Polyakov, N.V. Polyakova, E.I. Shtangeev, Computational and experimental testing of the FEMM program and overcoming the problems of its use for calculating the magnetic field of electrical machines/Electrical Engineering and Electromechanics. - 2004. - No. 3. - P. 38-43.