МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»

Институт № 3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика»

Кафедра 310 **Группа** М3О-405Б-21

Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль Информационные технологии в электроэнергетических и электромеханических системах

Квалификация бакалавр

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой _____ _____ _____
(№ каф.) (подпись) (инициалы, фамилия)
«_____» _____ 20___ г.

З А Д А Н И Е
на выпускную квалификационную работу бакалавра

Обучающийся Коваль Максим Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество полностью)

Руководитель Чекин Андрей Юрьевич
(фамилия, имя, отчество полностью
кандидат технических наук, доцент кафедры 310
ученая степень, ученое звание, должность и место работы)

1. Наименование темы Разработка электромагнитного привода и моделирование его работы

2. Срок сдачи обучающимся законченной работы _____

3. Задание и исходные данные к работе
Провести расчет втягивающей силы электромагнитного соленоида и собрать экспериментальную установку для измерения параметров. На основе полученных данных разработать модели экспериментальной установки в программных средах Elcut и Matlab Simulink. Смоделировать работу электромагнитного соленоида при различных величинах воздушного зазора. Проанализировать результаты опытов на экспериментальной установке и в компьютерных моделях.

.

Перечень иллюстративно-графических материалов: *при наличии

№ п/п	Наименование	Количество листов

1	2	3

4. Перечень подлежащих разработке разделов и этапы выполнения работы

№ п/п	Наименование раздела или этапа	Трудоёмкость в % от полной трудоёмкости дипломной работы	Срок выполнения	Примечание
1	2	3	4	5
	Проведение расчета по методике, определение необходимых материалов	5	14.10.2024	
	Разработка экспериментальной установки для измерения параметров характеристик соленоида	10	28.10.24	
	Проведение испытаний экспериментальной установки соленоида	10	11.11.2024	
	Разработка компьютерной модели установки в среде моделирования Elcut	20	10.02.2025	
	Разработка компьютерной модели установки в среде моделирования Matlab Simulink	30	6.04.2025	
	Подбор параметров для блоков, составляющих компьютерную модель	15	1.05.2025	
	Сравнение результатов физического и виртуального экспериментов	10	12.05.2025	

5. Исходные материалы пособия Розанов А. И. Электромагнитные устройства автоматики. — М.: Энергия, 1974. — 368 с. ГОСТ 16115–79. Электромагниты. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 12 с. Рауф К. Р., Пандей С. К. Электромагниты и электромагнитные приводы. — М.: Мир, 1985. — 264 с. Капица П. Л., и др. Электротехника: курс для вузов. — М.: Наука, 1971. — 512 с. Крук Г. А. Электромагниты и электромагнитные устройства. — М.: Радио и связь, 1985. — 208 с.

6. Дата выдачи задания_____

Руководитель_____
(подпись)

Задание принял к исполнению_____ _____
(подпись)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
1 Обзорная часть 7
2 Соленоид 9
2.1 Разновидности соленоида 10
2.1.1 Линейные соленоиды 10
2.1.2 Двусторонние линейные соленоиды 11
2.1.3 Удерживающие соленоиды 12
2.1.4 Поворотные соленоиды 13
2.1.5 Миниатюрные соленоиды 14
2.1.6 Импульсные соленоиды 15
2.2 Параметры соленоида 15
2.3 Выбор соленоида 16
2.4 Особенности исследования соленоида и его характеристик 17
3 Расчет линейного соленоида 18
4 Экспериментальная установка соленоида 21
4.1 Сборка экспериментальной модели соленоида 25
4.2 Методика проведения экспериментов модели соленоида 26
4.3 Порядок проведения экспериментов модели соленоида 27
4.4 Завершение испытаний 28
4.5 Итоги испытаний 28
5 Расчет линейного соленоида в программной среде Elcut 31
5.1 Методика проведения расчета в elcut 35
5.2 Результаты расчета в elcut 36
6 Компьютерное моделирование в программе Matlab Simulink 39
6.1 Разработка модели соленоида в программной среде Matlab Simulink 40
6.2 Параметры электромагнитного соленоида в Matlab Simulink 43
6.3 Методика расчета модели в Matlab Simulink 47
6.4 Результаты расчета в Matlab Simulink 47

7 Сравнительный анализ 50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 53
ПРИЛОЖЕНИЕ А – код, используемый для вывода данных из оболочки Matlab Simulink 54

ВВЕДЕНИЕ

Цель дипломной работы состоит в проведении сравнительных испытаний соленоида на реальной установке и в программных средах численного моделирования: Elcut и MATLAB Simulink. Этот метод позволяет оценить точность моделирования электромагнитных процессов и подтвердить корректность расчётных методов, применяемых при анализе индукции в обмотке.

В рамках работы рассматривается электромагнитный соленоид. В ходе исследования проводится математический расчет характеристик соленоида, проводится и его сборка. Конструкция устройства была сформирована с учётом возможности как практического эксперимента, так и последующего сопоставления с результатами численного моделирования. В последствии моделируется поведение соленоида [1] в программных средах:

1) Elcut — система двумерного и трёхмерного электромагнитного моделирования;

2) MATLAB Simulink — инструмент для динамического моделирования и симуляции с использованием физического моделирования.

Сравнение численных результатов с данными эксперимента в реальной установке позволяет оценить точность используемых моделей и методов. Чтобы определить степень расхождения между расчётными и реальными значениями требуется провести ряд испытаний в схожих условиях. Кроме того, это облегчает поиск потенциальных источников несоответствий.

Практические исследования, направленные на понимание принципа работы соленоида, особенно важны в свете растущих требований к надёжности и техническому обслуживанию электрических машин. Необходимость подтверждения точности численных моделей, используемых для проектирования соленоидов в инженерной практике, делает эту тему актуальной. Возможность оценить адекватность применяемых методов и найти способы их улучшения достигается путем сравнения результатов

компьютерного моделирования с данными реальных испытаний. Таким образом, исследование соленоида имеет важное практическое значение для разработки надежных и эффективных электромагнитных приводов.

В рамках дипломной работы предстоит выполнить расчет соленоида и силы втягивания сердечника в катушку, сборка экспериментальной установки электромагнитного соленоида и измерение параметров его характеристик. В дальнейшем провести расчеты в программных средах Elcut и Matlab Simulink на основе полученных характеристик с экспериментальной установки.

Параметры испытательной установки соленоида:

1) напряжение — 16 В;
2) количество витков в обмотке — 1250;
3) диаметр проволоки — 0.3 мм;
4) длина сердечника — 6 см;
5) сечение сердечника — 15 мм;
6) относительная магнитная проницаемость сердечника — 600;
7) масса сердечника — 50 г;
8) сопротивление обмотки — 29 Ом

1 Обзорная часть

Современные транспортные системы, промышленная автоматика и электроника невозможны без компактных, надежных и быстродействующих исполнительных устройств [7]. Электромагнитные приводы — миниатюрные устройства, преобразующие электрическую энергию в управляемое механическое движение. Они являются неотъемлемой частью современного промышленного производства. Соленоиды, обеспечивающие линейное перемещение подвижного сердечника под действием магнитного поля, являются одним из наиболее распространенных типов таких устройств [3].

Популярность соленоидов в промышленности можно объяснить их простотой конструкции, надежностью, высокой скоростью срабатывания, а также возможностью точного управления без сложных механических элементов. Благодаря этим свойствам у соленоидов есть применение в самых разнообразных отраслях, включающие мелкую бытовую технику и автомобильные системы. Также крупные промышленные станки, робототехника и энергетические установки используют электромагнитные соленоиды.

На производстве соленоиды используются:

1) в автоматических клапанах для управления подачей воздуха, воды, масла или газа;

2) в электромагнитных реле и контакторах для коммутации цепей;

3) в тормозных системах и фиксаторах машин и конвейеров;

4) в приводах штоков, замков и заслонок;

5) в пневмо- и гидрораспределителях как исполнительные элементы быстрого действия;

6) в дозирующих устройствах и упаковочных линиях, где требуется точное линейное перемещение;

7) в роботизированных захватах и конечных эффекторах.

Особая роль соленоидов в системах аварийного отключения, потому что в них важно мгновенное срабатывание при подаче сигнала. Компактность и энергетическая эффективность делают возможным внедрение соленоидов в устройства с ограниченным пространством и высокими требованиями к надёжности.

Несмотря на внешнюю простоту, поведение соленоида под действием электрического тока определяется множеством факторов: геометрией и числом витков обмотки, магнитными свойствами сердечника, величиной воздушного зазора, массой подвижного элемента и прочими характеристиками. От их правильного выбора зависит сила втягивания, быстродействие, потребляемая мощность и надёжность устройства. Исследование соленоида в рамках работы позволит глубже понять электромагнитные процессы, лежащие в основе его действия, также обеспечит оптимизацию конструкции для конкретных условий использования.

2 Соленоид

Соленоид — это электромагнитное устройство, которое преобразует электрическую энергию в механическое движение за счёт действия магнитного поля на сердечник. Он относится к классу электромагнитных исполнительных механизмов. Такие устройства находят широкое применение в системах управления, автоматике и машиностроении. Простота конструкции, высокая надёжность, быстродействие и компактность сделали соленоиды востребованными в различных отраслях техники — от бытовой электроники до промышленного оборудования.

Соленоид состоит из катушки с обмоткой из медного провода и подвижного сердечника из магнитопроницаемого материала [1]. При подаче электрического тока на обмотку катушки магнитное поле втягивает сердечник внутрь. Этот процесс происходит из-за того, что система стремится уменьшить магнитное сопротивление. Другими словами, это означает, что воздушный зазор, через который проходит магнитный поток, должен быть минимальным. Различные механические элементы, такие как штоки, клапаны, защёлки и т. д., могут двигаться под втягивающим усилием.

Принцип действия соленоида основан на законе Ампера и правила Ленца [5]. Ток в обмотке создаёт магнитное поле, направленное вдоль оси катушки. Взаимодействуя с сердечником, поле вызывает его перемещение в область с большей индукцией. После прекращения подачи тока сердечник возвращается в исходное положение либо за счёт возвратной пружины, либо под действием силы тяжести. Таким образом, соленоид может работать в импульсном или удерживающем режиме, в зависимости от конструкции и требований.

2.1 Разновидности соленоида

Соленоиды, как электромагнитные устройства, имеют множество конструктивных разновидностей, каждая из которых адаптирована к конкретным целям, условиям работы и уровням усилия, хода, времени срабатывания и надежности, которые они требуют [4, 2]. Соленоиды используются в широком спектре конструкций, от бытовых приборов до сложных промышленных автоматизированных систем. Рассмотрим основные типы соленоидов, которые группируются в соответствии с их движением, конструкцией, режимом работы и целью использования.

2.1.1 Линейные соленоиды

Это самый распространенный тип соленоида. Он работает за счет втягивания подвижного сердечника внутрь катушки при подаче тока. Под действием магнитного поля сердечник движется вдоль оси катушки, создавая поступательное усилие. После снятия напряжения сердечник возвращается за счет собственного веса или встроенной пружины. Рисунок 1 демонстрирует конструкцию этого типа соленоида.

Его основные преимущества включают простоту конструкции, высокую надёжность, быстрый отклик и простоту управления. Эти характеристики делают линейный соленоид популярным в системах автоматизации, замках, клапанах и других исполнительных механизмах.

Единственный недостаток таких устройств заключается в том, что, хотя сердечник втягивается в катушку, для возврата требуются пружины или сила тяжести. Кроме того, соленоид создает неравномерное усилие, которое зависит от положения сердечника относительно катушки, а ход перемещения обычно ограничен.

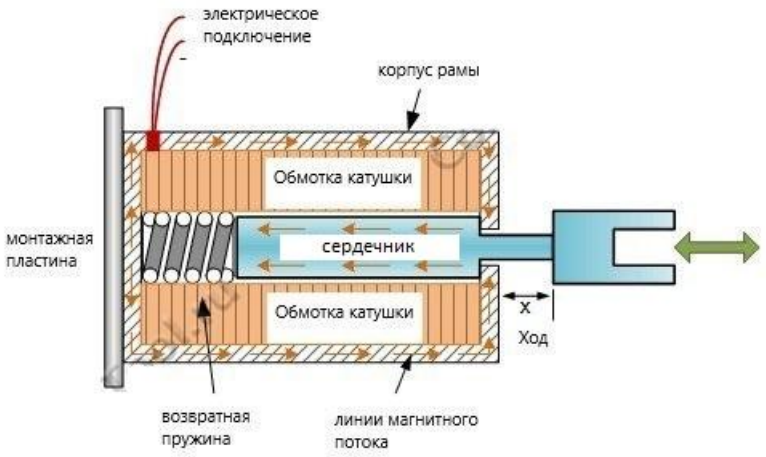

Рисунок 1 – схематическое изображение линейного соленоида

2.1.2 Двусторонние линейные соленоиды

Этот вид соленоидов может перемещать сердечник не только вперед, но и назад. Это происходит за счёт двух обмоток, работающих поочерёдно. Такой механизм позволяет глубже управлять положением сердечника. На рисунке 2 показан внешний вид двустороннего соленоида.

Такие соленоиды применяются в более сложных системах управления, переключателях, а также в случаях, где возвратное усилие пружины нежелательно или недостаточно. Но их конструкция более громоздкая, требует более сложной схемы управления. Эти недостатки в результате повышают общую стоимость системы.

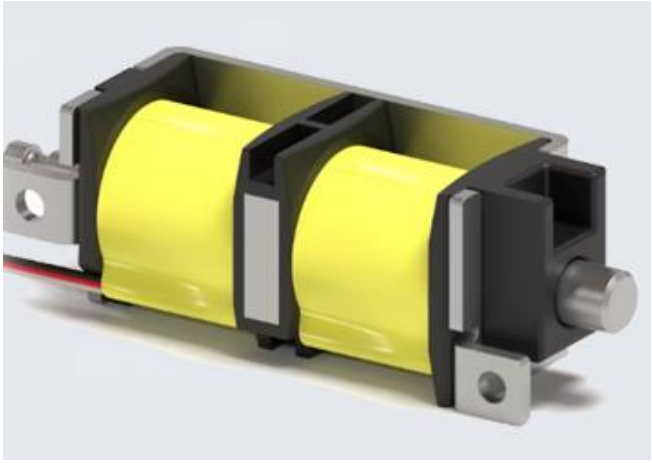

Рисунок 2 – двусторонний соленоид

2.1.3 Удерживающие соленоиды

Этот тип соленоида используется для фиксации подвижного элемента в заданном положении при наличии постоянного тока. Пока подаётся питание, удерживающее усилие создаётся в магнитной цепи и сохраняется. Удержание прекращается при снятии напряжения. Это делает их полезными в тормозных системах, защёлках и фиксаторах. На рисунке 3 внешний вид данного типа соленоида.

Преимуществами таких устройств являются их стабильность удержания и простота их использования. Неспособность быстро двигаться, постоянный расход энергии при удержании и нагрев обмотки ограничивают их использование без охлаждения.

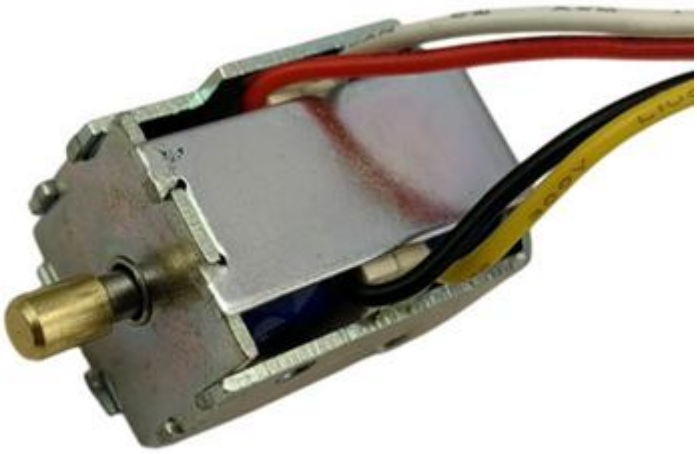

Рисунок 3 – удерживающий соленоид

2.1.4 Поворотные соленоиды

В этих соленоидах механическая энергия преобразуется не в линейное, а во вращательное движение, обычно с ограниченным углом поворота (до 90°). В конструкции используется особая форма якоря и магнитной системы, позволяющая реализовать такой вращательный момент. Строение поворотного соленоида изображено на рисунке 4.

Их главным преимуществом является возможность приведения во вращение без дополнительных преобразователей движения. Однако такая конструкция требует более точного проектирования магнитопровода, отличается сложной геометрией и, как правило, стоит дороже по сравнению с аналогами.

Рисунок 4 – поворотный соленоид

2.1.5 Миниатюрные соленоиды

Среди выраженных особенностей эти устройства отличаются малыми размерами и малой потребляемой мощностью. Они используются в условиях, где требуется точность и компактность, например, в медицинском оборудовании, камерах, системах автоматизации лабораторных процессов. На 5 рисунке показан образец миниатюрного соленоида.

Среди основных достоинств компактность, высокая точность срабатывания и малое потребление энергии. Но у таких устройств невысокое усилие, малый ход и чувствительность к перегреву, а также повышенные требования к качеству сборки и стабильности питающего напряжения.

Рисунок 5 – миниатюрный соленоид

2.1.6 Импульсные соленоиды

Предназначены для кратковременного срабатывания при подаче короткого импульса тока. После перемещения сердечника устройство либо блокируется механически, либо удерживается в новом положении с помощью магнитного остатка или фиксирующих элементов. Рисунок 6 демонстрирует пример применения импульсного соленоида.

Такие устройства идеально подходят для защёлок, замков и других импульсных механизмов из-за их быстрого отклика и низкого энергопотребления. Тем не менее, поскольку они требуют внешних механизмов фиксации и не обеспечивают плавного возврата, они не подходят для циклической или удерживающей работы и могут быть непригодны для определенных задач.

Рисунок 6 – импульсный соленоид в составе дверного замка

2.2 Параметры соленоида

При исследовании соленоида особое внимание уделяется его электрическим, магнитным и механическим характеристикам:

1) сопротивление и индуктивность обмотки;
2) количество витков;

3) сила втягивания;

4) ход и масса сердечника;

5) временные параметры срабатывания и отпускания;

От этих параметров зависит эффективность работы устройства, его энергопотребление и долговечность. Для анализа характеристик соленоида применяются как экспериментальные методы, так и численные методы моделирования в программных средах, таких как Elcut и Matlab Simulink. Исследования позволяют определить оптимальные конструктивные параметры и смоделировать поведение устройства при различных нагрузках и режимах работы.

2.3 Выбор соленоида

Для проведения испытаний был выбран линейный соленоид втягивающего действия, потому что этот тип электромагнитного исполнительного устройства является наиболее распространенным, конструктивно простым и наглядным. При подаче электрического тока на обмотку этот соленоид обеспечивает поступательное движение подвижного сердечника. Это позволяет фиксировать и анализировать важные параметры его работы, такие как сила втягивания, перемещение, ток, напряжение и время срабатывания.

Относительная простота конструкции делает возможным сопоставление результатов численного моделирования и реальных измерений, а также позволяет легко изменять экспериментальные параметры: количество витков, ток, массу сердечника и геометрию катушки. Кроме того, линейный соленоид хорошо изучен теоретически, что облегчает построение математической модели и её реализацию в программных средах Elcut и Matlab Simulink. Всё это делает линейный соленоид оптимальным выбором для проведения экспериментов и сравнения результатов моделирования с данными, полученными на экспериментальной установке.

2.4 Особенности исследования соленоида и его характеристик

В рамках анализа электромагнитных исполнительных устройств исследование соленоида важная задача. Соленоид как устройство преобразует электрический сигнала в механическое движение за счёт создаваемого магнитного поля. Основное внимание в процессе исследования уделяется определению электрических, магнитных и механических характеристик, а также взаимосвязи между ними. Для исследования соленоида требуется рассмотрение как экспериментальных методов, так и моделирование в программных средах. На практике исследуются следующие параметры:

1) сила тока в обмотке;
2) индуктивность и сопротивление катушки;
3) число витков;
4) характеристики магнитного поля;
5) усилие, развиваемое на подвижный сердечник;
6) перемещение сердечника;
7) временные характеристики втягивания и отпускания;

Моделирование магнитного поля представляет собой большую проблему, особенно когда дело доходит до области воздушного зазора. При численном анализе важно правильно определить геометрию катушки, сердечника и зазора, а также использовать реальные значения магнитной проницаемости материалов. Поскольку эта характеристика определяет эффективность устройства как привода, особое внимание уделяется оценке силы втягивания и ее зависимости от положения сердечника. В результате сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными можно подтвердить валидацию модели и определить параметры, влияющие на производительность соленоида.

3 Расчет линейного соленоида

Произведем расчет линейного соленоида по методике [4,8]. За исходные данные взяты:

1) напряжение — 16 В;
2) количество витков в обмотке — 1250;
3) диаметр проволоки — 0.3 мм;
4) длина сердечника — 6 см;
5) сечение сердечника — 15 мм;
6) относительная магнитная проницаемость сердечника — 600;
7) масса сердечника — 50 г;
8) сопротивление обмотки — 29 Ом.

Когда сердечник втягивается внутрь катушки соленоида, происходит уменьшение магнитной энергии системы за счёт сокращения воздушного зазора и снижения магнитного сопротивления. Эта убывающая энергия не исчезает, а преобразуется в механическую работу, в следствие чего возникает втягивающая сила, которая перемещает сердечник внутрь. Таким образом:

$$F = \frac{dW}{dg}, \quad (1)$$

где:

1) W — энергия магнитного поля;
2) g — длина воздушного зазора;
3) F — сила, с которой магнит «стягивает» зазор.

Магнитная энергия в зазоре:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot V, \quad (2)$$

где:

1) B — магнитная индукция;
2) V=A·g — объём зазора;
3) μ0 — магнитная проницаемость вакуума равная $1.26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м;

4) A — поперечное сечение сердечника.

Подставляя значение зазора:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot A \cdot g, \quad (3)$$

Сила это производная энергии по зазору, следовательно:

$$F = -\frac{dW}{dg} = \frac{d}{dg} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot A \cdot g \right), \quad (4)$$

Поскольку магнитная индукция не зависит от длины воздушного зазора в приближении, производная обретает вид:

$$F = -\frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot A, \quad (5)$$

Знак «минус» означает, что сила направлена на уменьшение зазора, то есть втягивает сердечник, поэтому:

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0}, \quad (6)$$

Индукция внутри соленоида рассчитывается:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{NI}{l}, \quad (7)$$

где N — количество витков соленоида.

Если основной зазор в воздушной щели g, то магнитная длина цепи ≈g, и следовательно:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{NI}{g}, \quad (8)$$

Подставляя данную формулу в расчет силы получаем полную формулу для расчёта втягивающей силы электромагнита с воздушным зазором:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 I^2 A}{2g^2}, \quad (9)$$

Реальное значения силы тока по закону ома будет равно:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{16}{29} = 0.55 \text{ A}, \quad (10)$$

Подставляем исходные значения соленоида и величины зазора в формулу расчета втягивающей силы электромагнита с воздушным зазором.

Результаты при зазоре в 10 мм:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 I^2 A}{2g^2} = \frac{1.26 \cdot 10^6 \cdot 1250^2 \cdot 0.55^2 \cdot 1.13 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0.01^2} \approx 0.33 \text{ Н.} \quad (11)$$

Результаты при зазоре в 8 мм:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 I^2 A}{2g^2} = \frac{1.26 \cdot 10^6 \cdot 1250^2 \cdot 0.55^2 \cdot 1.13 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0.008^2} \approx 0.39 \text{ Н.} \quad (12)$$

Результаты при зазоре в 4 мм:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 I^2 A}{2g^2} = \frac{1.26 \cdot 10^6 \cdot 1250^2 \cdot 0.55^2 \cdot 1.13 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0.004^2} \approx 0.89 \text{ Н.} \quad (13)$$

4 Экспериментальная установка соленоида

В первой части практической работы были проведены испытания модели собранной установки соленоида. Экспериментальная установка предназначена для измерения втягивающей силы, с помощью электромагнитного соленоида при подаче тока на его обмотку. Целью измерения является определение усилия, с которым сердечник втягивается внутрь катушки под действием создаваемого магнитного поля, при различных величинах воздушного зазора.

В процессе установки стальной сердечник располагается таким образом, чтобы его нижняя часть опиралась на весовой датчик или портативные весы, расположенные под ним. Когда на обмотку соленоида подается ток, магнитное поле начинает втягивать сердечник в катушку. Благодаря этой силе сердечник начинает нажимать на весы. Величина приложенной силы отображается на дисплее измерительного прибора в виде изменения массы. Рисунок 7 показывает внешний вид установки стенда соленоида.

Рисунок 7 – экспериментальная установка электромагнитного соленоида

Для намотки обмотки соленоида была выбрана медная проволока диаметром 0.3 мм, для достижения оптимального соотношения между током, числом витков и возникающей втягивающей силой при сохранении допустимого нагрева катушки.

В качестве магнитопровода использовался стальной сердечник с относительной магнитной, проницаемостью в 600. Он обеспечивает достаточную концентрацию магнитного потока и работу соленоида в условиях близких к техническим. Сердечник показан на рисунке 8

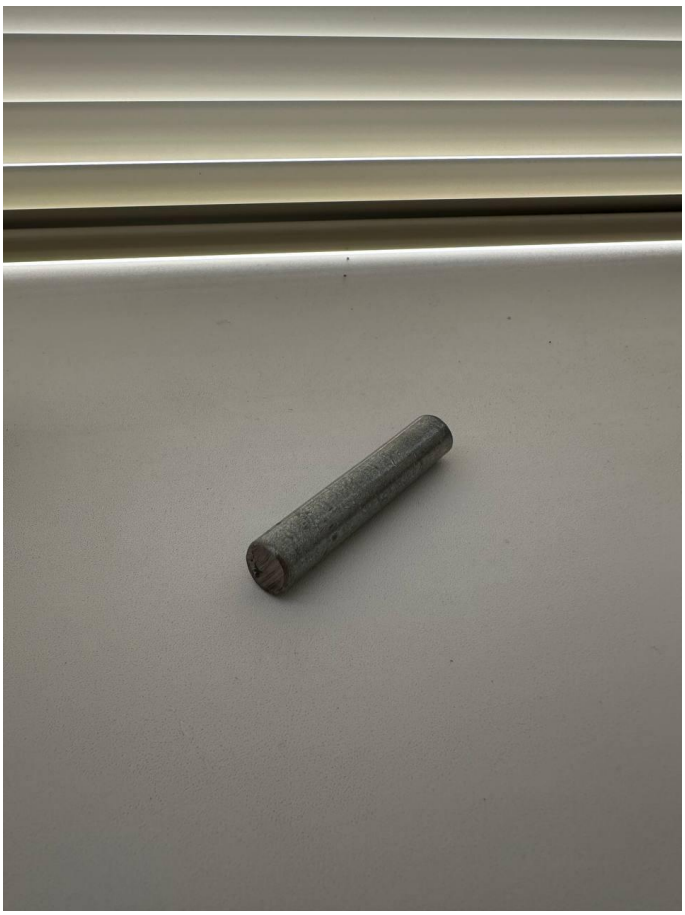

Рисунок 8 – внешний вид сердечника

Катушка для соленоида была смоделирована в программе Компас-3Д с диаметром в 15 мм и длиной в 40 мм. После она была изготовлена на 3D-принтере. Это позволило точно воспроизвести требуемую геометрию для задачи и надёжно зафиксировать обмотку. Распечатанная катушка изображена на рисунке 9.

Рисунок 9 – катушка, распечатанная на 3D-принтере

Для обеспечения питания соленоида в процессе эксперимента был использован лабораторный источник постоянного тока АКИП-1145/1. Данный прибор представляет собой прецизионный программируемый источник питания, предназначенный для работы в лабораторных, учебных и инженерных условиях. Он обладает широким диапазоном выходного напряжения и тока, а также возможностью регулировки параметров питания. Источник питания изображен на рисунке 10.

Рисунок 10 – источник питания АКИП-1145/1

Измерение развиваемой втягивающей силы осуществлялось с помощью портативных миллиграммовых весов, позволивших зафиксировать

результирующее усилие при различных режимах подачи напряжения. Данные весы показаны на рисунке 11.

Рисунок 11 – весы миллиграммовые

4.1 Сборка экспериментальной модели соленоида

1) Изготовление катушки: на 3D-принтере изготавливается катушка заданных геометрических размеров, соответствующих параметрам предполагаемого соленоида.

2) Намотка обмотки: на готовую катушку аккуратно наматывается 1250 витков медной проволоки диаметром 0,3 мм. Намотка осуществляется вручную.

3) Фиксация проволоки: по завершении намотки провод фиксируется изолентой или термостойким скотчем, чтобы предотвратить его разматывание при установке или перемещении. Оба конца провода зачищаются для последующего подключения к источнику питания.

4) Подключение питания: обмотка соленоида подключается к лабораторному источнику питания с возможностью регулировки напряжения

и тока. Перед включением проверяется надёжность соединений и целостность провода.

5) Установка на подставку: собранный соленоид подвешивается на специально подготовленной подставке, которая удерживает катушку в строго вертикальном положении.

6) Подготовка весов: под катушку, строго по оси симметрии, устанавливаются портативные миллиграммовые весы, которые будут фиксировать силу втягивания. Весы выравниваются и включаются в режиме "обнуления", чтобы масса сердечника не учитывалась как постоянная нагрузка.

7) Установка сердечника: стальной сердечник устанавливается таким образом, чтобы его нижняя часть находилась на платформе весов, а верхняя осталась погруженной в полость катушки.

8) Проведение испытаний: после проверки всех соединений и положения элементов подаётся питание на обмотку, и весы начинают фиксировать усилие, с которым сердечник втягивается внутрь катушки. Измерения проводятся при разных расстояниях и уровнях тока.

4.2 Методика проведения экспериментов модели соленоида

Цель эксперимента состоит в том, чтобы определить втягивающую силу, создаваемую линейным соленоидом [2] при подаче напряжения на его обмотку. Усилие было зарегистрировано с помощью мобильных миллиграммовых весов, которые служили как измерительным инструментом [6], так и контактной поверхностью, на которую воздействует сердечник соленоида.

В эксперименте тестировались различные расстояния между корпусом соленоида и весами, а также изменения высоты катушки над платформой. Это позволяет оценить влияние положения сердечника в магнитном поле на развивающую силу. Зависимость втягивающей силы от положения сердечника

была определена путем поэтапного изменения высоты установки и фиксации соответствующих показаний весов. Это дает важные данные о распределении магнитного поля внутри катушки и общей эффективности конструкции.

4.3 Порядок проведения экспериментов модели соленоида

1) Установка соленоида на нужную высоту: с помощью регулируемой подставки соленоид закрепляется в вертикальном положении на заданной высоте над платформой весов.

2) Подготовка весов: портативные миллиграммовые весы устанавливаются строго под ось соленоида. Устройство включается и производится обнуление показаний, чтобы масса сердечника не влияла на итоговые измерения.

3) Подключение и запуск источника питания: лабораторный источник питания АКИП-1145/1 включается. Проверяется надёжность соединений между обмоткой соленоида и клеммами источника.

4) Установка рабочего напряжения: на источнике выставляется напряжение 16 В, соответствующее расчётному режиму работы соленоида. Ток автоматически устанавливается в зависимости от сопротивления обмотки.

5) Подача питания на соленоид: кнопкой включения источник подаёт напряжение на обмотку. Соленоид активируется, создаётся магнитное поле, и сердечник начинает втягиваться внутрь катушки.

6) Фиксация результата: весы записывают усилие, с которым сердечник нажимает на платформу.

7) Отключение питания: после завершения измерений питание отключается. Весы возвращаются в исходное состояние, а соленоид снимается или переводится в новое положение.

8) Изменение высоты установки: высота соленоида над весами изменяется на заданную величину, и процедура повторяется для последующих измерений.

4.4 Завершение испытаний

1) Отключение питания: после завершения всех измерений питание на соленоид отключается с помощью кнопки выключения на источнике АКИП-1145/1.

2) Извлечение сердечника: ферромагнитный сердечник аккуратно извлекается из внутренней полости катушки, чтобы не сместить измерительное оборудование.

3) Удаление весов: весы осторожно убираются из-под установки. При необходимости устройство выключается и подготавливается к следующему испытанию.

4) Снятие соленоида с подставки: соленоид аккуратно снимается с подставки, на котором он был закреплён. Снятие происходит без резких движений во избежание повреждений проводов.

5) Отключение соленоида от источника питания: провода, подключённые к клеммам источника питания, отсоединяются от обмотки соленоида.

4.5 Итоги испытаний

В результате проведенных экспериментов над моделью электромагнитного соленоида были получены данные измерений. Результаты указаны в таблице 1.

Таблица 1 – результаты испытаний экспериментальной установки

Высота соленоида над поверхностью, мм	Сила втягивания соленоида, г
2	23.6
4	16.3
8	6.7
10	3.6

Поскольку конструктивно сердечник соленоида был длиннее самого соленоида, можно заключить что меньшие значения высот соленоида над поверхностью соответствуют большему удалению сердечника от центра соленоида. Характеристики с учетом длины катушки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – результаты испытаний экспериментальной установки с учетом длины соленоида

Длина зазора, мм	Сила втягивания соленоида, г
10	23.6
8	16.3
4	6.7
2	3.6

Следовательно, можно сделать вывод — чем дальше сердечник от центра соленоида, тем больше воздействует на него втягивающая сила электромагнитного соленоида. Результат опыта при высоте в 2 мм показан на рисунке 12.

Рисунок 12 – результат опыта при высоте в 2 мм на экспериментальной установке электромагнитного соленоида

5 Расчет линейного соленоида в программной среде Elcut

Во второй части практической работы был выполнен расчет модели соленоида с помощью программного обеспечения Elcut. Для численного исследования работы соленоида было выбрано использование осесимметричной постановки магнитостатического поля [6]. За счет использования геометрической симметрии устройства этот метод позволяет упростить расчёт и значительно сократить время моделирования, при этом результаты остаются точными. В исследовании использовалась двумерная плоскость с вращением вокруг оси симметрии.

При построении схемы установки в геометрическом поле магнитостатической задачи elcut были установлены параметры для каждого из блоков. Они указаны на рисунке 13 .

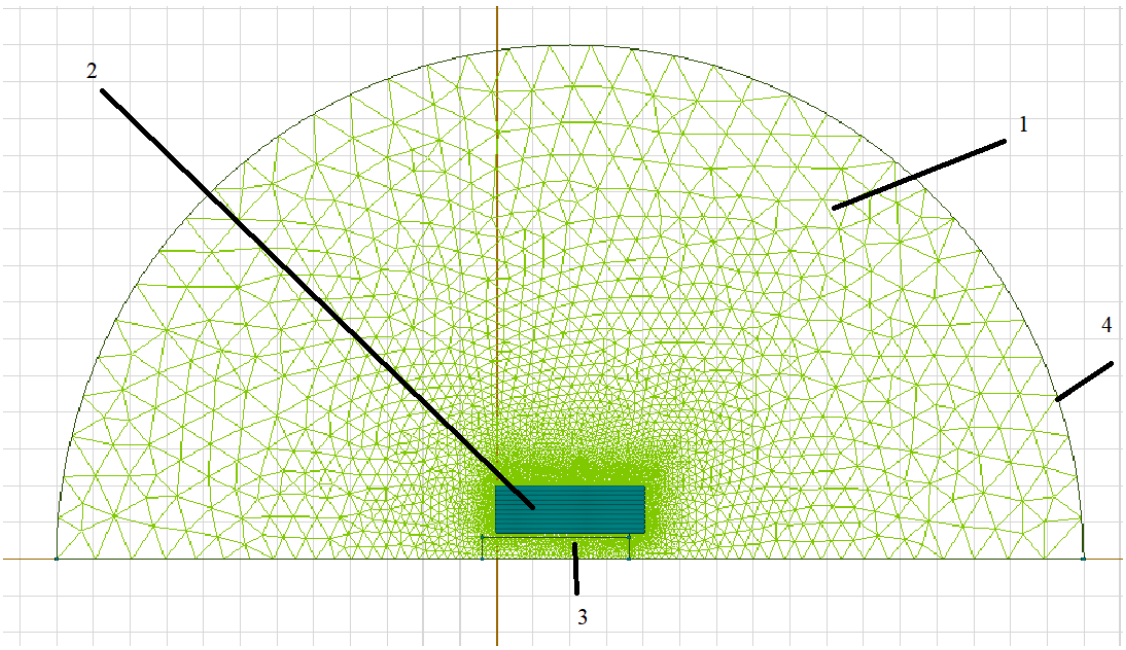

Рисунок 13 – блоки экспериментальной модели соленоида в elcut

Блоки, показанные на этой схеме:

1) воздушная среда вокруг установки;
2) обмотка соленоида;

3) сердечник из магнитопроницаемого материала;

4) граница воздушной среды.

Характеристики блоков, использованных при построении испытательной модели, были подобраны на основе использованных для сборки экспериментальной модели соленоида. Они показаны на рисунках 14, 15, 16 и 17.

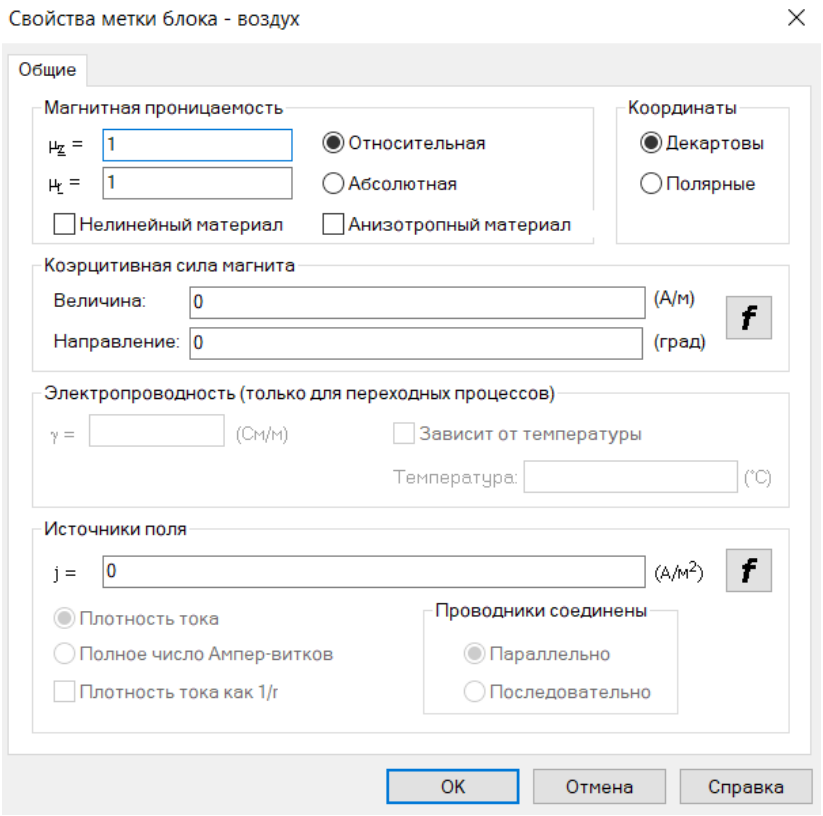

Рисунок 14 – характеристика блока воздуха окружающей среды

Магнитная проницаемость воздуха равная единице соответствует идеальному немагнитному материалу. При этом в воздухе не может быть источников тока, он служит лишь средой распространения поля.

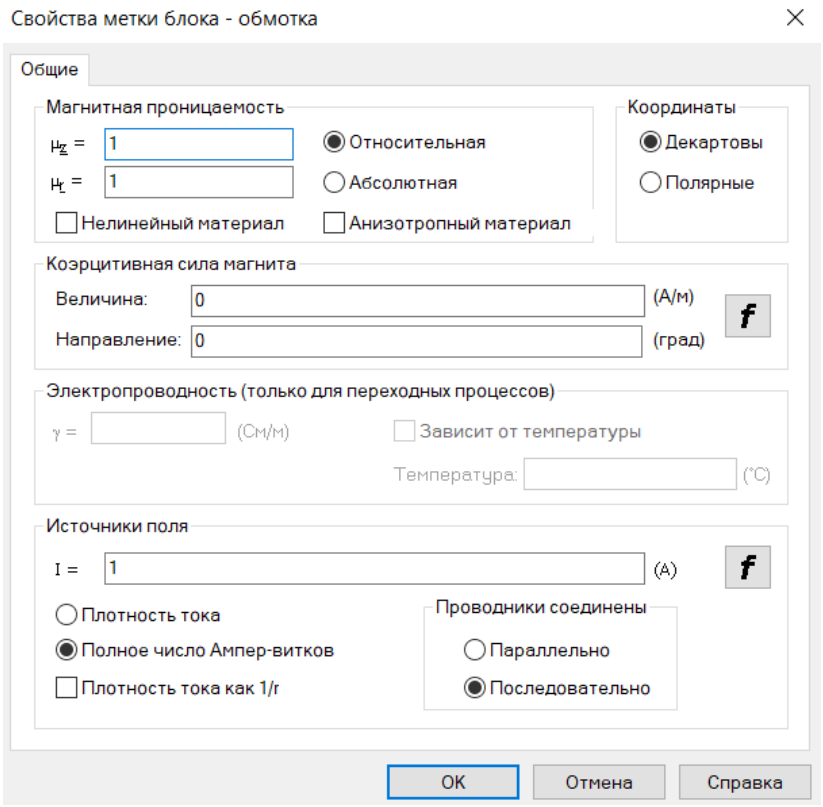

Рисунок 15 – характеристика блока обмотки соленоида

Магнитная проницаемость медной обмотки по значению близка к единице поскольку не является магнитным материалом. На нее подается ток из источника питания, потому что обмотка создаёт магнитное поле за счёт протекающего через неё тока. При этом обмотке дополнительно был присвоен статус «последовательный проводник», что позволяет Elcut учитывать число витков в расчёте.

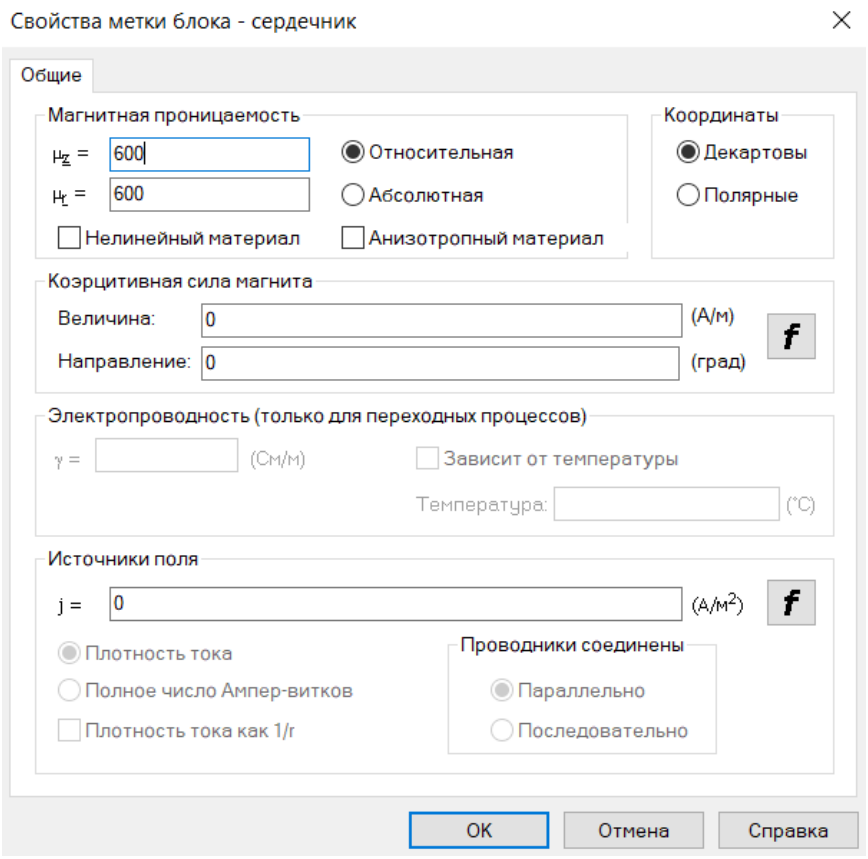

Рисунок 16 – характеристика блока сердечника

Магнитная проницаемость сердечника из стали была выбрана равной 600 на основе использованного материала. На сердечник не подается ток, в следствие чего он равен нулю.

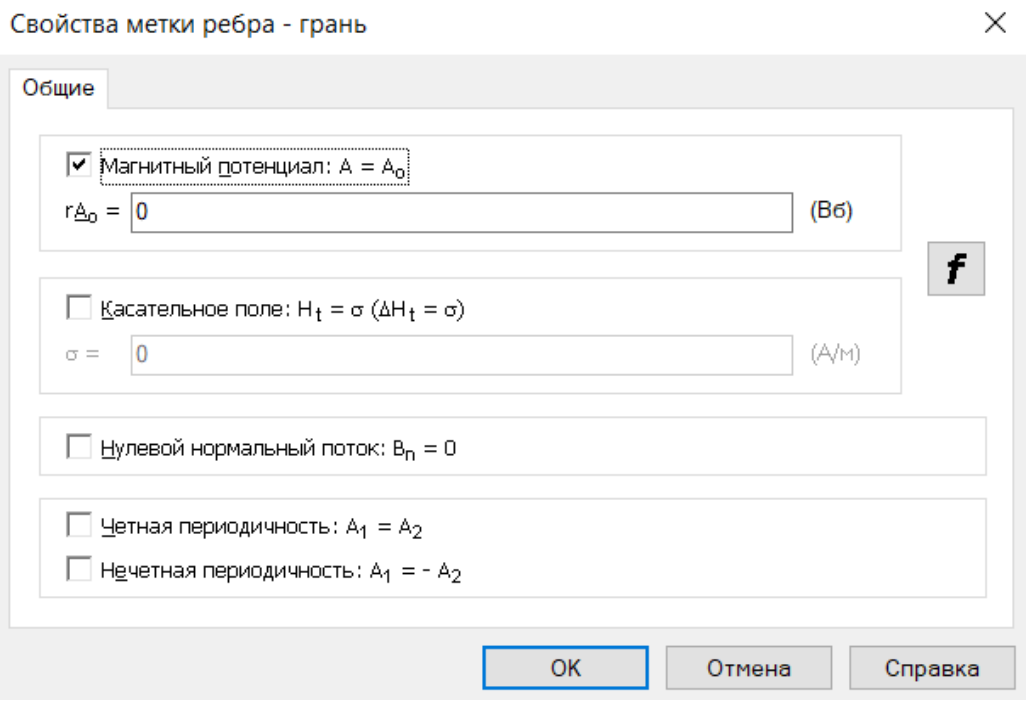

Рисунок 17 – характеристика блока границы

Внешней границе модели были заданы физические условия, ограничивающие область расчёта. Подобные граничные условия устанавливаются на внешних краях области расчёта, чтобы зафиксировать потенциал и избежать ошибок а решении.

Геометрия модели была частично подготовлена во внешнем CAD-редакторе SolidWorks, где была построена обмотка соленоида. Созданная модель была экспортирована в формате DXF и впоследствии загружена в Elcut [6]. Остальные элементы были смоделированы непосредственно в среде Elcut — воздушный купол, сердечник и внешние граничные области. Таким образом, была создана полная расчетная область, включающая все элементы, участвующие в создании магнитного поля.

5.1 Методика проведения расчета в elcut

После задания материалов и условий была создана конечная элементная сетка, охватывающая все области модели. Она изображена на рисунке 18.

Затем была выполнена магнитостатическая задача, в результате чего получено распределение магнитного поля внутри и вокруг соленоида. Основным выходным параметром расчёта стало усилие, действующее на сердечник соленоида, вычисляемое по распределению магнитной индукции и напряжённости.

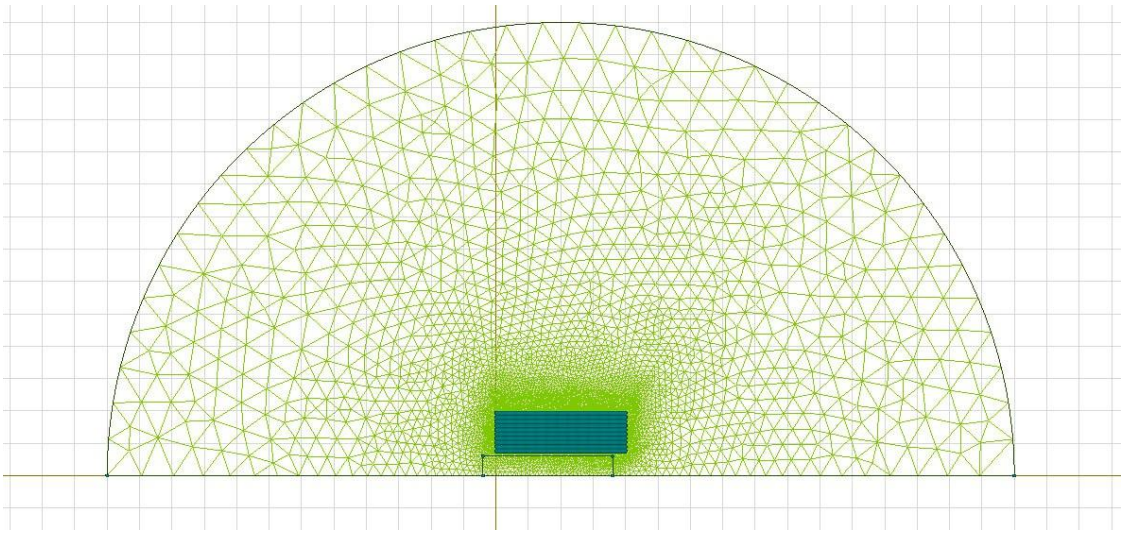

Рисунок 18 – элементная сетка

5.2 Результаты расчета в elcut

Был проведен ряд опытов в программной среде elcut с изменяющимися величинами зазора. На основе проведенных испытаний были получены результаты, показанные на рисунках 19- 21.

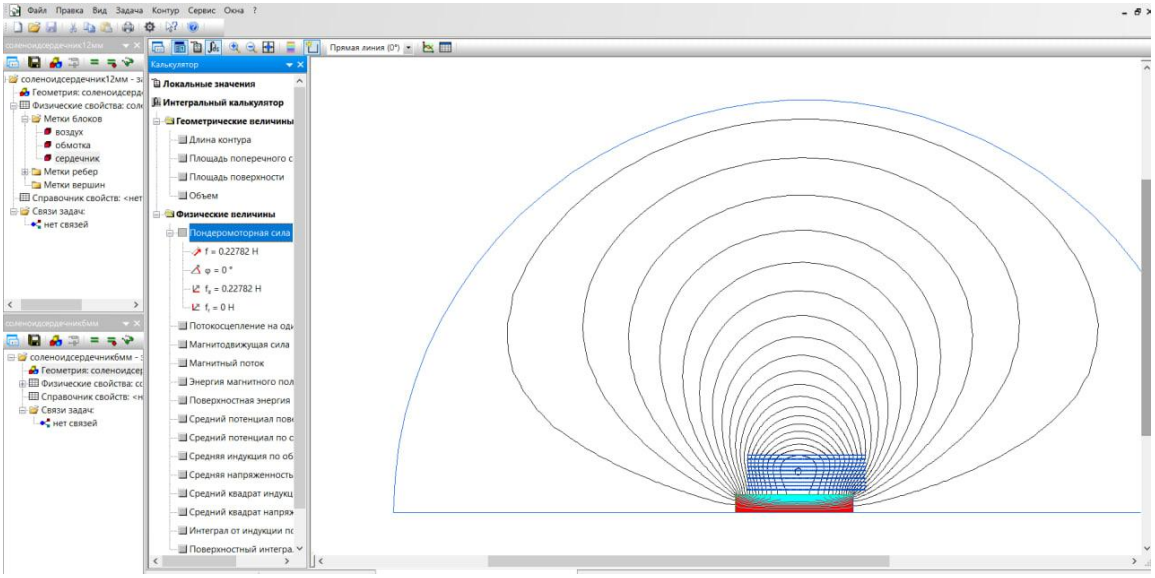

Рисунок 19 – результаты опыта при зазоре в 4 мм

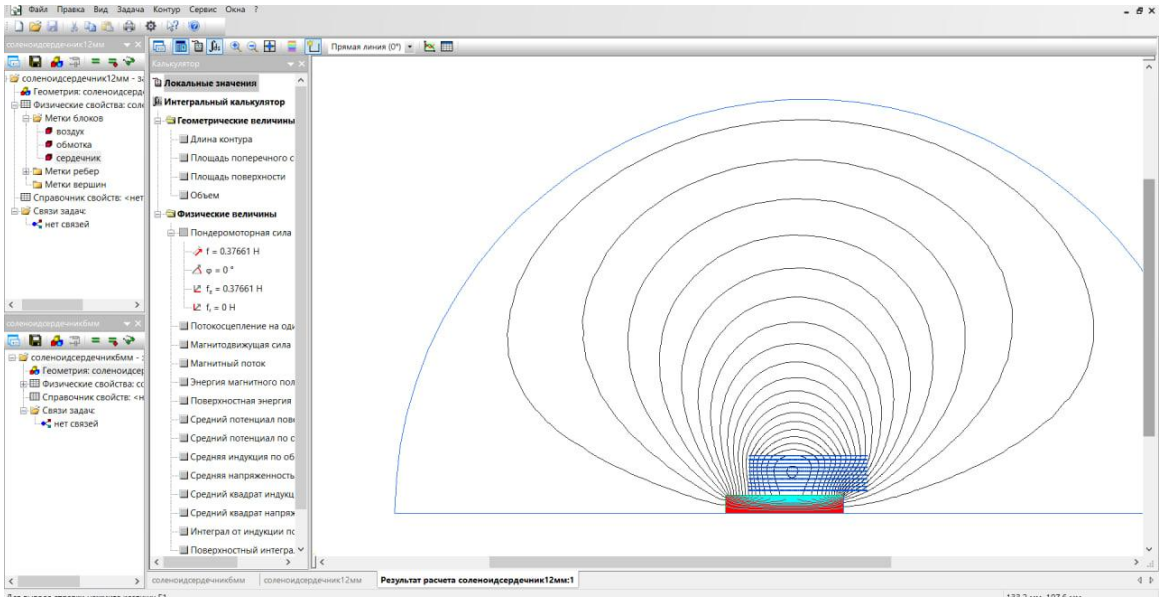

Рисунок 20 – результаты опыта при зазоре в 8 мм

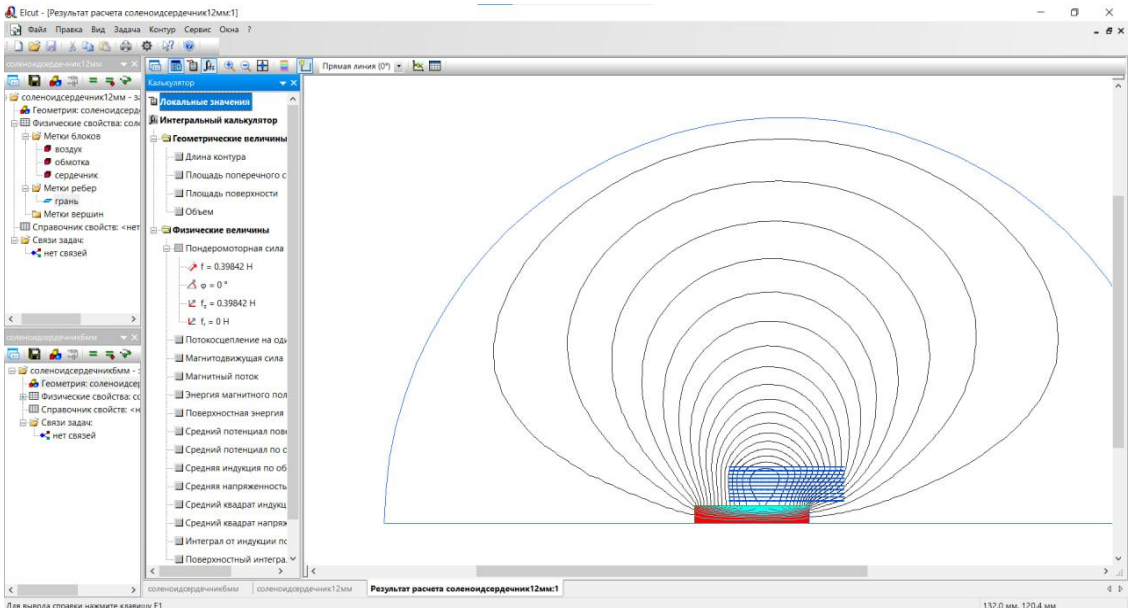

Рисунок 21 – результаты опыта при зазоре в 10 мм

По расчетам в Elcut результаты были занесены в таблицу 3:

Таблица 3 – результаты расчета в Elcut

Величина зазора, мм	Сила втягивания соленоида, гр
4	22.7
8	37.6
10	39.8

6 Компьютерное моделирование в программе Matlab Simulink

В третьей части практической работы было проведено моделирование соленоида в программной среде Matlab Simulink.

Для проведения моделирования и анализа поведения соленоида была выбрана среда Matlab, и ее графическая оболочка Simulink. Такой выбор обусловлен следующими преимуществами:

1 обширная библиотека блоков: Simulink предоставляет большой набор готовых компонентов для моделирования электромеханических, гидравлических, тепловых и других систем. Это существенно сокращает время на разработку модели и упрощает структуру проекта.

2 полная интеграция с Matlab: благодаря интеграции с Matlab пользователи получают доступ к мощному математическому аппарату, функциям анализа данных, визуализации и оптимизации. Это обеспечивает гибкость при настройке модели и расширяет её возможности.

3 поддержка физического моделирования: библиотека Simscape в составе Simulink предоставляет средства для моделирования реальных физических процессов — включая электромагнитные взаимодействия, движение тел, силы и моменты. Это делает Simulink удобным инструментом для анализа работы соленоидов как систем с электромеханической обратной связью.

Использование Simulink позволяет получить результаты, максимально приближенные к реальному поведению устройства, учитывая, что для правильного построения модели необходимо точно задать параметры обмотки, сердечника, геометрию и нагрузки.

Разработка экспериментального стенда включает в себя ряд ключевых аспектов:

1) конструкция: установка строится с учетом размеров и свойств исследуемого соленоида, чтобы обеспечить надежную фиксацию и воспроизводимость условий испытаний.

2) измерительные приборы: в системе есть датчики тока, напряжения, перемещения и, если необходимо, силы. Это позволяет получить данные, которые могут быть объективны для анализа.

3) сценарии испытаний: испытания проводятся при различных нагрузках и условиях, например, когда сердечник перемещается внутри соленоида.

4) сравнение данных: измеренные значения сравниваются с результатами моделей, что позволяет сделать выводы о точности и пригодности программного обеспечения к использованию в инженерной практике.

5) анализ и выводы: результаты сравнения позволяют определить уровни отклонения, определить причины потенциальных ошибок моделирования и предложить корректировки моделей или методов расчёта.

6.1 Разработка модели соленоида в программной среде Matlab Simulink

Модель «Соленоид с магнитными блоками», доступная в библиотеке примеров программы, была использована для разработки модели электромагнитного соленоида в графической среде Matlab Simulink [9]. Для этого использовались модули электричества и магнита из библиотеки Simscape. Поведение соленоида при воздействии на подвижный сердечник описано в этой модели.

В разработке модели использовались следующие компоненты:

1) DC Voltage — это блок, задающий источник питания для обмотки соленоида.

2) Repeating Sequence — используется для создания временного профиля напряжения для импульсного включения.

3) Solver Configuration — необходим для правильной работы модели.

4) Electrical Reference — нулевой потенциал, необходимый для замыкания электрической цепи, называется электрической точкой отсчета.

5) Resistor — элемент сопротивления, который имитирует сопротивление обмотки соленоида.

Для моделирования электромагнитной части использовались следующие блоки из библиотеки Simscape > Magnetic:

1) Electromagnetic Converter — преобразователь электрической энергии в магнитную, соединяющий электрическую и магнитную подсистемы.

2) Reluctance — блок, моделирующий магнитное сопротивление участка цепи (включая зазор и магнитопровод).

3) Reluctance Force Actuator — ключевой блок, преобразующий магнитную энергию во втягивающее механическое усилие.

4) Magnetic Reference — магнитная точка отсчёта, служащая замыканием магнитной цепи.

Механическая часть, представляющая подвижный сердечник, была реализована с использованием следующих элементов из библиотеки Simscape > Foundation > Mechanical (Translational):

1) Mass — масса подвижного сердечника.

2) Translational Spring — возвратная пружина, создает противодействующее усилие.

3) Translational Damper — демпфирующий элемент, имитирующий потери на трение.

4) Translational Motion Sensor — датчик перемещения, измеряющий положение сердечника.

5) Mechanical Translational Reference — механическая точка отсчёта, задающая нулевую точку координат.

Для отображения результатов расчёта был использован блок Scope, подключённый к датчику перемещения. На рисунках 22 и 23 показаны собранные схемы испытательной установки соленоида в MATLAB Simscape.

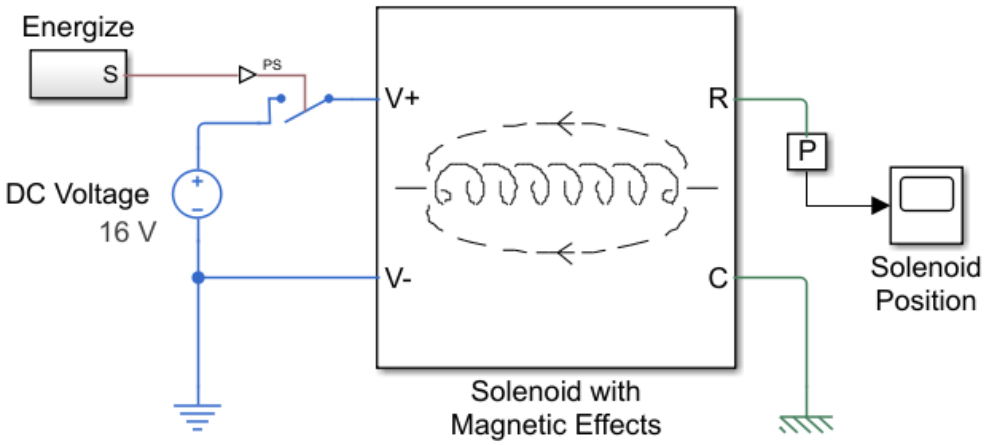

Рисунок 22 – внешний вид модели соленоида

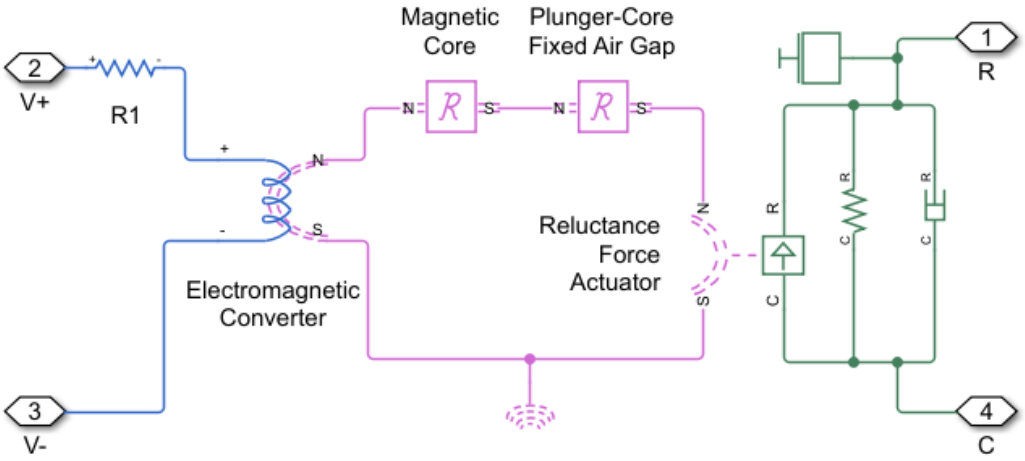

Рисунок 23 – механическая и электромагнитная составляющая экспериментальной установки

Перечисленным выше блокам библиотеки Simscape были даны следующие параметры:

1) напряжение — 16 В;
2) количество витков в обмотке — 1250;
3) диаметр проволоки — 0.3 мм;
4) длина сердечника — 4 см;
5) сечение сердечника — 12 мм;
6) относительная магнитная проницаемость сердечника — 600;

7) масса сердечника — 50 гр;

8) сопротивление обмотки — 29 Ом;

9) общее время симуляции — 0.004 с.

6.2 Параметры электромагнитного соленоида в Matlab Simulink

После окончательной сборки модели электромагнитного соленоида в программной среде MATLAB Simulink были заданы параметры работы его блоков. Они показаны на рисунках 24- 29.

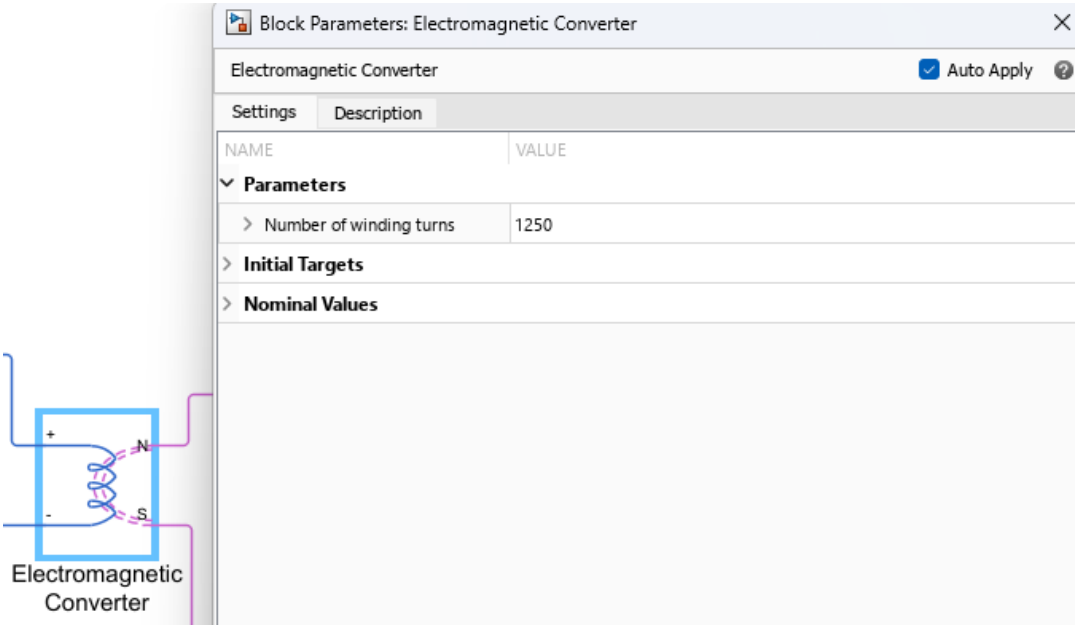

Рисунок 24 – параметры блока Electromagnetic Converter

Для блока Electromagnetic Converter нужно было выбрать необходимое количество витков соленоида для корректной работы. В ходе проведения испытаний были использованы 1250 витков.

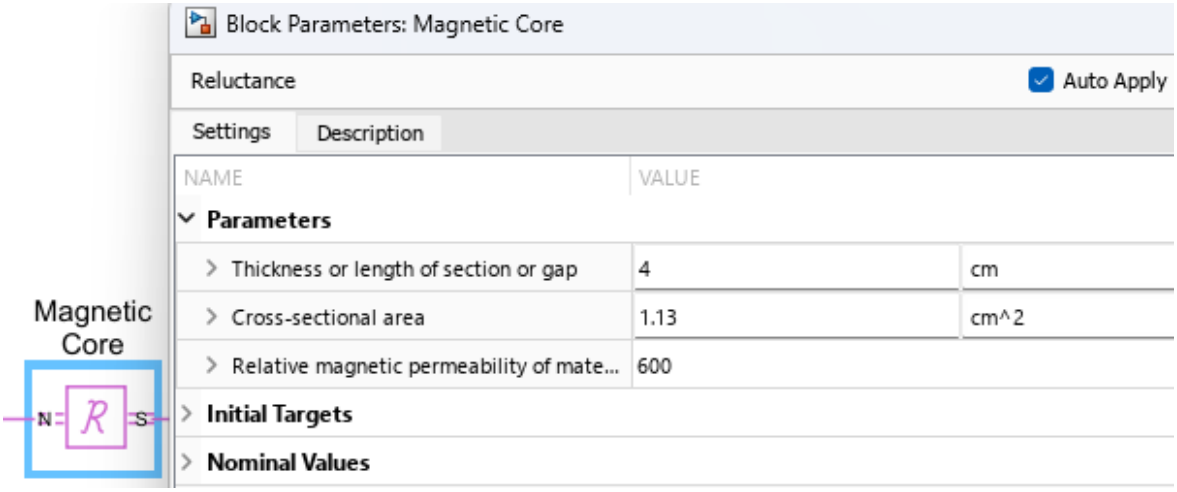

Рисунок 25 – параметры блока Reluctance: Magnetic Core

Для блока Reluctance: Magnetic Core нужно было выбрать длину сердечника соленоида, площадь его поперечного разреза и магнитную проницаемость материала для опыта. В ходе проведения испытаний был использован сердечник длиной в 4 см, диаметром в 12 мм и магнитной проницаемостью в 600.

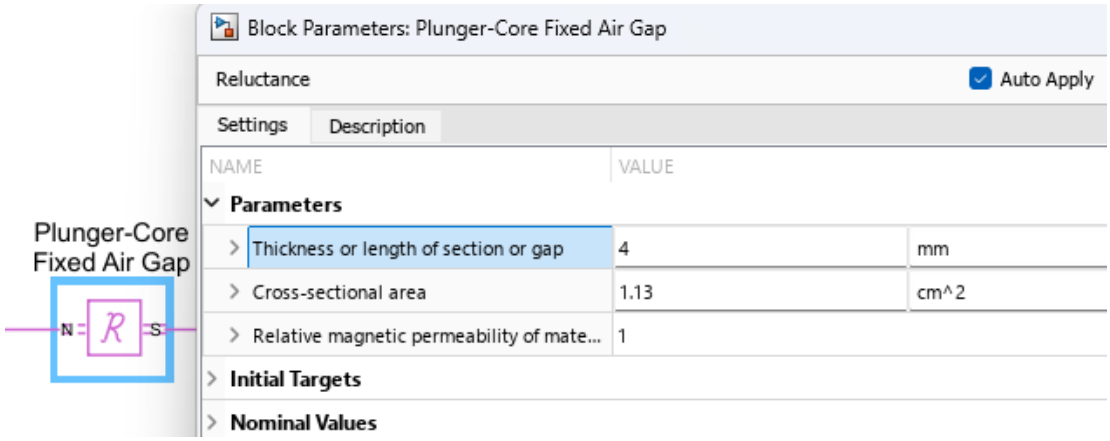

Рисунок 26 – параметры блока Reluctance: Plunger-Core Fixed Air Gap

Для блока Reluctance: Magnetic Core нужно было выбрать длину воздушного зазора, площадь его поперечного разреза и магнитную проницаемость материала для опыта. Поскольку зазор во время испытаний менялся, его значения подстраивались под соответствующие для испытаний.

Магнитная проницаемость воздуха приблизительно равна единице, а поперечный разрез зазора равен по площади поперечному разрезу сердечника.

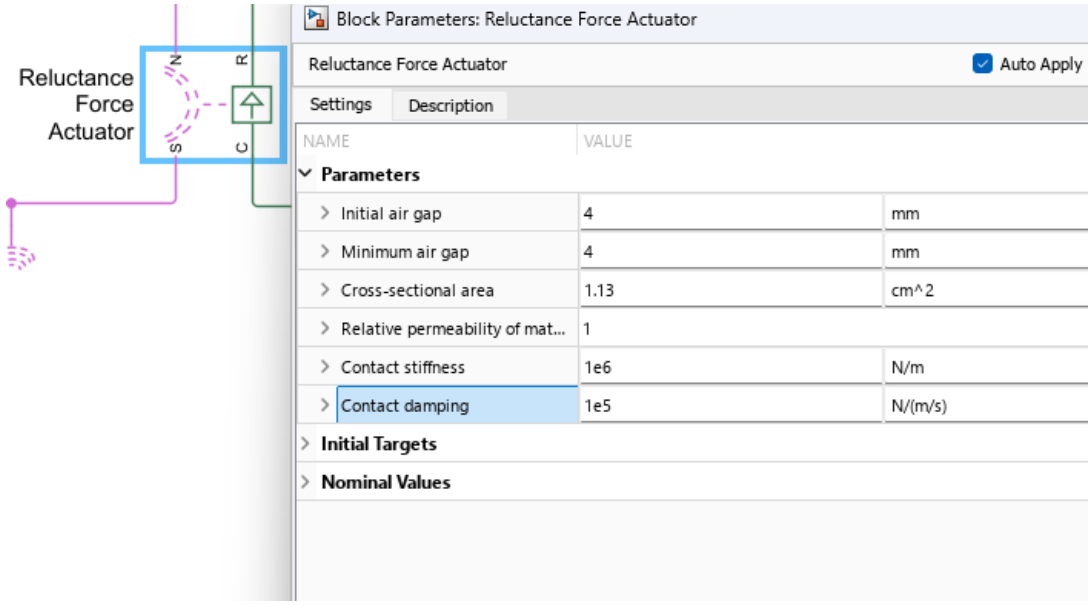

Рисунок 27 – параметры блока Reluctance Force Actuator

Для блока Reluctance Force Actuator нужно было выбрать длину исходного и минимального воздушного зазора, площадь его поперечного разреза, магнитную проницаемость материала для опыта, а также жесткость и затухание контакта. Поскольку зазор во время испытаний менялся, его значения подстраивались под соответствующие для испытаний, то же относится и к параметру минимального воздушного зазора. Магнитная проницаемость воздуха приблизительно равна единице, поперечный разрез зазора равен по площади поперечному разрезу сердечника, жесткость контакта была выбрана с произвольно высокими значениями для того, чтобы величина зазора сохранялась. Величина затухания контакта была взята на порядок ниже.

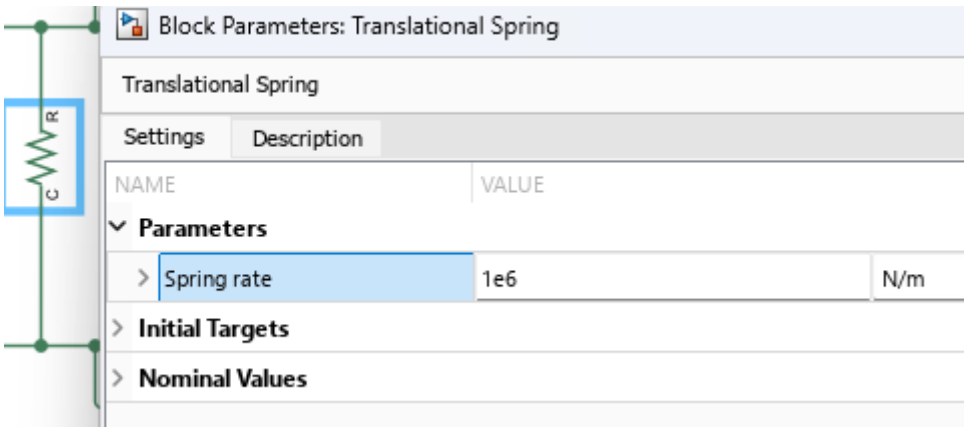

Рисунок 28 – параметры блока Translational Spring

Для блока Translational Spring нужно было подобрать величину жесткости контакта. Она была выбрана с произвольно высокими значениями для того, чтобы пружина не сжималась под давлением силы, воздействующей на сердечник и таким образом зазор сохранял свою величину.

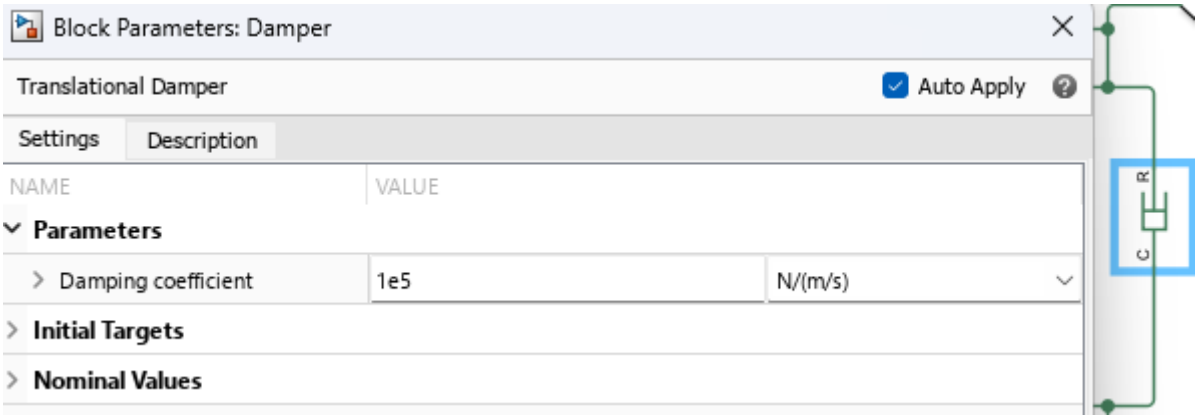

Рисунок 29 – параметры блока Translational Damper

Для блока Translational Damper нужно было подобрать величину затухания контакта. Она была выбрана с произвольно высокими значениями для того, чтобы тело сердечника не проходило сквозь поверхность испытательных весов. Величина затухания контакта была взята на порядок ниже величины жесткости контакта пружины.

6.3 Методика расчета модели в Matlab Simulink

По команде Simulate Model был проведен расчет виртуальной модели соленоида. Данные, полученные в ходе расчета, сохраняются в среде Simulink. Далее использовался код из приложения А в Matlab. По команде Run нужные нам характеристики из Simulink выводятся в формате графиков.

6.4 Результаты расчета в Matlab Simulink

Результаты моделирования в Matlab Simulink представлены на рисунках 30- 32.

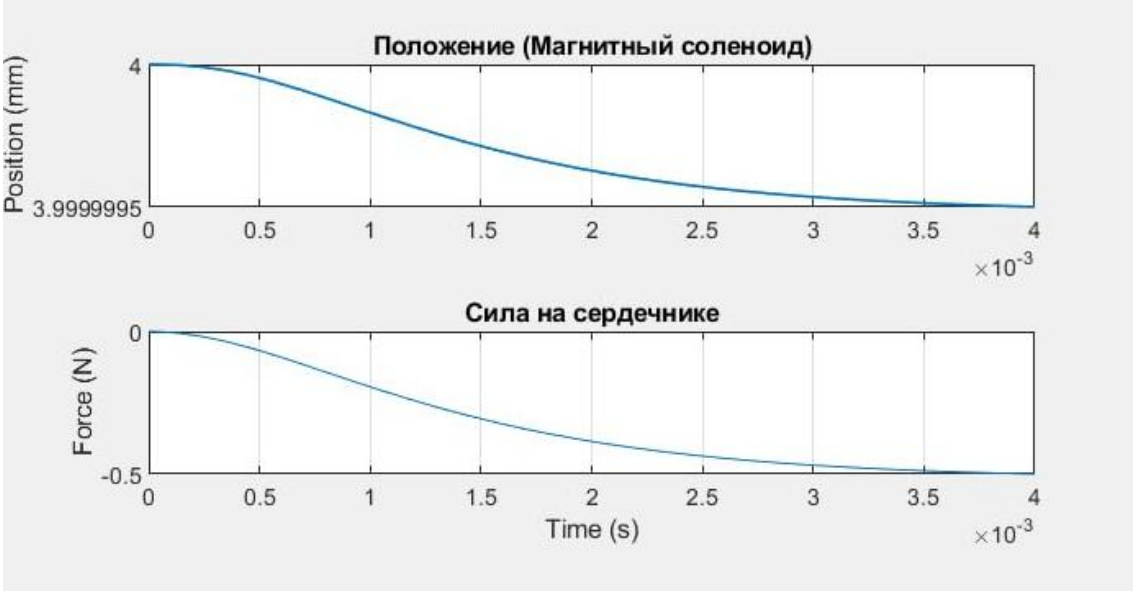

Рисунок 30 – перемещение сердечника соленоида и сила втягивания сердечника в симуляции при зазоре в 4 мм

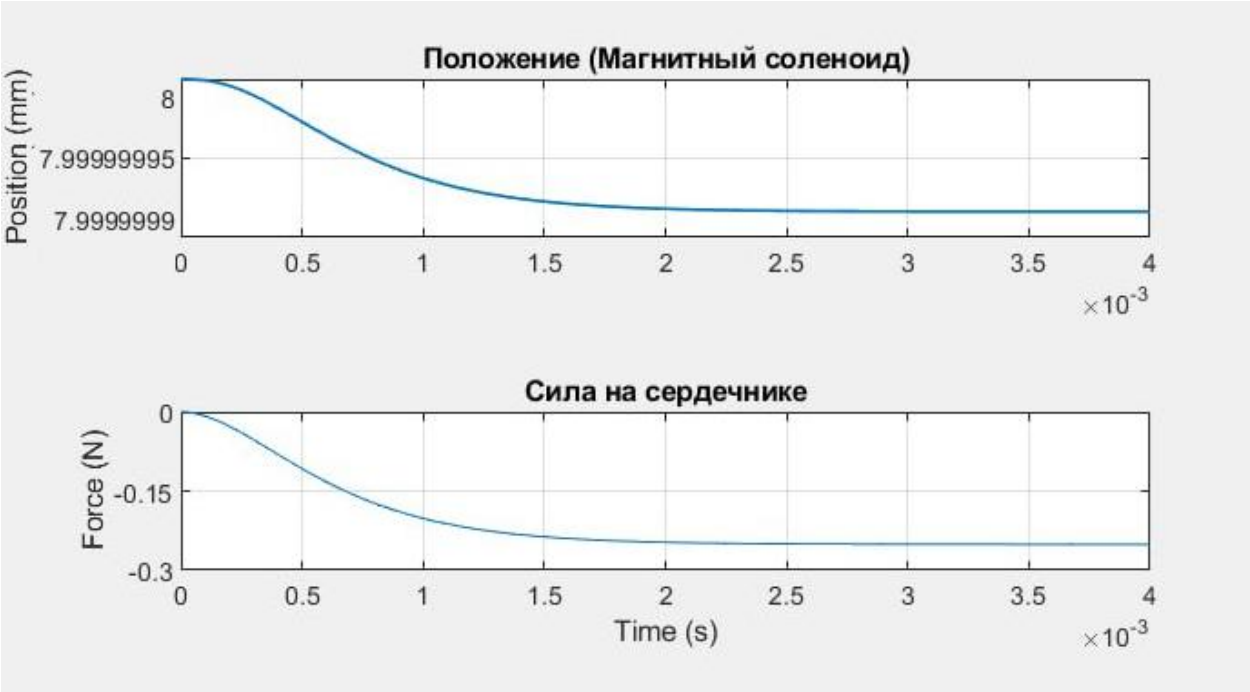

Рисунок 31 – перемещение сердечника соленоида и сила втягивания сердечника в симуляции при зазоре в 8 мм

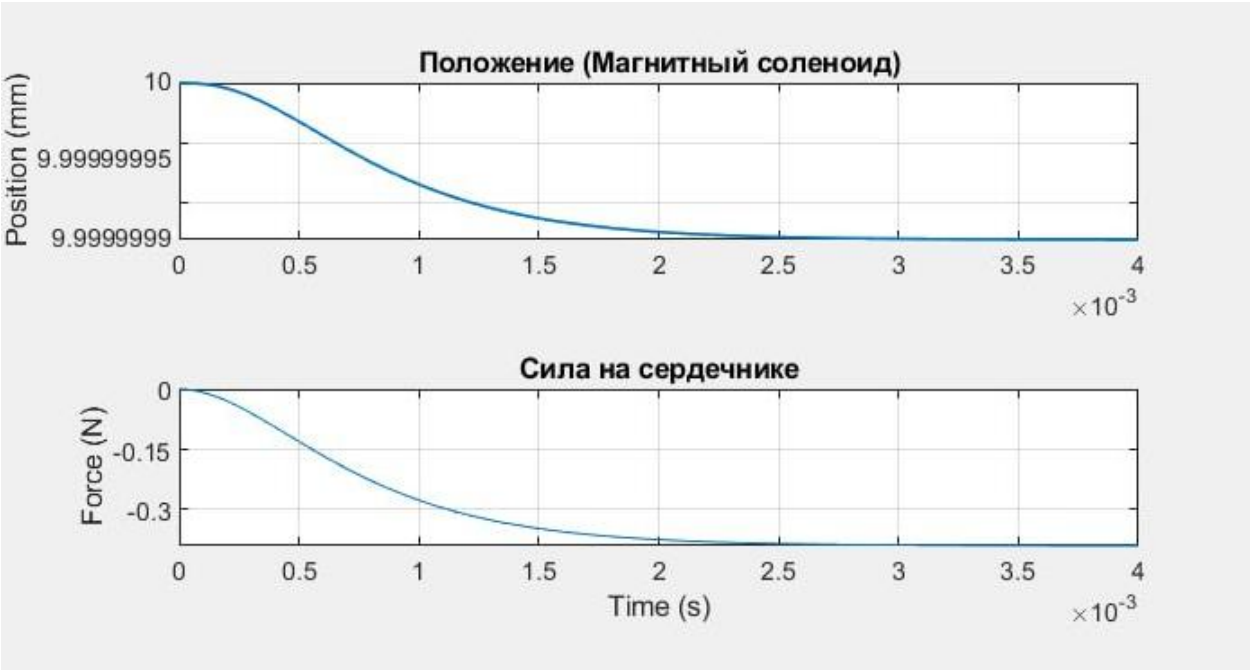

Рисунок 32 – перемещение сердечника соленоида и сила втягивания сердечника в симуляции при зазоре в 10 мм

В таблице 4 приведены результаты полученые при моделированиb в Matlab Simulink.

Таблица 4 – результаты моделирования в Matlab Simulink

Длина зазора, мм	Сила втягивания соленоида, г
4	50
8	28
10	35

7 Сравнительный анализ

Получив результаты со всех испытаний, был проведен сравнительный анализ, чтобы определить, насколько сильно расходятся величины между разновидностями экспериментов. В качестве опорных данных были выбраны силы, полученные при испытаниях экспериментальной установки соленоида. В таблицах 5- 7 приведен сравнительный анализ отклонений значений.

Таблица 5 – сравнительный анализ Elcut

Длина зазора, мм	Экспериментальная установка, г	Расчет в Elcut, г	Отклонение, %
4	6.7	22.7	238
8	16.3	37.6	130
10	23.6	39.8	68

Таблица 6 – сравнительный анализ Matlab Simulink

Длина зазора, мм	Экспериментальная установка, г	Моделирование в Matlab Simulink, г	Отклонение, %
4	6.7	50	646
8	16.3	28	71
10	23.6	35	48

Таблица 7 – сравнительный анализ методического расчета

Длина зазора, мм	Экспериментальная установка, г	Расчет по методике, г	Отклонение, %
4	6.7	89	1228
8	16.3	39	139
10	23.6	33	39

Все численные методы дают завышенные результаты по сравнению с результатами эксперимента. Это связано с тем, что в моделях используются идеализированные условия: нет потерь на нагрев, нет люфтов, геометрия обмотки и сердечника полностью симметрична.

Наибольшее отклонение было выявлено при расчете по методике. При длине зазора в 4 мм отклонение составило 1228%, то связано с приближениями в аналитической формуле, такими как постоянная индукция, идеальный магнитопровод и т. д.

Моделирование MATLAB Simulink также показывает высокие отклонения при малых зазорах, но оно также демонстрирует более устойчивую динамику при увеличении зазора.

Расчет ELCUT показал наименьшее отклонение, что подтверждает эффективность численного моделирования двумерного распределения магнитного поля и геометрии. Увеличение воздушного зазора приводит к снижению отклонения ELCUT, что связано с уменьшением влияния конструктивных погрешностей, связанных с увеличением магнитной длины пути.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы был проведён анализ конструкции и характеристик электромагнитного соленоида. Данный тип устройства был выбран для исследования благодаря своей конструктивной простоте и широкому распространению в системах управления и автоматики. Работа включала теоретический расчёт по методике, численное моделирование в среде Elcut, моделирование в MATLAB Simulink, а также сборку и экспериментальную проверку характеристик на реальной установке.

В результате испытаний были получены значения втягивающей силы, развиваемой сердечником под действием магнитного поля, при разных величинах воздушного зазора. Проведено сравнение этих значений с результатами, полученными в ходе моделирования. Было установлено, что результаты численного моделирования и экспериментальные данные демонстрируют качественное совпадение по характеру зависимости. При этом величина силы втягивания, измеренная на реальном стенде, оказалась несколько ниже расчётной.

Причиной такого расхождения служит наличие конструктивных и технологических погрешностей, допущенных при ручной сборке устройства: недостаточно плотная укладка витков, неидеальная форма магнитопровода, возможные потери на трение и нагрев. В реальной системе действуют дополнительные элементы, которые могут снизить эффективность устройства, в отличие от моделирования. Но численная модель была подтверждена достоверной, поэтому ее можно использовать для дальнейших расчётов, оптимизации конструкции и прогнозирования поведения аналогичных устройств.

Таким образом, поставленные цели были достигнуты, а результаты сравнений показали, что моделирование работает хорошо в инженерной практике при разработке электромагнитных приводов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Розанов А. И. Электромагнитные устройства автоматики. — М.: Энергия, 1974. — 368 с.

2 Kendrion Industrial Actuators [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.kendrion.com (дата обращения: 05.03.2025).

3 ГОСТ 16115–79. Электромагниты. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 12 с.

4 Рауф К. Р., Пандей С. К. Электромагниты и электромагнитные приводы. — М.: Мир, 1985. — 264 с.

5 Капица П. Л., и др. Электротехника: курс для вузов. — М.: Наука, 1971. — 512 с.

6 ООО «Физтех». Индуктивность длинного соленоида. Типовые примеры Elcut [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://elcut.ru/advanced/long_solenoid_inductance.htm (дата обращения: 02.04.2025).

7 Крук Г. А. Электромагниты и электромагнитные устройства. — М.: Радио и связь, 1985. — 208 с.

8 Цуриков С. Н. Электромагнитные приводы: расчётные соотношения и примеры расчётов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://imlab.narod.ru/MechSys/EMD_Calc/EMD_Calc.htm (дата обращения: 20.10.2024).

9 MathWorks. Solenoid with Magnetic Blocks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/solenoid-with-magnetic-blocks.html (дата обращения: 16.04.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ А – код, используемый для вывода данных из оболочки Matlab Simulink

```
% Code to plot simulation results from SolenoidWithMagneticBlocks

% Copyright 2015 The MathWorks, Inc.

% Reuse figure if it exists, else create new figure
try
    figure(h1_SolenoidWithMagneticBlocks)
catch
    h1_SolenoidWithMagneticBlocks=figure('Name', 'SolenoidWithMagneticBlocks');
end

% Generate simulation results if they don't exist
if(~exist('simlog_SolenoidWithMagneticBlocks','var'))
    sim('SolenoidWithMagneticBlocks')
end

% Get simulation results
temp_solx =
simlog_SolenoidWithMagneticBlocks.Solenoid_with_Magnetic_Effects.Reluctance_Force_Act
uator.x.series;
temp_solmf =
simlog_SolenoidWithMagneticBlocks.Solenoid_with_Magnetic_Effects.Reluctance_Force_Act
uator.phi.series;

% Plot results
ah(1) = subplot(3,1,1);
plot(temp_solx.time,temp_solx.values,'LineWidth',1);
grid on
title('Положение (Магнитный соленоид)');
ylabel('Position (mm)');
ah(3) = subplot(3,1,3);
f =
simlog_SolenoidWithMagneticBlocks.Solenoid_with_Magnetic_Effects.Reluctance_Force_Act
uator.f.series.values;
t =
simlog_SolenoidWithMagneticBlocks.Solenoid_with_Magnetic_Effects.Reluctance_Force_Act
uator.f.series.time;
plot(t, f)
xlabel('Time (s)')
ylabel('Force (N)')
title('Сила на сердечнике')
grid on

linkaxes(ah,'x');

% Remove temporary variables
clear temp_solx temp_solmf ah
```