

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра

«Промышленная электроника»

(наименование)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Разработка регулируемого электрического привода для создания
противодействующей силы в тренажерном устройстве

Обучающийся

П.С. Журавлев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, М.В. Позднов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

И.Ю. Усатова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Аннотация

Название выпускной квалификационной работы: «Разработка регулируемого электрического привода для создания противодействующей силы в тренажерном устройстве».

Выпускная квалификационная работа (ВКР) состоит из введения, шести глав, 44 рисунков, 2 таблиц, заключения, списка литературы из 8 источников, включая иностранные.

Целью данной дипломной работы является создание конструкторского инструментария для проектирования регулируемого электропривода, способного генерировать противодействующую силу в тренажерном устройстве. Работа сосредоточена на разработке комплексного набора инструментов для моделирования и анализа приводов.

Объектом исследования является электропривод, управляемый электричеством и физическими усилиями. Предметом работы является разработка регулируемого электропривода для использования в тренажерах, который может имитировать реалистичное поведение системы и позволяет проводить динамический и статический анализ характеристик привода.

Ключевыми задачами дипломной работы являются:

- Выбор конфигурации магнитов для оптимизации якоря.
- Создание динамической модели привода для моделирования.
- Расчет тепловых полей с использованием программного обеспечения Elmer.
- Анализ магнитных полей с помощью моделирования Elcut.
- Проверка модели с помощью вычислительных экспериментов на базе MATLAB.

Работа разделена на логически связанные части: обзор литературы, результаты и их обсуждение, а также экспериментальный раздел.

В первой части описываются теоретические основы, включая принципы работы регулируемых электроприводов, стратегии управления для

противодействия созданию силы и сравнительный анализ существующих решений в области оборудования для реабилитации и спортивных тренировок.

Во второй части излагаются результаты моделирования и обсуждений, касающиеся проектирования модели привода, оптимизации параметров теплового и магнитного полей и интеграции алгоритмов управления для адаптации нагрузки.

В третьей части представлена методология экспериментальной проверки, включая рабочие процессы моделирования в MATLAB/Simulink, Elmer и Elcut, а также анализ динамических реакций при различных сценариях сопротивления.

В заключение следует отметить, что разработанная модель успешно демонстрирует способность моделировать реалистичные условия нагрузки и оптимизировать работу привода для применений с регулируемым сопротивлением. Экспериментальные данные позволяют получить представление о термической стабильности и магнитной эффективности, хотя для внедрения в промышленном масштабе рекомендуется провести дополнительные эмпирические испытания.

Работа актуальна для инженеров, разработчиков тренажерного оборудования и специалистов по системам электропривода, которые ищут решения для адаптивного контроля сопротивления в реабилитационных и фитнес-технологиях.

Abstract

The title of the graduation work is "Development of an Adjustable Electric Drive for Creating a Counteracting Force in a Training Device."

The graduation work consists of an introduction, six chapters, 44 figures, 2 tables, a conclusion, and a list of 8 references

The aim of this graduation work is to create a design toolkit for designing an adjustable electric drive capable of generating a counteracting force in a training device. The work focuses on developing a comprehensive set of tools for modeling and analyzing the drive's performance under various load conditions.

The object of study is an electric drive controlled by electricity and physical effort. The subject of the work is the development of an adjustable electric drive for use in training devices, which can simulate realistic system behavior and allow for dynamic and static analysis of the drive's characteristics.

The key tasks of the graduation work include:

- Selection of magnet configurations for armature optimization.
- Creation of a dynamic drive model for simulation.
- Calculation of thermal fields using Elmer software.
- Analysis of magnetic fields via Elcut simulations.
- Validation of the model through MATLAB-based computational experiments.

The work is divided into logically connected parts: a literature review, results and discussion, and an experimental section.

The first part describes the theoretical foundation, including principles of adjustable electric drives, control strategies for counteracting force generation, and comparative analysis of existing solutions in rehabilitation and sports training equipment.

The second part outlines the results of simulations and discussions, covering the design of the drive model, optimization of thermal and magnetic field parameters, and integration of control algorithms for load adaptation.

The third part presents the methodology for experimental validation, including simulation workflows in MATLAB/Simulink, Elmer, and Elcut, as well as analysis of dynamic responses under varying resistance scenarios.

In conclusion, the developed model successfully demonstrates the ability to simulate realistic load conditions and optimize drive performance for adjustable resistance applications. Experimental data provide insights into thermal stability and magnetic efficiency, though further empirical testing is recommended for industrial-scale implementation.

The work is relevant for engineers, designers of training equipment, and specialists in electric drive systems seeking solutions for adaptive resistance control in rehabilitation and fitness technologies.

Содержание

Введение.....	7
1. Постановка задачи	8
1.1. Структура устройства.....	9
2. Аналоги и существующие решения	13
3. 3D разработка привода в программе FreeCAD.....	17
4. Расчёт тепловых полей в программе Elmer.....	25
4.1. Граничные условия.....	29
4.2. Сходимость	30
4.3. Моделирование	35
5. Расчёт магнитных полей в Elcut	40
6. Создание динамической модели в пакете MATLAB Simulink.....	45
Заключение	54
Список используемой литературы и используемых источников	55

Введение

С развитием технологий всё чаще спортивные и реабилитационные тренажёры оснащаются системами с регулируемым сопротивлением. Это даёт клиентам возможность подбирать нагрузку, соответствующую их уровню подготовки или целям тренировки. Такая гибкость системы очень важна как для спортсменов, так и среднестатистических людей, так и для людей, проходящих восстановительные процедуры после травм.

Одним из основных узлов современного тренажёра является привод — устройство, которое обеспечивает заданное усилие сопротивления и управляет его величиной в зависимости от режима работы [1] [7]. В данной работе рассматривается разработка электрического привода, способного создавать регулируемое противодействующее усилие при линейном перемещении [3].

Исходными данными для проектирования послужили следующие параметры:

максимальное усилие якоря — 500 Н;

длина хода привода — 60 см.

Актуальность темы обусловлена тем, что традиционные системы нагрузки (например, на основе весовых блоков или гидравлических цилиндров) имеют ряд ограничений: они не обеспечивают плавной регулировки, занимают много места и требуют постоянного обслуживания [4]. Электромеханические приводы лишены этих недостатков — они компактны, точны в управлении и позволяют реализовать широкий функционал, включая программирование нагрузочных профилей и взаимодействие с цифровыми интерфейсами [8].

Целью выпускной квалификационной работы стало создание конструкции регулируемого электрического привода, удовлетворяющего заданным техническим характеристикам и пригодного к внедрению в состав тренажёрного оборудования.

1 Постановка задачи

Цель проекта:

- Создание инструментария для проектирования, включающий в себя комплекс инструментов.

Задачи исследования и разработки:

- Изучить современные тренажеры с электрической нагрузкой.
- Выявить их достоинства и недостатки.
- Определить направления совершенствования.

Выбор типа привода:

- Обосновать выбор типа электродвигателя (постоянного тока, шаговый, серводвигатель и т.д.) [2].
- Рассчитать необходимые параметры: момент, мощность, диапазон скоростей.

Проектирование системы управления:

- Разработать алгоритм регулирования усилия/сопротивления [10] [11].
- Реализовать обратную связь по силе или моменту.
- Настроить интерфейс взаимодействия с пользователем (ручная регулировка, автоматический режим и т.д.).

Моделирование и проектирование механической части:

- Создать модель передачи усилия (редуктор, шкивы, валы).
- Проверить работоспособность узлов под нагрузкой.

Изготовление и тестирование прототипа:

- Собрать действующий макет устройства.
- Провести испытания на точность и стабильность нагрузки.
- Проанализировать эффективность и надежность работы.

Оценка экономической целесообразности:

- Сравнить стоимость компонентов и трудозатраты.
- Оценить потенциал внедрения в реальное производство.

1.1 Структура устройства

Регулируемый электрический привод, предназначенный для создания противодействующей силы в тренажерном устройстве, представляет собой систему, способную динамически изменять уровень сопротивления в зависимости от параметров движения пользователя. Мы будем использовать самый простой вариант, как показано на рисунке 1. Такие тренажеры будут использоваться в спортивных, реабилитационных или профессиональных целях [6].

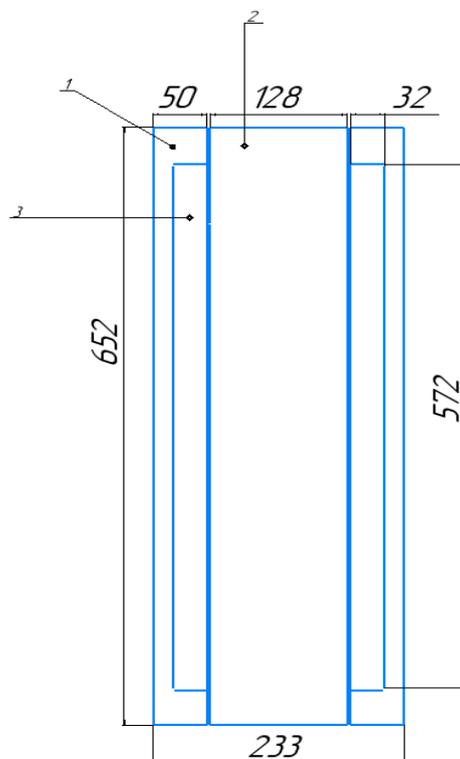


Рисунок 1 – Схема привода. Он состоит из C-образного профиля (1), катушки (2) и якоря (3).

Основная структура устройства регулируемого электрического привода:

1. Электродвигатель (привод)

Типы двигателей:

- Бесщеточный постоянного тока (BLDC)
- Асинхронный двигатель с векторным управлением
- Серводвигатель

Функция: Создает крутящий момент, который может быть преобразован в линейное усилие или использован напрямую как сопротивление/движущая сила [9].

Особенность: Работает не только в режиме приведения, но и в режиме торможения (генераторном), создавая противодействующее усилие.

2. Система управления (контроллер)

Микроконтроллер / DSP / ПЛК:

- Обрабатывает сигналы от датчиков
- Управляет работой двигателя через частотный преобразователь или моторный драйвер

Алгоритмы управления:

- PID-регулирование [10]
- Следящие системы по положению, скорости или усилию
- Адаптивные алгоритмы под нагрузку пользователя

3. Частотный преобразователь

- Преобразует питание в нужную форму для управления двигателем.
- Может управлять направлением, скоростью, моментом.
- Поддерживает рекуперацию энергии (в некоторых случаях).

4. Датчики обратной связи

- Датчики положения (энкодеры): определяют угол поворота вала двигателя.
- Датчики скорости: либо рассчитываются из данных энкодера.
- Датчики усилия: позволяют точно контролировать прикладываемое сопротивление [3].
- Датчики силы (тензодатчики): могут устанавливаться на рычагах или ручках тренажера.
- Инерциальные измерительные блоки (IMU): для анализа движений пользователя.

5. Приводной механизм

Редуктор: снижает скорость вращения, увеличивает момент.

Передача усилия:

- Через ремень, цепь, шестерни
- В случае линейного усилия — используется винтовая передача или линейный привод
- Тормозная система (необязательно): дополнительное механическое или электромагнитное сопротивление.

6. Источник питания

- Блок питания или аккумуляторная батарея.
- Должен обеспечивать достаточную мощность для работы двигателя в режиме максимальной нагрузки.

7. Интерфейс взаимодействия с пользователем.

- Панель управления: выбор программы, уровня сопротивления, отображение параметров.
- Графический интерфейс (экран): визуализация тренировки, данные о силе, скорости, затраченной энергии.
- Подключение к мобильным устройствам / ПК: Bluetooth, Wi-Fi, USB.

8. Система безопасности.

- Защита от перегрузки по току, перегрева, перенапряжения.
- Экстренная остановка (Emergency Stop).
- Контроль корректности движения пользователя (предотвращение травм).

Пример функционирования:

1. Пользователь начинает выполнять движение (например, тянет ручку тренажера).
2. Датчики фиксируют усилие, скорость и положение.
3. Контроллер рассчитывает необходимый уровень противодействующей силы согласно заданной программе.
4. Электродвигатель создает соответствующий момент сопротивления.
5. При необходимости система может менять сопротивление динамически в зависимости от фазы движения.

Возможности такого привода:

- Точное регулирование сопротивления (от 0 до максимума)
- Возможность программирования различных профилей тренировок,
- Анализ движений и адаптация под уровень подготовки пользователя,
- Рекордирование параметров тренировки,
- Использование в реабилитации — контроль за безопасностью и восстановлением мышечной массы.

Вывод: Регулируемый электрический привод представляет собой сложную интегрированную систему, состоящую из нескольких ключевых компонентов, взаимодействующих между собой для обеспечения точного и адаптивного управления движением и сопротивлением. Такая структура позволяет применять регулируемые электрические приводы в высокотехнологичных тренажёрах, реабилитационных устройствах, роботизированных системах и других приложениях, где важна точность, безопасность и адаптация под индивидуальные особенности пользователя.

2 Аналоги и существующие решения

В мире существует несколько типов тренажеров, использующих электрические приводы для создания сопротивления. Ниже — обзор наиболее близких аналогов.

1. Technogym SKILLRUNNER

Тип: Беговая дорожка + эллиптический тренажер

Принцип действия: Использует электромагнитную систему нагрузки, управляемую компьютером [3].

Некоторые параметры беговых дорожек с технологией Multidrive:

- Диапазон скоростей движения бегового полотна. Может варьироваться от 0,2 до 30 км/ч.
- Угол наклона беговой поверхности. Может регулироваться от 0 до 25%.
- Максимальный вес пользователя. Зависит от модели, например, может составлять 180–220 кг.
- Мощность двигателя. Может быть 10 л.с..

Встроенные программы тренировок: Quick Start, оценка Body Fat, по времени, по расстоянию и другие.

Показания дисплея во время тренировки: время в целевой зоне, пройденное расстояние, пульс, расход калорий и другие.

Особенности: Возможность изменения сопротивления в реальном времени в зависимости от движений пользователя. Оснащена технологией Multidrive: Run + Resistance, имеет 16 встроенных тренировочных программ для скорости, ловкости, силы и выносливости. Позволяет сочетать кардио- и силовые тренировки, имеет интерфейс с экраном, как показано на рисунке 2.



Рисунок 2 – Беговая дорожка с технологией Multidrive

2. Life Fitness ICG Racer Rower

Тип: Гребной тренажер

Привод: Электромагнитный маховик с регулируемой нагрузкой.

Управление: Подключается к приложениям (Zwift, Peloton), позволяет имитировать различные условия гребли.

Особенности:

- Естественное движение. Система жидкостного сопротивления Fluid Technology обеспечивает естественную плавность движения, которой славятся тренажеры Life Fitness [3].

- Универсальность. Плавная регулировка нагрузки в широких пределах позволяет использовать тренажер людям с разным уровнем физической подготовки. Поэтому упражнения на Row GX можно включить в любую программу тренировок в любом фитнес-центре.

- Этот тренажер компактный и мобильный, его можно с легкостью перемещать между зонами групповых тренировок, а также хранить в

вертикальном положении, освобождая пространство для других видов тренировок. Его вид показан на рисунке 3.

Плюсы: Точное управление сопротивлением, интеграция с онлайн-тренировками.



Рисунок 3 – Гребной тренажёр с настраиваемыми режимами

3. Peloton Bike+

Тип: Велотренажер

Привод: Электронная система управления магнитным сопротивлением.

Вращающийся сенсорный экран: легко переходите от езды на велосипеде к полу с экраном, который имеет 360 ° движения. 23,8» антибликовый сенсорный экран HD: разработан таким образом, что вы можете видеть свою тренировку под любым углом. Звук студийного качества: передние и задние динамики погружают вас в звук.

Особенность: Автоматическая регулировка сопротивления в зависимости от программы тренировки. Велотренажёр показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Велотренажёр с регулировкой сопротивления

3 3D разработка привода в программе FreeCAD

Для того, чтобы начать работать в Elmer нам нужно подготовить деталь. Возьмём деталь, сделанную в программе КОМПАС 3D и перенесём её в FreeCAD. Для этого необходимо сохранить деталь в формате STEP. После открытия детали в FreeCAD, нужно создать сетку FEM. С помощью инструмента деления форм , мы теперь можем приступить к созданию сетки. Переходим во вкладку FEM и выбираем сетку, генерируемую Gmsh . Задаём параметры и нажимаем применить. Инструмент должен завершить постройку сетки без ошибок [18] [19] [20], как показано на рисунке 5.

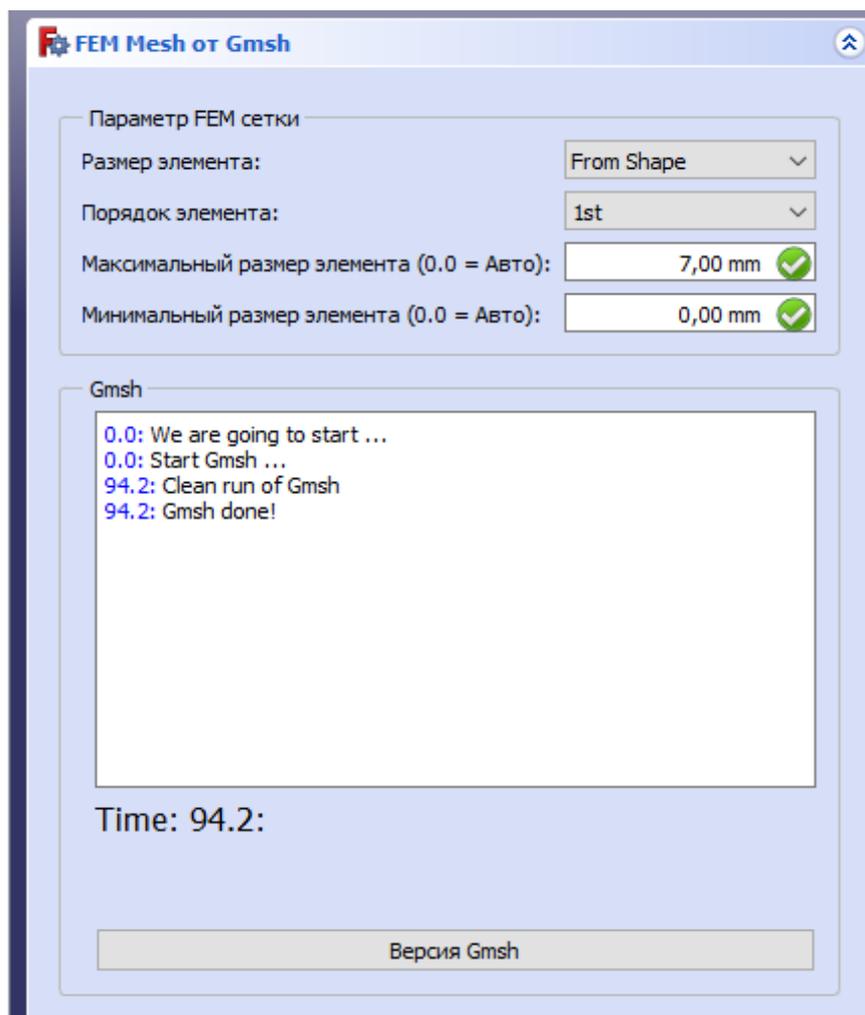


Рисунок 5 – Настройка параметров сетки Gmsh

Теперь нам нужно наполнить нашу сетку группами, с помощью которых мы в дальнейшем будем задавать области. Для этого, нажимаем на созданную сетку и выбираем группу сетки.

В данной сетке нужно заполнить активными группами, через которые мы будем задавать параметры для моделирования теплопередачи радиатора. После того, как мы создадим все нужные группы. Задаём твёрдые тела для воздуха, обмотки, якоря и корпуса. Данные тела показаны на рисунках 6,7 и 8 соответственно.

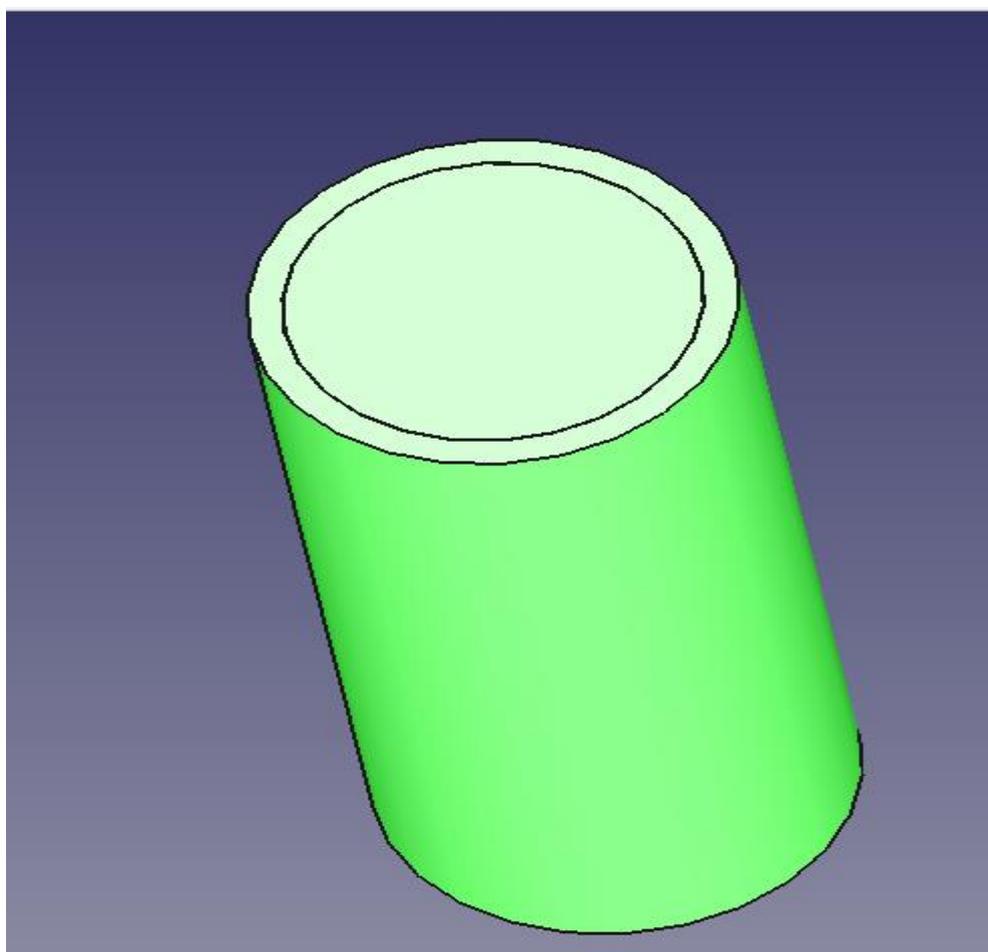


Рисунок 6 – Твёрдое тело – воздух

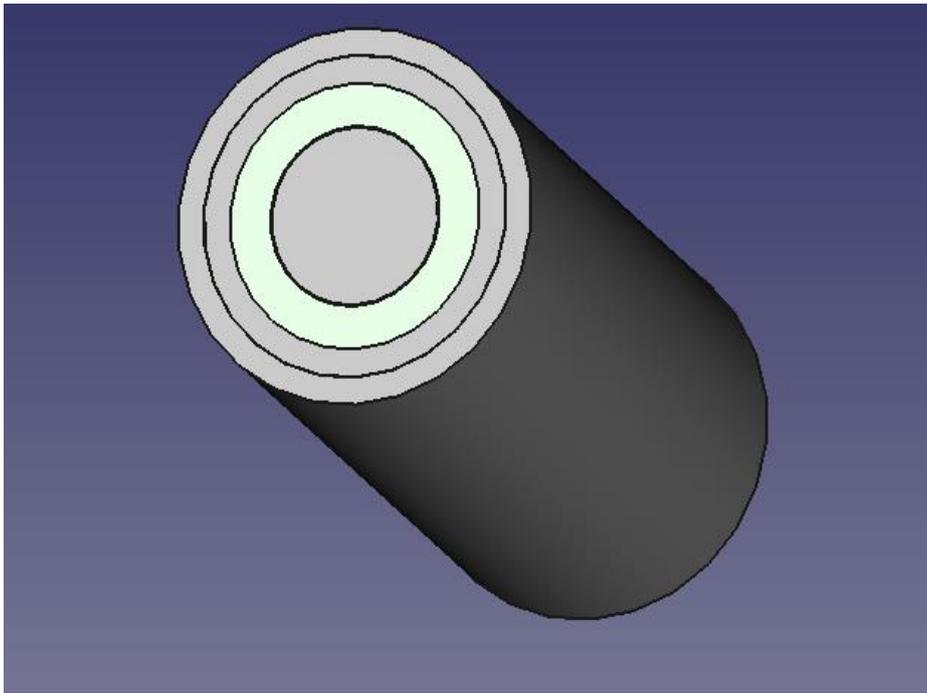


Рисунок 7 – Твёрдое тело – катушка

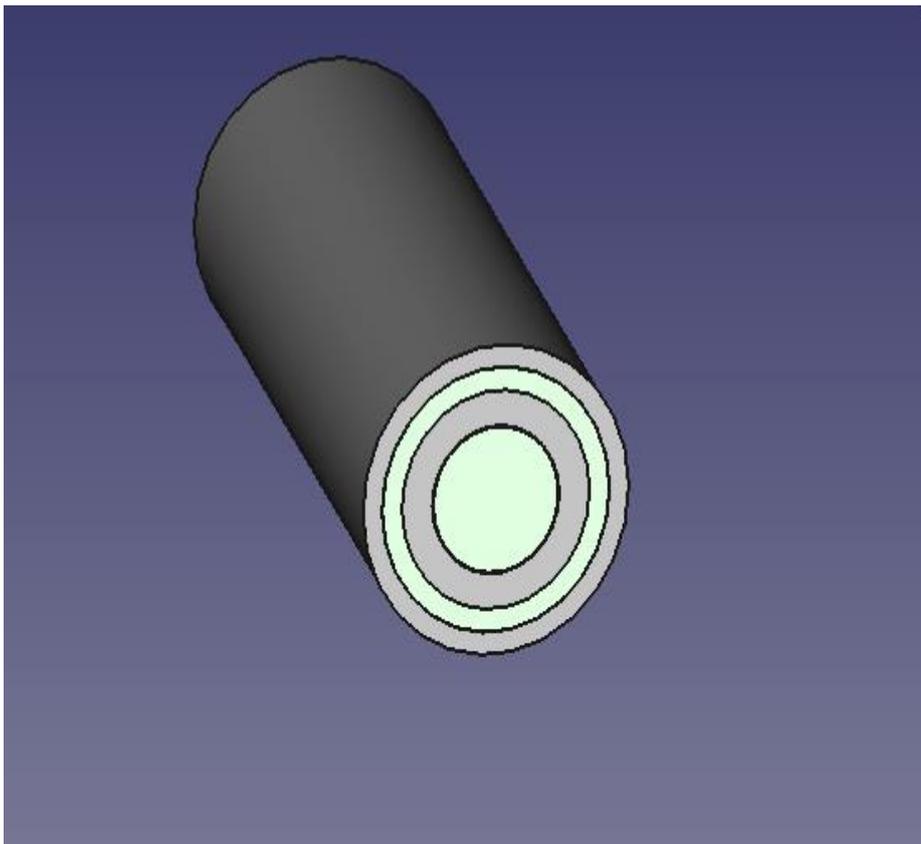


Рисунок 8 – Твёрдое тело – якорь и корпус

Теперь необходимо задать области для конкретных состояний. Нам нужны состояния: имитация работы вентилятора, потока воздуха, нагрева катушки и состояние якоря и корпуса. Данный процесс показан на рисунках 9,10, 11 и 12 соответственно.

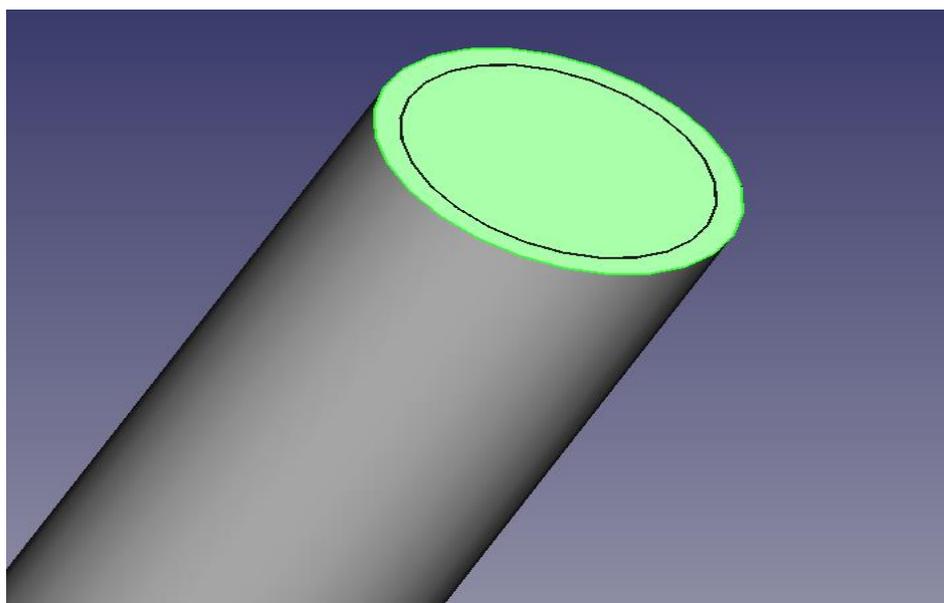


Рисунок 9 – Группа Mesh – вентилятор

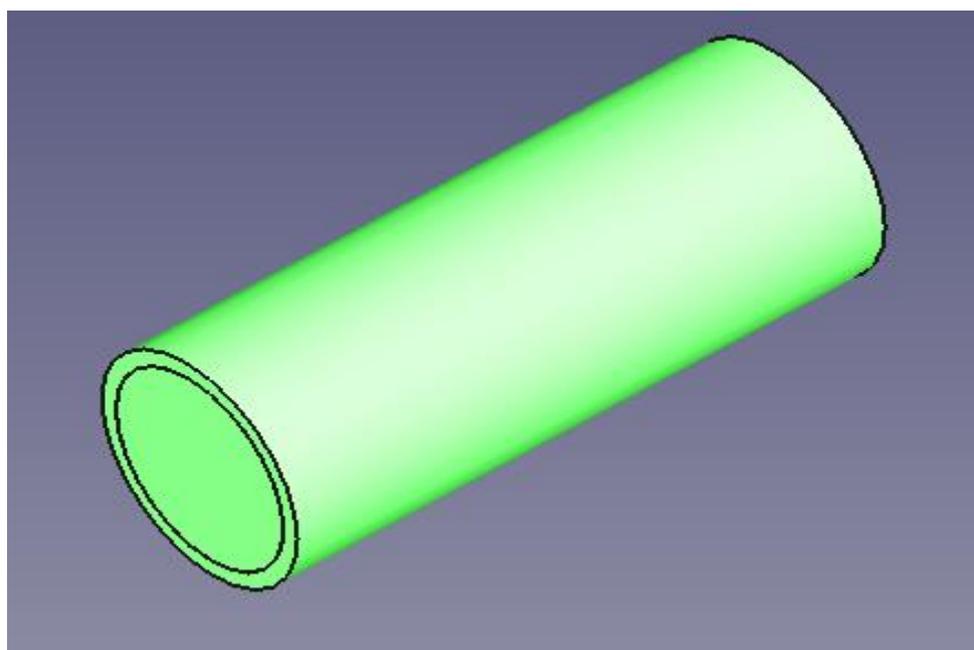


Рисунок 10 – Группа Mesh – воздух

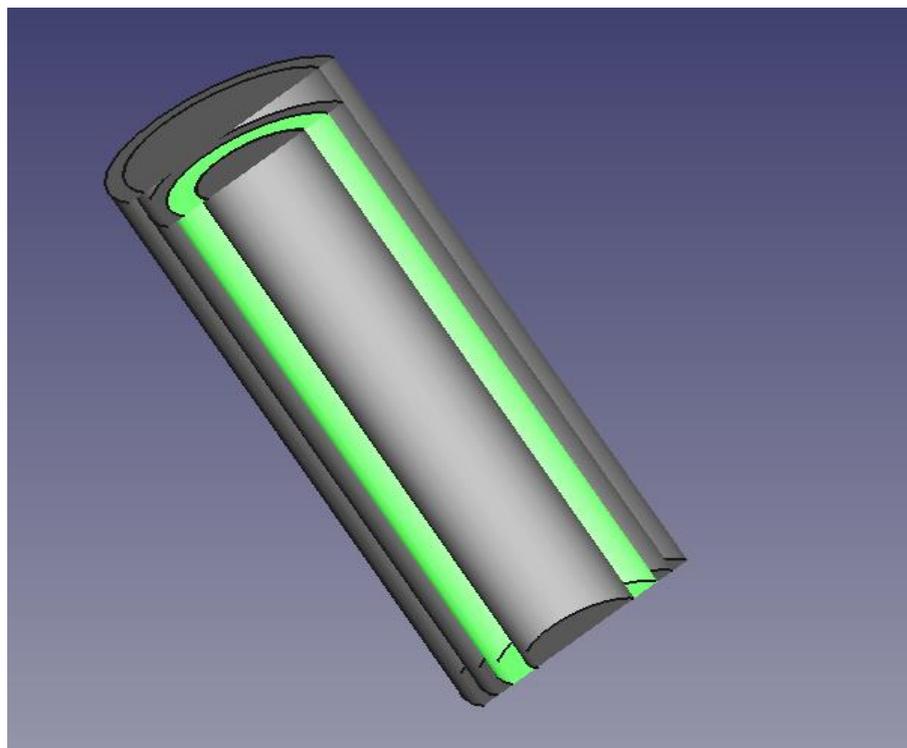


Рисунок 11 – Группа Mesh – нагрев

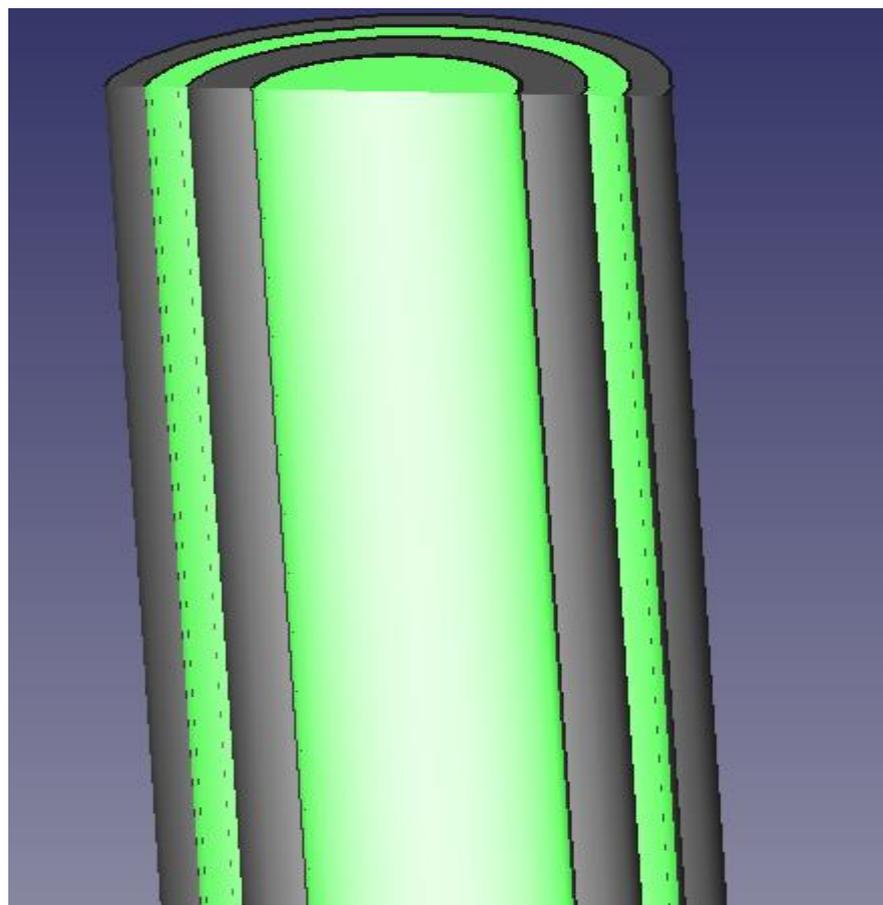


Рисунок 12 – Группа Mesh – теплопередача якоря и корпуса

После того как задали все группы, возвращаемся к нашей фигуре, и обновляем нашу сетку. На рисунке 13 показана фигура в сетке вида Gmsh.

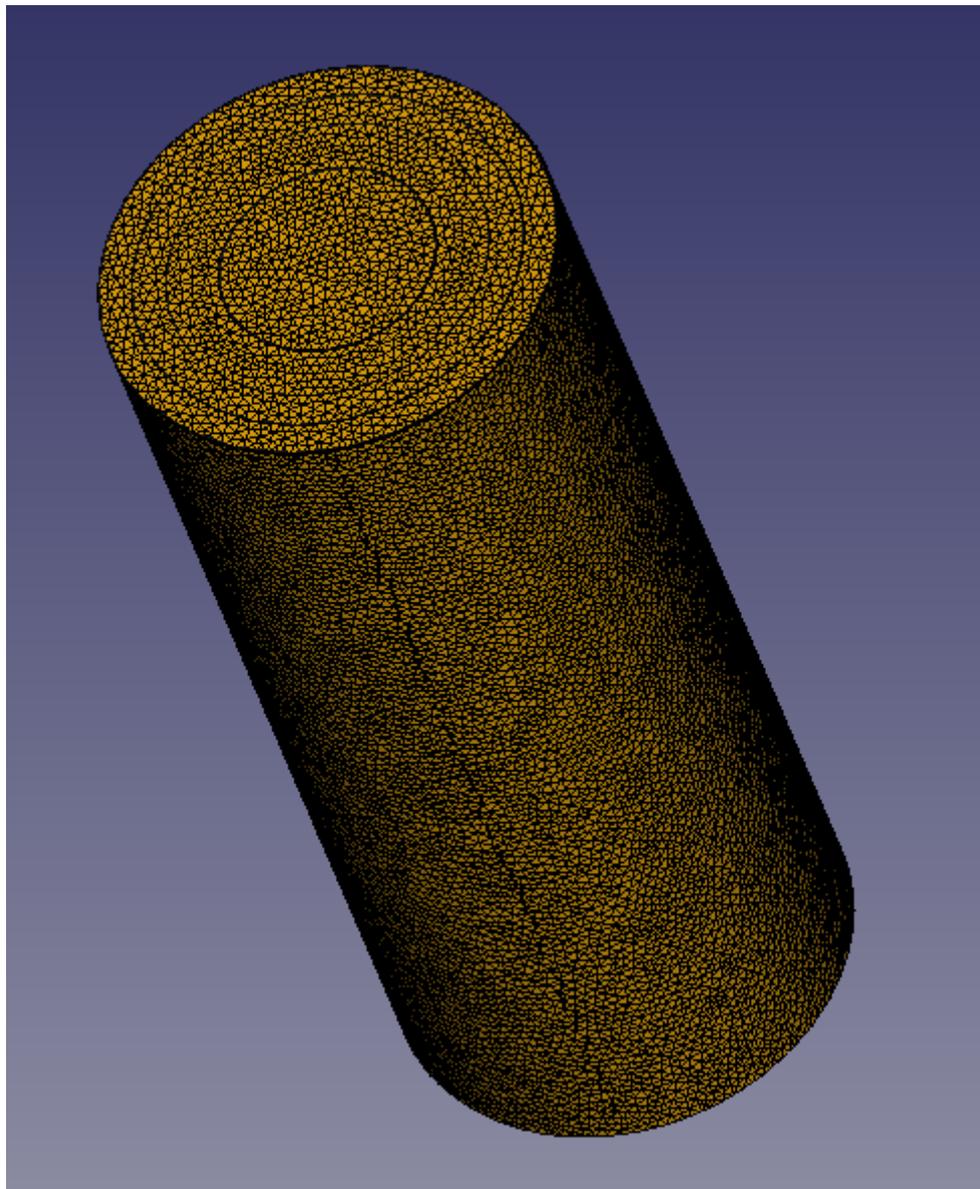


Рисунок 13 – Фигура в сетке Gmsh

После экспортируем сетку в формате “.unv”. Для этого у нас должна быть открыта сама сетка. Находим меню экспорта, как показано на рисунке 14.

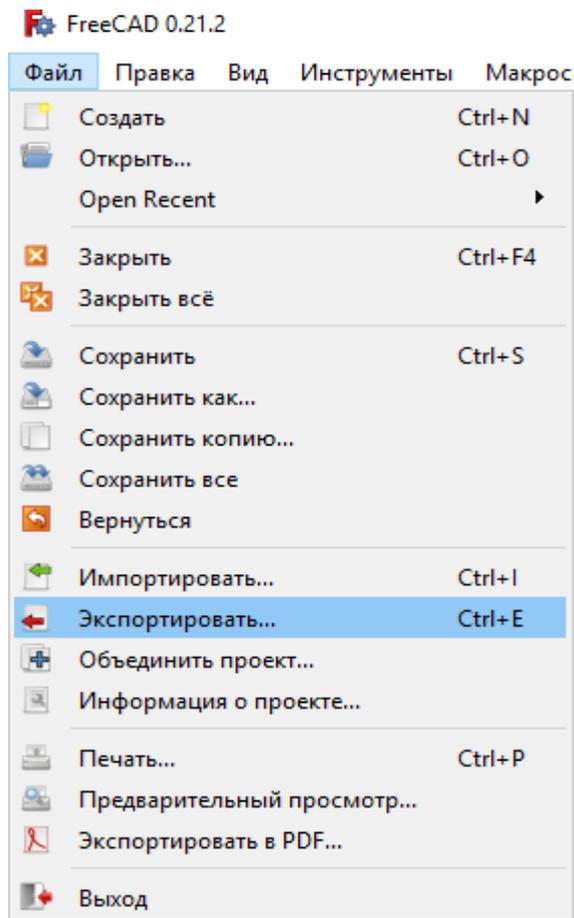


Рисунок 14 – меню экспорта

Теперь открываем ElmerGUI, для этого нажимаем File -> Open, или горячие клавиши Ctrl-O. Открываем нашу сетку в ElmerGUI. Её вид в программе показан на рисунке 15.

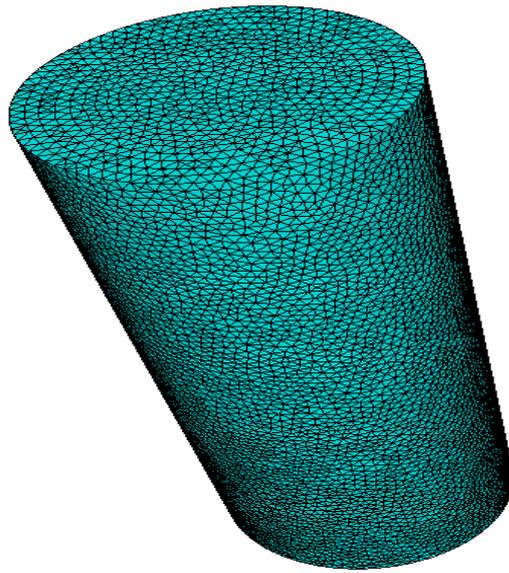


Рисунок 15 – Сетка Gmsh в программе Elmer

4 Расчёт тепловых полей привода в Elmer

После переноса в Elmer проверяем модель и задаём коэффициент масштабирования 0.1, что равняется 1 см. Меню Setup показана на рисунке 16.

E Setup ? ×

Header

Check keywords warn

MeshDB

Include path

Results directory

Free text

Simulation

Max. output level Steady state max. iter

Coordinate system Timestepping method

Coordinate mapping BDF order

Simulation type Timestep intervals

Output intervals Timestep sizes

Coordinate Scaling Angular Frequency

Solver input file Post file

Calculate Mesh Pieces Desired Mesh Pieces

Free text

Constants

Gravity Boltzmann

Stefan Boltzmann Unit charge

Vacuum permittivity Vacuum permeability

Free text

Рисунок 16 – меню Setup

Теперь нам нужно добавить уравнения для тел. Для этого заходим во вкладку model -> equation и создаём новое уравнение, как показано на рисунке 17.

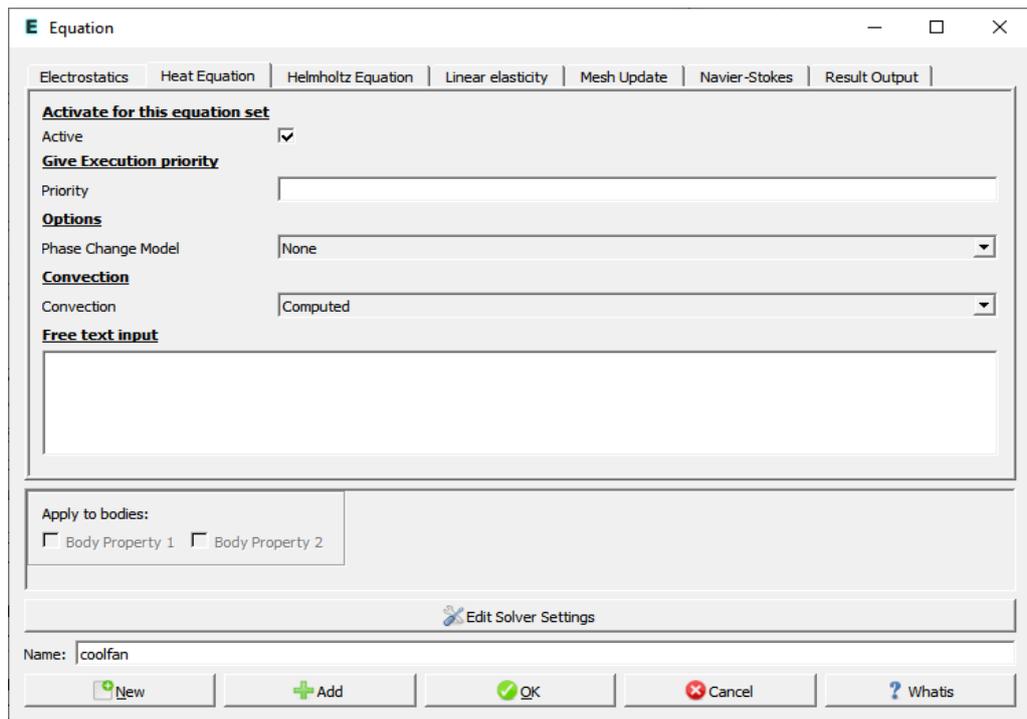


Рисунок 17 – меню Heat Equation. Задача для воздуха

Создадим его для моделирования работы вентилятора. Во вкладке Heat equation ставим галочку на Active и меняем конвекцию Computed. Переходим во вкладку Navier-Stokes, ставим priority=1 и заходим в настройки решателя, находим Preconditioning и выбираем ILU1, чтобы задать первостепенный приоритет задачи [14] [17]. Данные действия показаны на рисунках 18 и 19 соответственно.

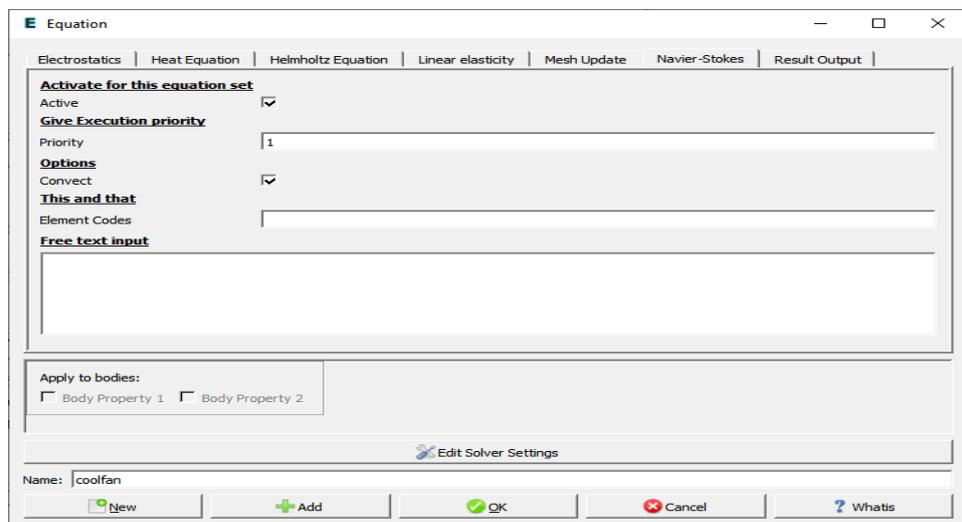


Рисунок 18 – меню Navier-Stokes

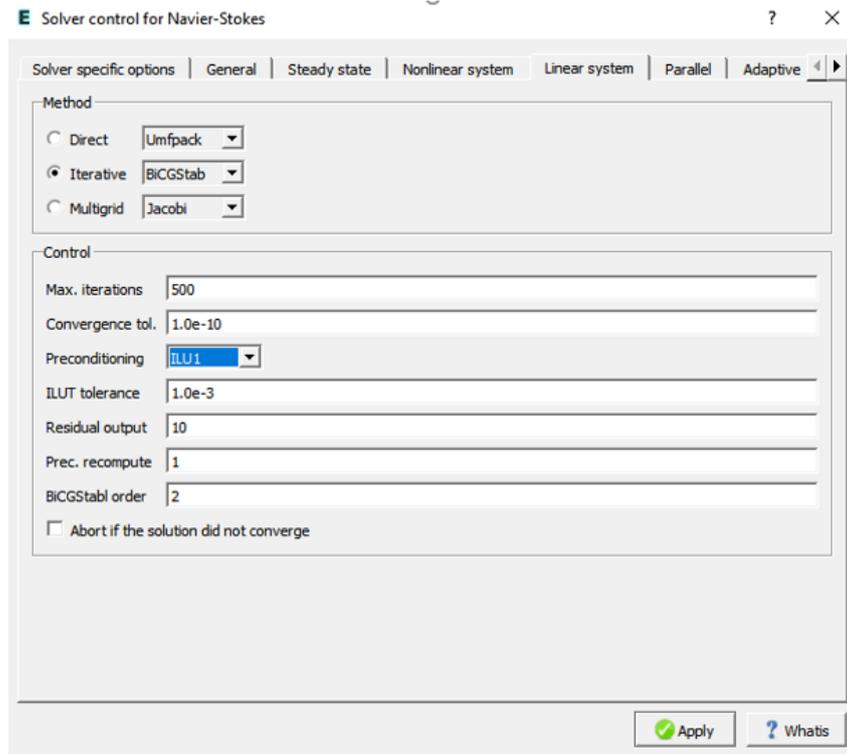


Рисунок 19 – меню control for Navier-Stokes

Теперь переходим ко второму телу. Для привода нам лишь нужно поставить галочку на Active, как показано на рисунке 20.

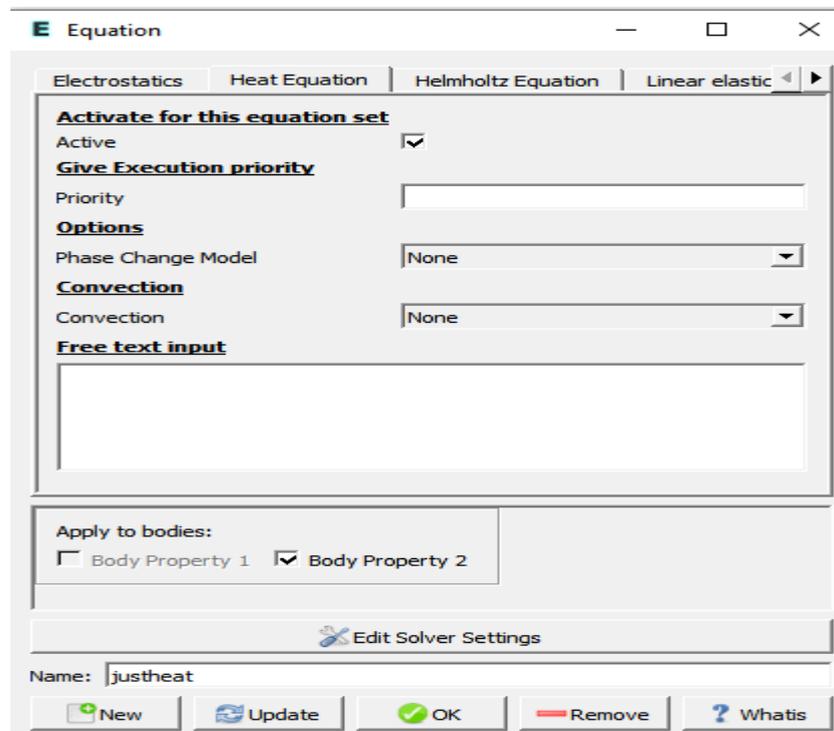


Рисунок 20 – Задача для твёрдого тела

Зададим материалы. Для этого нам нужно зайти в библиотеку материалов и найти там воздух и алюминий. На рисунке 21 показана библиотека материалов.

Зададим начальные условия: для этого во вкладке Heat equation ставим температуру 300°K , как показано на рисунке 22.

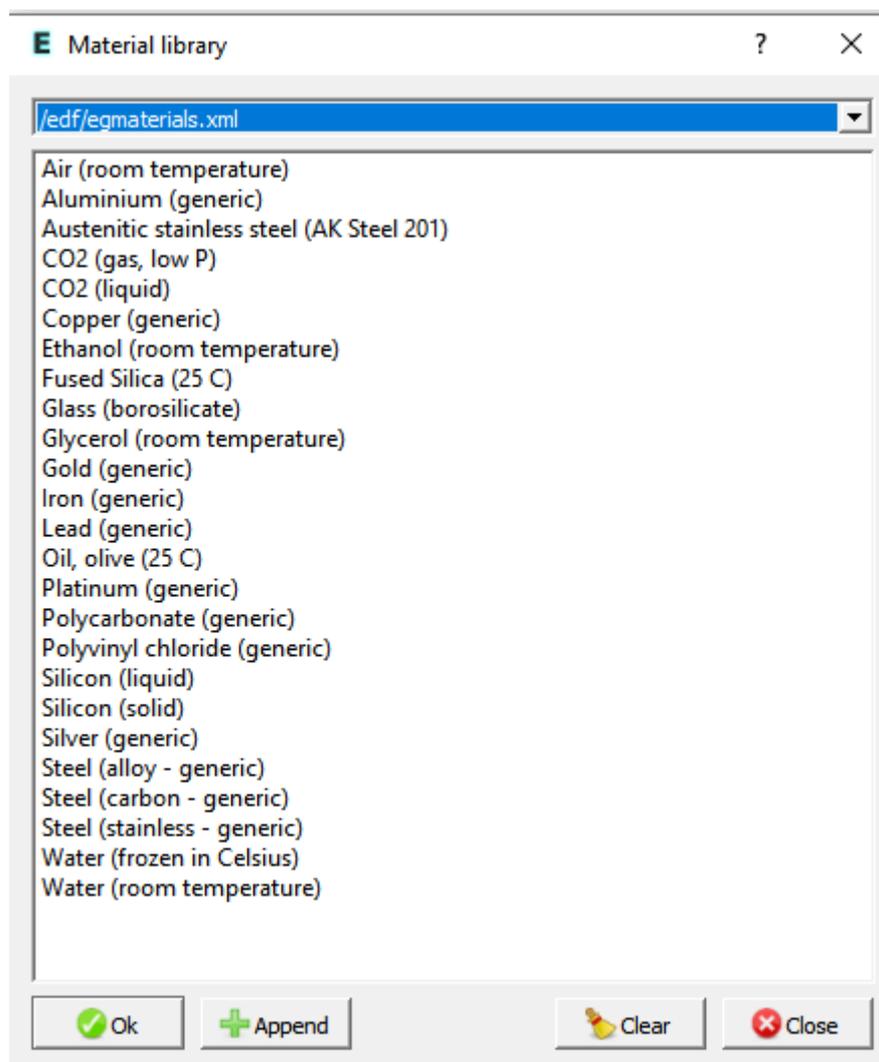


Рисунок 21 – Библиотека компонентов

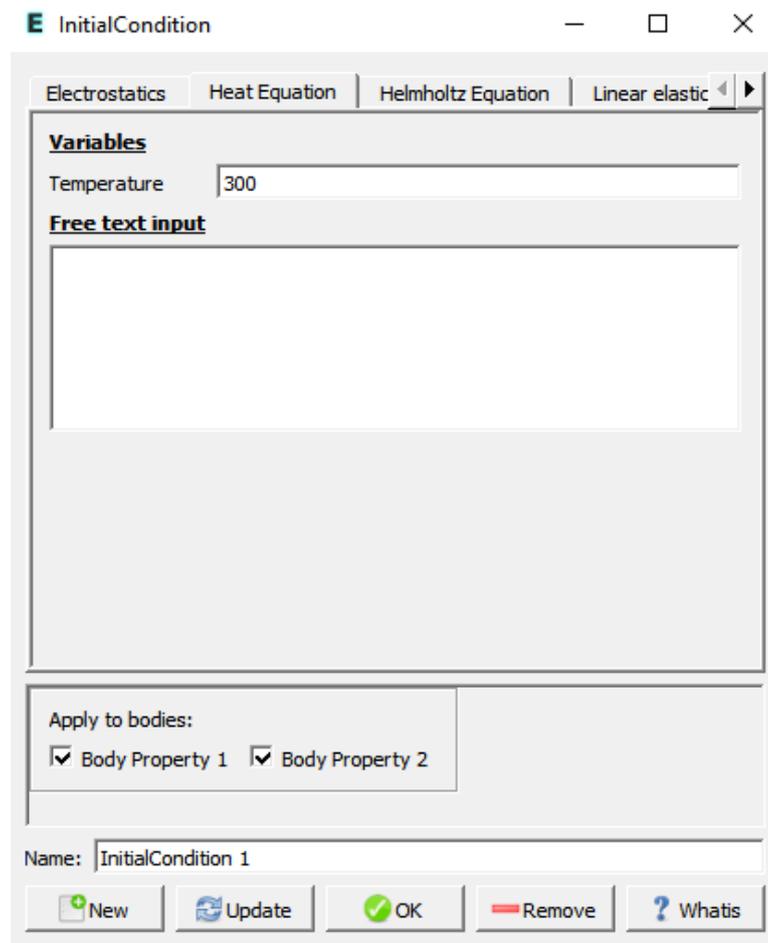


Рисунок 22 – Начальные условия

4.1 Граничные условия.

Зададим граничные условия для областей.

1) Катушка, на которую будет приходиться тепло. Заходим во вкладку Heat equation, в меню Heat Flux ставим 1800 Вт/м^2 . Мы задали тепловой поток.

2) Теплоотдача в окружающую среду (воздух). Заходим во вкладку Heat equation, в меню проставляем коэффициент передачи ($10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$) и окружающую температуру.

3) Приток воздуха от вентилятора. Заходим во вкладку Heat equation, в меню проставляем температуру 300° К. Переходим во вкладку Navier-Stokes и ставим Velocity1-2=0 м/с, Velocity3=20 м/с

4) Корпус и якорь привода. Переходим во вкладку Navier-Stokes, включаем Noslip wall BC. Эта функция используется для задания граничных условий на твердых стенках в задачах гидродинамики.

4.2 Сходимость

После всех произведённых выше настройках, мы можем приступить к расчёту модели. Для этого на рабочей области находим вкладку sif, жмём Generate, а затем Edit, как показано на рисунке 23.

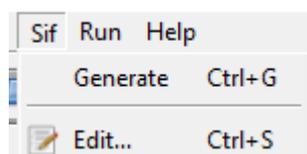


Рисунок 23 – Расположение вкладки Sif

Таким образом мы создали текстовый документ, в котором находятся все данные, которые мы внесли и который можно редактировать в этом файле. Данный файл показан на рисунке 24.

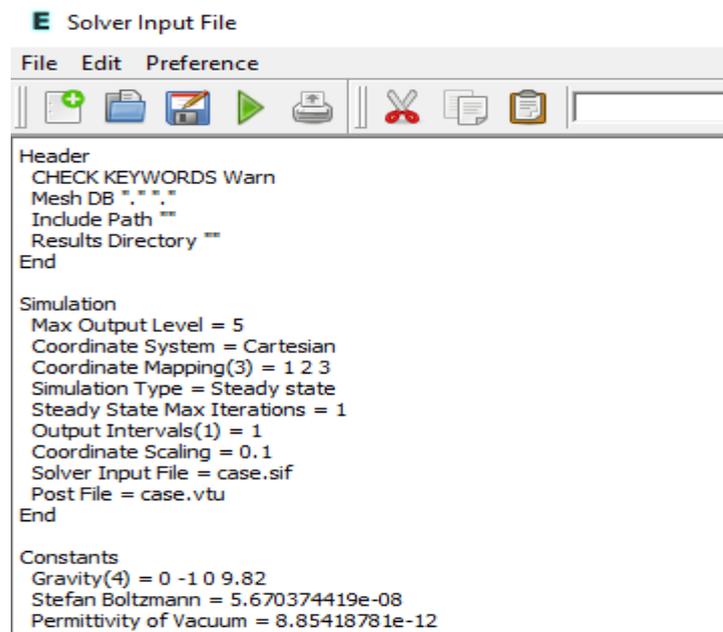


Рисунок 24 – Документ формата Sif

Проверяем данные, а после нажимаем кнопку Run. Программа предложит сохранить данные этого расчёта в папке. После этого появится два окна. Первое — логи и итерации, проходящие в настоящее время, второе — график сходимости. Рассмотрим график сходимости, показанный на рисунке 25.

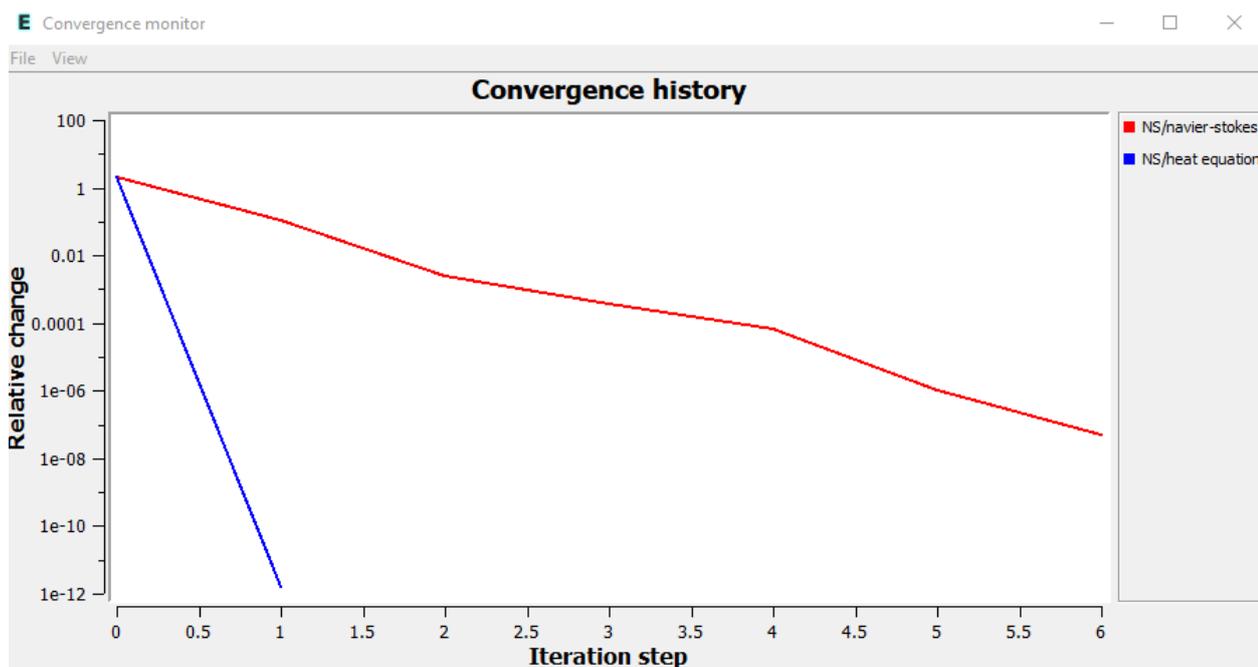


Рисунок 25 – История сходимости

Данный график представляют собой историю сходимости (Convergence history) для двух различных уравнений, которые решаются в процессе численного моделирования. Графики показывают, как изменяется относительное изменение решения на каждом шаге итерации. Вот детальное описание того, что можно узнать из этих графиков:

1. Оси координат

Х-ось (Iteration step):

Отображает номер текущего шага итерации.

Это количество раз, которое алгоритм повторяет вычисления для достижения решения.

Y-ось (Relative change):

Отображает относительное изменение решения между текущим и предыдущим шагом итерации.

Чем меньше это значение, тем ближе решение к стабильному состоянию.

2. Линии на графике

На графике представлены две линии:

Красная линия (NS/navier-stokes):

Соответствует уравнениям Навье-Стокса, которые описывают движение жидкости или газа.

Синяя линия (NS/heat equation):

Соответствует уравнению теплопроводности, которое описывает распределение температуры в системе.

3. Интерпретация данных

– Красная линия (Navier-Stokes)

Начало:

На первых шагах итерации (слева на графике) видно, что относительное изменение решения достаточно велико (порядка 1). Это означает, что начальное приближение к решению еще далеко от конечного результата.

Сходимость:

По мере увеличения номера итерации (движение вправо), красная линия стремится к нулю. Это указывает на то, что решение становится все более стабильным и точным.

Уровень сходимости:

Красная линия достигает значения порядка 10^{-8} на последних итерациях. Это говорит о том, что алгоритм сходится до высокой точности, хотя скорость сходимости ниже, чем у уравнения теплопроводности.

– Синяя линия (Heat equation)

Начало:

Аналогично красной линии, на первых шагах итерации относительное изменение также велико (порядка 1).

Быстрая сходимость:

Однако синяя линия демонстрирует значительно более быструю сходимость по сравнению с красной. Уже после нескольких итераций (менее 1) она достигает значений порядка 10^{-16} , что практически соответствует машинной точности вычислений.

Уровень сходимости:

Синяя линия показывает, что решение уравнения теплопроводности сходится очень быстро и достигает высочайшей точности.

4. Выводы

– Скорость сходимости

Уравнение теплопроводности (синяя линия) сходится значительно быстрее, чем уравнения Навье-Стокса (красная линия). Это связано с различной сложностью математических моделей и особенностями их численного решения.

– Необходимое количество итераций

Для уравнения теплопроводности требуется значительно меньше итераций для достижения приемлемого решения, чем для уравнений Навье-Стокса.

5. Практическое значение

– Если сходимость не достигается

Если линии не стремятся к нулю, это может указывать на проблемы с численной моделью, такие как:

Некорректные начальные условия.

Ошибки в формулировке задачи.

Неправильный выбор параметров решателя.

Быстрая сходимость (как у синей линии) позволяет экономить вычислительные ресурсы и время расчета.

Медленная сходимость (как у красной линии) может потребовать оптимизации методов решения или использования более мощных вычислительных средств.

График Convergence History наглядно демонстрирует различия в скорости и точности сходимости для уравнений Навье-Стокса и уравнения теплопроводности. Уравнение теплопроводности сходится значительно быстрее и достигает высочайшей точности, в то время как уравнения Навье-Стокса требуют большего количества итераций для достижения приемлемого решения. Эти наблюдения имеют важное практическое значение при выборе численных методов и оптимизации процесса моделирования.

4.3 Моделирование.

После того, как программа построит график, после чего на рабочей области находим вкладку Run, жмём Start Elmer VTK, как показано на рисунке 26.

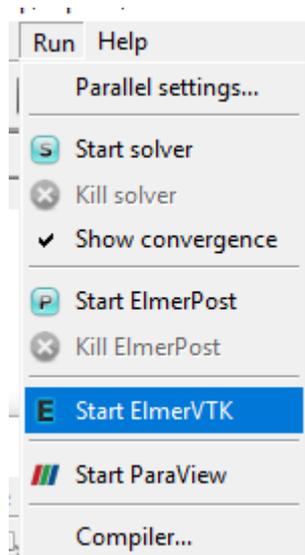


Рисунок 26 – Расположение вкладки Run

Нам открывается график с визуализацией полей внутри построенной нами фигуры, как показано на рисунке 27.



Рисунок 27– Геометрическая модель в Elmer VTK

В данный момент модель представлена в объёме без визуализации полей и температур. Чтобы показать температуру, в рабочей области

находим вкладку Surface и находим нужный параметр, как показано на рисунке 28.

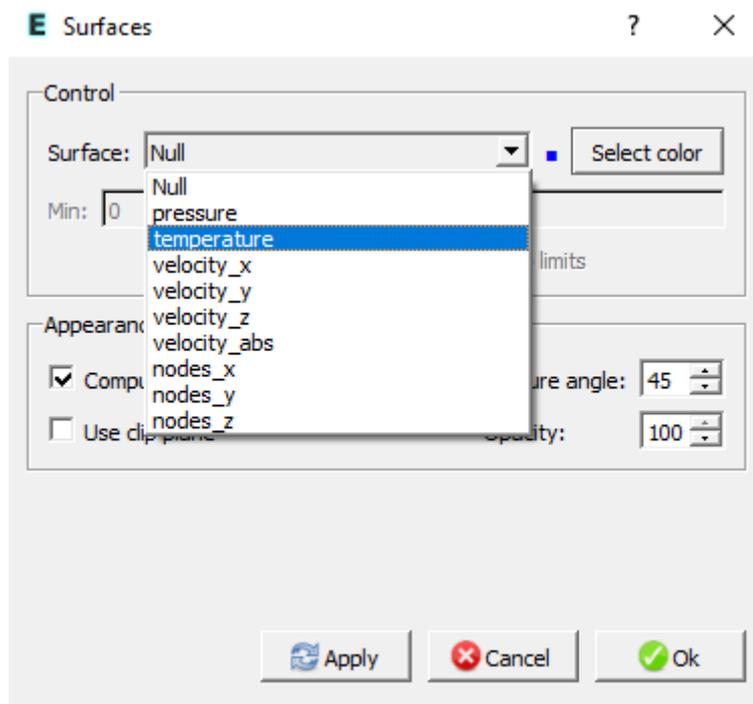


Рисунок 28 – Параметр температуры

После открывается меню, в котором мы можем проставить максимальное и минимальное значение температуры. Изначально система сама ставит свои значения, но мы можем их менять под свои задачи. На рисунке 29 показано открывшееся меню.

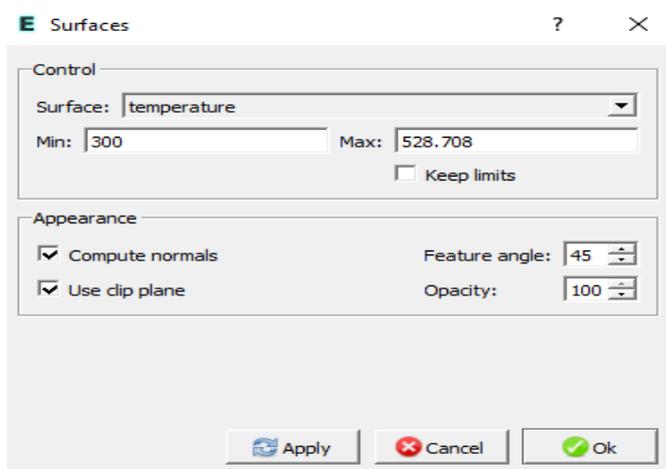


Рисунок 29 – Меню контроля температуры

После жмём apply, находим в рабочей области colorbar и проделываем ту же операцию, предварительно выбрав surface. Теперь у нас есть фигура и шкала температуры к ней. Осталось только увидеть направление воздуха. Для этого нам нужно меню vectors. Подтверждаем и теперь на нашей фигуры векторами указано направление воздуха, предварительно отключив surface, щёлкнув по нему. На рисунке 30 показан нагрев фигуры, а на рисунке 31 векторы движения воздуха.

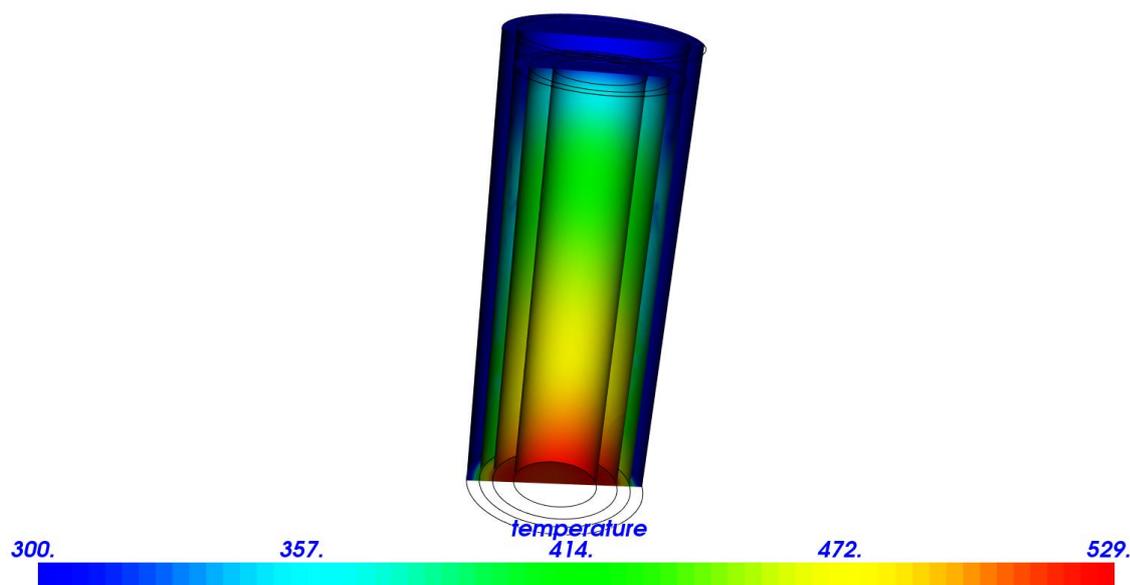


Рисунок 30– Нагрев фигуры

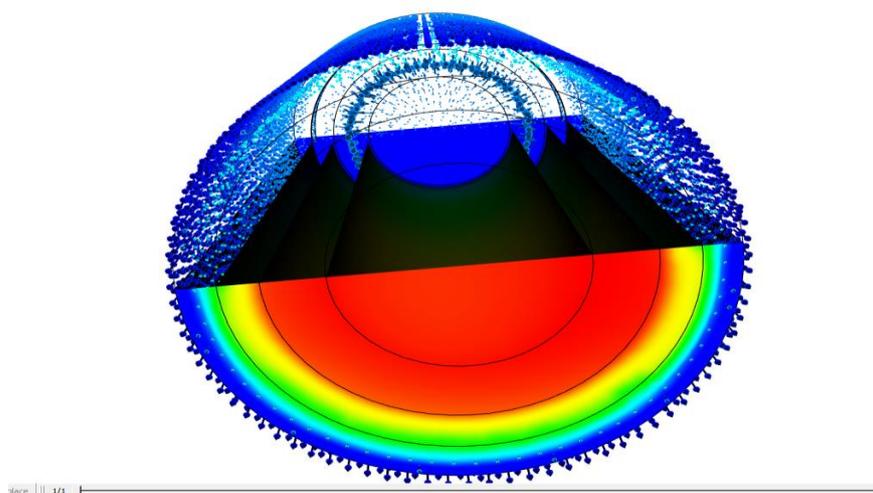


Рисунок 31– Векторы направления воздуха

Вывод: Рисунок 30 представляет собой результат численного моделирования или экспериментального исследования распределения температуры в цилиндрическом объекте. Цветовая карта наглядно демонстрирует, что температура в нижней части объекта выше, чем в верхней, с плавным переходом между этими значениями. Такая визуализация полезна для анализа термических процессов и оптимизации конструкции объекта. Визуализация детали демонстрирует четкое разделение температурных зон в модели: высокие температуры в внешней оболочке и низкие температуры в внутренних каналах. Это указывает на активный процесс теплообмена между этими областями. Такая визуализация крайне полезна для анализа работы системы и оптимизации ее характеристик. Модель успешно воспроизводит процессы теплообмена и движения теплоносителя в системе. Результаты показывают, что система работает эффективно, обеспечивая необходимый перенос тепла от внешней оболочки к внутренним каналам. Однако для дальнейшего улучшения модели рекомендуется провести дополнительные исследования с учетом временной зависимости и оптимизации геометрических параметров.

5 Расчет магнитных полей с помощью Elcut

В работе рассматривается модель линейного электромагнита, состоящего из катушки с обмоткой и подвижного якоря. Цель исследования — построить зависимости силы тяги (P) и потокосцепления (Ψ) от положения якоря (x) и тока (I), необходимые для дальнейшего анализа динамики системы.

Зададим данные нашего привода в программе Elcut.

Elcut – это программный комплекс моделирования и расчёта полей (электрических, магнитных, тепловых и пр.) методом конечных элементов. В программе нам нужно задать привод полностью (магнит, обмотка, индуктор.) и воздух вокруг него [16]. На изображении видна схематическая конструкция электрического привода. Основные компоненты:

Якорь — это часть устройства, которая создает основное магнитное поле. Находится внутри катушки, так как постоянный магнит должен взаимодействовать с переменным магнитным полем, создаваемым катушкой.

Материал: Альнико (алюминий-никель-кобальт). Это постоянный магнит с высокой остаточной индукцией и большой коэрцитивной способностью.

Катушка представляет собой спираль провода, намотанного на определенную форму (в данном случае, якорь).

Материал провода: медный (благодаря низкому сопротивлению и хорошей проводимости).

Стальной индуктор — это элемент, который усиливает магнитное поле, создаваемое катушкой.

Материал: сталь с высокой магнитной проницаемостью (обычно электротехническая сталь).

Стальной индуктор (сердечник): Он служит для направления и усиления магнитного потока .

Когда ток проходит через катушку, создается переменное магнитное поле.

Это поле взаимодействует с постоянным магнитом (якорем), вызывая перемещение или изменение положения якоря.

Стальной индуктор усиливает магнитное поле, делая систему более эффективной.

Данный привод показан на рисунке 32.

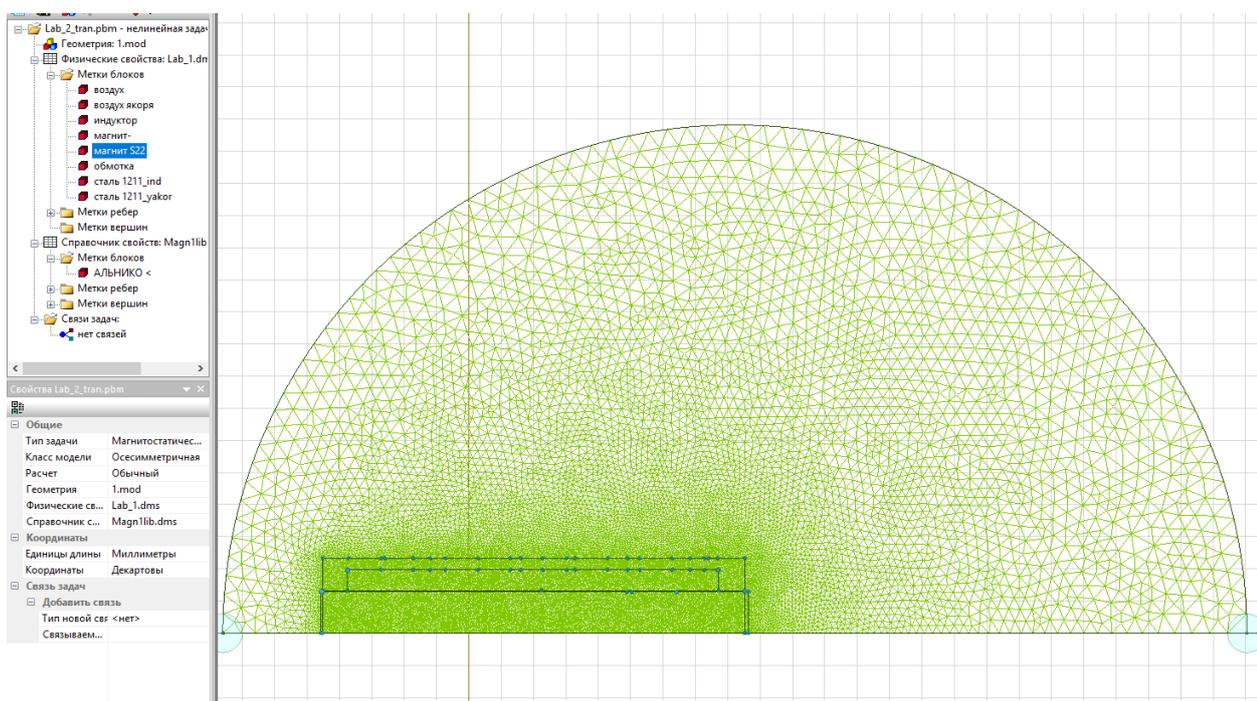


Рисунок 32 – Обзор привода в Elcut

Далее, давайте рассмотрим, какие данные у нас есть:

Сила (F) от положения якоря (x) и тока (I): $F = f(x, I)$.

Поток сцепления на виток (ψ) от положения якоря (x): $\psi = f(x)$.

Эти данные необходимы для анализа механической системы (силы взаимодействия) моделирования электрической системы (определение напряжения для заданного тока). Ключевые параметры:

Положение якоря (x):

Длина хода якоря: 652 мм (определяется геометрией и механическими ограничениями).

Шаг перемещения: 5–10 мм (баланс между точностью и вычислительной нагрузкой).

Направление: ось Z (или X, в зависимости от системы координат Elcat).

Ток в обмотке (I):

Задается вручную для каждого цикла расчета.

$I = [1, 2, 3, \dots]$ Ампер.

Области анализа:

Якорь + воздушный зазор.

Обмотка (для расчета потока сцепления).

Процедура параметрического анализа

Настройка параметров в Elcut:

Необходимо активировать модуль Label Mover для автоматизации параметрических расчетов.

Нужно определить два параметра:

Сила (F): измеряется для области "Магнит + воздух".

Поток сцепления (ψ): измеряется для обмотки.

Настройка перемещения якоря:

Выделить область якоря.

Установить шаг перемещения (например, 10 мм).

Нужно настроить цикл перемещения:

Начальное положение → Конечное положение (до механического упора).

Опция: "Повторять, пока возможно" (автоматическое определение количества шагов).

Расчет при фиксированном токе:

Нужно задать ток в обмотке (например, $I = 1$ А).

Запустить параметрический анализ:

Для каждого шага перемещения якоря рассчитываются F и ψ .

Эти данные представлены в виде таблиц 1 и 2.

Таблица 1 - Зависимость потокосцепления от положения якоря и МДС в обмотке Psi (х, F)

Положение якоря(х)	Ток						
	-55116	-36744	-18372	0	18372	36744	55116
0.200	0.00229	0.0042	0.0056	0.0069	0.008251	0.0095276	0.010797
0.225	0.001988	0.0038	0.0052	0.0065	0.007776	0.0090199	0.010257
0.250	0.001687	0.0034	0.0048	0.0060	0.007300	0.0085112	0.009715
0.275	0.001386	0.0031	0.0044	0.0056	0.006824	0.0080022	0.009174
0.300	0.001086	0.0027	0.0040	0.0051	0.006347	0.0074925	0.008631
0.325	0.000786	0.0023	0.0036	0.0047	0.005870	0.0069832	0.008089
0.350	0.000487	0.0019	0.0032	0.0043	0.005394	0.0064739	0.007547
0.375	0.000190	0.0016	0.0028	0.0038	0.004918	0.005965	0.007005
0.400	-0.00010	0.0012	0.0023	0.0034	0.004442	0.0054569	0.006465

Таблица 2 - Зависимость механической силы от положения МДС Р (х, F)

Положение якоря(х)	Ток						
	-55116	-36744	-18372	0	18372	36744	55116
0.00	-500	-508.37	-509.89	-500	-512.95	-14.687	-516.02
0.025	46.78	21.084	13.126	-679	-4.528	-991.75	-25.736
0.050	-81.385	-293.21	-469.52	-692.94	-813.27	-1398.6	-1176.6
0.075	296.55	-29.071	-358.11	-324.69	-1038.3	-995.3	-1776.2
0.100	542.93	275.46	-15.539	-217.01	-651.02	-906.34	-1358
0.125	640.47	383.68	95.193	-166.75	-550.8	-857.8	-1283.7
0.625	702.87	591.04	462.5	-70.736	146.27	-155.54	-243.96
0.650	48.371	-1.51	-34.179	-653.15	-111.19	-670.03	-203.79
0.675	-624.3	-638.46	-645.45	-399.82	-661.3	-414.36	-679.34
0.700	-381.79	-385.65	-392.69	-319.63	-407.04	-327.94	-421.75
0.725	-307.73	-311.4	-315.5	-347.88	-323.77	-352.78	-332.13
0.750	-357.62	-343.03	-345.45	-511.41	-350.33	-514.48	-355.23

Графики зависимостей:

Для различных комбинаций тока и положения якоря были получены дискретные значения силы и потокосцепления, которые затем использовались для аппроксимации функций $P(x, I)$ и $\Psi(x, I)$.

При помощи программы Matcad сделаны графики зависимостей, на основе имеющихся данных, показаны на рисунках 33 и 34.

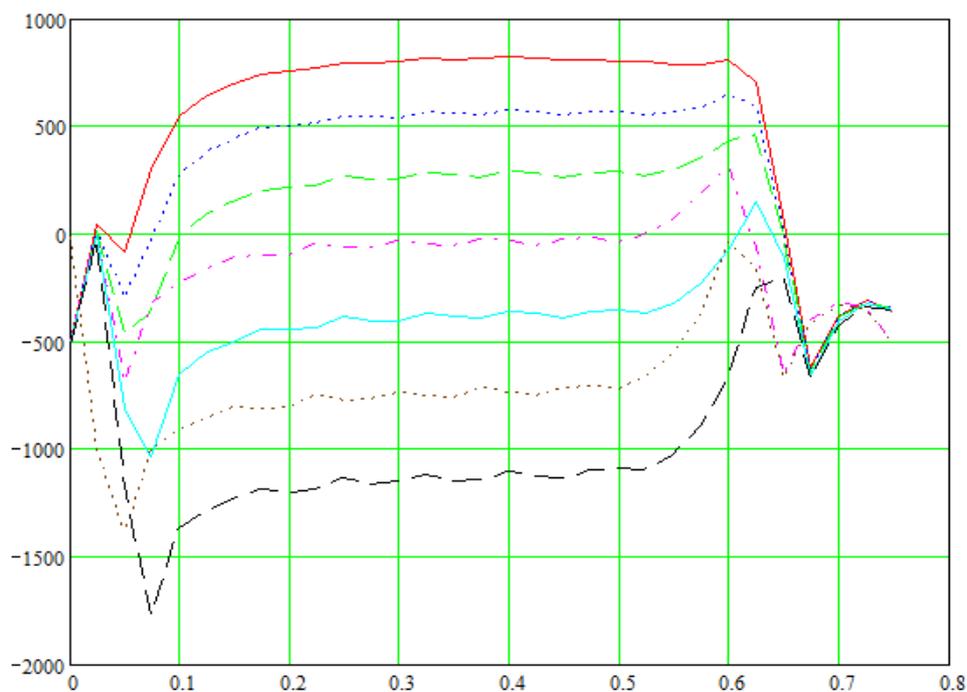


Рисунок 33 – График зависимости $P(F, x)$

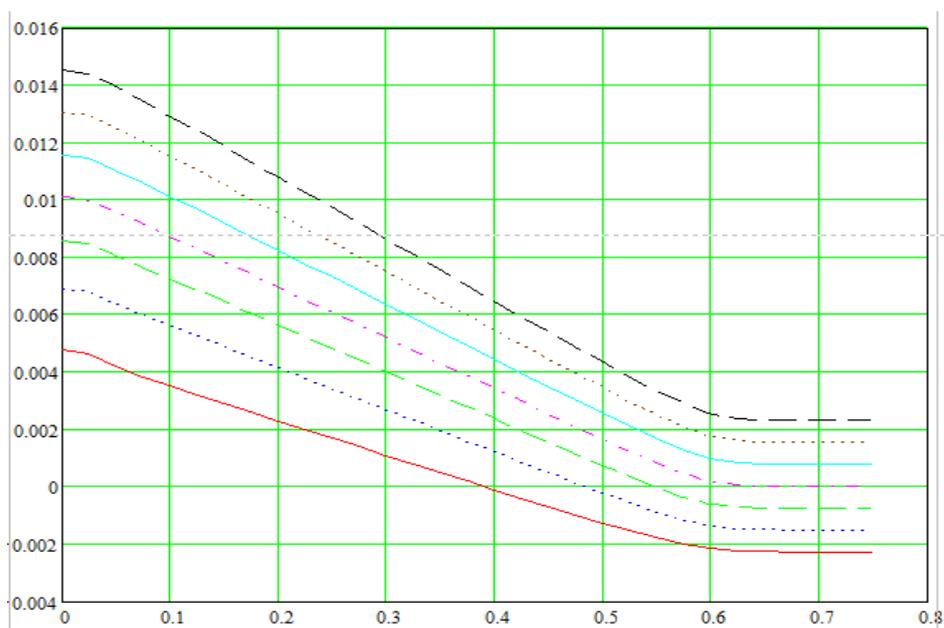


Рисунок 34 – График зависимости $\Psi(F, x)$

6. Создание динамической модели для моделирования работы привода и системы управления в пакете MATLAB Simulink.

MATLAB Simulink — это мощный инструмент для визуального моделирования сложных технических систем в реальном времени и их последующего анализа или реализации. Схема в MATLAB представляет собой численную модель, основанную на блоках, которая имитирует поведение системы путем применения таблиц данных для нелинейных преобразований и математических операций для линейных преобразований [5]. Результат интегрируется по времени для анализа временной динамики системы.

Для начала, нам нужна модель для дальнейшего построения блоков в MATLAB. Модель, показанная на рисунке 35, представляет собой регулируемый электрический привод, где электродвигатель создает движение рабочего органа, а противодействующая сила имитирует нагрузку [15]. Система работает в режиме замкнутой обратной связи для точного контроля положения и скорости [12].

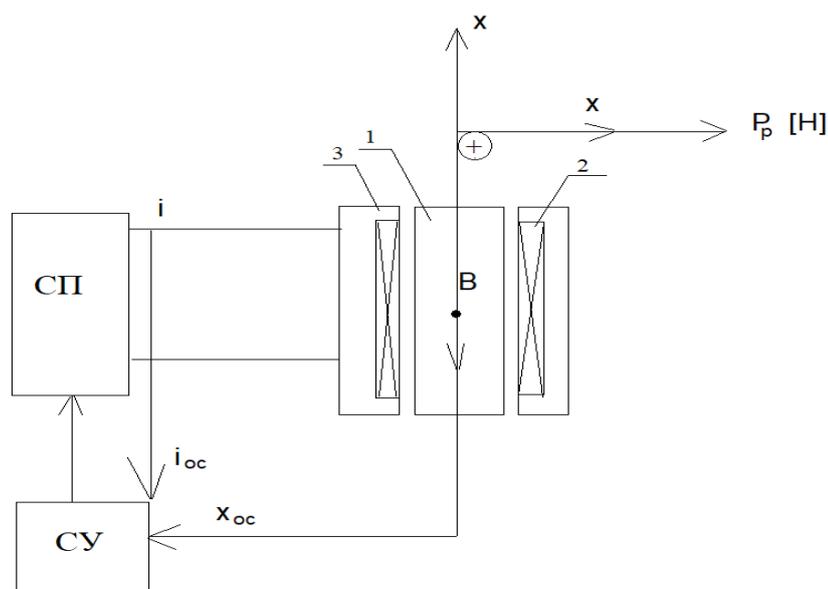


Рисунок 35 – Основные компоненты схемы. Он состоит из С-образного профиля (3), катушки (2) и якоря (1).

Рассмотрим функциональные обязанности по ключевым направлениям для каждого блока. Начнём с блоков, отвечающих за визуализацию, обработку и задержку входных сигналов. Данные блоки показаны на рисунке 37.

- Блоки Pad (300 и 500): Отвечают за моделирование временных задержек входных сигналов.
- Сумматор: Выполняет вычитание двух задержанных сигналов.
- Блоки Look-Up Table (p_table и cp_table): Применяют таблицы данных для обработки разницы сигналов (delta_2), обеспечивая нелинейную или табличную коррекцию.
- Блок Scope: Визуализирует сигнал delta_2 для анализа его поведения во времени.

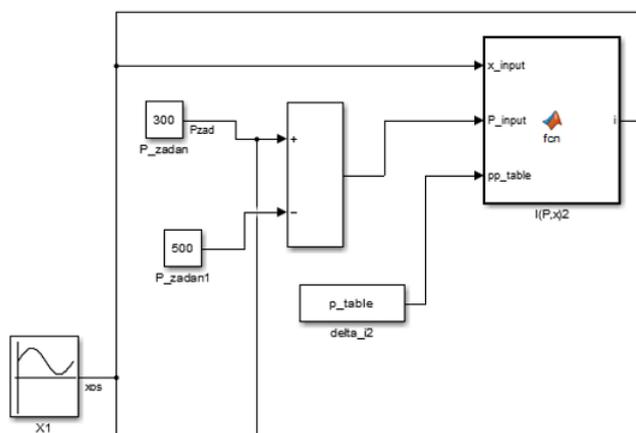


Рисунок 37 – Компоненты схемы

Данная схема моделирует процесс вычисления выходного сигнала, основываясь на ограничении входного сигнала, вычитании константы и умножении на другой параметр. Данные блоки показаны на рисунке 38.

- Блок Saturation2: Ограничивает входной сигнал f в заданных пределах.
- Блок Constant (1000): Генерирует постоянное значение 1000.

- Блок Gain (-1): Меняет знак входного сигнала (в данном случае - 1000).
- Блок Sum (Сумматор): Вычисляет разницу между ограниченным сигналом и -1000.
- Блок Product: Умножает результат сумматора на сигнал Ig_current.
- Блок Scope: Визуализирует выходной сигнал E_invert.

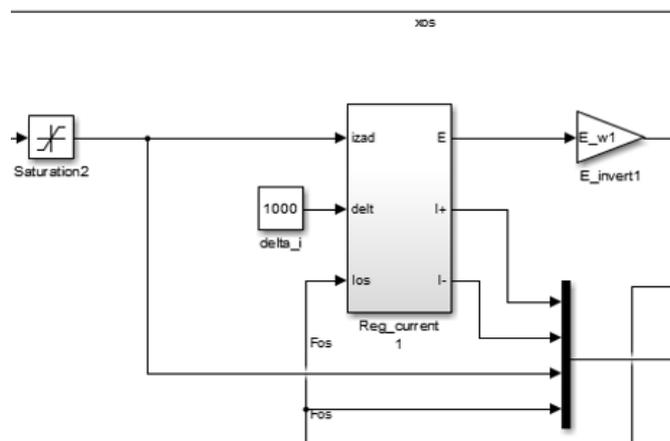


Рисунок 38 – Компоненты схема

Данная схема моделирует процесс интегрирования сигнала, предварительно умноженного на константы, и анализирует его динамику во времени. Данные блоки показаны на рисунке 39.

- Блок R1: Генерирует постоянное значение R1.
- Блок Gain (K): Умножает входной сигнал Fps на коэффициент усиления K.
- Блок Product1: Выполняет умножение R1 и $K * Fps$.
- Блок Integrator7: Интегрирует сигнал $R1 * K * Fps$ по времени.
- Блок Scope: Визуализирует интегрированный сигнал.

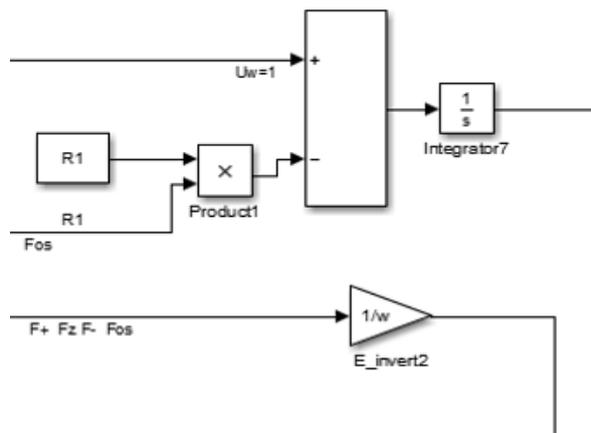


Рисунок 39 – Компоненты схемы

Данная схема моделирует процесс интегрирования сигнала, предварительно преобразованного с использованием таблиц данных и констант, и анализирует его динамику во времени. Данные блоки показаны на рисунке 40.

- Блок Look-Up Table (psi_table): Преобразует входной сигнал δ_1 с использованием таблицы данных, выдавая сигнал Ψ_{se} .
- Блок Look-Up Table (pp_table): Преобразует входной сигнал δ_1 с использованием другой таблицы данных, выдавая сигнал Pp_{se} .
- Блок Gain (-1): Меняет знак входной константы $R2$.
- Блок Sum (Сумматор): Вычисляет разницу между константами $R1$ и $R2$.
- Блок Product: Умножает результат сумматора на входной сигнал Fps .
- Блок Integrator: Интегрирует сигнал $(R1 - R2) * Fps$ по времени.
- Блок Score: Визуализирует интегрированный сигнал.

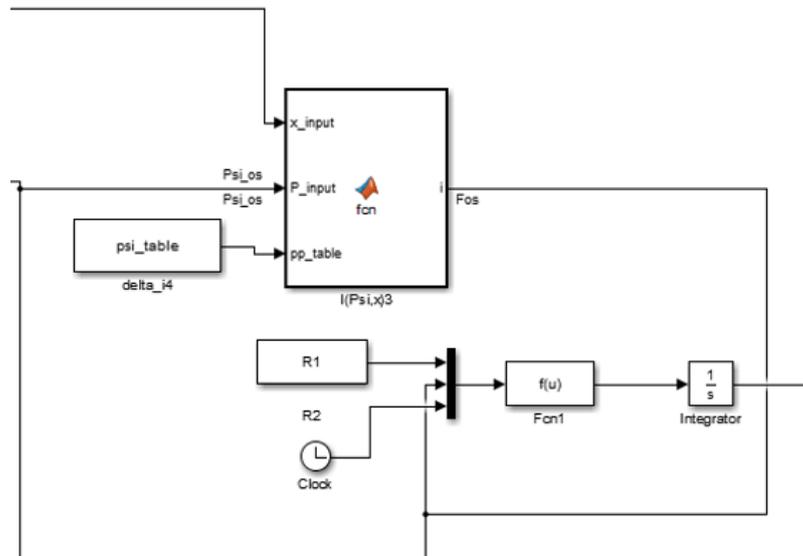


Рисунок 40 – Компоненты схемы

Схема, показанная на рисунке 41, моделирует процесс интегрирования произведения двух сигналов (P_{os} и P_{si}) по времени и анализирует их динамику во времени.

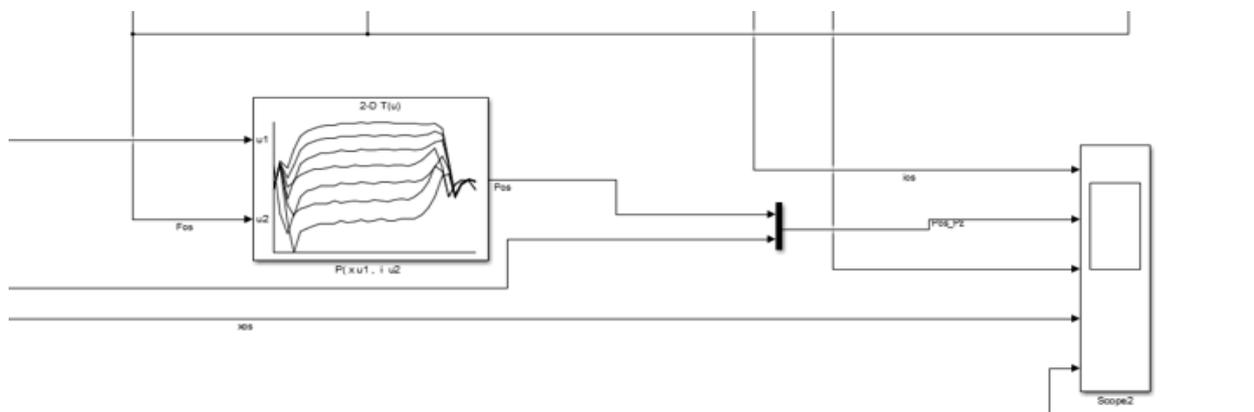


Рисунок 41 – Компоненты схемы

После настройки запускаем программу и визуализируем данные. Запустим при значениях $P_z=300$ (заданное усилие) и $P=500$ (усилие якоря). Данные показаны на рисунке 42.

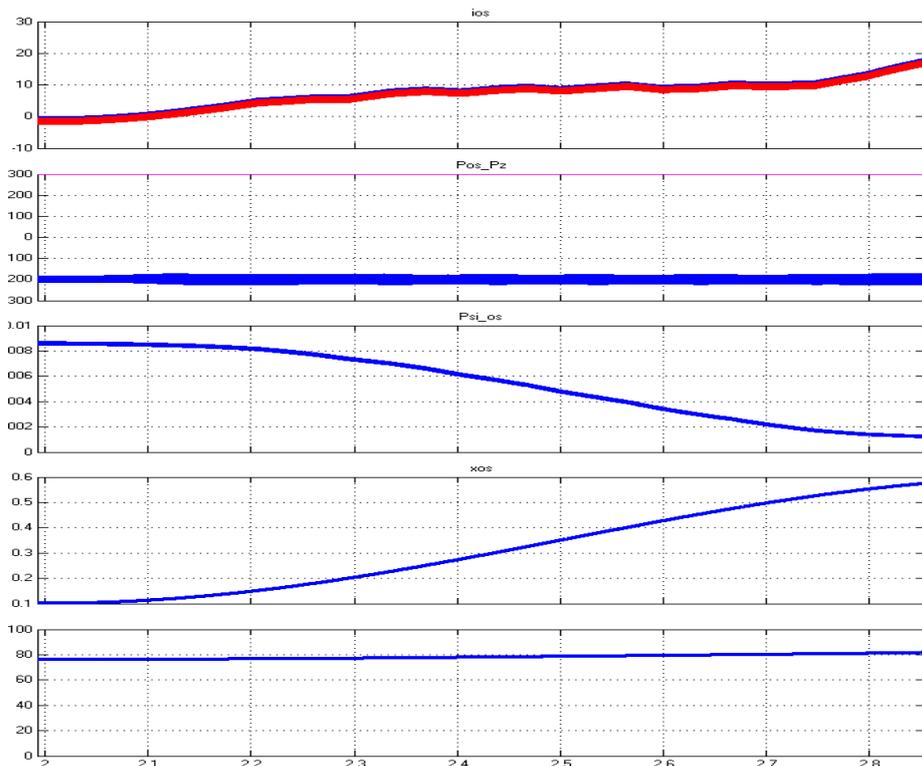


Рисунок 42 – Динамика основных сигналов системы при заданных параметрах

При заданных значениях у нас:

- ios: Сигнал растет с течением времени, достигая значения около 20.
- Pos_Pz: Сигнал остается практически постоянным на уровне 200.
- Psi_os: Сигнал убывает со временем, начиная с 0.08 и снижаясь до 0.01.
- xos: Сигнал растет линейно, начиная с 0 и достигая значения около 0.6.
- XOS: Сигнал остается практически постоянным на уровне 80.

Для получения новых экспериментальных данных и анализа поведения системы при изменённых условиях было принято решение увеличить усилие, с которым осуществляется вытягивание якоря. Значение силы было скорректировано с исходного на 700, что позволило провести дополнительное моделирование в расширенном диапазоне нагрузок и оценить динамические характеристики привода при повышенной внешней нагрузке [13]. Данные показаны на рисунке 43.

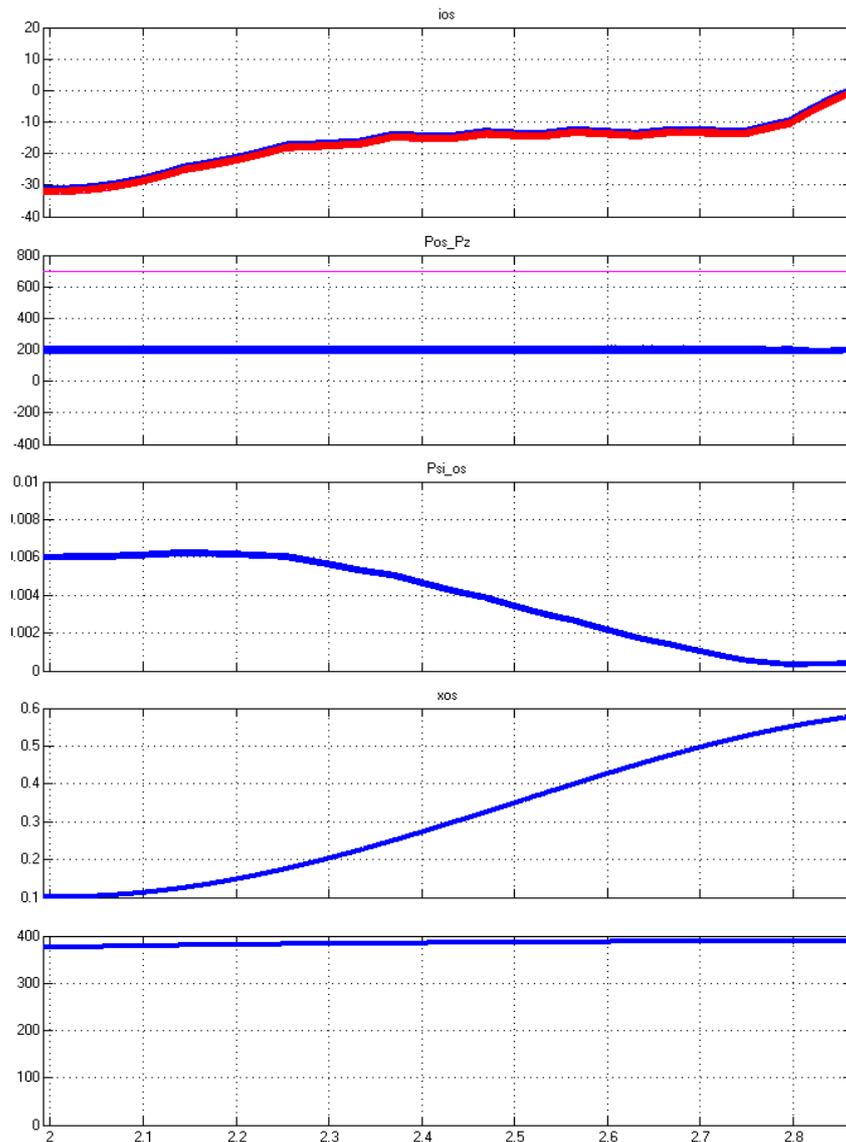


Рисунок 43 – Динамика основных сигналов системы при изменении входных параметров

При заданных значениях у нас:

- ios: Сигнал растет с течением времени, достигая значения около +10.
- Pos_Pz: Сигнал остается практически постоянным на уровне 200.
- Psi_os: Сигнал убывает со временем, начиная с 0.06 и снижаясь до 0.01.
- xos: Сигнал растет линейно, начиная с 0 и достигая значения около 0.6.
- XOS: Сигнал остается практически постоянным на уровне 400.

Данные показывают динамическое и статическое поведение системы, где некоторые сигналы изменяются со временем, а другие остаются стабильными.

Рассмотрим работу регулятора тока. График на рисунке 44 показывает комбинацию статических и динамических сигналов, где красный сигнал демонстрирует периодическую треугольную форму, а остальные сигналы остаются стабильными.

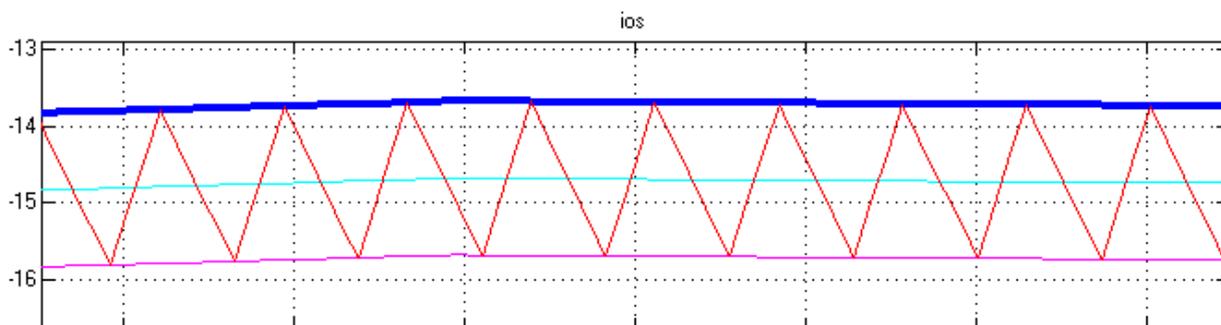


Рисунок 44 – Динамика силовых и позиционных параметров тренажера при циклической нагрузке

На представленном графике показаны следующие данные:

- Синий и розовый сигналы: Стабильные сигналы, являющиеся ограничителем для тока
- Красный сигнал: Периодический сигнал с треугольной формой, колеблющийся между значениями около -15 и -16.
- Голубой сигнал: Заданный сигнал, к которому стремится ток

Вывод: Эти данные демонстрируют сочетание статических и динамических характеристик системы, где один сигнал (красный) подвергается периодическим изменениям, а остальные сигналы остаются стабильными. Это указывает на корректную работу системы при моделировании различных условий.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана и исследована модель регулируемого электрического привода, предназначенного для создания противодействующей силы в тренажерном устройстве. Разработанная модель позволяет анализировать как динамические, так и статические характеристики привода при различных условиях нагрузки.

На основе анализа существующих решений был выбран подходящий тип привода, а также обоснована конструктивная схема устройства. С использованием программного обеспечения FreeCAD, Elmer, Elcut и MATLAB Simulink были проведены расчёты тепловых и магнитных полей, создана 3D-модель привода, а также разработана динамическая модель системы управления.

Результаты моделирования показали:

Высокую точность расчётов тепловых полей в Elmer, подтверждённую устойчивой сходимостью решения.

Успешное построение зависимостей силы тяги и потокосцепления от положения якоря и тока в Elcut.

Эффективное функционирование динамической модели в Simulink, позволяющей имитировать поведение системы управления при различных входных параметрах.

Модель привода демонстрирует корректное поведение при изменении внешних условий, что подтверждается результатами компьютерного моделирования. Добавление новых данных и параметров позволило повысить точность модели и её применимость к реальным условиям эксплуатации.

Разработанные инструменты могут быть использованы при проектировании современных тренажерных устройств с регулируемой электрической нагрузкой.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Александреску, М. Электрические машины и приводы в автоматизированном электроприводе / М. Александреску. — Москва: Энергия, 1985. — [Б.л.].
2. Башарин, А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. — Ленинград: Энергоатомиздат, 1982. — [Б.л.].
3. Белов, М. Г. Электропривод промышленных установок / М. Г. Белов. — Москва: Академия, 2005. — [Б.л.].
4. Боуз, Б. К. Силовая электроника и приводы переменного тока / Б. К. Боуз. — Аппер-Сэддл-Ривер: Прентис Холл, 1986. — [С. л.].
5. Дьяконов, В. П. MATLAB. Полный самоучитель / В. П. Дьяконов. — Москва: ДМК Пресс, 2014. — [Б.л.].
6. Зайчик, В. З. Курс электротехники и радиотехники / В. З. Зайчик. — Санкт-Петербург: ВНУ, 2010. — [Б.л.].
7. Климовицкий, М. Д. Электропривод в современных условиях / М. Д. Климовицкий. — Москва: МГТУ им. Баумана, 2015. — [Б.л.].
8. Ковалев, А. Н. Электромагнитные устройства и электропривод / А. Н. Ковалев, Е. А. Миллер. — Москва: Энергия, 1983. — [Б.л.].
9. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов. — Москва: Высшая школа, 2004. — [Б.л.].
10. Клюев, А. С. Автоматическое регулирование / А. С. Клюев. — Москва: Высшая школа, 1986. — [Б.л.].
11. Новиков, В. А. Основы проектирования систем управления электроприводами / В. А. Новиков. — Москва: Машиностроение, 1983. — [Б.л.].
12. Огата, К. Современная инженерия управления / К. Огата. — Аппер Сэддл Ривер: Прентис Холл, 2010. — [С.л.].
13. Фицджеральд, А. Э. Электрические машины / А. Э. Фицджеральд, К. Кингсли, С. Д. Уманс. — Нью-Йорк: Макгроу-Хилл, 2003. — [С. л.].
14. Филиппов, А. И. Тепловые процессы в электрических машинах / А. И. Филиппов. — Москва: Энергоатомиздат, 1984. — [Б.л.].
15. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. — Москва: Техносфера, 2001. — [Б.л.].
16. Elcut — программа для моделирования технических полей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.elcut.ru/>, свободный (дата обращения: 16.04.2025).

17. Документация по решателю Elmer FEM [Электронный ресурс] / GitHub. — Режим доступа: <https://github.com/ElmerCSC/elmerfem>, свободный (дата обращения: 29.11.2024).

18. FreeCAD — параметрический 3D-САПР с открытым исходным кодом [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.freecadweb.org>, свободный (дата обращения: 13.11.2024).

19. Gmsh — генератор сеток конечных элементов с открытым исходным кодом [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://gmsh.info>, свободный (дата обращения: 15.11.2024).

20. Официальный сайт MATLAB & Simulink [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.mathworks.com>, свободный (дата обращения: 25.05.2025).