

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический  
институт  
Элетротехнология и электротехника  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.Н.Тимофеев  
подпись      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

13.03.02.11 Электротехнологические установки и системы

МГД-вращатель алюминиевого расплава  
тема

Руководитель	_____	<u>доцент, к.т.н.</u>	<u>М.Ю.Хацаюк</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускники	_____		<u>А.С.Черкасов</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
	_____		<u>Г.С.Курочкин</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтроллер	_____	<u>профессор, д.т.н.</u>	<u>М.В.Первухин</u>
	Подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2017

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический  
институт  
Электротехнологии и электротехники  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_      \_\_\_\_\_  
подпись      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ Г

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
в форме бакалаврской работы**

Студентам Черкасову Артему Сергеевичу

фамилия, имя, отчество

Курочкину Геннадию Сергеевичу

фамилия, имя, отчество

Группа ФЭ13-07Б Направление (специальность) 13.03.02

номер

код

Электроэнергетика и электротехника

наименование

Тема выпускной квалификационной работы: МГД-вращатель  
алюминиевого расплава

Утверждена приказом по университету № 17236/6 от 16,12,2016г.

Руководитель ВКР М.Ю.Хацаюк, доцент, к.т.н.

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: геометрически параметры МГД-вращателя,  
параметры и настройки источника питания

Перечень разделов ВКР: обзор существующих МГД-устройств и методов  
моделирования МГД-процессов, математическая модель системы,  
численный анализ процессов, физическое моделирование и верификация

Перечень графического материала: конструкторский проект  
физической модели, техническая документация источника питания

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_

подпись

М.Ю.Хацаюк

инициалы и фамилия

Задание приняли к исполнению

А.С.Черкасов

подпись, инициалы и фамилия студента

Г.С.Курочкин

подпись, инициалы и фамилия студента

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1 Обзор применения индукционных машин в металлургии .....	4
1.1 принцип работы и конструкции индукционных машин.....	4
1.2 Возможности математического моделирования .....	11
1.3 Модуляция напряжения .....	15
1.4 Выводы по первой главе.....	16
2 Математическое моделирование .....	17
2.1 Математическое моделирование электромагнитных процессов.....	17
2.2 Моделирование в ANSYS Maxwell.....	22
2.3 Моделирование в ANSYS APDL.....	30
2.4 Выводы по второй главе.....	36
3 Экспериментальное исследование на физической модели.....	37
3.1 Устройство установки .....	37
3.2 Результаты эксперимента.....	40
3.3 Выводы по третьей главе .....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	43
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	44

## ВВЕДЕНИЕ

Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом находят все более широкое применение [1].

МГД-устройства используются уже достаточно давно, с 60-х годов, а их развитие не стоит на месте. МГД-устройства, использующие электромагнитные силы, способны осуществить различные виды манипулирования жидким металлом, а также позволяют повысить эффективность металлургического оборудования для осуществления различных технологических операций. Таким образом, изучение методов расчета и проектирования МГД-устройств является актуальной задачей.

Не менее актуальной задачей является изучение источников питания МГД-машин, так как их работа напрямую зависит от основных параметров переменного тока (напряжения и частоты), а также различных видов его модуляции.

На данный момент, существует множество видов индукционных машин с жидкометаллическим рабочим телом. Таковой является экспериментальная дуговая МГД-машина, применяемая для создания воронки в жидком металле.

Одним из наиболее востребованных способов изучения электромагнитных процессов в МГД-машинах является математическое моделирование, корректность расчетов которого можно достичь путем сравнения различного программного обеспечения и экспериментальных данных.

Влияние моделирования различных видов импульсов на работу МГД-машины в полной мере не изучена. Поэтому результаты, полученные в данной работе, послужат толчком к дальнейшему изучению поставленной задачи.

# 1 Обзор применения индукционных машин в металлургии

## 1.1 Принцип работы и конструкции индукционных машин

Линейные индукционные машины – этих машинах токи в рабочем теле (жидкие металлы, плазма) индуктируются переменным магнитным полем, электрическая связь между рабочим телом и внешней электрической цепью отсутствует и стенки каналов могут быть неэлектропроводящими. По принципу действия индукционные МГД-машины аналогичны асинхронным электрическим машинам, рассмотрим принцип действия и конструкцию асинхронной дуговой и линейной машины.

Устройство линейного (а) и дугового (б) асинхронных двигателей показано на рисунке 1.1. Магнитопровод статора 1 линейного двигателя имеет форму параллелепипеда, дугового двигателя – дугового сектора. Разноименнополусная трехфазная первичная обмотка 2 размещается в линейном двигателе в пазах на одной из граней параллелепипеда, в дуговом двигателе – в пазах на внутренней (или внешней) цилиндрической поверхности дугового сектора. Подвижная часть в линейном двигателе перемещается поступательно. Ее магнитопровод 4, как и магнитопровод статора, имеет форму параллелепипеда (рисунок 1.1а). В пазах на поверхности подвижного магнитопровода, обращенной к статору, размещается короткозамкнутая обмотка 3. Подвижная часть в дуговом двигателе вращается. Она называется, как и в обычном двигателе, ротором. Ротор 4 имеет форму полого цилиндра (рисунок 1.1б). В пазах на его наружной цилиндрической поверхности размещается короткозамкнутая обмотка 3 [2].

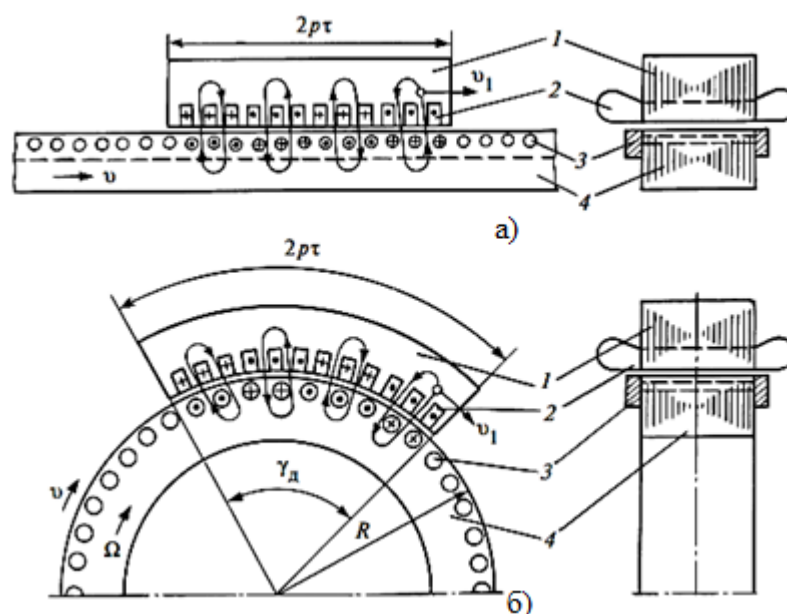


Рисунок 1.1 – Линейный (а) и дуговой (б) асинхронные двигатели

Как в линейном, так и в дуговом двигателе подвижная часть может быть выполнена массивной из магнитного материала. Причем в этом случае отпадает необходимость в короткозамкнутой обмотке, а иногда в качестве ротора удастся использовать цилиндрические массивные детали рабочей машины [2].

Поподробнее рассмотрим дуговую асинхронную машину.

Особенностью этого двигателя является зависимость частоты вращения его ротора 1 от длины дуги, на которой располагаются обмотки 2 статора 3. Пусть обмотки статора располагаются на дуге, длина которой соответствует центральному углу  $\alpha = 2\tau p$ , где  $\tau$  – длина полюсного деления и  $p$  – число пар полюсов. Тогда за один период тока вращающееся поле статора совершит поворот на угол  $2\tau p/p = \alpha/p$ , а в течение одной минуты поле повернется на  $n$  оборотов, т.е. будет иметь частоту вращения  $n$ , об/мин (формула 1.1). Выбирая различные  $\alpha$ , можно выполнять дуговые двигатели с различными частотами вращения ротора [2].

$$n = \frac{\alpha 60 f}{p 2\pi}. \quad (1.1)$$

Разновидности индукционных магнитогидродинамических машин с жидкометаллическим рабочим телом.

Плоские линейные машины – главные элементы конструкции плоских линейных машин уже были рассмотрены выше. Здесь подробнее остановимся на особенностях этих машин [1].

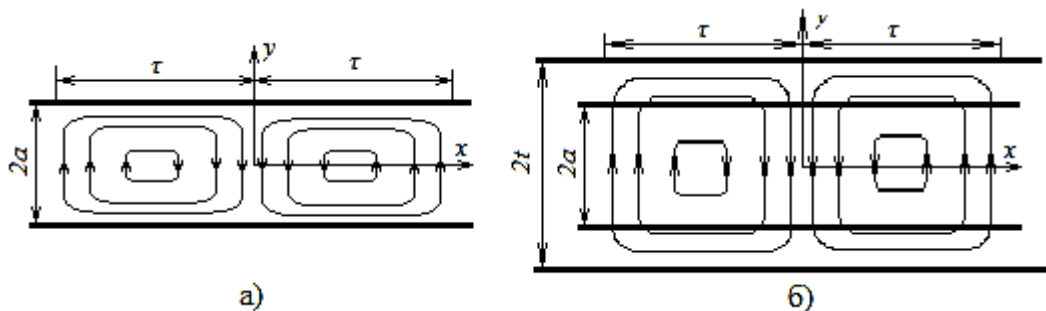
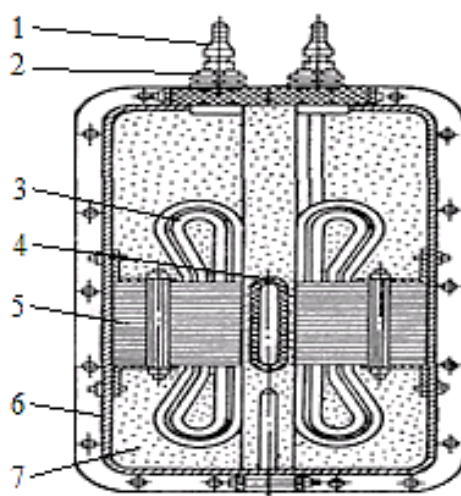


Рисунок 1.2 – Поперечный краевой эффект в распределении токов в жидком металле у плоских индукционных машин без боковых шин (а) и с боковыми шинами (б)

Характерной особенностью плоских машин является наличие у них поперечного краевого эффекта в распределении вторичных токов. На рисунке 1.2а показан вид плоского слоя жидкого металла сверху и изображены замкнутые линии тока в жидком металле. Так как слой металла имеет конечную ширину  $2a$ , линии тока у краев слоя металла ориентированы вдоль оси  $x$ , и поэтому плотность тока  $j$  имеет составляющие  $j_x$  и

$j_y$ . Составляющие  $j_y$  при взаимодействии с магнитным полем, линии которого на рисунке 1.2 направлены перпендикулярно плоскости чертежа, создают полезный напор, направленный вдоль оси  $x$ . В то же время составляющие  $j_x$  не создают полезного напора и обуславливают только возникновение поперечных усилий. Вместе с тем наличие составляющих  $j_x$  увеличивает сопротивление нитей тока, что приводит к уменьшению  $j$ ,  $j_y$  и полезного напора. Одновременно увеличивается относительная величина электрических потерь в жидком металле. В результате всего этого эффективность машины понижается. Для борьбы с влиянием поперечного краевого эффекта внутри канала можно установить боковые шины (рисунок 1.2б) с высокой электропроводностью  $\gamma_{ш}$ . При  $\gamma_{ш}=\infty$  их действие было бы идеальным, линии тока входили бы в шины перпендикулярно и  $j_x=0$ . В действительности всегда  $\gamma_{ш}<\infty$ , и поэтому установка этих шин приводит только к ограничению поперечного краевого эффекта. Установка шин возможна только в случае неагрессивных жидких металлов и при не слишком высоких температурах. В электромагнитных насосах и генераторах, работающих на натрии, калии и их сплавах при температурах 400—800 °С, применяются никелированные медные шины. В электромагнитных насосах для металлургических целей часто приходится иметь дело с весьма агрессивными жидкими металлами (алюминий, цинк, их сплавы, сталь и т. д.), и в этих случаях применение шин невозможно. Плоские машины ввиду простоты их конструкции получили наибольшее распространение. Их разборка и сборка возможны без нарушения целостности тракта жидкого металла. В этих машинах практически во всех случаях обмотку можно располагать на обоих сердечниках индуктора, что позволяет увеличить общую линейную токовую нагрузку машины и соответственно уменьшить ее габариты. Ниже для иллюстрации рассматриваются некоторые изготовленные машины [1].



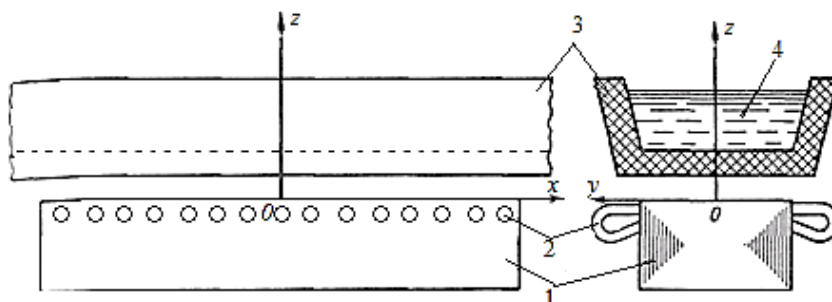
1-ниппель для шланга водяного охлаждения; 2 — вывод обмотки; 3 — обмотка; 4 — огнеупорная труба; 5 — магнитопровод; 6 — корпус; 7 — наполнитель.

Рисунок 1.3 – Индукционный насос



Изготовление электромагнитных насосов для черных металлов представляет чрезвычайно сложную задачу, так как температура металла очень высока, его электропроводность мала и имеются большие трудности в выполнении надежных в работе каналов. К. п. д. таких насосов весьма мал, в частности, к. п. д. насоса, изображенного на рисунке 1.3, и составляет менее 1%. Впрочем, к. п. д. насосов для металлургических целей в большинстве случаев не имеет решающего значения, так как главный выигрыш заключается в усовершенствовании технологии производства, улучшении качества продукции, возможности механизации и автоматизации производства и улучшении условий труда [1].

Индукционный желоб – если у плоского индукционного насоса удалить верхний сердечник с обмоткой и сделать канал открытым сверху, то получится индукционный электромагнитный желоб. Такой желоб был предложен Л. А. Верте, и под его руководством были построены опытные желоба для чугуна на Московском автозаводе им. И. А. Лихачева и Енакиевском металлургическом заводе. Длительно действующий опытный желоб для чугуна относительно небольших размеров был изготовлен и исследован во ВНИИметмаш [1].

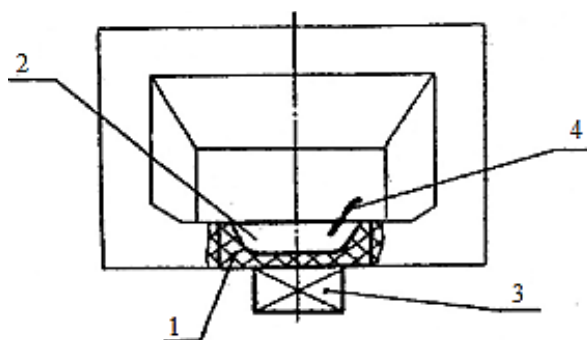


1- сердечник; 2 — многофазная обмотка; 3 — канал; 4 — жидкий металл.

Рисунок 1.4 – Индукционный желоб

Индукционный желоб способен транспортировать жидкий металл вверх под некоторым углом к горизонту. В опытных желобах для чугуна этот угол составлял несколько градусов. Из-за отсутствия второго сердечника магнитная индукция желоба в зоне жидкого металла является относительно слабой, поэтому его энергетические показатели низки, в частности, его к. п. д. приблизительно на порядок ниже, чем в индукционных насосах. По этой причине индукционный желоб не перспективен для транспортирования металла на значительные расстояния, но он может найти применение для перемещения металла на расстояния до нескольких метров, в особенности при сочетании с той или иной его технологической обработкой [1].

Электромагнитные перемешиватели жидкого металла в печах – если индуктор с одним сердечником поместить под подом сталеплавильной печи, то в печи возникнет движение и перемешивание жидкого металла [1].



1-блок; 2-ниша; 3-индуктор; 4- перегородки.

Рисунок 1.5 – МГД-перемешиватель под подом печи

Благодаря этому облегчается и усиливается выделение газовых пузырьков и неметаллических включений, достигается равномерное распределение легирующих добавок и интенсификация физико-химических процессов в жидком металле, в результате чего значительно улучшается качество металла, а также уменьшается время плавки. По этим причинам подобными перемешивателями в настоящее время оснащаются все мощные электроплавильные печи для выплавки качественных сталей. Толщина слоя металла в таких печах достигает 0,5 – 1,0 м. Поэтому для ограничения поверхностного эффекта в распределении токов и электромагнитных усилий в жидком металле индукторы перемешивателей питаются токами с частотами 0,2 – 1,5 Гц. Для их питания в настоящее время применяются однофазные коллекторные генераторы с независимым возбуждением, которые изготавливаются на базе машин постоянного тока с шихтованными полюсами и ярами. Для уменьшения количества таких генераторов в индукторах перемешивателей применяются двухфазные обмотки. Индукторы имеют число полюсов  $2p=2$  и длину до 2 – 3 м. Для лучшего прилегания к поду печи индукторы делают вогнутой или ступенчатой формы [1].

Цилиндрические линейные машины – в цилиндрической машине создается магнитное поле, бегущее в направлении оси машины, и она работает по такому же принципу, как и плоская машина. В цилиндрической машине вторичные токи протекают в жидком металле по кольцевидным контурам, параллельным кольцевидным катушкам первичной обмотки, и взаимодействуют с первичным полем на протяжении всей окружности. Поэтому вторичный краевой эффект в цилиндрических машинах отсутствует. Кроме того, первичная обмотка не имеет неактивных лобовых частей. Эти обстоятельства составляют главное преимущество цилиндрических машин. Обычно цилиндрические машины имеют обмотку только на внешнем сердечнике, так как размещать, охлаждать, обслуживать и ремонтировать обмотку на внутреннем сердечнике трудно. Это является определенным недостатком этих машин, так как вызывает необходимость уменьшать общую линейную нагрузку машины, что в свою очередь приводит к увеличению ее размеров. Цилиндрические машины имеют, кроме того, более

сложную конструкцию, и разборка изображенной на рисунке 1.6 машины без нарушения целостности жидкометаллического тракта невозможна. Для устранения этого недостатка предложен обратный конец металлопровода пропускать через внутренний сердечник (рисунок 1.7), однако конструкция машины при этом еще более усложняется. Если температура жидкого металла выше точки Кюри (для стали около  $760^{\circ}\text{C}$ ), то необходимо охлаждение внутреннего сердечника, что также усложняет конструкцию. Цилиндрические машины в наибольшей степени пригодны при больших расходах жидкого металла (многие сотни и тысячи кубических метров в час) и при напорах до  $5 - 10 \text{ кг/см}^2$ . Ввиду более сложной конструкции они в настоящее время применяются реже, чем плоские машины. Данные о некоторых изготовленных цилиндрических насосах для жидких металлов и их применений содержатся в работах [1].

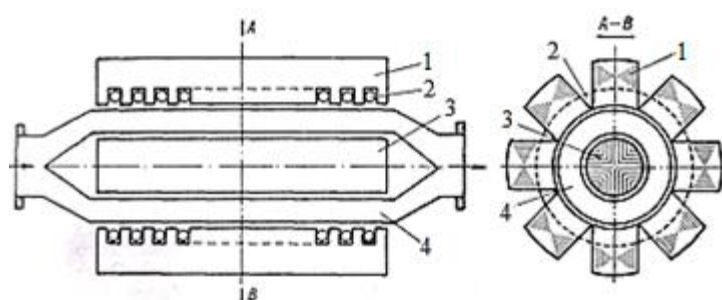


Рисунок 1.6 – Цилиндрическая линейная индукционная магнетогидродинамическая машина

1 – внешний сердечник, состоящий из ряда (4 – 8) пакетов, набранных из листовой электротехнической стали; 2 – многофазная обмотка индуктора, изготовленная из кольцевидных катушек, уложенных в пазы сердечника; 3 – внутренний сердечник, набранный и склеенный из листовой электротехнической стали; 4 – канал кольцевидного сечения для жидкого металла, охватывающий внутренний сердечник [1].

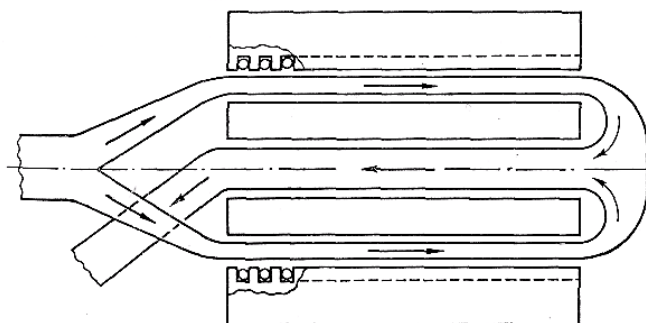
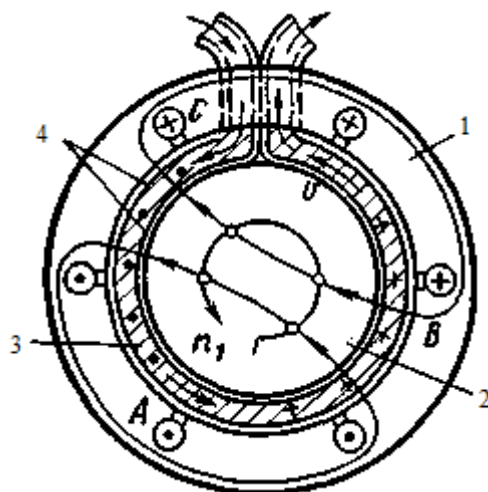


Рисунок 1.7 – Конструктивная схема цилиндрической машины с обратным металлопроводом, размещенным во внутреннем сердечнике

Цилиндрические насосы без внутреннего сердечника – цилиндрическая линейная машина (рисунок 1.6) способна работать также в случае, если у нее удалить внутренний сердечник и применить в качестве канала трубку круглого сечения. Эффективность машины при этом снижается, так как ослабляется магнитное поле и, кроме того, становится весьма неравномерным его распределение в зоне жидкого металла. Однако такая машина в конструктивном отношении очень проста и привлекательна тем, что ее канал с точки зрения его изготовления и надежности в работе имеет наиболее выгодную форму. Это обстоятельство становится почти решающим в случае агрессивных жидких металлов, когда канал необходимо изготавливать из керамических материалов [1].

Винтовые индукционные МГД-машины – можно представить себе, что винтовая индукционная машина получается из нормального асинхронного двигателя следующим образом: ротор двигателя закрепляется в неподвижном положении, его зубцовый слой вместе со вторичной обмоткой срезается и взамен его на цилиндрическую поверхность неподвижного «ротора» наматывается спиралевидный, или винтовой, канал с жидким металлом. При включении обмотки статора в трехфазную сеть возникает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует в жидком металле вторичные токи. В результате машина может работать в двигательном (насосном) и генераторном режимах точно так же, как нормальная асинхронная машина и линейные плоские и цилиндрические индукционные МГД-машины с жидкометаллическим рабочим телом. Машины рассматриваемого вида называются также спиральными. На рисунке 1.8 в схематическом виде представлена конструкция винтовой индукционной машины. Между каналом и сердечниками расположена тепловая изоляция, которая на рисунке 1.8 не показана. Самую большую трудность представляет изготовление канала машины. Между витками канала, а также между жидким металлом и стенками канала должен существовать надежный электрический контакт для того, чтобы вторичные токи могли протекать в осевом направлении последовательно через витки канала. В противном случае вторичные токи будут замыкаться в пределах каждого витка канала по отдельности и ввиду небольшой ширины витка проявление поперечного краевого эффекта (рисунок 1.2а) будет весьма сильным. Это приведет к значительному понижению эффективности машины. При надежных электрических контактах все витки канала в электрическом отношении составляют единое целое или единую проводящую среду, благодаря чему влияние поперечного краевого эффекта проявляется во много раз слабее. Вследствие изложенного канал винтовой машины должен быть металлическим и машина может работать только с малоагрессивными жидкими металлами (натрий, калий, ртуть и т. д.). Обычно каналы винтовых машин изготавливаются из нержавеющей стали и состоят из двух тонкостенных коаксиально расположенных цилиндров. На поверхности одного из цилиндров имеется выточенная на токарном станке винтовая канавка или приваренное к

цилиндру винтовое ребро, а другой цилиндр не имеет винтовых ребер и надевается с горячей посадкой на первый цилиндр. Винтовые машины наиболее пригодны для работы при малых расходах жидкого металла (до нескольких десятков кубических метров в час) и относительно высоких напорах (до 20 – 30 кг/см<sup>2</sup>). Данные о некоторых изготовленных винтовых насосах и их особенностях содержатся в работах [1].



1-внешний, 2-внутренний статор; 3-жидкий металл; 4-плоская трубка.

Рисунок 1.8 – винтовая индукционная машина

Винтовые индукционные машины с вращающимися полюсами – конструкцию изображенной на рисунке 1.8 винтовой машины можно видоизменить следующим образом: внешний сердечник изготовить без обмотки и к нему прикрепить спиральный канал с жидким металлом, а на вращающемся роторе поместить полюсы в виде постоянных магнитов или с обмоткой возбуждения, которая питается постоянным током. Если ротор такой машины привести во вращение посторонним двигателем, то машина будет работать в качестве электромагнитного насоса. При этом угловая скорость движения жидкого металла будет меньше угловой скорости вращения ротора. Если же при помощи внешнего источника гидравлической энергии привести жидкий металл в движение со скоростью, большей, чем угловая скорость ротора, то на валу [1].

## 1.2 Возможности математического моделирования

Расчет модели производился в пакетных программах ANSYS, а именно: ANSYS Mechanical APDL и ANSYS Maxwell. В настоящее время программа ANSYS представляет собой многоцелевой пакет проектирования и анализа, признанный во всем мире. Первая реализация программы значительно отличалась от последних ее версий и касалась только решения задач теплопередачи и прочности в линейной постановке. Как и большинство других программ того времени, она работала в пакетном режиме и лишь на

“больших” машинах. В начале 70-х годов в программу было внесено много изменений в связи с внедрением новой вычислительной технологии и реализацией запросов пользователей. Были добавлены нелинейности различной природы, появилась возможность использовать метод под конструкций, была расширена библиотека конечных элементов. Компания обратила внимание на появившиеся в то время мини компьютеры и векторные графические терминалы. В течение нескольких лет эти новые аппаратные средства были освоены программными разработками фирмы, породив новую эру компьютерного решения инженерных задач. В конце 70-х существенным дополнением к программе ANSYS явился интерактивный режим работы. Это значительно упростило процедуры создания конечно-элементной модели и оценку результатов (пре- и пост процессорная обработка). Стало возможным использовать интерактивную графику для проверки геометрии модели, заданных свойств материала и граничных условий перед началом счета. Графическая информация могла быть сразу же выведена на экран для интерактивного контроля результатов решения. Сегодня ANSYS – это чрезвычайно мощная и удобная программа. Каждая ее версия включает новые и расширяет прежние возможности пакета, что делает программу быстродействующей, более гибкой и удобной. Эти ее качества помогают пользователям справиться с непрерывно возрастающими запросами современного промышленного производства. Возможности программы ANSYS Maxwell – это современное, высокопроизводительное программное обеспечение для моделирования двумерных и трехмерных электромагнитных полей, используемое для анализа моделей двигателей, датчиков, трансформаторов и многих других электрических и электромеханических устройств различного применения. На данный момент это приоритетный продукт фирмы ANSYS. Математическая основа ANSYS Maxwell – метод конечных элементов, задача которого заключается в нахождении единственно возможного распределения электромагнитного поля в заданной расчётной области при указанных граничных условиях и возбуждении. ANSYS Maxwell стремительно развивается, высокопроизводительные решатели с высокой точностью и максимальной скоростью рассчитывают статические, гармонические электромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы в полевых задачах. Пользователю предоставляется огромный инструментарий и современный постпроцессор для расчёта и оптимизации электромеханических устройств основанном на анализе виртуальной модели. ANSYS Maxwell применяется для разработки различных электромеханических узлов в электромашиностроении, автомобильной, оборонной, авиакосмической отрасли. Работа с виртуальными моделями, взамен дорогостоящих натуральных экспериментов имеет четкую экономическую обоснованность [5].

- Электромеханика: двигатели и генераторы, поступательные и вращающиеся электромагниты, реле, микро электромеханические устройства МЭМС.

- Электромагнетизм: катушки индуктивности, постоянные магниты, датчики, кабели.
- Силовая электроника: трансформаторная техника, преобразователи, токнесущая ошиновка, IGBT транзисторы и многие другие устройства.
- Поведение электромагнитных полей: изучение экранирования, электростатические задачи, электромагнитная совместимость, полупроводники, беспроводная передача энергии.
- Междисциплинарные задачи: магнитное перемешивание, индукционный нагрев, анализ вибрации и акустики в электрических машинах [5].

ANSYS Maxwell оснащён встроенным графическим редактором, функционал которого в полной мере обеспечивает потребности пользователя на этапе подготовки модели для расчёта:

- Импорт геометрической CAD-модели из всех современных пакетов трехмерного моделирования. Более подробно о импорте геометрических моделей можно узнать в описании лицензии ANSYS Alinks for MCAD;
- Работа с большими сборками;
- База примитивов: прямоугольник, окружность, параллелепипед, цилиндр, конус, сфера, тор;
- Возможность создания геометрических моделей сверху-вниз (операции с геометрическими примитивами) и снизу-вверх (точки, линии, поверхности, объемы);
- Операции над геометрическими объектами (сложение, вычитание, пересечение и т.д.);
- Возможность слияния нескольких геометрических объектов в один;
- Параметрическое задание геометрии;
- Проверка на наличие малых геометрических объектов, сингулярностей и многого другого с возможностью визуального контроля;
- Инструменты измерения геометрических объектов: запрос объема, площади поверхности, длины линии и др. данных;
- ANSYS Maxwell имеет набор примитивов, который используется для упрощения создания и параметризации моделей электрических машин и трансформаторов: элементы статоров, роторов, магнитопроводов, элементы обмоток, корпуса электрических машин;
- Адаптивный сеточный генератор с автоматическим контролем ошибки вычислений;
- Полностью автоматизированная процедура разбиения на тетраэдры твердых тел произвольной геометрии;
- Сгущение сетки (двух и трехмерное) на уже имеющемся разбиении.
- Построение нерегулярных сеток с разбиением приграничных областей «регулярными слоями»;
- Перестройка сетки в соответствии с полученными в результате расчета узловыми перемещениями;
- Импорт сеточной модели из других проектов;

- Наличие вспомогательных сеточных операций для контроля дискретизации модели;

- Структурированные сеточные модели для задач моделирования электрических машин [5].

ANSYS Maxwell поддерживает следующие типы задач в линейных и нелинейных средах, плоскопараллельных, осесимметричных, трехмерных постановках:

- Магнитостатика. Магнитные поля, вызванные распространением плотности постоянного тока в проводниках, постоянными магнитами, а также задачи с внешними постоянными магнитными полями. Распределение магнитной индукции в магнитной системе электромагнита;

- Гармонические поля. Установившиеся электромагнитные поля с индуцированными вихревыми токами в проводящих частях модели, вызванные распространением переменных токов в проводниках (одинаковой частоты, разных по фазам). Источником магнитного поля может быть внешнее переменное электромагнитное поле. Решение гармонической магнитной задачи - это полное волновое решение, включающее эффекты электромагнитного волнового излучения. Этот тип решения применяется для решения электромагнитных задач, где значительный вклад в работу модели вносят поверхностный эффект индуцированных токов и эффект близости [5].

Нестационарное магнитное поле. Рассматривается переходный процесс в электромеханических системах, вызванный постоянными магнитами и токопроводящими обмотками, запитанными источниками напряжения или тока с произвольным изменением во времени. Обмотки могут быть подключены к электрическим цепям управления ANSYS Maxwell Circuit Editor или ANSYS Simplorer. В этом типе решения возможно рассматривать эффекты вращательного или поступательного движения элементов модели в магнитном поле с учетом наведённых вихревых токов [4].

Моделирование магнитного поля двигателя в ANSYS Maxwell.

Электрические поля. Могут относиться к одной из трех категорий:

- Электростатические поля в диэлектриках, вызванные напряжениями и зарядами;

- Электрические поля в проводниках, описываемые пространственным распространением напряжения, электрического поля и плотности постоянного тока;

- Комбинация предыдущих двух вариантов с решениями по полю в проводниках, как начальные условия для электростатической задачи [3].

Все расчётные модули ANSYS интегрированы в единую расчётную платформу ANSYS Workbench для более простого обмена данными между ними при решении междисциплинарных задач. Результаты электромагнитного моделирования из ANSYS Maxwell могут использоваться как исходные данные для задач:



- ANSYS Maxwell – ANSYS Mechanical (Thermal, Transient Thermal, Static Structural) для решения электромагнитной – тепловой, прочностной задачи;
- ANSYS Maxwell – ANSYS Mechanical для решения задач вибрации и акустики в электрических машинах;
- ANSYS Maxwell – ANSYS Fluent, ANSYS IcePak для решения электромагнитной – тепловой задачи;
- ANSYS Maxwell – ANSYS Fluent MHD для решения задач магнитогидродинамики [5].

### 1.3 Модуляция напряжения

МГД-вращатель по принципу действия похож на асинхронный двигатель, следовательно, при помощи регулировки частоты питающего напряжения индуктора, можно регулировать частоту вращения поля индуктора, что приведет к изменению скорости вращения металла в загрузчике.

Существует два основных типа преобразователей частоты: с непосредственной связью и с промежуточным контуром постоянного тока. В первом случае выходное напряжение синусоидальной формы формируется из участков синусоид преобразуемого входного напряжения. При этом максимальное значение выходной частоты принципиально не может быть равным частоте питающей сети. Частота на выходе преобразователя этого типа обычно лежит в диапазоне от 0 до 25 – 33 Гц. Но наибольшее распространение получили преобразователи частоты с промежуточным контуром постоянного тока, выполненные на базе инверторов напряжения. Структурная схема такого преобразователя приведена на рисунке 1.9 [6].

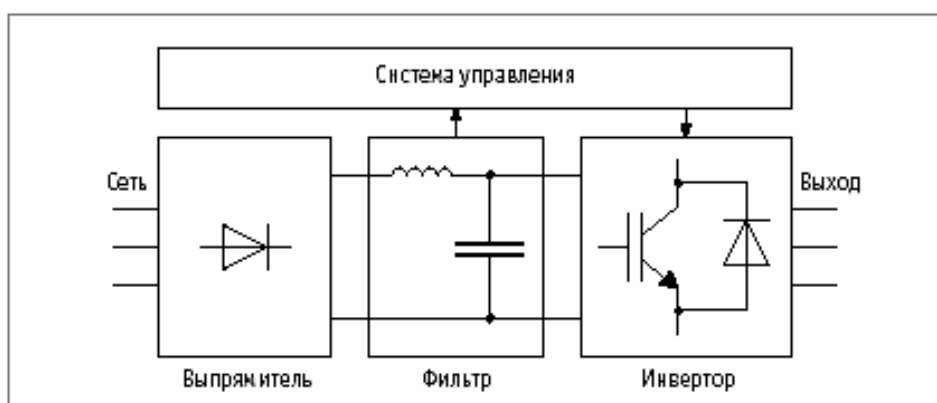


Рисунок 1.9 – Структурная схема преобразователя частоты с промежуточным контуром постоянного тока

Переменное напряжение сети преобразуется с помощью диодного выпрямителя, а затем сглаживается в промежуточной цепи индуктивно-емкостным фильтром. И, наконец, инвертор, выходной каскад которого

обычно выполняется на основе IGBT-модулей, осуществляет обратное преобразование из постоянного тока в переменный, обеспечивая формирование выходного сигнала с необходимыми значениями напряжения и частоты. Наиболее часто в инверторах применяется метод высокочастотной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В этом случае выходной сигнал преобразователя представляет собой последовательность импульсов напряжения постоянной амплитуды и изменяющейся длительности, которая на индуктивной нагрузке, каковой является обмотка статора, формирует токи синусоидальной формы [6].

Возможный диапазон регулирования частоты — от 0 до нескольких тысяч герц [6].

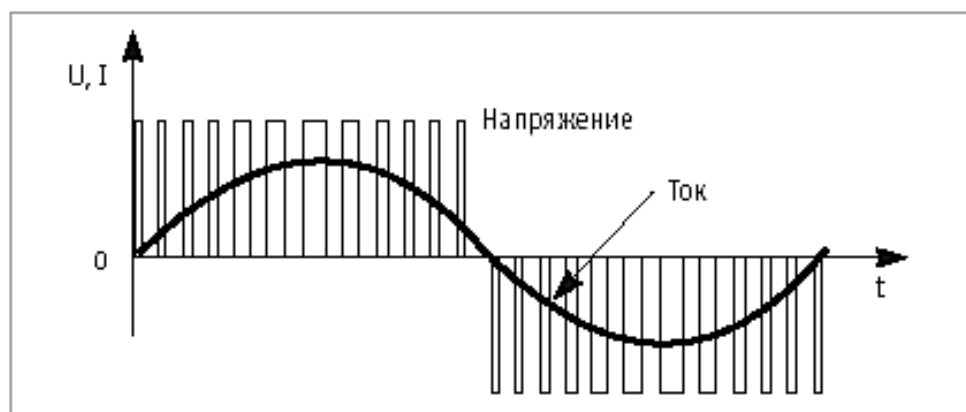


Рисунок 1.10 – Выходной сигнал преобразователя частоты

#### 1.4 Выводы по первой главе

Из широкого выбора МГД-машин наиболее оптимальным вариантом для изучения электромагнитных процессов служит дуговая индукционная машина с жидкометаллическим рабочим телом. Ее конструкция дает возможность создать вращающееся движение в металле, а именно воронку.

Среди большого количества различного программного обеспечения ПО компании ANSYS Maxwell 3D позволяет достичь высоких результатов при достаточно доступном интерфейсе для пользователя. Использование современных методов математического моделирования, основанных на методе конечных элементов, имеет возможность дальнейшего изучения различного рода процессов, путем интеграции полученных данных в другие пакеты ANSYS.

Применение широтно-импульсной модуляции позволяет регулировать частоту питающего напряжения, что достаточно актуально при регулировании частоты вращения рабочего тела МГД-машин.

## 2 Математическое моделирование

### 2.1 Математическая модель электромагнитных процессов

Решение поставленной задачи можно провести используя аналитический метод и численный метод. Так как аналитический метод подразумевает достаточно большое количество времени на решение задачи, недостаточную точность вычислений, а также программные пакеты ANSYS Mechanical APDL и Maxwell 3D, в которых производилось моделирование, работают на методе конечных элементов (FEM – finite elements method), было выбрано использовать численный метод проведения электромагнитного анализа.

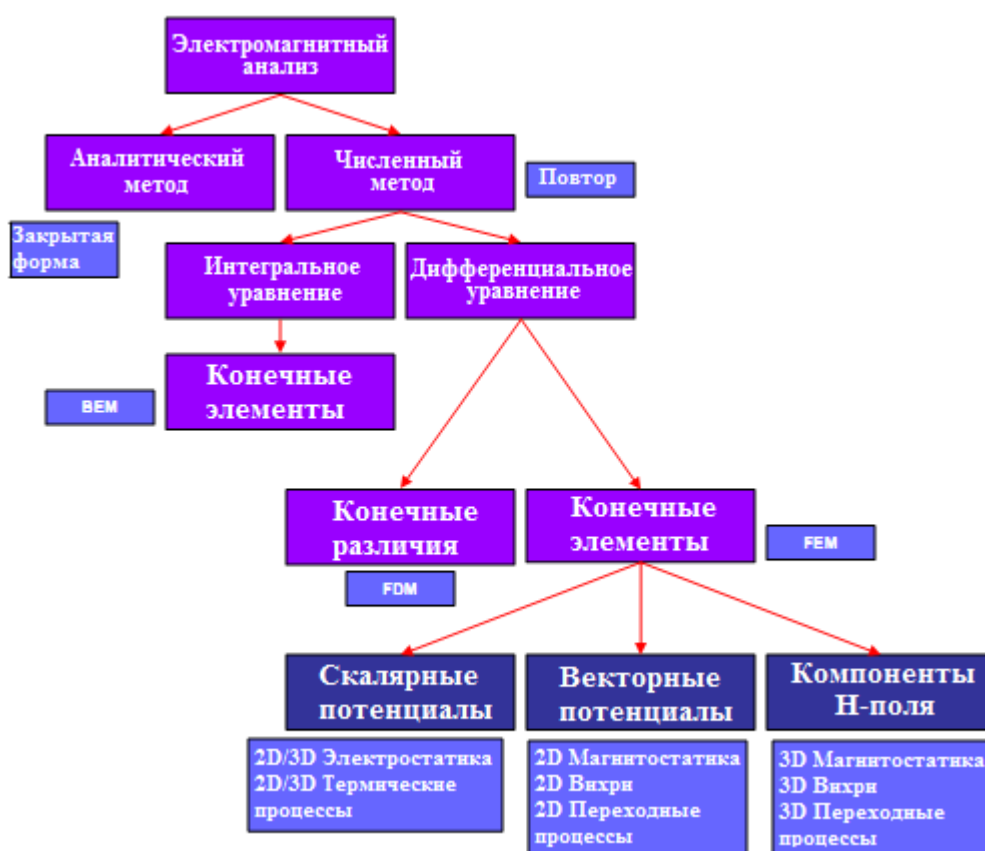


Рисунок 2.1 – Методы электромагнитного анализа

Метод конечных элементов является одним из многих принятых методов численного решения сложных полей, где аналитические решения недостаточны. Конечные элементы доказали, что являются очень надежным средством для общего электромагнитного анализа [3].

Конечный элемент является методом решения при котором решение численно получают из произвольной геометрии. В Maxwell3D основной единицей конечного элемента является тетраэдр (четырёхсторонняя

пирамида). Эти элементы объединены в так называемую сетку конечных элементов [3].

Односторонние тетраэдры лучше всего подходят для квадратичной интерполяции 2-го порядка, так как используется между узлами. Чаще всего требуется относительно однородная, желательно, равносторонняя сетка. Поэтому, желаемое поле в каждом элементе аппроксимируется квадратичным порядком полинома (базисная функция), формула (2.1):

$$H_x(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5yz + a_6xz + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2. \quad (2.1)$$

Чтобы получить базисные функции, величины полей вычисляются для 10 узловых значений, в вершинах и по краям. Все остальные величины определяются из решения поля частично или во всех пространствах решений.

Компоненты поля, которые являются касательными к краям элемента, явно сохраняются в вершинах [3].

Компоненты тангенциального поля на гранях элемента и нормаль к краю явно сохраняется в середине выбранных ребер [3].

Значения векторного поля численной точке интерполируется из узловых значений [3].

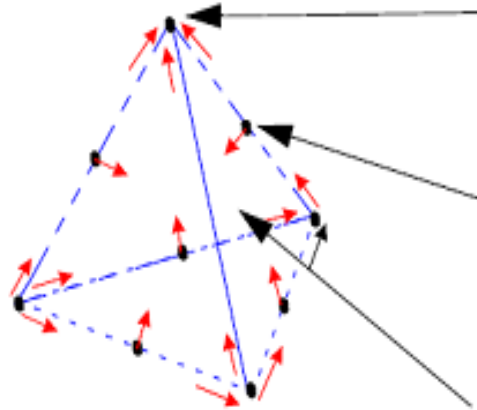


Рисунок 2.2 – Компоненты поля

Как только тетраэдры будут заданы, конечные элементы помещаются в большое, сложное матричное уравнение, формула (2.2):

$$[S][H] = [J]. \quad (2.2)$$

Теперь данную задачу можно решить с использованием стандартных методов решения матриц, таких как:

– Метод последовательного исключения переменных Гаусса (прямое решение) [7].

– Неполный метод градиентного разложения Холецкого (итеративный решатель ICCG) [8].

Прямое решение используется решателем по умолчанию и, как правило, это лучший метод [3].

Система уравнений, описывающих электромагнитное поле, записанная относительно векторного и скалярного потенциалов (формулы 2.3 и 2.4), и уравнение непрерывности (формула 2.5) имеют вид:

$$\nabla^2 A - \nabla(\nabla A + \varepsilon_a \mu_a \frac{\partial \varphi}{\partial t}) - \varepsilon_a \mu_a \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu_a \delta, \quad (2.3)$$

$$\nabla^2 \varphi + \frac{\partial}{\partial t} \nabla A = -\frac{\rho_q}{\varepsilon_a}, \quad (2.4)$$

$$\nabla \delta = -\frac{\partial \rho_q}{\partial t}, \quad (2.5)$$

где  $A$  – векторный потенциал;

$\varphi$  – скалярный потенциал неподвижных зарядов;

$\delta$  – вектор плотности тока;

$\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

$\rho_q$  – плотность свободных зарядов;

$t$  – время.

Входящий в уравнения (формулы 2.3 и 2.5) вектор плотности тока имеет вид (формула 2.6):

$$\delta = \gamma(-\nabla \varphi - \frac{\delta A}{\delta t} + v \times (\nabla \times A)), \quad (2.6)$$

где  $v$  – вектор скорости.

Пренебрегая токами смещения, а также накладывая кулоновскую калибровку ( $\nabla A = 0$ ) и учитывая отсутствие в расчетной области свободных электрических зарядов ( $\rho_q = 0$  и  $\varphi = 0$ ), уравнения (2.3 – 2.5) можно записать в следующем виде:

$$\nabla^2 A = -\mu_a \delta; \quad (2.7)$$

$$\nabla \delta = 0. \quad (2.8)$$

При этом вектор плотности тока принимает следующий вид:

$$\delta = \gamma \left( -\frac{\delta A}{\delta t} + v(\nabla \cdot A) \right). \quad (2.9)$$

Анализ электромагнитного поля в расчетной области сводится к решению системы уравнений (2.7 – 2.9) в 3D постановке относительно трех компонент векторного потенциала [4].

С учетом принятых допущений, уравнения можно записать в комплексном виде:

$$\nabla^2 \dot{A} = -\mu_a \dot{\delta}; \quad (2.10)$$

$$\nabla \dot{\delta} = 0; \quad (2.11)$$

$$\dot{\delta} = -\gamma j \omega \dot{A}, \quad (2.12)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота электромагнитного поля.

Чтобы электромагнитное поле в расчетной области определялось однозначно, систему уравнений дополняется (2.10 – 2.12) граничными условиями [4].

Считая, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ( $\mu = \infty$ ), на границах расчетной области будут выполняться условия:

для касательной составляющей векторного потенциала:

$$\frac{\partial \dot{A}_\tau}{\partial n} = 0; \quad (2.13)$$

для нормальной составляющей векторного потенциала:

$$\dot{A}_n = 0, \quad (2.14)$$

где  $n$  – нормаль к поверхности расчетной области [4].

Есть шесть разных решателей. Это:

- Магнитоэлектростатический;
- Вихревого тока;
- Переходно-магнитный;
- Электростатический;
- Проводимости постоянного тока;
- Переходно-электрический [4].

Последние решатели (переходно-электростатический и проводимости постоянного тока) объединены вместе, так как вычисления для них производятся в различных пространствах решений (проводимость постоянного тока в проводниках, а электростатика в изоляторах). Но решение от решателя проводимости постоянного тока может быть использовано в качестве источника данных для электростатического решателя [3].

Решатели магнитостатический, вихревого тока, электростатический и постоянного тока (каждый решатель, за исключением решателей переходных процессов) выполняют построение адаптивной сетки для решения задачи. Это означает, что сетка конечных элементов разумно улучшается от одного адаптивного перехода к другому [3].

Данные решатели предназначены для решения уравнений Максвелла в рамках типа конкретной задачи [3].

Для каждого решателя существует некоторое фундаментальное определяющее уравнение, которое обеспечивает оценку ошибок для вычисления полей. В случае магнитостатического моделирования, этим определяющим уравнением является немонопольное уравнение, в котором говорится:

$$\nabla \bar{B} = 0. \quad (2.15)$$

Когда полевое решение возвращается к этому уравнению, мы получаем член ошибки:

$$\nabla \bar{B}_{solution} = err. \quad (2.16)$$

Энергия, создаваемая по данным условиям ошибки (эти ошибки действуют в некотором смысле, как источники энергии), вычисляется во всем объеме вычисления поля. Затем это сравнивается с суммарной энергией, рассчитанной для получения процентного числа энергии ошибки:

$$percent\ error\ energy = \frac{error\ energy}{total\ energy} \cdot 100\% . \quad (2.17)$$

Это число возвращается при каждом адаптивном проходе вместе с полным значением энергии. Эти два числа обеспечивают требуемую меру сходимости решения [3].

## 2.2 Моделирование в ANSYS Maxwell-3D

Исходные данные:

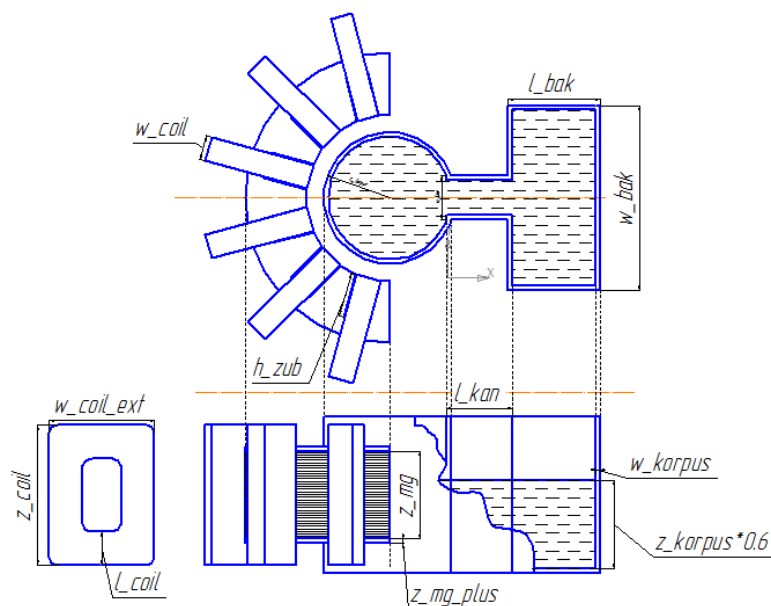


Рисунок 2.3 – Изображение модели с входными параметрами

Таблица 2.1 – Основные параметры Maxwell

Часть	Переменная	Значение, мм	Пояснения
Корпус	$r\_korpus$	70	радиус загрузчика
	$z\_korpus$	177	высота загрузчика
	$w\_kan$	50	толщина канала
	$l\_kan$	70	длина канала
	$w\_bak$	210	толщина бака
	$l\_bak$	105	длина бака
	$w\_korpus$	5	толщина стенок корпуса
Магнитопровод	$z\_mg$	70	высота магнитопровода
	$R\_mg\_ext$	165	внешний радиус
	$R\_mg\_in$	95	внутренний радиус
	$l\_zub$	46	длина зуба
	$fi$	30	угол поворота
	$z\_mg\_plus$	5	толщина дополнительных зажимных листов
Катушка	$w\_coil$	25	глубина катушки
	$del\_coil$	2	толщина зазора
	$z\_coil$	160	высота катушки
	$w\_coil\_ext$	120	толщина катушки
	$l\_coil$	38	длина части витка катушки
Металл	$z\_korpus \cdot 0.6$	106,2	высота металла



Геометрическая модель – в основе технологии твердотельного моделирования, используемой в Maxwell, лежит графический редактор ACIS, благодаря которому пользователи могут создавать модели использующие примитивы и операции над ними. Ко всему прочему, Maxwell 3D позволяет использовать построение кривых поверхностей, что существенно упрощает и ускоряет работу.

Для построения модели использовались простые трехмерные фигуры, над которыми были проведен ряд графических операций (объединение объемов, вычитание объемов, поворот и т.д.).

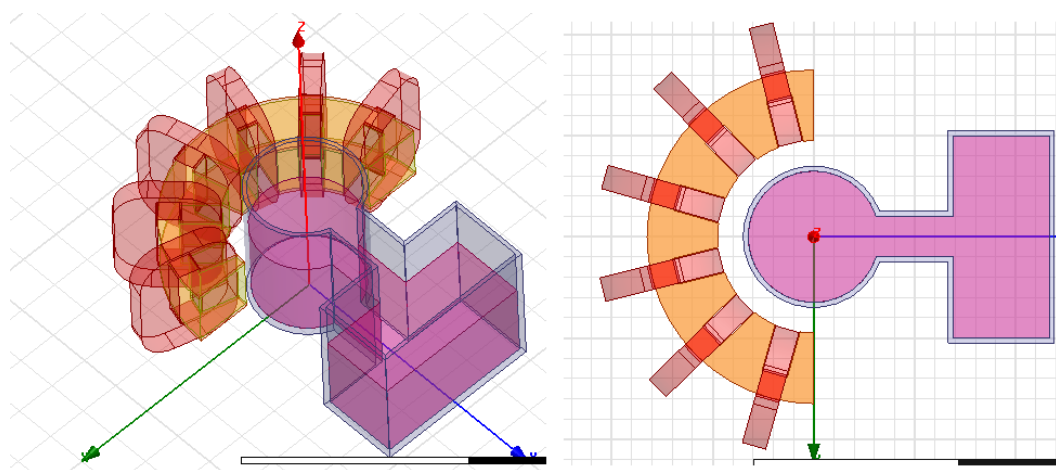


Рисунок 2.4 – Внешний вид геометрии модели в Maxwell

Модель сетки – сетка строится автоматически и адаптивно, при соблюдении всех условий, которые можно увидеть в разделе проверки (*validation check*).

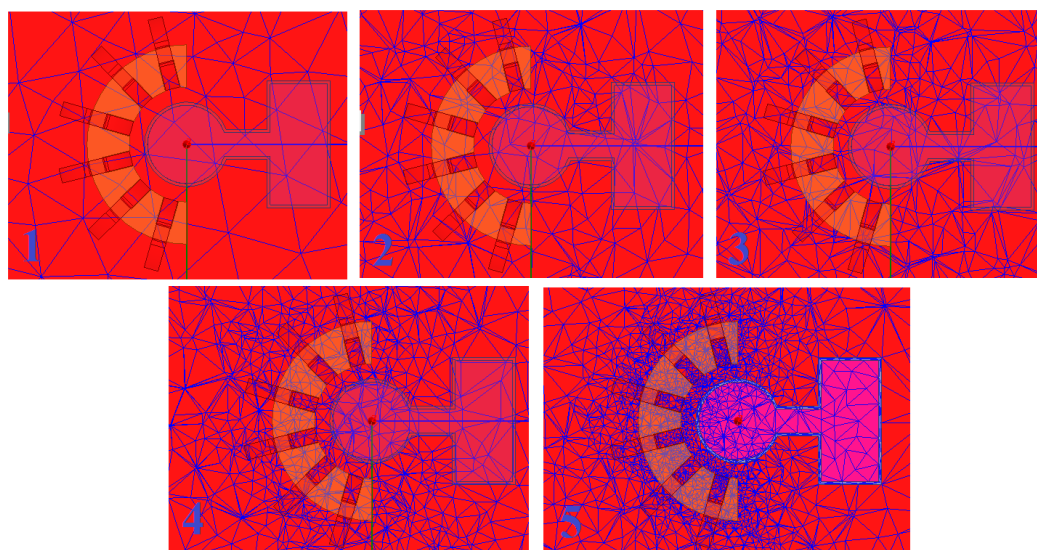


Рисунок 2.5 – Этапы построения сетки модели

На рисунке 2.5 явно прослеживается, как увеличивается количество конечных элементов с каждой итерацией. Также сетка адаптивно сгущается в ту область, где требуется провести большее количество вычислений, что существенно облегчает работу с сеткой. Данная сетка позволяет снизить процент ошибки в вычислениях и привести результаты к максимально реалистичному результату.

Задание тока и нагрузки – Чтобы задать ток в катушках используется МДС, для провода заданного сечения (формула 2.18):

$$F_l = wI = w\delta S = 50 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-5} = 2000 \text{ A.} \quad (2.18)$$

Для задания направления тока в системе были взяты крайние сечения катушек (выделены на рисунке 2.6). Затем, выделив данные сечения, в них было установлено направление и сила тока, требуемые по условию задачи.

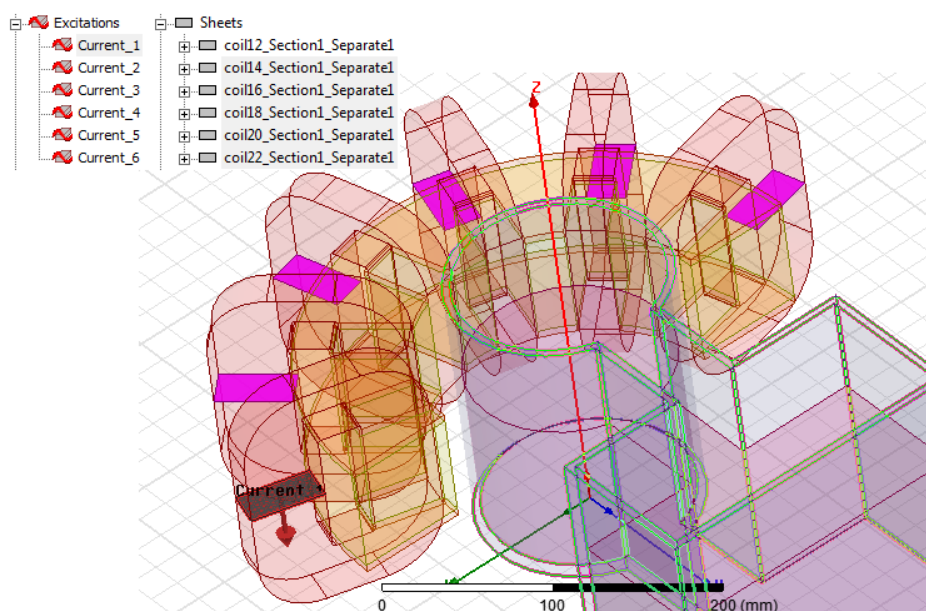


Рисунок 2.6 – Построение плоскостей наведения тока

С помощью построения матрицы токов, токи были объединены в звезду, с подключением  $AxVzCy$  при частоте  $f=50$  Гц.

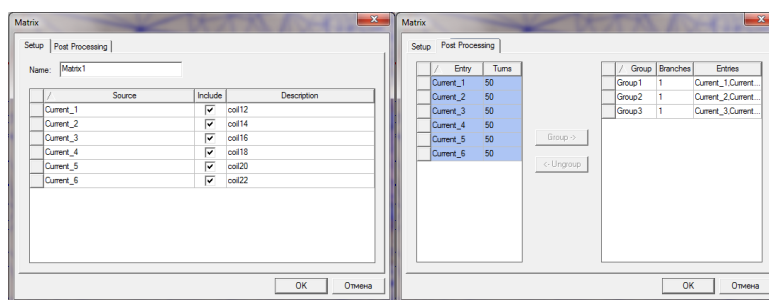


Рисунок 2.7 – Задание матриц токов

Анализ результатов – для получения конечных результатов решатель установил семь итераций, при которых конечное число элементов сетки составило 69867, и процентом энергетической ошибки  $err=0,71\%$ , что допустимо для расчетов. Время расчета составило 19 минут 35 секунд. Это вызвано тем, что сетка при каждой итерации образует область сгущения, где количество элементов увеличивается. Получив разницу между двумя решениями, программа оценивает разницу в значениях, и тем самым получает процент ошибки. Между первой и второй итерацией разница в результатах составляет 32,5% погрешности, но следом, между второй и третьей – уже 7,44%.

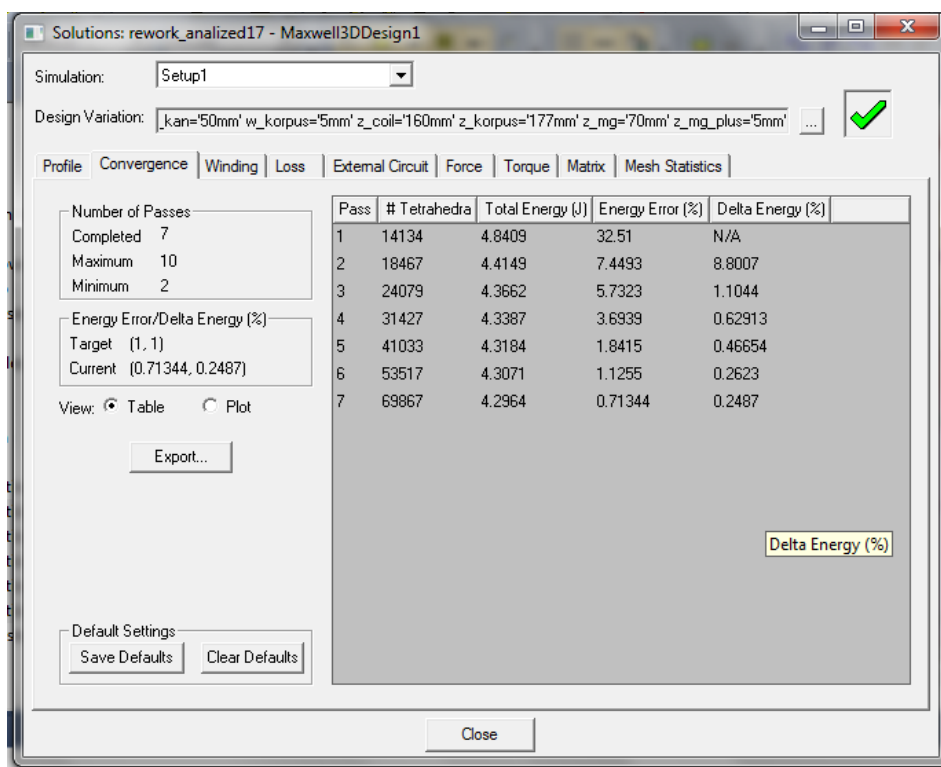


Рисунок 2.8 – Проведение расчета задачи и вычисления погрешности

Дифференциальные характеристики – плотность тока  $\delta$ , показано на рисунках 2.9 и 2.17. Плотность тока это величина равная току проходящему через поверхность. Она сосредоточена главным образом в катушках и рабочем теле, и равна  $\delta=0 \div 3,27 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ .

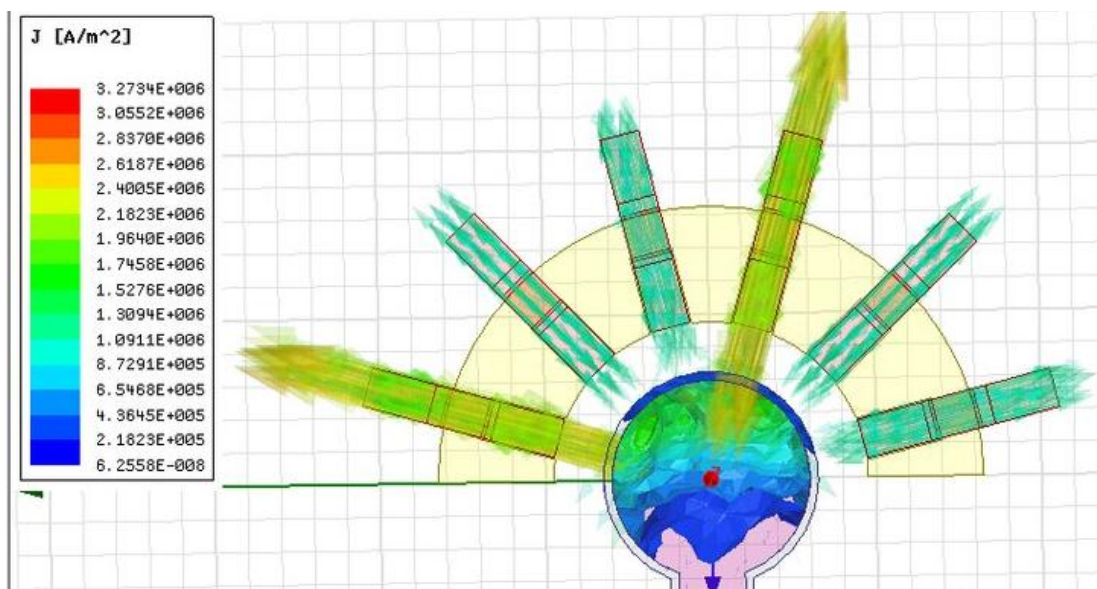


Рисунок 2.9 – Плотность тока

Напряженность электрического поля (рисунок 2.10 ). Напряженность электрического поля сосредоточена на поверхности галлия, и, перпендикулярно наводится в корпусе. Её значение в Maxwell 3D  $E=0\div 33,1$  В/м. Данные Mechanical APDL  $E=0\div 29,3$  В/м.

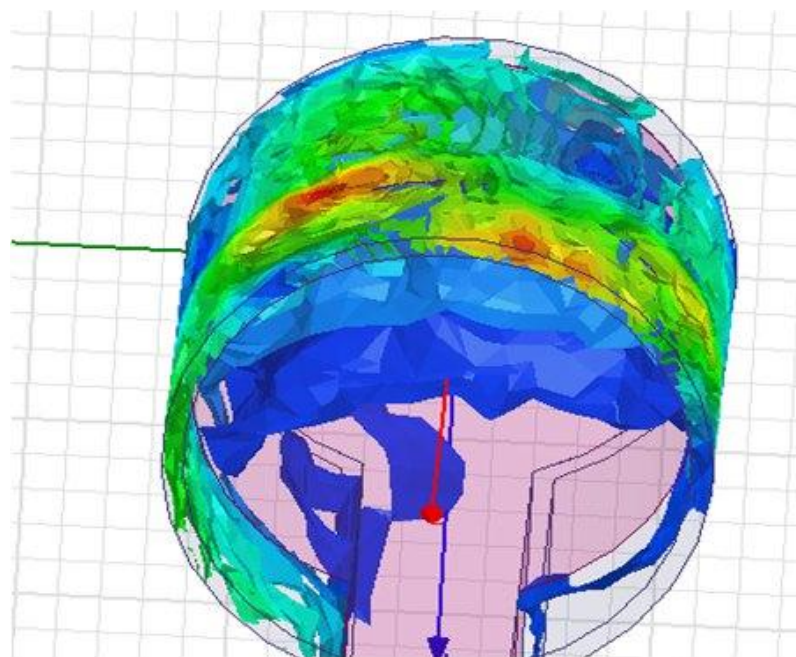


Рисунок 2.10 – Напряженность электрического поля

Магнитная индукция (рисунок 2.11 и 2.18), является векторной величиной. определяет интенсивность магнитного поля, т.е. способность его производить работу. По результатам расчета Maxwell 3D, магнитная индукция, сконцентрированная внутри магнитопровода, имеет значения

$B=8,14 \cdot 10^{-3}$  Тл (синий) ÷ 1,1 Тл (красный). Результаты Mechanical APDL  $B=$  от  $1,56 \cdot 10^{-3}$  ÷ 1,66 Тл.

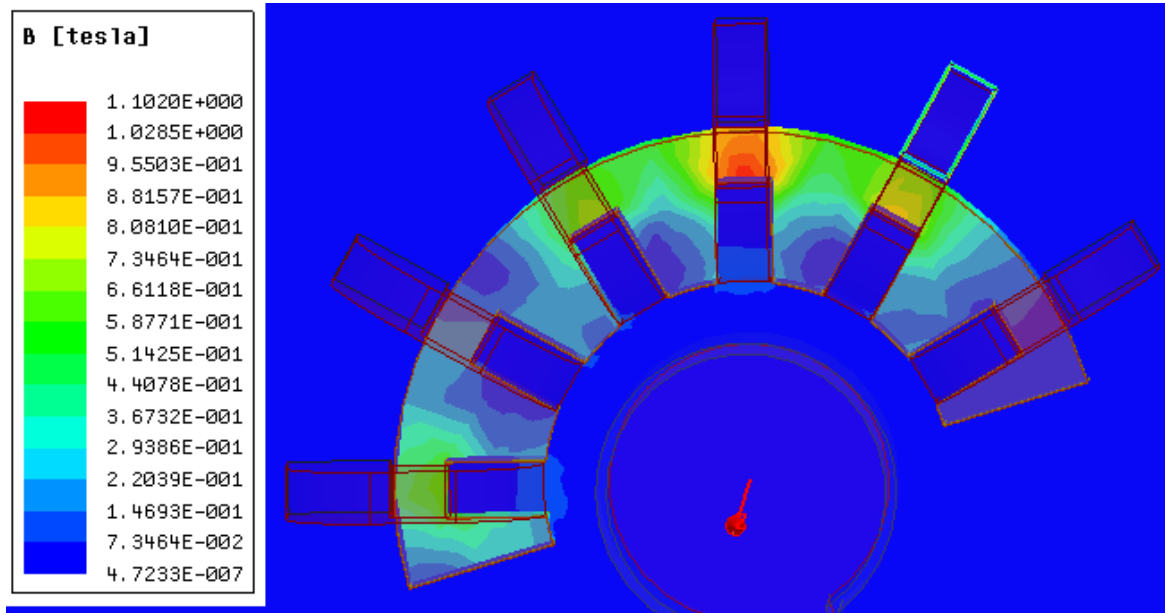


Рисунок 2.11 – Магнитная индукция

Напряжённость магнитного поля (рисунки 2.12 и 2.19) – Напряженность магнитного поля учитывает влияние силы тока и формы проводников на интенсивность магнитного поля. Она наглядно иллюстрирует движение бегущего магнитного поля. Сконцентрирована вне магнитопровода, и изменяет свои значения от минимального  $H=0,27$  А/м до  $H=147000$  А/м (синий и красный, соответственно). Результаты Mechanical APDL  $H=0,43$  ÷ 121757 А/м.

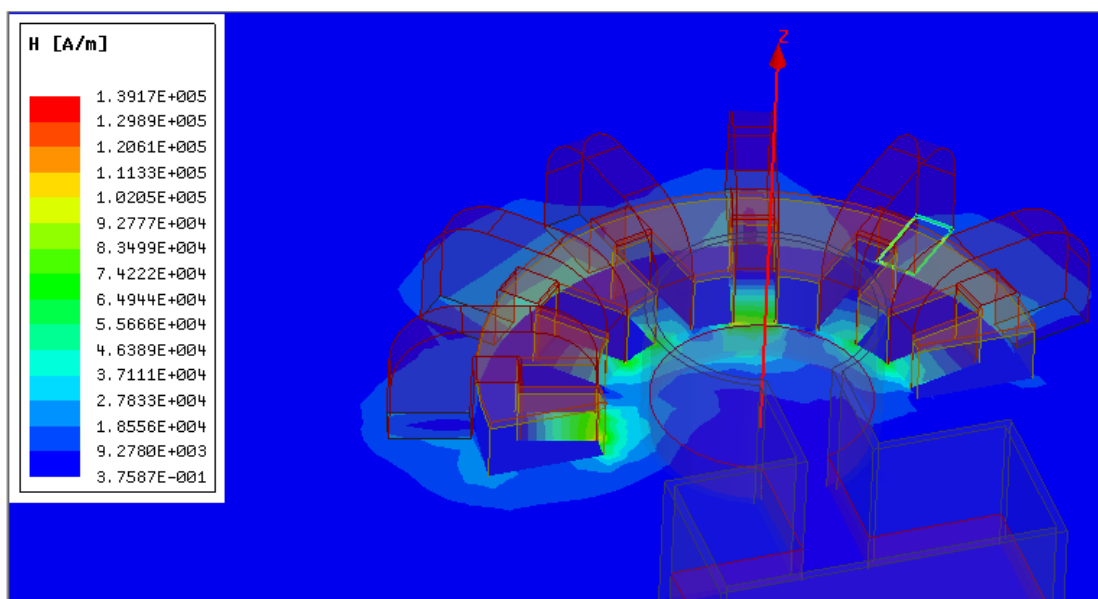


Рисунок 2.12 – Напряженность магнитного поля

Электромагнитные силы (рисунки 2.13 и 2.20) создают вращательное движение рабочего тела. В Maxwell 3D имеется возможность рассчитать объемную плотность сил, её значение варьируется  $DC\_Force=0,39\div5,08\cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup>. В Mechanical APDL имеется возможность посчитать значение именно электромагнитной силы, (силу Лоренца), ввиду отсутствия расчета скорости движения частицы, приблизительное значение  $F_{mag}=0\div0,065$  Н/м<sup>3</sup>.

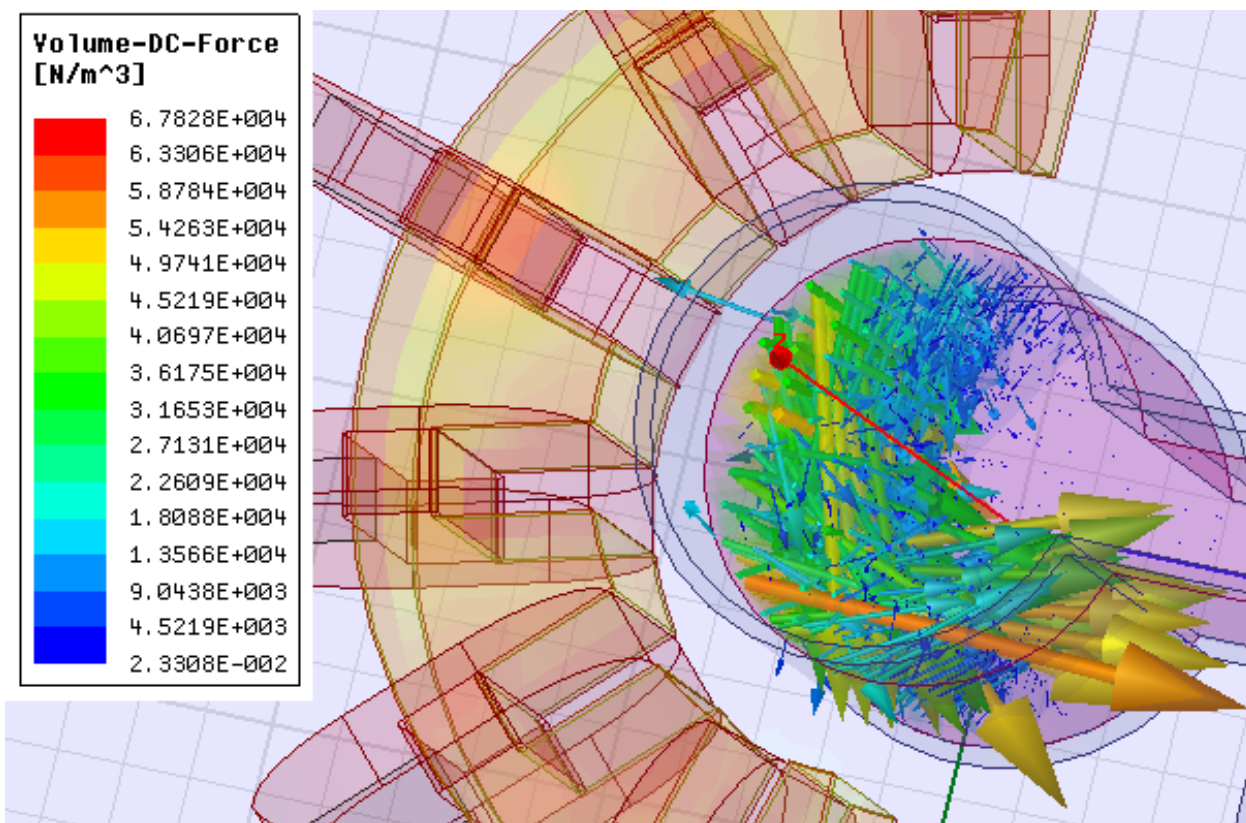


Рисунок 2.13 – Электромагнитные силы

Джоулево тепло (рисунки 2.14 и 2.21) – работа, при перемещении этих частиц, что по факту, является тепловыми потерями в рабочем теле. Значение данной величины, также приблизительно, в Mechanical APDL – Power-Loss= $0\div217,9$  кВ/м<sup>3</sup>, а в Maxwell 3D – Ohmic-Loss= $7,4\div190,5$  кВ/м<sup>3</sup>.

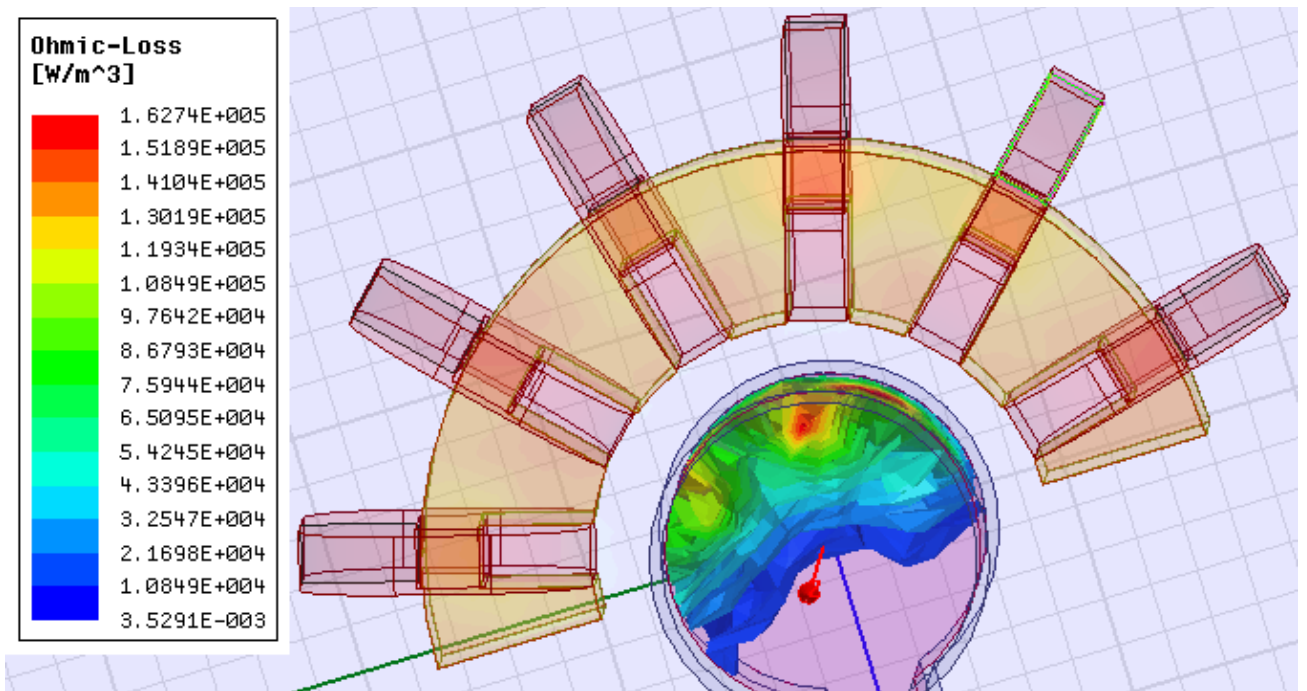


Рисунок 2.14 – Джоулево тепло

Интегральные характеристики.

Формулы для расчета:

— Для определения коэффициента мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P_{\Sigma}}{\sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q^2}}; \quad (2.19)$$

— Для определения реактивной мощности:

$$Q = \frac{dE}{dt} = 2\omega E; \quad (2.20)$$

— Для определения действующего напряжения системы:

$$U = \frac{I}{\sqrt{2}} \sqrt{r^2 + x^2}, \quad (2.21)$$

где  $P_{\Sigma}$  – потери активной мощности системы (OhmicLoss);

$P_{body}$  – потери активной мощности в заготовке;

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота;

$E$  – энергия запасаемая системой (Total Energy).

Таблица 2.2 – Интегральные характеристики Maxwell

$f$ , Гц	$P_{\Sigma}$ , Вт	$E$ , Дж	$Q$ , ВАр	$\cos\varphi$ , $10^{-2}$	$r$ , Ом	$x_a$ , Ом	$x_b$ , Ом	$x_c$ , Ом	$L_a$ , мГн	$L_b$ , мГн	$L_c$ , мГн	$P2$ , Вт	$U$ , В
25	102,8	4,29	1348	9,5	0,04	0,63	0,44	0,37	4,06	2,83	2,38	18,6	13,31
50	128,6	4,29	2695	4,8	0,05	1,25	0,87	0,73	3,98	2,77	2,33	36,9	26,06
$10^2$	146,7	4,29	5391	2,4	0,06	2,48	1,72	1,45	3,96	2,75	2,31	46,9	51,85

Расчет в ANSYS Maxwell 3D, занявший 19:35 минут, показало, что энергия, потребляемая в заготовке, составляет  $E=4,29$  Дж при потребляемой мощности в  $P_{\Sigma}=129,65$  Вт. Так как магнитная проницаемость была задана  $B$ - $H$  кривой, индуктивность катушек варьируется от  $L_a=4$  мГн до  $L_c=2,3$  мГн в разных катушках. При изменении частоты от  $f=25$  Гц до  $f=100$  Гц напряжение модели, при неизменном значении МДС  $F_I=2000$  А, принимает значения от  $U=13,31$  В до  $U=51,85$  В.

### 2.3 Моделирование в ANSYS Mechanical APDL

Для построения модели в ANSYS использовались несколько иные переменные.

Таблица 2.3 – Основные параметры Mechanical APDL

Часть	Переменная	Значение, м	Пояснения
индуктор	$a\_zub$	0,023	длина зуба
	$b\_yar$	0,0228	длина ярма
	$c\_yar$	0,063	ширина ярма
	$a\_kat$	0,0185	длина катушки
	$w\_cat$	0,04515	высота катушки
	$del\_kat\_yar$	0,002	зазор между катушкой и ярмом
	$del\_kat\_zub$	0,002	зазор между катушкой и зубом
Рабочее тело	$del\_zub\_up$	0,001	зазор за зубом
	$b\_body$	0,060	радиус тела
	$c\_body$	0,170	высота тела
	$del\_body\_x$	0	зазор тела по x
	$del\_body\_y$	0,028	зазор тела по y
Окружение	$del\_body\_z$	0	зазор тела по z
	$r\_ro$	$(b\_body+del\_body\_y)+$ $+(del\_zub\_up+w\_kat+del\_kat\_yar)$ $+b\_yar+(del\_kat\_yar+w\_kat)+$ $+del\_body\_y*5/2$	радиус расчетной области
	$z1\_ro$	$-(c\_body/2+del\_body\_y+$ $+abs(del\_body\_z))$	высота расчетной области над моделью
	$z2\_ro$	$-z1\_ro$	высота расчетной области под моделью



### Окончание таблицы 2.3

	$del\_inf$	$(a\_zub+del\_kat\_zub*2+a\_kat)*6$	зазор до области бесконечности
	$r\_inf$	$r\_ro+del\_inf$	радиус области бесконечности
	$z1\_inf$	$z1\_ro-del\_inf$	высота расчетной области над моделью
	$z2\_inf$	$z2\_ro+del\_inf$	высота расчетной области под моделью

Для построения геометрии использовались следующие методы:

- Построение различных объемов (команды *vgen*, *cylind*, *block*);
- Произведение операций над объемами таких как объединение, вычитание, слияние (команды *vovlap*, *vsbv*, *vsba*, *vdele*);
- Построение и работа в дополнительных координатных системах (команда *csys*, *wpro*, *wprof*, *cswpla*).

Для упрощения построения был создан блок магнитопровода с катушкой, а затем продублирован. Так как корпус на расчеты практически не влияет, для построения в ANSYS APDL было решено его упразднить.

Построение геометрии проводилось, в первую очередь, путем создания блока магнитопровода и катушки, с заданными геометрическими параметрами. Дублируя данный блок была сформирована конечная фигура. Моделирование корпуса было решено упразднить, в связи с тем, что корпус прозрачен для магнитного поля. Для повышения точности вычислений были введены расчетная область вокруг магнитопровода, расчетная область вокруг всей модели, а также дополнительная расчетная область бесконечности.

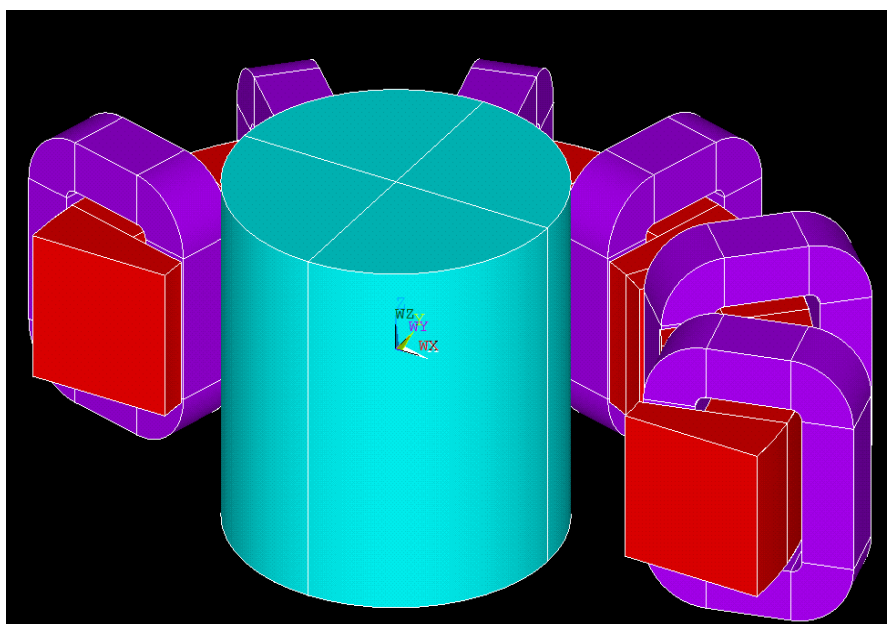


Рисунок 2.15 – Внешний вид геометрии модели в Mechanical APDL

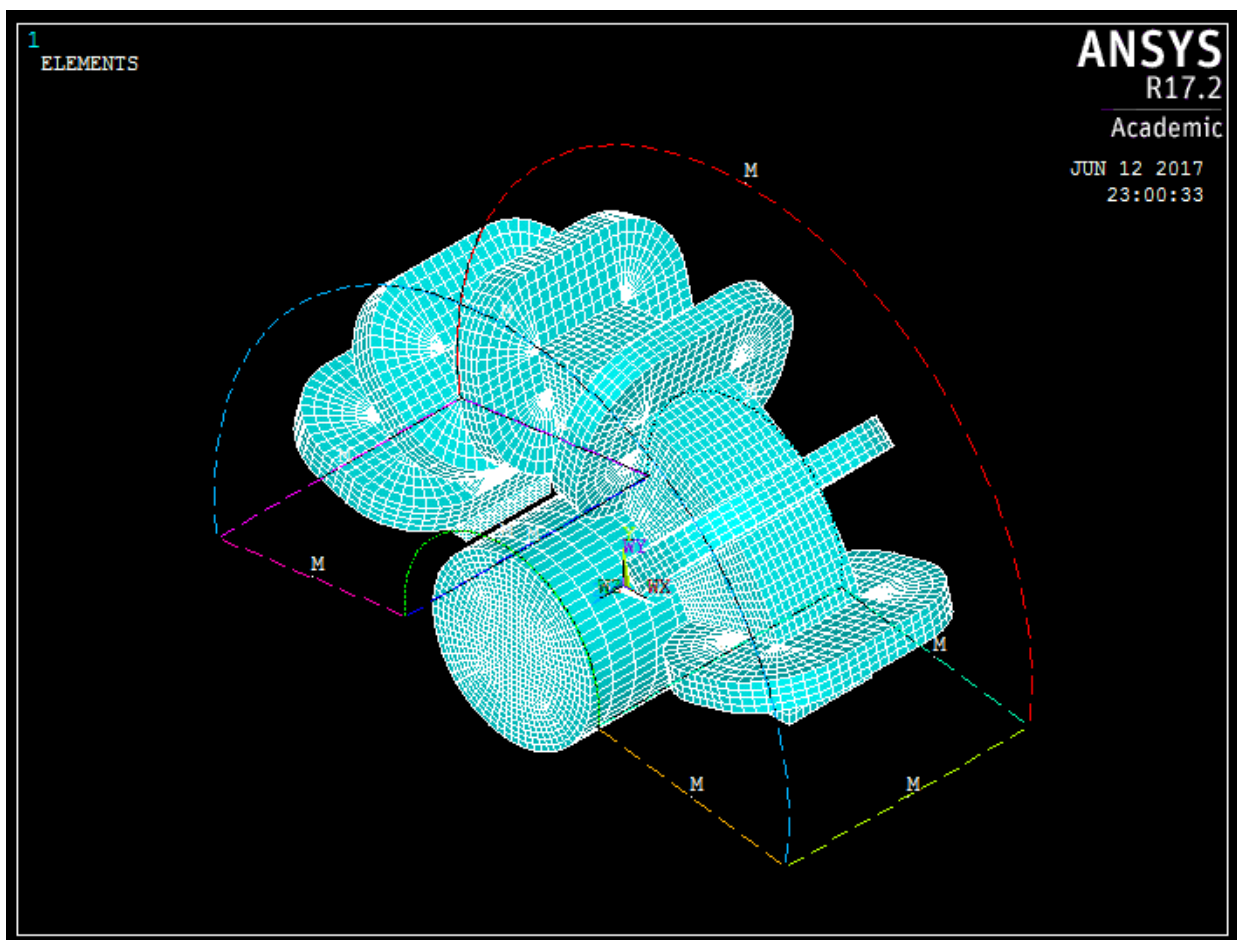


Рисунок 2.16 – Построение сетки модели

Построение сетки в Mechanical APDL производится с фиксированной сеткой в основных элементах модели (индуктор и рабочее тело). В расчетной области и области бесконечности создается свободная сетка со сгущением к основным элементам модели. Благодаря этому удается достичь достаточно точного решения в интересующих нас деталях. На основные элементы модели приходится 33360 конечных элементов, на всю модель – 223745, что существенно выше, чем в пакете Maxwell 3D. Количество итераций в Mechanical APDL отличается еще больше, и составляет 348 итераций (напомним, Maxwell 3D имеет всего лишь 7). Но, несмотря на это, время построения составляет всего 3 минуты 48 секунд. Достижение такого малого времени расчета достигается уже заданному алгоритму построения сетки.

Граничные условия и нагрузка. Как и в Maxwell 3D для задания нагрузки мы используем следующие параметры:

- Допустимая плотность тока  $j_{dop}=3,5 \cdot 10^6$  А/м;
- Число витков  $n_{pr}=2 \cdot 25=50$  (двойная намотка);
- Сечение проводника  $s_{pr}=0,0001 \cdot 0,001=10^{-5}$  м;
- Частота питающего напряжения  $f_{kat}=100$  Гц.

При данных условиях значение тока составляет  $I=41,65$  А также, как и в Maxwell 3D.

Граничные условия для особой расчетной области, общей расчетной области и области бесконечности.

Анализ результатов. Дифференциальные характеристики –

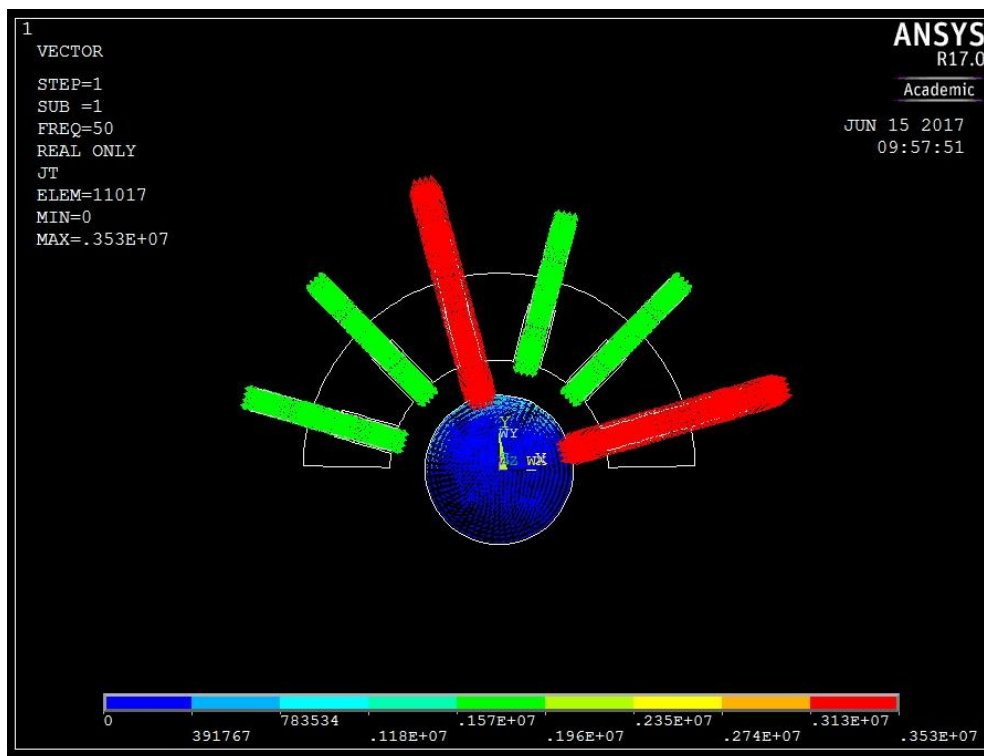


Рисунок 2.17 – Плотность тока

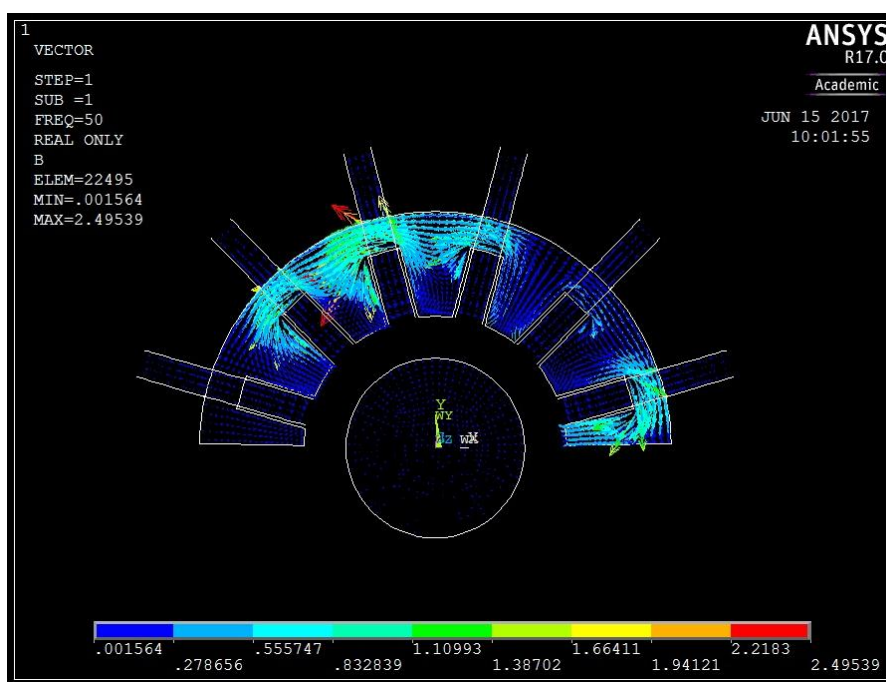


Рисунок 2.18 – Магнитная индукция

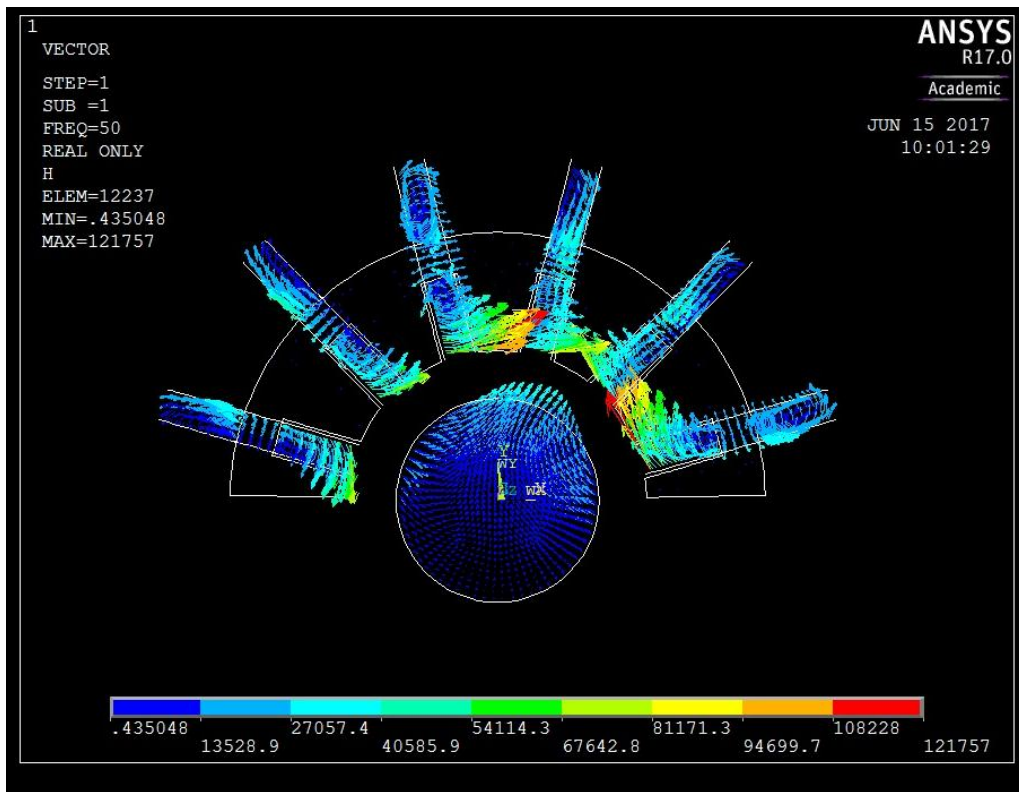


Рисунок 2.19 – Напряженность магнитного поля

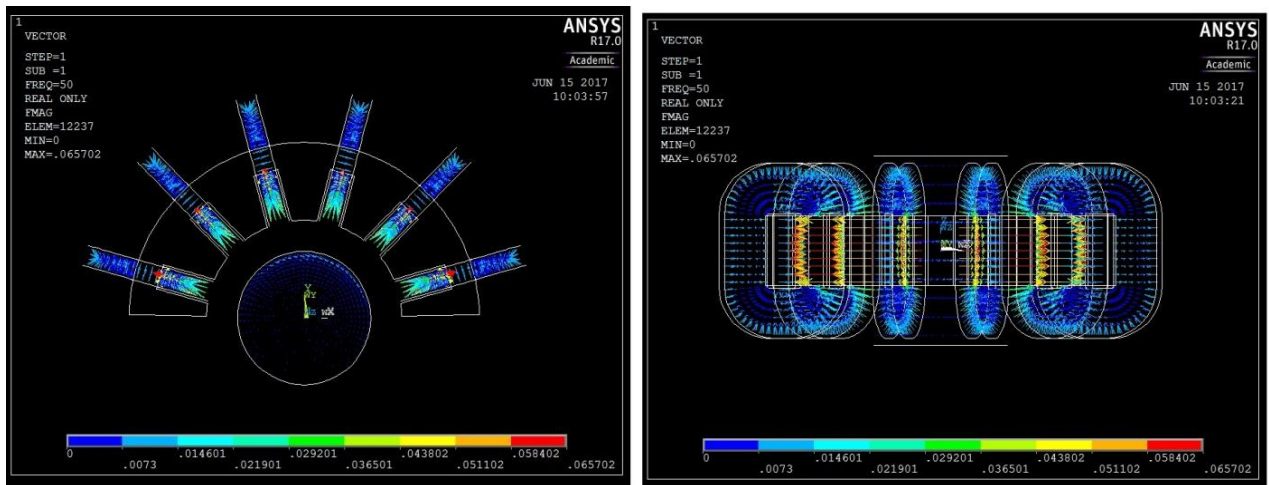


Рисунок 2.20 – Электромагнитные силы



Рисунок 2.21 – Джоулево тепло

Интегральные характеристики – для вычисления интегральных характеристик в Mechanical APDL используются формулы (2.19 – 2.21), а также:

— Для определения активного сопротивления:

$$r = \frac{P}{I^2}; \quad (2.22)$$

— Для определения реактивного сопротивления:

$$x = \frac{Q}{I^2}; \quad (2.23)$$

— Для определения индуктивности системы:

$$L = \frac{x}{\omega}, \quad (2.24)$$

где  $P_{\Sigma}$  – потери активной мощности системы (PowerLoss);

$P_{body}$  – потери активной мощности в заготовке;

$\omega = 2\pi f$  – циклическая частота;

$E$  – энергия запасаемая системой (Energy, CoEnergy).

Интегральные характеристики собраны в таблице для упрощенного наблюдения за результатами вычислений.

Таблица 2.4 – Интегральные характеристики

$f$ , Гц	$P_{\Sigma}$ , Вт	$E$ , Дж	$Q$ , ВАр	$\cos\phi$ , $10^{-2}$	$r$ , Ом	$x$ , Ом	$L$ , мГн	$P_2$ , кВт	$U$ , В
25	260,62	5,9	1854	13,9	0,15	1,07	3,98	15,86	15,89
50	296,23	5,87	3688	7	0,171	2,13	3,98	51,48	31,41
100	377,60	5,82	7314	5,2	0,21	4,22	3,98	132,85	62,17

Расчет в ANSYS Mechanical APDL 3D, занявший 3:48 минут, показало, что энергия, потребляемая в заготовке, составляет  $E=5,9$  Дж при потребляемой мощности в  $P_{\Sigma}=260,62$  Вт. Так как магнитная проницаемость была задана параметром, индуктивность катушек постоянная  $L=3,98$  мГн. При изменении частоты от  $f=25$  Гц до  $f=100$  Гц напряжение модели, при неизменном значении тока  $I=41,65$  А, принимает значения от  $U=15,89$  В до  $U=62,17$  В.

## 2.4 Выводы по второй главе

Расчет в ANSYS Maxwell 3D, занявший 19:35 минут, показало, что энергия, потребляемая в заготовке, составляет  $E=4,29$  Дж при потребляемой мощности в  $P_{\Sigma}=129,65$  Вт. Так как магнитная проницаемость была задана  $B-H$  кривой, индуктивность катушек варьируется от  $L_a=4$  мГн до  $L_c=2,3$  мГн в разных катушках. При изменении частоты от  $f=25$  Гц до  $f=100$  Гц напряжение модели, при неизменном значении МДС  $F_I=2000$  А, принимает значения от  $U=13,31$  В до  $U=51,85$  В.

Расчет в ANSYS Mechanical APDL 3D, занявший 3:48 минут, показало, что энергия, потребляемая в заготовке, составляет  $E=5,9$  Дж при потребляемой мощности в  $P_{\Sigma}=260,62$  Вт. Так как магнитная проницаемость была задана параметром, индуктивность катушек постоянная  $L=3,98$  мГн. При изменении частоты от  $f=25$  Гц до  $f=100$  Гц напряжение модели, при неизменном значении тока  $I=41,65$  А, принимает значения от  $U=15,89$  В до  $U=62,17$  В.

Результат различается между собой на  $\sim 15\%$ , что связано с различием характера изменения магнитной проницаемости (в Maxwell 3D это  $B-H$  кривая, а в Mechanical APDL это константа), а также дополнительными потерями в зажимных пластинах магнитопровода.

### 3 Экспериментальное исследование установки

#### 3.1 Устройство установки

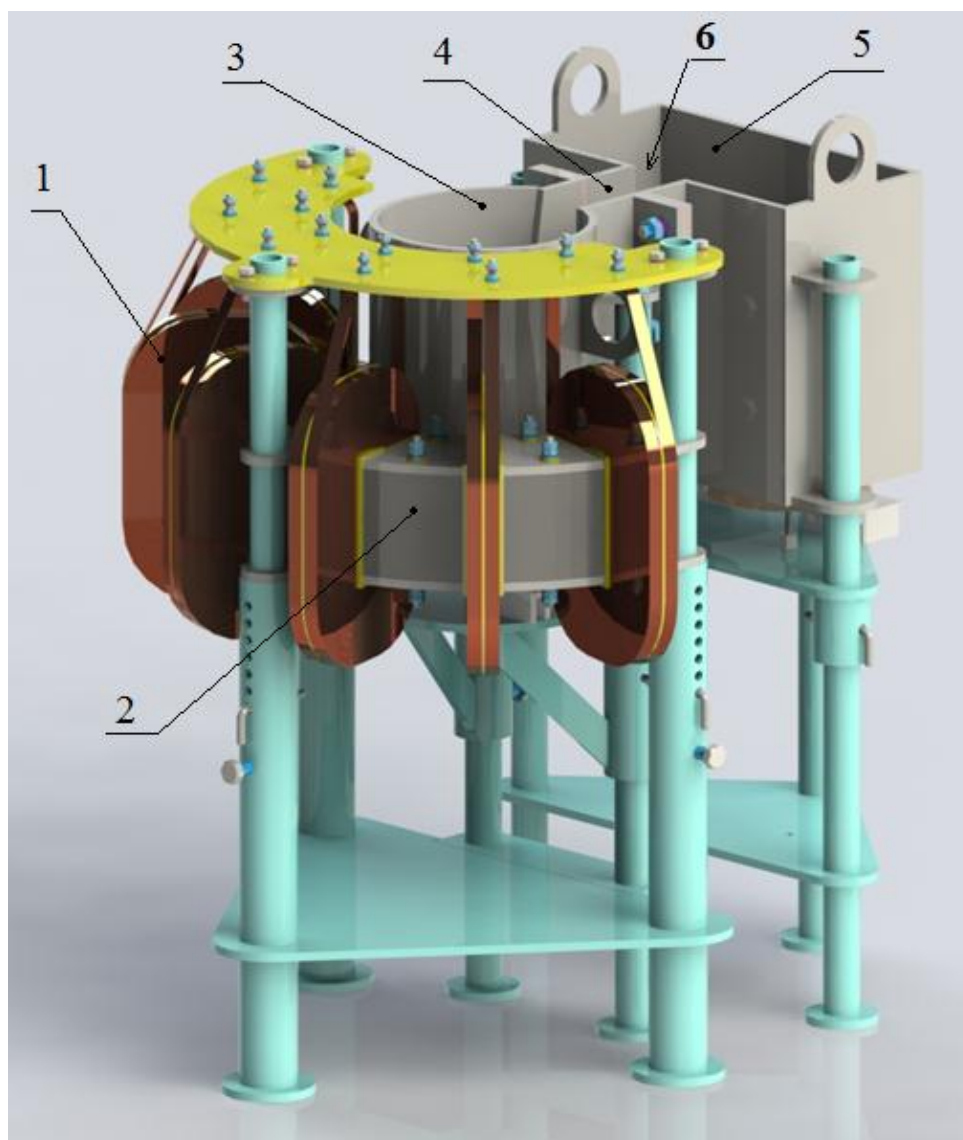


Рисунок 3.1 – Внешний вид физической модели

Физическая модель, является уменьшенной копией промышленной установки. В печи 5, находится жидкий металл 6, через канал 4 металл подается загрузочный карман 3, в котором под действием электромагнитного поля, созданного индуктором, состоящим из катушек 1 и магнитопровода 2, создается воронка. В загрузочный карман засыпается стружка и мелкий лом, под действием воронки стружка и лом опускается на дно металла и попадает в печь для переплавки.



Рисунок 3.2 – Источник питания физической модели

Источник питания представляет из себя преобразователь частоты «ВЕСПЕР EI-9011-025H». Предназначен для регулирования скорости вращения стандартных асинхронных двигателей.

Таблица 3.1 – Характеристики источника питания [9]

Максимальная мощность машины, кВт	18,5
Полная мощность преобразователя, кВА	25
Номинальный выходной ток, А	41
Максимальное выходное напряжение, В	380/400/415/440/460
Номинальная выходная частота, Гц	400
Номинальное входное напряжение, В и частота, Гц	380/400/415/440/460, 50/60
Допустимые отклонения напряжения, %	+10, -15
Допустимые отклонения частоты, %	±5

Для визуализации полученных данных используется компьютер с установленным на него необходимым программным обеспечением LabVIEW SignalExpress. Данная программа позволяет регистрировать и выдавать данные на экран, в реальном времени.



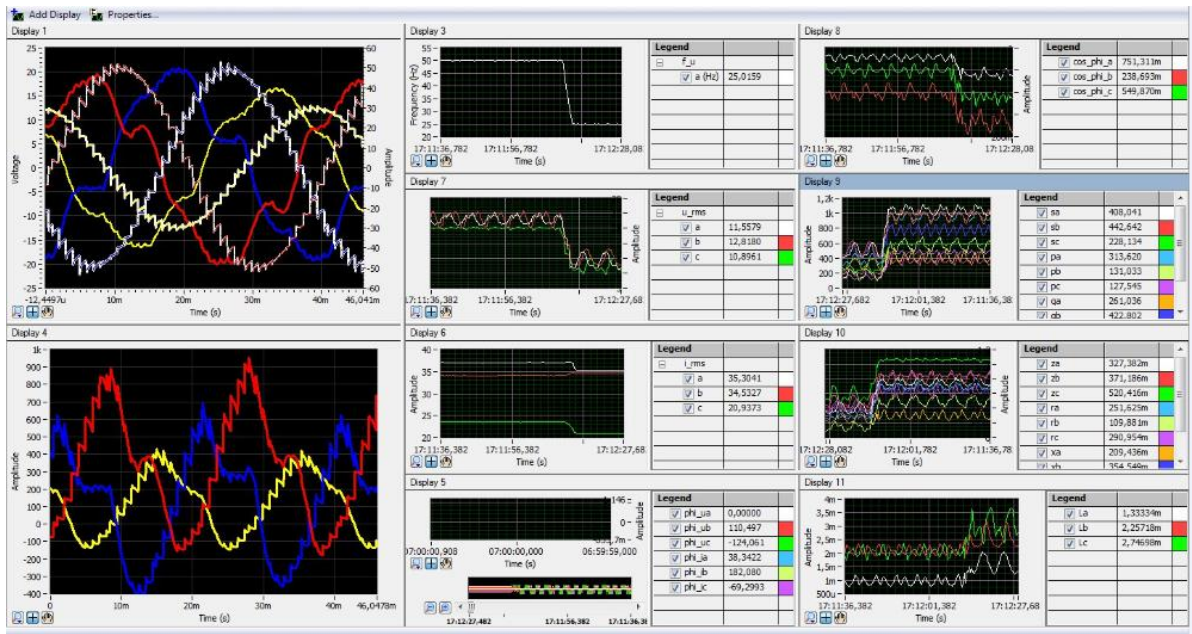


Рисунок 3.3 – Внешний вид программы LabVIEW SignalExpress

SignalExpress оптимизирует виртуальные инструменты для инженеров-проектировщиков, предлагая мгновенные интерактивные измерения, которые не требуют программирования. Присутствует возможность интерактивно использовать SignalExpress для получения, генерации, анализа, сравнения, импортирования и сохранения сигналов. Сравнить проектные данные с данными измерений возможно за один шаг. SignalExpress расширяет простоту использования виртуальной аппаратуры тем, кто должен анализировать сигналы без программируемых приложений [10].

Для преобразования сигналов с датчиков установленных на физической модели, в цифровые сигналы, и дальнейшей их передачи на компьютер, используются многофункциональные устройства ввода/вывода National Instruments USB-6218, для дальнейшей обработки и передачи информации.



Рисунок 3.4 – Внешний вид NI USB-6218

NI USB-6218 – изолированное многофункциональное устройство получения данных (DAQ). Он предлагает аналоговый ввод-вывод (16 бит, 250 килоотсчетов/сек), цифровой вход, цифровой выход (250 килоотсчетов/сек) и два 32-битных счетчика. Для повышения точности и безопасности USB-6218 обеспечивает изоляцию 60 В, CAT I. Он также оснащен технологией потоковой передачи сигналов, которая обеспечивает двунаправленную высокоскоростную поточную передачу данных по USB через DMA (технология прямого доступа к памяти, минуя центральный процессор). Устройство идеально подходит для тестирования, управления и проектирования приложений, включая портативную регистрацию данных [11].

### 3.2 Результаты эксперимента

В ходе эксперимента были сняты характеристики установки при частотах 25, 50 и 100 Гц, а также при 50 Гц без фильтрации сигнала. Задание данных параметров осуществлялось путем изменения значения заранее установленных производителем переменных. График разгонной характеристики приведен на рисунке 3.4, а параметры выходного напряжения и выходной частоты – в таблице 3.1. Значения выходных параметров были рассчитаны для поддержания постоянного значения индуктивности в 3 мГн.

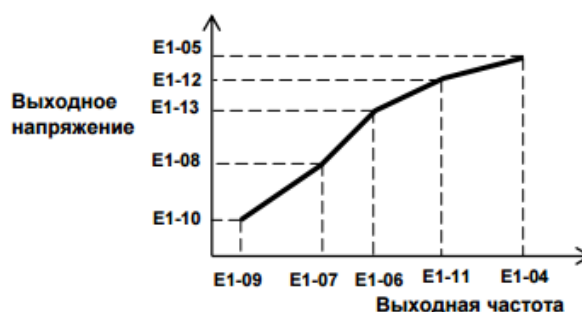


Рисунок 3.5 – Разгонная характеристика  $U/f$

Таблица 3.1 – Параметры выходного напряжения и частоты

параметры частоты/напряжения	$f$ , Гц	$U$ , В	$I$ , А
E1-10/E1-09	10	5	10
E1-08/E1-07	20	10	20
E1-13/E1-06	30	15	30
E1-12/E1-11	50	25	30
E1-05/E1-04	100	50	100

Интегральные характеристики собраны в таблице 3.2 для упрощенного наблюдения за результатами вычислений. Для сопоставления с результатами

математического моделирования потребовалось определить значение энергии.

$$E = \frac{Q_{\Sigma}}{2\omega}. \quad (3.1)$$

В результате были получены следующие характеристики (таблица 3.2)

Таблица 3.2 – Результаты эксперимента

$f, \text{Гц}$	Фаза	$P, \text{Вт}$	$E, \text{Дж}$	$Q, \text{ВАр}$	$\cos\phi, 10^{-2}$	$r, \text{Ом}$	$x, \text{Ом}$	$L, \text{мГн}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$
25	a	422	3,23	378,61	7,44	0,33	0,30	1,93	16,07	35,29
	b	165		440,19	3,52	0,19	0,36	2,34	13,06	34,57
	c	128		198,13	5,43	0,29	0,24	2,86	11,25	20,97
50	a	1000	2,76	372,54	9,26	0,74	0,28	0,9	29,52	37,11
	b	560		823,24	5,30	0,50	0,68	2,18	29,08	34,13
	c	469		352,42	8,18	0,85	0,19	2,12	24,95	23,06
50 б/ф	a	433	4,3	858,27	4,5	0,32	0,65	2,31	26,44	36,35
	b	39		975,44	0,01	0,01	0,83	2,94		34,38
	c	67		578,07	1,16	0,12	0,92	3,68		23,65
100	a	1920	0,66	598,05	9,65	0,82	0,22	3,2	42,53	49,55
	b	1756		117,27	9,75	1,02	0,23	3,95	46,93	44,51
	c	1150		6,78	9,98	1,03	0,02	1,30	38,13	29,12

По результатам эксперимента удалось установить, что показания математических моделей и реальной установки имеют небольшие различия.

Таблица 3.3 – Таблица результатов математического моделирования

	$f, \text{Гц}$	Фаза	$P, \text{Вт}$	$E, \text{Дж}$	$Q, \text{ВАр}$	$\cos\phi, 10^{-2}$	$r, \text{Ом}$	$x, \text{Ом}$	$L, \text{мГн}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$
Maxwell 3D	25	a	102,8	4,29	1348	9,5	0,04	0,63	4,06	13,31	31,11
		b						0,44	2,83		
		c						0,37	2,38		
	50	a	128,6	4,29	2685	4,8	0,05	1,25	3,98	26,06	
		b						0,87	2,77		
		c						0,73	2,33		
	100	a	146,7	4,29	5391	2,4	0,06	2,48	3,96	51,85	
		b						1,72	2,75		
		c						1,45	2,31		

### Окончание таблицы 3.3

Mechanical APDL	25	-	260,6	5,9	1854	13,9	0,15	1,07	3,98	15,86	15,89
	50	-	296,2	5,87	3688	7	0,17	2,13	3,98	31,41	31,41
	100	-	377,6	5,82	7314	5,2	0,21	4,22	3,98	62,16	62,17

### 3.3 Выводы по третьей главе

Результаты эксперимента отличны от значений математических моделей в пределах 15%, кроме значений активной мощности. Такое серьезное отличие связано с влиянием воздушной среды на активные потери (для математических установок задан вакуум в расчетной области).

Также, существенное влияние оказывает фильтрация напряжения, в связи с чем появляется различия в выходных токах и напряжениях по фазам. При одной частоте (50 Гц) разница между напряжениями составляет ~10%, при совершенно незначительной разнице в токах (менее 1%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента отличаются от математических моделей в пределах 15%, что вполне очевидно. Для математических моделей мы используем идеальные условия (вакуум в расчетной области, а не воздух, и т.д.), не учитывающие дополнительные потери, от которых не избавиться в реальности. Это и высшие гармоники, и влияние фильтрации напряжения. Даже дополнительное тепло, исходящее от соседних установок и стен, влияет на результаты вычисления.

Различия в результатах между Maxwell 3D и Mechanical APDL возникают в результате различий в геометрии модели, характера построения сетки и зависимости магнитной проницаемости, а также количества элементов модели. Модель в Maxwell 3D имеет геометрию корпуса, дополнительные зажимные листы в магнитопроводе, и В-Н кривую для магнитной проницаемости. В то же время, хоть в Mechanical APDL и не учитывается данная геометрия, а магнитная проницаемость – константа, количество элементов модели гораздо выше. В итоге, результаты, полученные в Maxwell 3D, ближе к реальности, особенно на частоте 50 Гц.

Для получения совершенно идентичных результатов возможна интеграция параметров модели Maxwell 3D с пакетом ANSYS Simplorer, где возможна имитация широтно-импульсной модуляции, а также широкая настройка источника питания. Дальнейшее изучение данного процесса поможет установить точное влияние источников питания на процесс, может открыть способ избавления от высших гармоник, либо извлечения выгоды. Расчет гидродинамической задачи позволит оценить влияние фильтрации и модуляции напряжения на характер движения металла, на качество его перемешивания, и как следствие на формирование его структуры при застывании.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Вольдек, А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкокристаллическим рабочим телом. Л., "Энергия", 1970. 272с.
- 2 Иванов-Сомленский, А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 656 с.
- 3 User's Guide of ANSYS Maxwell 3D Field Simulator v15, edition REV6.0, 2012. – 1006 с.
- 4 Хацаюк, М. Ю. Индукционная установка с МГД воздействием в процессе приготовления и разливки высоколегированных алюминиевых сплавов: Диссертация / М. Ю. Хацаюк - 2013. - 154 с.
- 5 Единый центр поддержки продуктов ANSYS в России и странах СНГ: общая информация: Группа компаний "ПЛИМ Урал" - "Делкам-Урал" [сайт]. – режим доступа: <http://cae-expert.ru/products>.
- 6 Help for engineer [электронный ресурс]: ШИМ – широтно-импульсная модуляция. – режим доступа: <http://h4e.ru/obshchie-svedeniya/110-shim-shirotno-impulsnaya-modulyatsiya>.
- 7 Википедия – свободная энциклопедия [электронный ресурс]: метод Гаусса. – режим доступа: [ru.wikipedia.org/wiki/Метод\\_Гаусса](http://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_Гаусса).
- 8 Википедия – свободная энциклопедия [электронный ресурс]: разложение Холецкого. – режим доступа: [ru.wikipedia.org/wiki/Разложение\\_Холецкого](http://ru.wikipedia.org/wiki/Разложение_Холецкого).
- 9 Частотный преобразователь с управлением вектора потока [электронный ресурс]: руководство по эксплуатации часть 1. 2009. – 60с. – режим доступа: <http://www.celmont.ru/staff/service/mat/instructions/Vesper/ei-9011-1.pdf>.
- 10 SignalExpress [электронный ресурс]: Getting Started with SignalExpress. USA, Austin, Texas, 2004. – режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373873a.pdf>.
- 11 National instruments [электронный ресурс]: View product details. – режим доступа: <http://www.ni.com/ru-ru/support/model.usb-6218.html>.