МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по учебной работе
_____ / О.В. Юсупова
"_____" _____ 20___ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Б1.В.01.06 «Компьютерные исследования электромеханических преобразователей»

Код и направление подготовки (специальность)	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль)	Современные технологии в электромеханике и автоматизированном электроприводе
Квалификация	Магистр
Форма обучения	Очная
Год начала подготовки	2022
Институт / факультет	Электротехнический факультет (ЭТФ)
Выпускающая кафедра	кафедра "Электромеханика и автомобильное электрооборудование"
Кафедра-разработчик	кафедра "Электромеханика и автомобильное электрооборудование"
Объем дисциплины, ч. / з.е.	180 / 5
Форма контроля (промежуточная аттестация)	Зачет с оценкой

Самара 2022

Б1.В.01.06 «Компьютерные исследования электромеханических преобразователей»

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) **13.04.02 Электроэнергетика и электротехника**, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от № 147 от 28.02.2018 и соответствующего учебного плана.

Разработчик РПД:

Профессор, доктор технических наук, доцент	Ю.В Зубков
(должность, степень, ученое звание)	(ФИО)

Заведующий кафедрой	Ю.А. Макаричев, доктор технических наук, профессор
	(ФИО, степень, ученое звание)

СОГЛАСОВАНО:

Председатель методического совета факультета / института (или учебно-методической комиссии)	В.Н Овсянников, кандидат технических наук, доцент
	(ФИО, степень, ученое звание)
Руководитель образовательной программы	Ю.А. Макаричев, доктор технических наук, профессор
	(ФИО, степень, ученое звание)

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы 4
2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы 4
3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся 5
4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам), с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий 5
4.1 Содержание лекционных занятий 5
4.2 Содержание лабораторных занятий 5
4.3 Содержание практических занятий 6
4.4. Содержание самостоятельной работы 8
5. Перечень учебной литературы и учебно-методического обеспечения по дисциплине (модулю) 11
6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения 12
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», профессиональных баз данных, информационно-справочных систем 12
8. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю) 13
9. Методические материалы 13
10. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю) 14

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Наименование категории (группы) компетенций	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Результаты обучения (знать, уметь, владеть, соотнесенные с индикаторами достижения компетенции)
Профессиональные компетенции			
Не предусмотрено	ПК-2 Способен к управлению деятельностью по ремонтам ЭТО ГЭС/ГАЭС	ПК-2.2 Обеспечивает эффективную эксплуатацию электромеханических преобразователей и автоматизированного электропривода	Владеть навыками выбора электрооборудования для ГЭС/ГАЭС
			Знать нормальные, аварийные, послеаварийные и ремонтные режимы эксплуатации оборудования
			Уметь применять правила эксплуатации электротехнического оборудования, системы автоматизированного контроля состояния трансформаторного и силового электрооборудования предприятий

2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы: **часть, формируемая участниками образовательных отношений**

Код компетенции	Предшествующие дисциплины	Параллельно осваиваемые дисциплины	Последующие дисциплины
ПК-2		Автоматизация обработки данных экспериментальных исследований; Методы принятия технических решений в задачах проектирования и управления; Учебная практика: практика по получению первичных навыков научно-исследовательской работы	Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы; Производственная практика: научно-исследовательская работа, в том числе научно-исследовательский семинар; Производственная практика: преддипломная практика; Производственная практика: проектная практика; Системы менеджмента качества в промышленности и образовании; Электромеханические системы с упругими связями

3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Вид учебной работы	Всего часов / часов в электронной форме	2 семестр часов / часов в электронной форме
Аудиторная контактная работа (всего), в том числе:	48	48
Практические занятия	48	48
Внеаудиторная контактная работа, КСР	5	5
Самостоятельная работа (всего), в том числе:	127	127
выполнение курсовых работ	20	20
подготовка к зачету	12	12
подготовка к практическим занятиям	95	95
Итого: час	180	180
Итого: з.е.	5	5

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам), с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

№ раздела	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы				
		ЛЗ	ЛР	ПЗ	СРС	Всего часов
1	Пакет прикладных программ MathCAD	0	0	20	50	70
2	Пакет прикладных программ Elcut	0	0	28	77	105
	КСР	0	0	0	0	5
	Итого	0	0	48	127	180

4.1 Содержание лекционных занятий

Учебные занятия не реализуются.

4.2 Содержание лабораторных занятий

Учебные занятия не реализуются.

4.3 Содержание практических занятий

№ занятия	Наименование раздела	Тема практического занятия	Содержание практического занятия (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов / часов в электронной форме
2 семестр				
1	Пакет прикладных программ MathCAD	Операционная среда системы MathCAD	Пакет прикладных программ MathCAD как средство моделирования электротехнических и электромеханических преобразователей Система инженерных и научных расчётов MathCAD . Общая характеристика системы и её отличия от других аналогичных математических систем	2
2	Пакет прикладных программ MathCAD	Операционная среда системы MathCAD	Окна системы: командное окно, текущего каталога, рабочего пространства, истории команд и путей доступа	2
3	Пакет прикладных программ MathCAD	MathCAD как научный калькулятор	Операции с числами. Ввод действительных чисел. Форматы представления чисел их установка и изменение. Требования к имени переменной Правила ввода векторов и матриц Операции над массивами и матрицами. Обращение к элементам векторов и матриц Извлечение и вставка частей матриц	2
4	Пакет прикладных программ MathCAD	MathCAD как научный калькулятор	Построение графиков. Операторы управления вычислительным процессом Назначение и применение процедуры plot. Процедуры оформления графиков: задание масштаба, надписи осей, заголовка. Вывод нескольких графиков в одних осях.	2
5	Пакет прикладных программ MathCAD	Программирование в MathCAD	Особенности создания m-функций в MathCAD Основные особенности оформления m-файлов Создание простейших файл – функций Создание Script– файлов	2
6	Пакет прикладных программ MathCAD	Программирование в MathCAD	Ввод и вывод информации в диалоговом режиме Организация повторения действий в диалоговом режиме Организация изменения данных в диалоговом режиме Графическое оформление результатов расчетов	2
7	Пакет прикладных программ MathCAD	Программирование в MathCAD	Организация управления цветом графика с помощью оператора menu	2

8	Пакет прикладных программ MathCAD	Решение дифференциальных уравнений в MathCAD	Анализ экспериментальных данных. Интерполяция, регрессия Операции над полиномами Решение обыкновенных дифференциальных уравнений с помощью механизма OLE	2
9	Пакет прикладных программ MathCAD	Решение дифференциальных уравнений в MathCAD	Элементы математической статистики Обмен данными с другими программами	2
10	Пакет прикладных программ MathCAD	Специальные инструменты системы: структурное моделирование нелинейных систем (MathConex), символьные преобразования (Symbolic Mathematics)	Основные сведения для работы с пакетом MathConex Построение структурных схем и выполнение вычислений Работа с Symbolic Mathematics	2
11	Пакет прикладных программ Elcut	Основные сведения об организации Elcut	Типы документов, используемые в Elcut Приемы управления окнами в Elcut Основные типы задач, решаемых в Elcut Пакет прикладных программ Elcut как средство решения задач магнетизма, электростатики. Пакет прикладных программ Elcut как средство решения задач теплопередачи и теории упругости	2
12	Пакет прикладных программ Elcut	Основные сведения об организации Elcut	Пакет прикладных программ Elcut как средство решения задач магнетизма, электростатики. Пакет прикладных программ Elcut как средство решения задач теплопередачи и теории упругости	2
13	Пакет прикладных программ Elcut	Описание задачи в Elcut	Структура базы данных, создание задачи Ввод параметров, задание связи между задачами	2
14	Пакет прикладных программ Elcut	Описание задачи в Elcut	Настройка временных параметров задачи. Автоматический выбор шага во времени в нестационарных задачах. Выбор единиц измерения длины и системы координат. Полярные и декартовы координаты	2
15	Пакет прикладных программ Elcut	Описание геометрии задачи. Создание геометрической модели в Elcut	Терминология, применяемая при описании геометрии задачи Этапы создания геометрической модели	2
16	Пакет прикладных программ Elcut	Описание геометрии задачи. Создание геометрической модели в Elcut	Выделение, дублирование, перемещение, удаление объектов Присвоение меток геометрическим объектам	2
17	Пакет прикладных программ Elcut	Описание геометрии задачи. Создание геометрической модели в Elcut	Технология дискретизации области (разбиения на элементы) Настройка изображения в окне модели Импорт и экспорт модели в системы САПР Печать и копирование изображения модели	2

18	Пакет прикладных программ Elcut	Ввод параметров задачи в Elcut	Ввод параметров задачи. Ввод свойств материалов и граничных условий Создание новой метки Ввод свойств метки в задачах магнитостатики	2
19	Пакет прикладных программ Elcut	Ввод параметров задачи в Elcut	Ввод свойств метки в задаче нестационарного магнитного поля Ввод свойств метки в задаче магнитного поля переменных токов	2
20	Пакет прикладных программ Elcut	Ввод параметров задачи в Elcut	Ввод свойств метки в задаче электростатики и растекания токов Ввод свойств метки в задаче расчета температурного поля и теории упругости Периодические граничные условия	2
21	Пакет прикладных программ Elcut	Решение задач и анализ результатов решения в Elcut	Способы достижения максимальной производительности при решении задач Формирование картины поля на экране для задач магнитостатики и нестационарного магнитного поля, магнитного поля переменных токов	2
22	Пакет прикладных программ Elcut	Решение задач и анализ результатов решения в Elcut	Формирование картины поля на экране для задач электростатики, расчета температурного поля и теории упругости. Панель калькулятора. Просмотр локальных значений поля Мастер вычисления индуктивности, емкости, импеданса	2
23	Пакет прикладных программ Elcut	Решение задач и анализ результатов решения в Elcut	Редактирование контуров. Графики Вычисление интегралов, вывод результатов в таблицу Таблицы и графики во времени Печать и копирование результатов анализа Графики. Выбор отображаемых величин	2
24	Пакет прикладных программ Elcut	Надстройки Elcut	Добавление, редактирование, удаление свойств надстроек Программирование надстроек Диалог – параметры надстройки Диалог – пункт меню надстроек	2
			Итого за семестр:	**48**
			Итого:	**48**

4.4. Содержание самостоятельной работы

Наименование раздела	**Вид самостоятельной работы**	**Содержание самостоятельной работы** (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	**Количество часов**
2 семестр			
Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Синтез параметров и моделирование режима пуска синхронного явнополюсного двигателя Расчет параметров схемы замещения СД	5

Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Синтез параметров и моделирование режима пуска синхронного явнополюсного двигателя Моделирование режима пуска СД с построением зависимости момента	5
Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Моделирование режима внезапного короткого замыкания синхронного генератора Задание параметров схемы замещения СГ Моделирование периодического тока короткого замыкания	5
Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Моделирование режима внезапного короткого замыкания синхронного генератора Задание параметров схемы замещения СГ Моделирование апериодического тока короткого замыкания	5
Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Синтез параметров и моделирование режима включения трансформатора под напряжение Задание параметров схемы замещения Моделирование тока включения	5
Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Синтез параметров и моделирование режима включения трансформатора под напряжение Задание параметров схемы замещения Построение зависимости тока включения трансформатора в сеть в функции времени	5
Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Параметры и моделирование режима внезапного короткого замыкания трансформатора Задание параметров схемы замещения Моделирование установившегося, свободного токов короткого замыкания	5
Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Параметры и моделирование режима внезапного короткого замыкания трансформатора Задание параметров схемы замещения Моделирование полного тока короткого замыкания Построение зависимостей составляющих токов КЗ в функции времени	5
Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Синтез параметров и моделирование режима пуска асинхронного двигателя Задание каталожных данных Расчет параметров схемы замещения АД	5
Пакет прикладных программ MathCAD	подготовка к практическим занятиям	Синтез параметров и моделирование режима пуска асинхронного двигателя Расчет входного сопротивления, пускового тока, пускового и максимального моментов Моделирование режима пуска АД с построением зависимости момента в функции скольжения	5

Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к практическим занятиям	Моделирование магнитного поля синхронного генератора (магнитостатика) Источники поля, граничные условия. Магнитное поле при холостом ходе	5
Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к практическим занятиям	Моделирование магнитного поля синхронного генератора (магнитостатика) Источники поля, граничные условия. Продольная реакция якоря Поперечная реакция якоря	5
Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к практическим занятиям	Моделирование магнитного поля двигателя постоянного тока Источники поля, граничные условия. Магнитное поле при холостом ходе	5
Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к практическим занятиям	Моделирование магнитного поля двигателя постоянного тока Источники поля, граничные условия. Магнитное поле при нагрузке	5
Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к практическим занятиям	Моделирование электрического поля двухпроводной линии (электростатика) Источники поля, граничные условия. Определение собственной емкости проводников	5
Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к практическим занятиям	Моделирование задачи теплопроводности (стационарная теплопередача) Учет джоулевых потерь в тепловой задаче Моделирование температурного поля в зубцовой зоне статора синхронного двигателя	5
Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к практическим занятиям	Моделирование тепловой нестационарной задачи. Нагрев стартера. Учет джоулевых потерь в тепловой задаче Расчет временной зависимости перегрева обмотки стартера	5
Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к практическим занятиям	Моделирование магнитного поля линейного асинхронного двигателя (магнитное поле переменных токов) Источники поля, граничные условия. Моделирование распределения магнитной индукции и напряженности для плоской задачи магнитного поля переменных токов	5
Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к практическим занятиям	Моделирование задачи расчета прочности клеевой конструкции магнитоэлектрического генератора Источники усилий, граничные условия. Моделирование максимальных неразрушаемых усилий в задаче теории упругости	5
Пакет прикладных программ Elcut	выполнение курсовых работ	Моделирование в программном комплексе Elcut	20

Пакет прикладных программ Elcut	подготовка к зачету	Изучение теоретического материала	12
		Итого за семестр:	**127**
		Итого:	**127**

5. Перечень учебной литературы и учебно-методического обеспечения по дисциплине (модулю)

№ п/п	**Библиографическое описание**	**Ресурс НТБ СамГТУ** (ЭБС СамГТУ, IPRbooks и т.д.)
Основная литература		
1	Голубева, Н.В. Математическое моделирование систем и процессов : учеб.пособие / Н. В. Голубева.- СПб., Лань, 2013.- 191 с.	Электронный ресурс
2	Макаричев, Ю.А. Численное моделирование в электротехнике с использованием программной среды ELCUT : учеб. пособие / Ю. А. Макаричев, Ю. Н. Иванников; Самар.гос.техн.ун-т.- Самара, 2020.- 91 с.	Электронный ресурс
3	Математическое моделирование в системе MathCAD; Саратовский **государственный** технический университет имени Ю.А. Гагарина, ЭБС АСВ, 2020.- Режим доступа: https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu||iprbooks||108693	Электронный ресурс
4	Советов, Б.Я. Моделирование систем : учеб. для академ. бакалавриата / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев; С.-Петербург.гос.электротехн.ун-т "ЛЭТИ" им.В.И.Ульянова(Ленина) .- 7-е изд..- М., Юрайт, 2015.- 343 с.	Электронный ресурс
Дополнительная литература		
5	Абакумов, А.М. Управление электромеханическими преобразователями : учебно-методическое пособие / А. М. Абакумов, Д. Г. Рандин; Самар.гос.техн.ун-т, Электромеханика и автомобильное электрооборудование .- 2-е изд., испр. и доп..- Самара, 2019.- 243 с..- Режим доступа: https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu||elib||3786	Электронный ресурс
6	Дилигенская, А.Н. Математическое моделирование систем с распределенными параметрами : учеб.-метод. пособие / А. Н. Дилигенская, А. И. Данилушкин; Самар.гос.техн.ун-т.- 2012.- 65 с.	Электронный ресурс
7	Киреев, К.В. Моделирование переходных процессов в электрических цепях : моногр. / К. В. Киреев; Самар.гос.техн.ун-т, Теоретическая и общая электротехника.- Самара, 2011.- 255 с..- Режим доступа: https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu||elib||2284	Электронный ресурс
8	Компьютерное моделирование; **Профобразование**, 2021.- Режим доступа: https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu||iprbooks||102191	Электронный ресурс
9	Математическое моделирование процессов тепломассопереноса и термоупругости : учебное пособие / А. В. Еремин [и др.]; Самар.гос.техн.ун-т, Теоретические основы теплотехники и гидромеханика.- Самара, 2018.- 230 с..- Режим доступа: https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu||elib||3448	Электронный ресурс
10	Решение задач математического моделирования в системе MathCAD; Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017. - Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/79498.html	Электронный ресурс

11	Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных .- 2-е изд..- М., ДМК-Пресс, 2014.- 288 с.	Электронный ресурс

Доступ обучающихся к ЭР НТБ СамГТУ (elib.samgtu.ru) осуществляется посредством электронной информационной образовательной среды университета и сайта НТБ СамГТУ по логину и паролю.

6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения

Организовано взаимодействие обучающегося и преподавателя с использованием электронной ин-формационной образовательной среды университета.

№ п/п	Наименование	Производитель	Способ распространения
1	Ansys	ANSYS (Зарубежный)	Лицензионное
2	ELCUT	ООО ТОР (Отечественный)	Свободно распространяемое
3	MathCAD	PTC (Зарубежный)	Лицензионное
4	Matlab	MathWorks (Зарубежный)	Лицензионное
5	Microsoft Office https: //microsoft. com	Microsoft (Зарубежный)	Лицензионное
6	Компас-3D	ЗАО АСКОН (Отечественный)	Лицензионное
7	Многоканальный осциллограф	ИПЦ (Отечественный)	Свободно распространяемое

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», профессиональных баз данных, информационно-справочных систем

№ п/п	Наименование	Краткое описание	Режим доступа
1	консультационный центр Matlab и Simulink	http://matlab.exponenta.ru	Ресурсы открытого доступа
2	Государственная публичная научно-техническая библиотека России (ГПНТБ)	http://www.gpntb.ru/win/ntb/	Ресурсы открытого доступа
3	Ежемесячный электронный журнал «Математическое моделирование» // Официальный сайт Института математического моделирования РАН.	http://www.imamod.ru/journal/	Ресурсы открытого доступа

4	Информационный сайт кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»	http://www.em.samgtu.ru.	Ресурсы открытого доступа
5	Компьютерное моделирование	http://www.intuit.ru/department/calculate/compmodel/4/	Ресурсы открытого доступа
6	Научная электронная библиотека «Киберленинка»	https://cyberleninka.ru	Ресурсы открытого доступа
7	Сайты научно – технической библиотеки ФГБОУ СамГТУ	http://lib.sumgtu.ru/	Ресурсы открытого доступа
8	Scopus - база данных рефератов и цитирования	http://www.scopus.com/	Зарубежные базы данных ограниченного доступа
9	База данных международных индексов научного цитирования Web of Science	http://www.webofknowledge.com/	Зарубежные базы данных ограниченного доступа
10	eLIBRARY.ru	http://www.eLIBRARY.ru/	Российские базы данных ограниченного доступа

8. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Лекционные занятия null

Практические занятия

Аудитории для практических занятий укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения (проектор, экран, компьютер/ноутбук).

Лабораторные занятия null

Самостоятельная работа

Помещения для самостоятельной работы оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и доступом к электронной информационно-образовательной среде СамГТУ:

9. Методические материалы

Методические рекомендации при подготовке и работе на практическом занятии

Практические занятия по дисциплине проводятся в целях выработки практических умений и приобретения навыков в решении профессиональных задач.

Рекомендуется следующая схема подготовки к практическому занятию:

1. ознакомление с планом практического занятия, который отражает содержание предложенной темы;
2. проработка конспекта лекции;
3. чтение рекомендованной литературы;

4. подготовка ответов на вопросы плана практического занятия;
5. выполнение тестовых заданий, задач и др.

Подготовка обучающегося к практическому занятию производится по вопросам, разработанным для каждой темы практических занятий и (или) лекций. В процессе подготовки к практическим занятиям, необходимо обратить особое внимание на самостоятельное изучение рекомендованной литературы.

Работа студентов во время практического занятия осуществляется на основе заданий, которые выдаются обучающимся в начале или во время занятия. На практических занятиях приветствуется активное участие в обсуждении конкретных ситуаций, способность на основе полученных знаний находить наиболее эффективные решения поставленных проблем, уметь находить полезный дополнительный материал по тематике занятий. Обучающимся необходимо обращать внимание на основные понятия, алгоритмы, определять практическую значимость рассматриваемых вопросов. На практических занятиях обучающиеся должны уметь выполнить расчет по заданным параметрам или выработать определенные решения по обозначенной проблеме. Задания могут быть групповые и индивидуальные. В зависимости от сложности предлагаемых заданий, целей занятия, общей подготовки обучающихся преподаватель может подсказать обучающимся алгоритм решения или первое действие, или указать общее направление рассуждений. Полученные результаты обсуждаются с позиций их адекватности или эффективности в рассмотренной ситуации.

Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы

Организация самостоятельной работы обучающихся ориентируется на активные методы овладения знаниями, развитие творческих способностей, переход от поточного к индивидуализированному обучению с учетом потребностей и возможностей обучающегося.

Самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной литературой, материалами периодических изданий и Интернета является наиболее эффективным методом получения дополнительных знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала. Все новые понятия по изучаемой теме необходимо выучить наизусть и внести в глоссарий, который целесообразно вести с самого начала изучения курса.

Самостоятельная работа реализуется:

- непосредственно в процессе аудиторных занятий;
- на лекциях, практических занятиях;
- в контакте с преподавателем вне рамок расписания;
- на консультациях по учебным вопросам, в ходе творческих контактов, при ликвидации задолженностей, при выполнении индивидуальных заданий и т.д.;
- в библиотеке, дома, на кафедре при выполнении обучающимся учебных и практических задач.

Эффективным средством осуществления обучающимся самостоятельной работы является электронная информационно-образовательная среда университета, которая обеспечивает доступ к учебным планам, рабочим программам дисциплин (модулей), практик, к изданиям электронных библиотечных систем.

10. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)

Фонд оценочных средств представлен в приложении № 1.

Приложение 1 к рабочей программе дисциплины
Б1.В.01.06 «Компьютерные исследования электромеханических преобразователей»

Фонд оценочных средств
по дисциплине
Б1.В.01.06 «Компьютерные исследования электромеханических преобразователей»

Код и направление подготовки (специальность)	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль)	Современные технологии в электромеханике и автоматизированном электроприводе
Квалификация	Магистр
Форма обучения	Очная
Год начала подготовки	2022
Институт / факультет	Электротехнический факультет (ЭТФ)
Выпускающая кафедра	кафедра "Электромеханика и автомобильное электрооборудование"
Кафедра-разработчик	кафедра "Электромеханика и автомобильное электрооборудование"
Объем дисциплины, ч. / з.е.	180 / 5
Форма контроля (промежуточная аттестация)	Зачет с оценкой

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Наименование категории (группы) компетенций	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Результаты обучения (знать, уметь, владеть, соотнесенные с индикаторами достижения компетенции)
Профессиональные компетенции			
Не предусмотрено	ПК-2 Способен к управлению деятельностью по ремонтам ЭТО ГЭС/ГАЭС	ПК-2.2 Обеспечивает эффективную эксплуатацию электромеханических преобразователей и автоматизированного электропривода	Владеть навыками выбора электрооборудования для ГЭС/ГАЭС
			Знать нормальные, аварийные, послеаварийные и ремонтные режимы эксплуатации оборудования
			Уметь применять правила эксплуатации электротехнического оборудования, системы автоматизированного контроля состояния трансформаторного и силового электрооборудования предприятий

Матрица соответствия оценочных средств запланированным результатам обучения

Код индикатора достижения компетенции	Результаты обучения	Оценочные средства	Текущий контроль успеваемости	Промежуточная аттестация
Пакет прикладных программ MathCAD				
ПК-2.2 Обеспечивает эффективную эксплуатацию электромеханических преобразователей и автоматизированного электропривода	**Владеть** навыками выбора электрооборудования для ГЭС/ГАЭС	задачи практических занятий	Да	Нет
	Знать нормальные, аварийные, послеаварийные и ремонтные режимы эксплуатации оборудования	Вопросы к зачету	Нет	Да
	Уметь применять правила эксплуатации электротехнического оборудования, системы автоматизированного контроля состояния трансформаторного и силового электрооборудования предприятий	задачи практических занятий	Да	Нет

Пакет прикладных программ Elcut				
ПК-2.2 Обеспечивает эффективную эксплуатацию электромеханических преобразователей и автоматизированного электропривода	**Владеть** навыками выбора электрооборудования для ГЭС/ГАЭС	задачи практических занятий	Да	Нет
	Знать нормальные, аварийные, послеаварийные и ремонтные режимы эксплуатации оборудования	задачи практических занятий Вопросы к зачету	Нет	Да
	Уметь применять правила эксплуатации электротехнического оборудования, системы автоматизированного контроля состояния трансформаторного и силового электрооборудования предприятий	задачи практических занятий	Да	Нет

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования
«Самарский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

К а ф е д р а «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Ю.А. МАКАРИЧЕВ, Ю.Н. ИВАННИКОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ ELCUT

Учебное пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2020

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ
УДК 519.281.2:621.313
М 30

Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н.
М 30 Численное моделирование в электротехнике с использованием программной среды ELCUT: учеб. пособие / *Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 107 с.: ил.

С развитием ЭВМ стало возможным использование специализированного программного обеспечения, в основе которого лежит численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ). По точности расчетов численное моделирование при корректном описании модели занимает промежуточное место между аналитическим расчетом и экспериментом на опытном образце.

Настоящее учебное пособие содержит описание и примеры решения учебных проектных задач методом численного моделирования электромагнитных и тепловых полей электротехнических комплексов в программной среде ELCUT.

Пособие предназначено для бакалавров направления подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» и магистрантов направления подготовки 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника». Пособие может быть полезным также аспирантам и научным сотрудникам, которые занимаются компьютерным моделированием сложных, многофакторных систем, объектов и явлений.

Рецензент:
д-р техн. наук, профессор Зимин Л.С., ФГБОУ ВО СамГТУ

УДК 519.281.2:621.313
М 30

© Ю.А. Макаричев,
Ю.Н. Иванников, 2020
© Самарский государственный
технический университет, 2020

Содержание

СОДЕРЖАНИЕ **3**

ПРЕДИСЛОВИЕ **5**

ВВЕДЕНИЕ **7**

1. ELCUT. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ **9**

1.1. Постановка задачи *9*
1.2. Геометрическая модель *13*

2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ **15**

2.1. Геометрическая модель электромагнита контактора *16*
2.2. Задание физических свойств блоков и источников поля *17*
2.3. Задание граничных условий *19*
2.4. Построение сетки конечных элементов *20*
2.5. Решение задачи *21*
2.6. Анализ результатов 23
2.7. Расчет параметров электромагнита *27*

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ **30**

3.1. Короткое замыкание на выводах трансформатора *31*
3.2. Электродинамические (пондеромоторные) силы. 34
3.3. Постановка задачи численного моделирования нестационарного магнитного поля *36*
3.4. Результаты решения задачи нестационарного магнитного поля *45*

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ **48**

4.1. Задача магнитного поля переменных токов в ELCUT *48*
4.2. Потери в стали электрических машин. Уравнение Штейнмеца *49*
4.3. Решение задачи магнитного поля в программной среде ELCUT *52*

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ **58**

5.1. Источники тепла в электрической машине.....58
5.2. Коэффициенты теплопроводности.....61
5.2.1. Теплопроводность всыпных обмоток.....61
5.2.2. Теплопроводность шихтованных магнитопроводов 65
5.3. Задание физических свойств блоков и граничных условий .66
5.4. Теплоотдача с внешней поверхности 69

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ 75

6. ПРАКТИКУМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ 77

Практическое занятие № 1. 78
Практическое занятие №2 81
Практическое занятие №3 86
Практическое занятие №4 91

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 96

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....97

ПРИЛОЖЕНИЕ.....100

Предисловие

Компьютерное моделирование, основанное на расчете электромагнитных, силовых и других полевых задач методом конечных элементов (МКЭ), отличается при корректной постановке задачи высокой точностью, оперативностью и наглядностью результатов. Методы численного моделирования физических объектов, в том числе, электромеханических преобразователей и электротехнических комплексов, за счет существенного повышения точности расчетов зачастую позволяют даже отказаться от физического моделирования в виде опытных образцов изделий. Это дает возможность значительно сократить сроки создания новых машин и аппаратов, исключить большинство проектных ошибок и удешевить весь комплекс предварительной подготовки производства [8, 19, 20, 23].

В пособии рассматриваются условия и необходимость применения математического моделирования в научных и инженерных исследованиях. Алгоритмы решения задач МКЭ применимы к большинству аналитических, проектно-расчетных и оптимизационных задач. Численные методы компьютерного моделирования полей необходимы для любого исследования, претендующего на достоверность результатов.

Следовательно, исследователю – электротехнику необходимо владеть методами теории и практики численного математического моделирования для успешного решения научных, производственных и технологических проблем и задач.

Освоение содержания данного учебного пособия позволяет достигнуть основной учебной цели: сформировать у студентов компетентность в области теории и практики математического моделирования объектов исследования в области их профессиональной деятельности.

Учебное предназначено для бакалавров направления подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника», изучающих дисциплины «Моделирование и методы планирования эксперимента», «Автоматизация прикладных расчетов электри-

ческих машин», и магистрантов направления подготовки 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», изучающих дисциплины «Математическое моделирование элементов электромеханических систем», «Оптимальное проектирование в электромеханике и электроприводе», а также аспирантам, занимающимся, численным моделированием процессов, происходящих в электромеханических системах.

Введение

Существует несколько подходов к расчету и проектированию объектов электротехники. Наиболее распространенным является аналитический подход, в котором на основании теоретического описания физических (электромагнитных, тепловых и механических) процессов и накопленного опыта осуществляется расчет главных геометрических размеров и основных характеристик электрических машин, аппаратов в соответствии с техническим заданием. Расчет производится на ЭВМ и представляет собой совокупность последовательных приближенных расчетов электромагнитной задачи с учетом ограничений, накладываемых тепловыми и механическими напряжениями на активные части проектируемой машины. Точность аналитического решения обуславливается допущениями, принятыми для упрощения расчетов: линеаризация нелинейных зависимостей, предположение о номинальном режиме работы машины и, следовательно, о постоянстве зависимых от температуры переменных и т.п.

Вторым этапом проектирования электрической машины является создание опытного образца для проведения семейства экспериментов по уточнению параметров и характеристик машины в номинальном и переходных режимах. По результатам экспериментов вносятся необходимые изменения в конструкцию рассчитанной машины. Очевидно, что недостатком такого подхода является значительные затраты времени и материальных средств.

С развитием ЭВМ стало возможным использование специализированного программного обеспечения, в основе которого лежит численное моделирование полей методом конечных элементов (МКЭ). С точки зрения точности расчетов численное моделирование при корректном описании модели занимает промежуточное место между аналитическим расчетом и экспериментом на опытном образце. Во многих случаях создание опытного образца можно заменить численным моделированием МКЭ, которое значительно повышает точность решения (по сравнению с аналитическими методами) благодаря возможности учета не-

линейности физических свойств материалов и междисциплинарному анализу проектируемого устройства.

Рынок программного обеспечения, специализирующегося на численном моделировании МКЭ постоянно развивается, однако можно выделить продукты, занимающие лидирующие позиции: Ansys, FemLAB, COMSOL Multiphysics, ELCUT. Последний из которых является отечественной разработкой ООО «Тор», г. Санкт-Петербург и имеет бесплатную студенческую версии, которая доступна на официальном сайте https://ELCUT.ru/free_soft_r.htm. Студенческая версия имеет ограничения по числу узлов генерируемой сетки на уровне 255 штук. Это ограничение не позволяет рассчитывать с удовлетворительной точностью большинство промышленных задач, однако, подходит для ознакомления с программным обеспечением ELCUT и численным моделированием МКЭ.

Проектировочные отделы электротехнических компаний и организаций используют коммерческие версии ELCUT для расчета электромагнитных параметров и тепловых напряжений машин. Такая необходимость возникает при оптимизации существующих машин или при расчете новых машин нетрадиционной конструкции [18].

Учебное пособие составлено на основе теоретических материалов из литературы, список которой представлен в работе, а также на основе лекционного курса «Моделирование и методы планирования экспериментов», в течение длительного времени читаемого студентам и аспирантам электротехнического факультета Самарского государственного технического университета профессором Ю.А. Макаричевым. В учебном пособии, с согласия автора, использованы материалы диссертационных исследований ассистента Ю.Н. Иванникова, проведённых при разработке, теоретическом и экспериментальном исследовании специальных электромеханических преобразователей [9, 10, 11, 15, 16, 17]

1. ELCUT. Основные сведения

ELCUT – это интегрированная диалоговая система программ, позволяющая решать плоские и осесимметричные задачи следующих типов [2]:

1. Электростатическое поле.
2. Нестационарное электрическое поле.
3. Электрическое поле постоянных токов.
4. Электрическое поле переменных токов.
5. Магнитостатическое поле.
6. Магнитное поле переменных токов.
7. Магнитное нестационарное поле.
8. Теплопередача стационарная.
9. Теплопередача нестационарная.
10. Упругие напряжения и деформации.

При исследовании электротехнических объектов могут быть востребованы все типы задач, а также мультидисциплинарные (связанные) задачи.

1.1. Постановка задачи

В общем случае решение и анализ результатов поставленной задачи включает в себя ряд последовательных шагов, представленных на рис.1.1 независимо от типа решаемой задачи. После установки программного обеспечения ELCUT Student необходимо приступить к созданию задачи. Для этого в меню программы следует выбрать вкладку **Файл -> Создать задачу**, затем в появившемся окне необходимо ввести имя задачи и путь, по которому она будет сохранена, после чего нажать кнопку «далее».



Рис.1.1. Последовательность шагов для решения задачи

Второй этап создания задачи – выбор типа задачи, класса модели, единиц длины, координатной плоскости, необходимой точности расчета и, для плоской задачи – длину модели в направлении, перпендикулярной плоскости чертежа. После чего в указанной папке будут созданы файлы задачи: центральный файл, который включает в себя общее описание задачи, и имеет расширение **.pbm**, файл геометрии задачи с расширением **.mod** – эти файлы общие для всех типов задач и файл физических параметров, отличающиеся расширением в зависимости от предметной области задачи. В процессе решения ELCUT создает еще один файл, включающий в себя результаты решения задачи с расширением **.res** [2].

Во вкладке класс модели (рис.1.2) нужно выбрать одну из двух возможных постановок двумерной задачи: плоскую или осесимметричную.

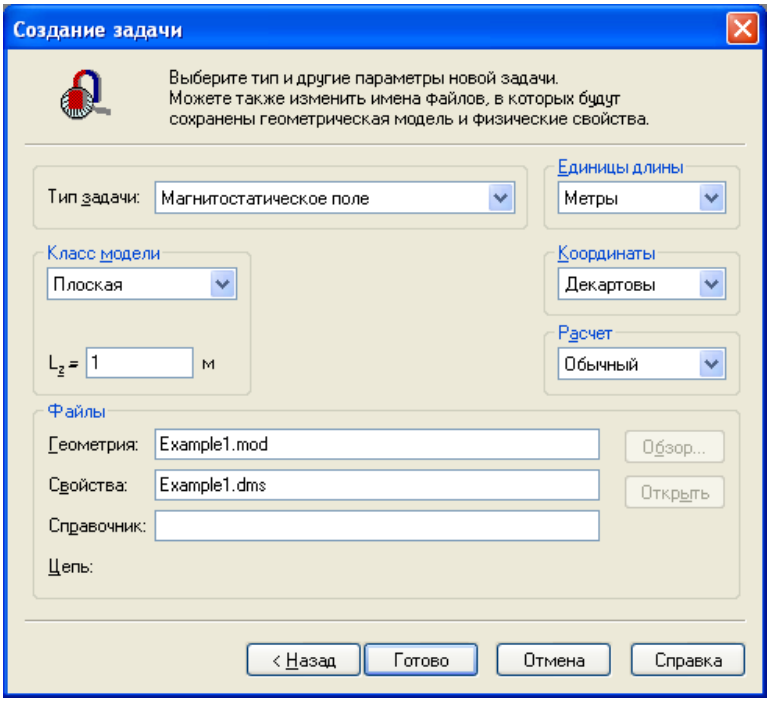


Рисунок 1.2 – Создание задачи

Плоскопараллельная постановка использует декартову систему координат *x y z*, при этом плоскость *xy* является рабочей плоскостью чертежа, а ось *z* ортогональна им. При такой постановке задачи существенным допущением является изотропность физических свойств используемых материалов в направлении оси *z*. Это следует учитывать при моделировании, например, устройств с шихтованным в направлении оси *z* сердечником, принимая его расчетную длину с учетом коэффициента заполнения пакета электротехнической сталью и т.п. При выборе плоскопараллельной модели необходимо задать ее длину в направлении перпендикулярном плоскости чертежа (в направлении оси *z*), по умолчанию длина модели равна 1 метру.

Осесимметричные задачи решаются в цилиндрической системе координат *z r Θ*. Ось симметрии осесимметричной задачи (*z*) совпадает с осью абсцисс (горизонтальной осью декарто-

вой системы координат). Основное допущение в такой задаче – это изотропность физических свойств материалов в направлении угловой координаты Θ. Работа с геометрической моделью осуществляется в полуплоскости zr при $r > 0$. Следует иметь в виду, что части модели, расположенные в отрицательной полуплоскости r имеют отрицательную длину и не имеют физического смысла.

Нажав кнопку «Готово» в окне создания задачи, откроется рабочий стол ELCUT, представленный на рис.1.3. ELCUT является многодокументным приложением. На рабочем столе рис.1.3 показаны основные окна. Окно, содержащее основную информацию, обычно прикреплено слева в верхнем углу рабочего стола. В окне свойств содержится скрытая информация активно окна. Окно документов предназначено для редактирования геометрической модели и постпроцессорного анализа результатов решения. Окно инструментов содержит необходимые инструменты для редактирования геометрической модели и постпроцессорного анализа.

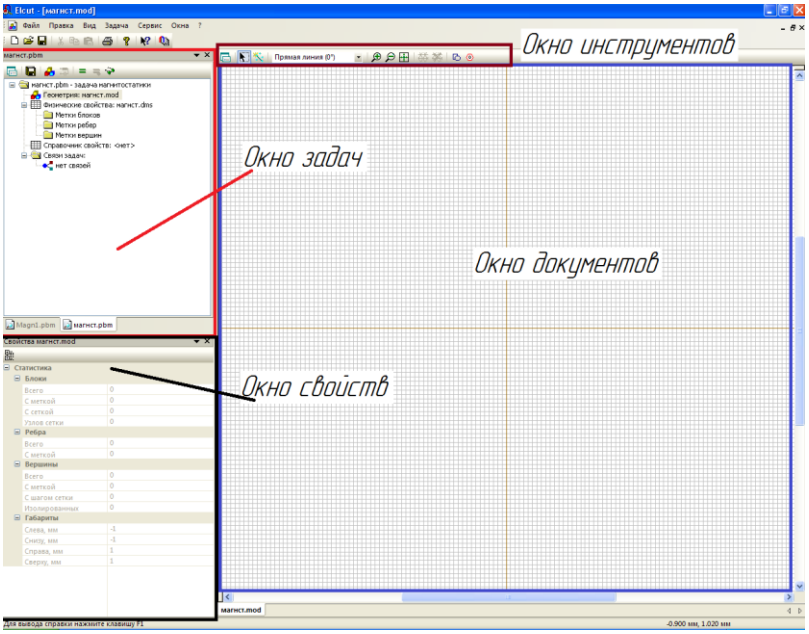


Рисунок 1.3 – Рабочий стол ELCUT

1.2. Геометрическая модель

Любая задача состоит из геометрической модели, представляющей плоскопараллельное или осесимметричное описание исследуемого устройства (или его части) с разбиением на отдельные блоки, отличающиеся физическими свойствами. Создание геометрической модели возможно двумя способами: с помощью встроенного геометрического редактора, включающего в себя инструменты для вставки ребер и вершин , и позволяющий добавлять геометрические примитивы, с помощью инструмента  «добавить фигуру», расположенного в окне инструментов и с помощью импорта внешней геометрической модели, имеющей расширение **.dxf**, созданной в AutoCad или Compas (необходимо сохранить чертеж в формате **.dxf**). Импорт геометрической модели осуществляется через вкладку **Файл -> импорт DXF** главного меню. При работе в окне документов для информативности в правом нижнем углу отображается координаты курсора мыши.

Геометрическая модель имеет три основных типа геометрических объектов: вершина, ребро и блок рис.1.4.

Вершина – это точка на плоскости чертежа, которая введена пользователем или автоматически сгенерирована в результате пересечения двух или нескольких ребер.

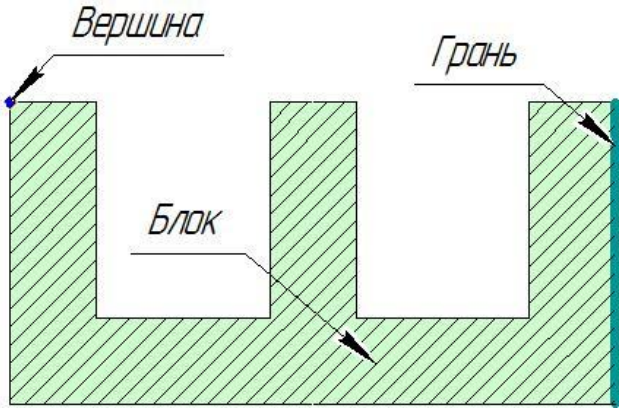


Рисунок 1.4 – Основные типы геометрических объектов ELCUT

Нажав правой кнопкой мыши на вершину в разделе свойства можно задать метку этой вершины, после чего она будет отображаться в окне задач в разделе «Метки вершин». Кроме того, в свойствах вершины есть возможность редактирования размеров ячейки в разделе «Шаг дискретизации». В общем случае мешер (от англ. *mesher* – генератор сетки конечных элементов) ELCUT строит сетку в автоматическом режиме без возможности редактирования типов конечных элементов, сгущая (уменьшая размер ячейки) сетку вслед за уменьшением геометрических размеров разбиваемых расчетных блоков модели. Однако в некоторых случаях, например, в наиболее критических с точки зрения точности расчета местах модели имеется возможность сгущать сетку с помощью изменения шага дискретизации элементов. В студенческой версии обычно число элементов, построенных в автоматическом режиме, значительно превышает поставленные ограничения, поэтому имеет смысл увеличивать размер сетки (особенно в местах слабо влияющих на точность расчета, например, в области воздушного пространства в окрестности модели). После создания метки вершины в окне задач нужно определить свойства метки вершины: граничное условие или сосредоточенный источник поля.

Ребро геометрической модели – отрезок прямой или дуга окружности между двумя вершинами. Ребра служат в основном для задания граничных условий задачи, для чего также необходимо создать метку ребра.

Блок геометрической модели – непрерывное плоское пространство, ограниченное ребрами. Блоки геометрической модели соответствуют отдельным частям реальной модели с необходимостью в определении свойств метки, соответствующих физическим свойствам материала.

Следующим этапом моделирования является этап задания физических свойств блоков геометрической модели и источников поля. Этот этап различается для разных типов задач. Рассмотрим его на примере решения магнитостатической задачи.

2. Расчет статического магнитного поля

Расчет статического магнитного поля актуален при проектировании таких устройств, как: соленоиды, постоянные магниты, электрические машины, реакторы и тому подобные. Рассмотрим решение задачи магнитостатики на примере расчета тяговых характеристик Ш-образного магнита постоянного тока. Подобная конструкция используется, например, в электромагнитном контакторе серии КМИ фирмы IEK. На рис.2.1 видно устройство контактора, расположение катушки, сердечника и возвратной пружины. Контакторы могут быть выполнены как на переменный, так и на постоянный ток в цепи управления и цепи главных контактов. Контактор с катушкой управления от источника постоянного напряжения обозначается добавлением буквы **п** в маркировке, например, КМИп.

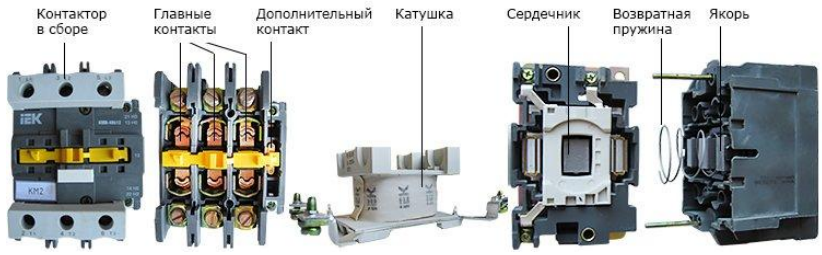


Рисунок 2.1 – Контакторы серии КМИ

Электромагнит контактора состоит из магнитопровода, катушки возбуждения и возвратной пружины. В свою очередь магнитопровод состоит из подвижной (якорь) и неподвижной части (статор). Якорь электромагнита контактора жестко связан с подвижными контактами. В выключенном состоянии под действием возвратной пружины якорь находится в крайнем положении, при котором главные контакты разомкнуты. При подаче напряжения на катушку управления электромагнитом якорь, преодолевая действие возвратной пружины, притягивается к сердечнику, при этом происходит замыкание главных контактов.

Одной из основных характеристик электромагнита контактора является зависимость силы притяжения магнита от тока в силовой катушке и зазора между якорем и статором. Для получения этой характеристики необходимо решить задачу стационарного магнитного поля.

2.1. Геометрическая модель электромагнита контактора

Геометрическая модель рис.2.2 является плоскопараллельным описанием исследуемого объекта и представляет собой сечение магнитопровода и обмоток электромагнита, окруженное воздушным пространством.

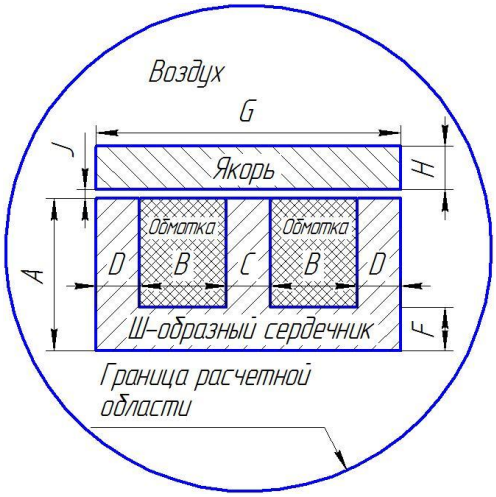


Рисунок 2.2 – Геометрическая модель электромагнита контактора

В таблице 2.1 в качестве примера приведены геометрические размеры электромагнита контактора и его параметры.

Таблица 2.1

Геометрические размеры модели, (мм) и номинальное усилие, Н.

A	*B*	*D,C*	*F, H*	*G*	*J*	Толщина магнита в направлении оси *z*, *Lz*	Номинальная сила притяжения якоря, *f*, Н
35	20	10	10	70	1	40	390

В соответствии с размерами, заданными в таблице, строится в основном поле геометрическая модель объекта. Как уже отмечалось, модель может быть импортирована из графических редакторов, поддерживающих формат **.dxf**.

2.2. Задание физических свойств блоков и источников поля

Пакет ELCUT позволяет решать задачи магнитостатики с линейными и нелинейными свойствами блоков. Ш-образный сердечник и якорь электромагнита набран из листов электротехнической стали, например, 2013. Катушка намотана медным обмоточным изолированным проводом. Область плоскости модели, занятая катушкой характеризуется коэффициентом заполнения медью $k_з$ равному отношению суммарного сечения всех проводников катушки к площади окна под обмотку.

Для задания свойств блоков необходимо в окне задачи выбрать блок, например, соответствующий сердечнику и дважды щелкнуть по нему. После чего откроется окно, представленное на рис.2.3. Электротехническая сталь 2013 имеет нелинейную кривую намагничивания $B = f(H)$ (Приложение П.2). Следовательно, во вкладке «магнитная проницаемость» необходимо выбрать «нелинейный материал», после чего в открывшемся окне редактирования кривой намагничивания следует ввести требуемую зависимость индукции от напряженности магнитного поля ($B – H$).

Аналогично необходимо задать кривую намагничивания для блока якоря электромагнита. В свойствах блока, соответствующего воздуху необходимо задать постоянную величину магнитной проницаемости равную $\mu_в = 1$. Обратите внимание, что магнитная проницаемость указывается в относительных единицах.

Вкладка «Коэрцитивная сила магнита» используется при моделировании поля постоянных магнитов.

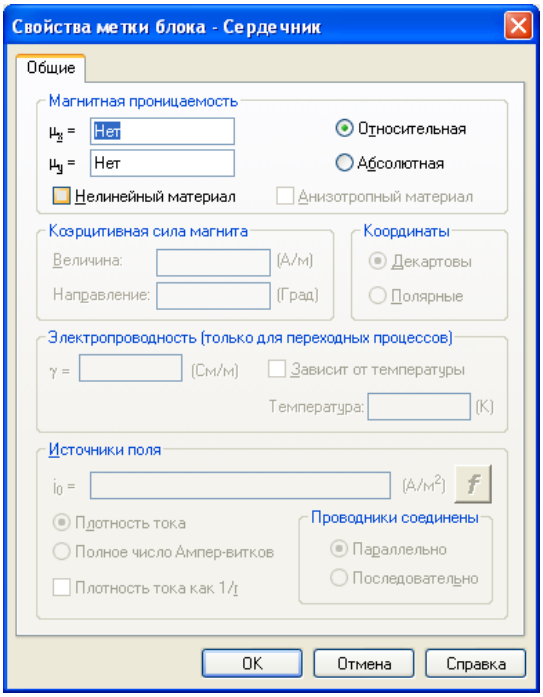


Рисунок 2.3 – Свойства блока «Сердечник электромагнита»

Источником поля электромагнита в рассматриваемом примере является ток катушек. Поэтому, открыв окно свойства катушек необходимо задать, во-первых, магнитную проницаемость $\mu_к = 1$ (немагнитный материал), во-вторых, определить, что является источником поля: плотность тока или полное число ампер-витков катушки. Обратите внимание, что катушке соответствуют два блока, в которых ток течет в противоположных направлениях. Следовательно, в одном блоке, например, в левом задаем положительное значение источника поля, а в другом – правом – отрицательное. Для определенности задайте источник поля в виде полного числа ампер-витков равным $I \cdot w = 250$ А. В поле «проводники соединены» необходимо установить флажок «Последовательно» (см. рис.2.3).

2.3. Задание граничных условий

После того, как заданы свойства всех блоков необходимо задать граничное условие (ГУ). В задаче магнитостатики есть возможность задать несколько типов граничных условий рис.2.4.

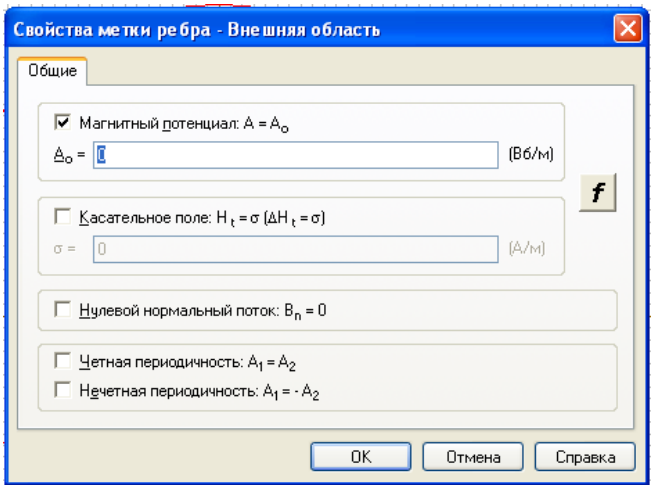


Рисунок 2.4 – Свойства метки ребра (задание граничных условий)

На границе расчетной области или в вершине может быть задано условие Дирихле – наперед известное значение векторного магнитного потенциала $\mathbf{A_0}$. Это условие часто используется для задания нулевого значения на оси симметрии или для указания о полном затухании поля вдали от исследуемого объекта. Однородное условие Неймана на внешней границе означает отсутствие касательной составляющей индукции на границе и применяется для описания плоской магнитной антисимметрии. Однородное условие Неймана является естественным и устанавливается по умолчанию на тех внешних границах, где явно не указано иное ГУ. Граничное условие нулевого нормального потока используется для описания границ подобластей, в которые не проникает магнитный поток (сверхпроводники).

В рассматриваемой задаче следует указать в качестве граничного условия условие Дирихле с полным затуханием магнитного потока на внешней границе расчетной области $\mathbf{A_0}$=0.

2.4. Построение сетки конечных элементов

После того, как были заданы свойства блоков и граничные условия, необходимо построить сетку конечных элементов, нажав на соответствующую кнопку , расположенную в окне инструментов, после чего в автоматическом режиме будет построена сетка конечных элементов (СКЭ) см.рис.2.5, (б).

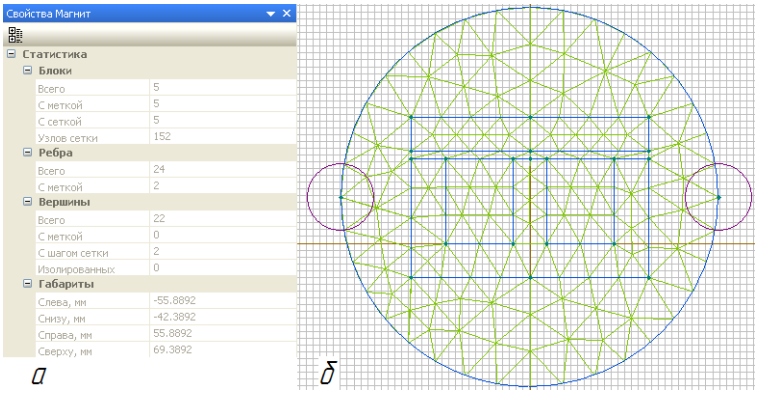


Рисунок 2.5 – Окно свойств геометрической модели (а), сетка конечных элементов (б)

Если при первом построении сетки всплывет окно, предупреждающее о превышении числа узлов сетки (для студенческой версии ELCUT) и сетка не будет построена, необходимо для сокращения числа узлов установить фиксированный шаг дискретизации, например равный 10 мм в вершинах, расположенных на внешней границе, см. рис.2.5 (б). После чего заново запустить построение сетки конечных элементов. В результате должна получиться СКЭ, показанная на рис.2.5 (б). Обратите внимание, что при активации окна документов в окне свойств выводится информация, характеризующая редактируемую геометрию. В свойствах геометрии модели после её разбиения на сетку конечных элементов указывается общее количество узлов. На рис.2.5 их число равно 152. Так как максимальное число узлов в студенческой версии ELCUT ограничивается на уровне 255 штук, то для повышения точности расчета рекомендуется уменьшить шаг

дискретизации в наиболее ответственных местах модели, например, в воздушном зазоре.

2.5. Решение задачи

После построения СКЭ задача может быть решена. Для этого необходимо нажать кнопку запуска решения расположенную в окне задач. После решения задачи ELCUT предложит перейти в постпроцессор для анализа результатов решения. Перейти к просмотру решения можно и нажав кнопку , расположенную в окне задач и доступную после решения. В результате в окне документов появится картина электромагнитного поля, наложенная на геометрию и представляющая собой замкнутые силовые линии магнитного потока. Величина магнитного потока определяется густотой силовых линий. Редактирование картины поля осуществляется после нажатия правой кнопкой мыши по модели и далее «свойства картины поля…», где можно изменить масштаб силовых линий, добавить векторы индукции и напряженности магнитного поля, цветовое отображение и сетку конечных элементов.

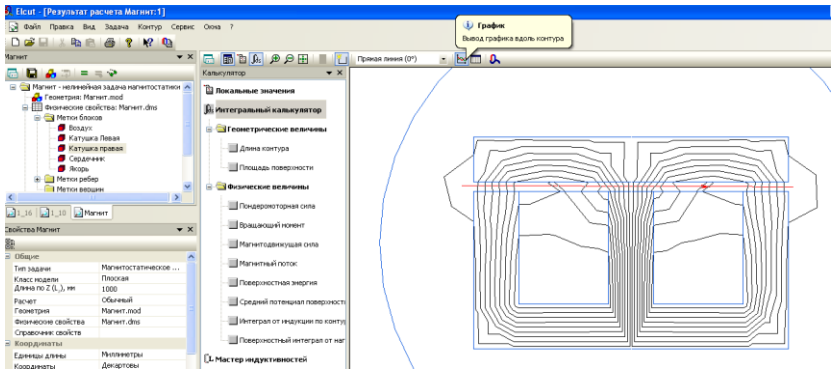


Рисунок 2.6 – Картина линий магнитной индукции

Результатами расчета магнитостатической задачи являются [2]: магнитный потенциал, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, силы, моменты, энергия магнитного поля, потокосцепления, собственные и взаимные индуктивности. Используя инструмент построения ребра в режиме постпроцес-

сора можно построить контур, вдоль которого будет определена величина индукции, напряженности, магнитной проницаемости, энергии или потенциала магнитного поля.

Например, для определения кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре необходимо построить контур, проходящий через воздушный зазор. Затем в окне инструментов нажать на кнопку «график» (рис.2.6). При этом откроется новое окно с кривой распределения магнитной индукции вдоль введенного контура (рис.2.7).

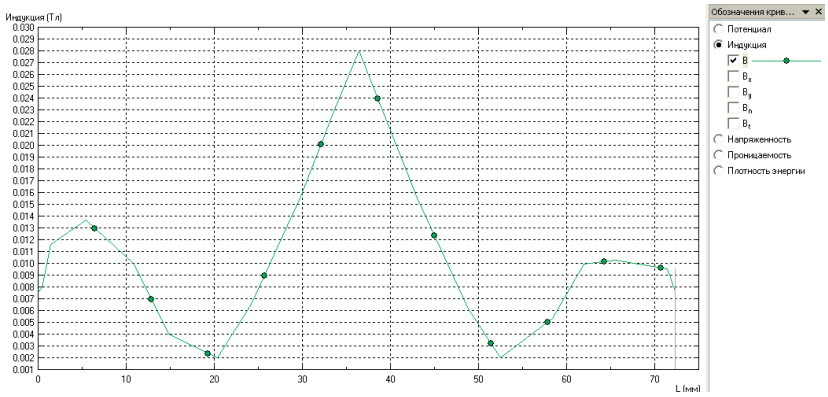


Рисунок 2.7 – Кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре

График на рис2.7 представляет собой зависимость величины магнитной индукции от координаты *x*. Обратите внимание, что в правой части окна имеется возможность выбора интересующего параметра. Кроме того, график может быть отображен относительно осей координатной плоскости (B_x, B_y) или в виде нормальной и тангенциальной составляющей (B_n, B_τ). Из графика видно, что индукция под средним стержнем броневого магнитопровода примерно в два раза выше, чем под крайними стержнями. Это объясняется тем, что такая конструкция симметрична относительно середины среднего стержня и магнитный поток, создаваемый обмоткой в ярме и якоре Ш-образного магнитопровода, разветвляется на две части, замыкаясь при этом по крайним стержням. Вектор магнитной индукции пересекает постро-

енный контур снизу вверх под средним стержнем и сверху вниз – под крайними. Для отображения знака магнитной индукции на графике рис.2.7 необходимо рассматривать нормальную составляющую магнитной индукции или ее составляющие по осям B_x, B_y.

Вид кривой индукции в форме ломаной линии с острыми углами объясняется малым количеством элементов сетки. В коммерческой версии ELCUT число узлов сетки конечных элементов на два порядка выше, чем в студенческой версии, и график индукции имел бы гладкий вид.

Для работы с результатами решения полевой задачи в постпроцессоре имеются инструменты  для определения локальных значений электромагнитного поля (левая иконка) и интегральный калькулятор (правая иконка). Локальное значение – это величина переменных задачи магнитного поля в выбранной точке. Интегральный калькулятор предназначен для интегрирования переменных поля вдоль контура или поверхности, заданных пользователем. На рис.2.6 в правой части окна документов расположено окно калькулятора – список геометрических и физических величин проинтегрированных по заданному контуру. Для определения силы притяжения, создаваемой электромагнитом в отношении якоря необходимо в режиме добавления контура выделить блок якоря, щелкнув по нему левой кнопкой мыши, после чего открыть вкладку «Пондеромоторная сила» интегрального калькулятора. Результатом интегрирования является вектор пондеромоторной силы – её величина и направление в декартовой системе координат.

2.6. Анализ результатов

Зависимость силы притяжения магнита от величины магнитодвижущей силы(МДС – полного числа ампер-витков) источника поля можно найти разными способами. Например, непосредственно изменяя величину МДС в окне задачи (изменять

необходимо в обеих сторонах катушки), после очередного решения задачи фиксируя изменение пондеромоторной силы.

Инструментарий ELCUT позволяет проводить параметрический анализ (в том числе статистический и оптимизационный анализ) с помощью

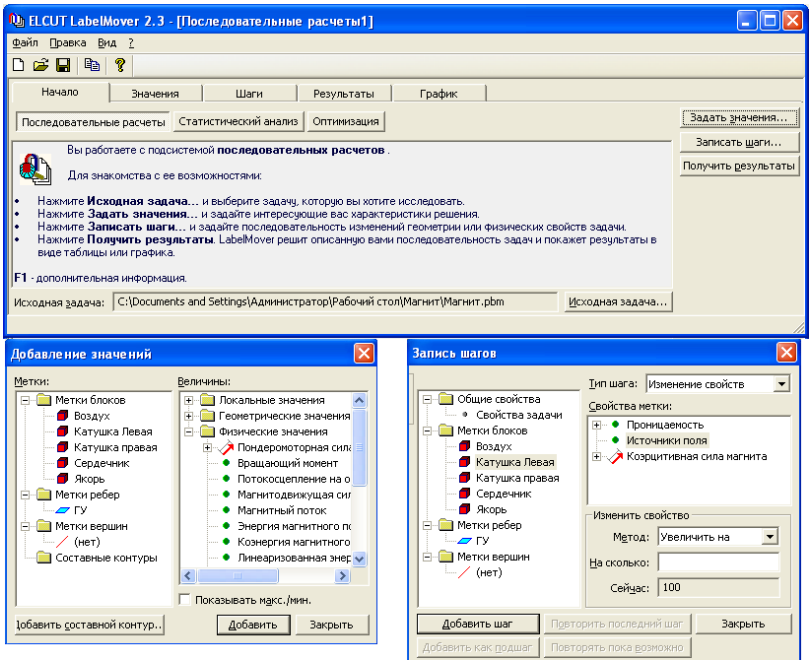


Рисунок 2.8 – Окно параметрического анализа LableMover

инструмента  LableMover, расположенного на панели инструментов.

Найдем искомую зависимость с помощью инструмента LableMover, нажав на соответствующую иконку левой кнопкой мыши. В результате откроется окно, представленное на рис.2.8, в котором есть инструкция пользования инструментом. Для определения искомой зависимости необходимо воспользоваться последовательным расчетом LableMover. Вначале задайте исходную задачу, для чего после нажатия на кнопку «Исходная задача» укажите путь к файлу с расширением **.pbm** , в котором она записана.

Далее необходимо определить анализируемую переменную. Для этого, нажав на кнопку «Задать значения…» в открывшемся окне «Добавление значений» выберите тот блок, для которого будет определяться искомая величина. В рассматриваемом примере – метку «Якорь» в левом окне (см. рис.2.8), а в правом окне необходимо выбрать искомую переменную – Пондеромоторную силу. Для того чтобы построить зависимость пондеромоторной силы от полного числа Ампер-витков (МДС) катушки выберите дополнительно в окне «Добавление значений» блок «Катушка левая» (правое окно) и «Магнитодвижущая сила» (левое окно).

Затем нужно определить шаг изменения значения полного числа ампер-витков. Для этого нажмите на кнопку «Записать шаги». В открывшемся окне (рис.2.8) необходимо активировать блок, соответствующий катушке, например, «Катушка левая». В правом окне установить тип шага «Изменение свойств», «Источники поля», метод изменения – «Увеличить на…», а в окне «На сколько» записать величину, на которую будет увеличиваться полное число ампер-витков, например, на $\Delta I \cdot w = 500$ А. После чего нажмите на кнопку «добавить шаг». Затем нужно в правой катушке увеличить полный ток на такую же, но отрицательную величину (ток течет в другую сторону). Для этого в правом окне выберите блок «Катушка правая», а в окне «На сколько» установите $\Delta I \cdot w = -500$ А, после чего нажмите кнопку «добавить как подшаг».

Число шагов можно задать, открыв закладку «Шаги» и активизировав в ней двойным кликом метку «Шаг 1». В открывшемся окне задайте число – 10…15 шагов.

Количество шагов можно задать иначе: нажимайте кнопку «повторить последний шаг» до тех пор, пока число в окне «Сейчас» не станет больше, заданного. В предлагаемом примере можно ограничиться величиной $I \cdot w = 7000$ А. После чего закройте окно записи шагов и нажмите кнопку «получить результаты».

Подождите, пока ELCUT решит поставленные задачи и откройте вкладку «График». В результате вы получите график зависимости величины пондеромоторной силы от установленного шага магнитодвижущей силы (ампер-витков) (рис.2.9). Эта зависимость нелинейная из-за нелинейности кривой намагничивания электротехнической стали. Из графика может быть определена величина полного числа ампер-витков $I \cdot w$, при котором электромагнит развивает требуемое номинальное усилие (f =390 Н).

Примем за номинальное значение магнитодвижущей силы для рассматриваемой модели контактора значение, соответствующее 8 точке на графике. Выбрав точку на графике в меню LableMover, нажмите на кнопку «просмотреть модель». Откроется модель с заданными физическими свойствами блоков. В окне задач выберете блок, соответствующий катушке и посмотрите чему равно значение полного числа ампер-витков. В рассматриваемом примере $I \cdot w$ = 2000 А. При этом магнит развивает номинальную силу притяжения, равную F = 391 Н.

Из рис.2.10 видно, что насыщение магнитной цепи магнита происходит на 7 – 10 точках кривой. При дальнейшем увеличении магнитодвижущей силы снижается эффективность устройства, так как увеличение тока за счет роста плотности тока в обмотке приведет к резкому увеличению электрических потерь.

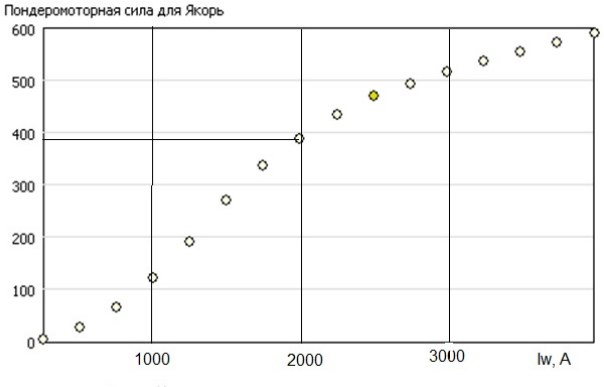


Рисунок 2.9 – Зависимость силы притяжения якоря электромагнита от магнитодвижущей силы

2.7. Расчет параметров электромагнита

На основании полученного решения полевой задачи можно рассчитать конструктивные параметры электромагнита. В качестве примера приведем расчет обмоточных данных катушки.

Из геометрической модели известны значения площади сечения катушки $S_к$, коэффициента заполнения сечения катушки медью $k_з$, полного числа ампер-витков (МДС) $I \cdot w$ и напряжения источника питания U . Число витков катушки w и сечение провода q можно найти, решив систему уравнений для электрической цепи постоянного тока в установившемся режиме:

$$\begin{cases} U = I \cdot R, \\ МДС = I \cdot w, \\ I = j \cdot q, \\ S_k \cdot k_з = q \cdot w, \\ R = \rho \dfrac{l_в \cdot w}{q} \end{cases}$$

где $l_в$ – средняя длина одного витка катушка, ρ – удельное электрическое сопротивление проводника при рабочей температуре, j – плотность тока, ρ – удельное сопротивление проводников катушки. Размерность всех величин в системе «СИ».

Рассчитаем обмоточные данные для Ш-образного электромагнита на основании результатов численного моделирования.

Исходные данные:

- напряжение питания U_s = 12 В,
- коэффициент заполнения медью катушки $k_з$ = 0,5,
- площадь поперечного сечения катушки из геометрической модели $S_k = 500 \cdot 10^{-6}$, м^2.

Плотность тока из системы уравнений:

$$j = \frac{МДС}{S_k \cdot k_з} = \frac{2000}{500 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5} = 8 \cdot 10^6 \; A/м^2$$

Число витков катушки:

$$w = \frac{U}{\rho \cdot l_в \cdot j} = \frac{12}{1/41 \cdot 10^{-6} \cdot 0,18 \cdot 8 \cdot 10^6} = 342 \text{ витка.}$$

Где $\rho = \frac{1}{41} \cdot 10^{-6}, Ом \cdot м$ – удельное электрическое сопротивление меди;

$l_в = 0,18 \;\; м$ – средняя длина витка катушки из геометрической модели:

$l_{вит} = 2 \cdot L_z + \pi \cdot (C + B), м$;

$j = 8 \cdot 10^6$, А/м^2 – принятая плотность тока в обмотке[1].

Сечение проводника:

$$q = \frac{МДС}{w \cdot j} = \frac{2000}{342 \cdot 8 \cdot 10^6} = 0,73 \cdot 10^{-6}, м^2$$

Принимаем сечение проводника марки ПЭТ-155 ближайшее к рассчитанному из стандартного ряда: q = 0,708 мм^2 (Приложение П 3).

Для проверки определим коэффициент заполнения сечения обмотки медью:

$$k_з = \frac{q \cdot w}{S_k} = \frac{0,708 \cdot 342}{500} = 0,484$$

Ранее коэффициент заполнения был принят равным $k_з$ = 0,5.

Сопротивление катушки:

[1] Рекомендуемая плотность тока зависит от множества факторов, таких как: вид катушек (сосредоточенные, распределенные), коэффициента заполнения сечения катушки медью, качества пропитки, площади поверхности охлаждения и т.п. Более точные результаты дает численное моделирование тепловой задачи или экспериментальные исследования на физической модели.

$$R = \rho \frac{l_в \cdot w}{q} = \frac{1}{41} \cdot 10^{-6} \frac{0{,}18 \cdot 342}{0{,}7080 \cdot 10^{6}} = 2{,}12 \quad Ом$$

Сила тока:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{2{,}12} = 5{,}66 \quad A$$

Плотность тока, окончательно:

$$j = \frac{I}{q} = \frac{5{,}66}{0{,}7080 \cdot 10^{-6}} = 7{,}994 \cdot 10^{6} \; A/м^2$$

3. Моделирование нестационарного магнитного поля

Электромеханические преобразователи и электротехнические устройства, принцип действия которых основан на использовании энергии магнитного поля имеют в своем устройстве катушки, намотанные, как правило, на ферромагнитный сердечник (в высокочастотных устройствах сердечник может отсутствовать). Например, простейший однофазный трансформатор имеет в своем устройстве две обмотки (катушки) – первичную и вторичную, намотанные на стержни замкнутой магнитной системы. Электрическая энергия из первичной обмотки посредством магнитного поля передается во вторичную обмотку. В нормальном режиме работы активные части трансформатора подвергаются ряду физических воздействий: переменному электрическому и магнитному полю, тепловому и механическому. Проектирование трансформатора осуществляется в определенной последовательности, обеспечивающей наибольшую эффективность. При этом определяются изоляционные расстояния между активными частями, габаритные размеры магнитной системы и обмоток, тип обмоток высшего и низшего напряжения, количество витков в катушках, конфигурация и расположение проводников в обмотке, тепловое состояние активных частей, механические силы в обмотках и т.д.

При эксплуатации трансформатора неизбежно возникают аварийные ситуации, например, короткое замыкание. Процесс короткого замыкания по сравнению с номинальным режимом сопровождается многократным увеличением тока в обмотках трансформатора, что приводит к повышенному термическому воздействию и ударным механическим силам в обмотках. Правильно рассчитанный трансформатор должен обладать запасом прочности к этим воздействиям, вследствие чего на этапе проектирования проводится проверка обмоток, включающая в себя [21]:

1. Определение наибольшего установившегося и наибольшего ударного тока короткого замыкания;
2. Определение механических сил между обмотками и их частями;
3. Определение механических напряжений в изоляционных опорах, междукатушечных конструкциях и в проводах обмоток;
4. Определение температуры обмоток при коротком замыкании.

3.1. Короткое замыкание на выводах трансформатора

Требования, предъявляемые к характеристикам трансформатора в нормальных и аварийных режимах работы, регламентируются государственным стандартом [7].

Установившейся ток короткого замыкания (действующее значение) может быть определен как, (А) [7]:

$$I_к = \frac{U_{ном}}{\left(z_k + z_c\right)} \qquad (3.1)$$

где $U_{ном}$ – номинальное фазное напряжение (В), z_k – фазное сопротивление короткого замыкания, z_c – фазное сопротивление короткого замыкания сети.

Действующее значение наибольшего установившегося тока короткого замыкания для трансформаторов мощностью менее 1 МВА (А):

$$I_к = \frac{I_{ном}}{u_к}, \qquad (3.2)$$

где $u_к$ – напряжение короткого замыкания (о.е.).

В начальный момент времени из-за наличия апериодической составляющей ток короткого замыкания может значительно превысить установившееся значение. Максимальное (ударное) значение тока короткого замыкания (А):

$$I_{k.\max} = \sqrt{2} \cdot k_{\max} \cdot I_к \qquad (3.3)$$

где k_{max} – коэффициент, учитывающий максимально возможную апериодическую составляющую тока короткого замыкания:

$$k_{\max} = 1 + e^{-\pi \frac{u_a}{u_p}}, \qquad (3.4)$$

где $u_a = r_k$ – активная составляющая номинального напряжения короткого замыкания, выраженная в относительных единицах (о.е.);

$u_p = x_k$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, о.е.

Дифференциальное уравнение, описывающего короткое замыкание трансформатора:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = r_k + L_k \frac{di_{1k}}{dt} \qquad (3.5)$$

Ток короткого замыкания i_k, полученный в результате решения уравнения (3.5), состоит из двух составляющих: установившегося тока i_{ky} и свободного (апериодического) тока i_{kc}.

$$i_k = i_{ky} + i_{kc}.$$

Установившийся ток

$$i_{ky} = \sqrt{2} I_k \sin(\omega t + \psi - \varphi_k); \qquad (3.6)$$

ψ – начальная фаза напряжения, при которой происходит короткое замыкание;

$$\varphi_k = arctg \frac{x_k}{r_k}.$$

Свободный ток i_{kc} определяется выражением

$$i_{kc} = (i_{kc} + i_{н0}) \cdot e^{-\frac{r_k}{L_k}(t - t_k)}, \qquad (3.7)$$

где $i_{н0}$ – мгновенное значение тока нагрузки в момент короткого замыкания

$$i_{н0} = \sqrt{2} I_{ном} \sin(\psi - \varphi_{нг}) \qquad (3.8)$$

$\varphi_{нг} = \arccos(\cos\varphi_{нг})$;

$L_k = \dfrac{x_k}{2\pi f}$, о.е.;

t_k – момент короткого замыкания

Полный ток короткого замыкания в функции времени t определится выражением:

$$i_k = \sqrt{2}\cdot I_{ном}\cdot\sin(\omega\cdot t+\varphi_{нг})+\sqrt{2}\cdot I_k\cdot\sin\left[\omega\cdot(t-t_k)+\psi-\varphi_k\right]-$$
$$-\left[\sqrt{2}\cdot I_k\sin(\psi-\varphi_k)-\sqrt{2}\cdot I_{ном}\sin(\psi-\varphi_{нг})\right]\cdot e^{-\frac{r_k\cdot(t-t_k)}{L_k}} \qquad (3.9)$$

При $t<t_k$ второе и третье слагаемые в выражении (3.9) должны быть приняты равными нулю (номинальный режим).

Учитывая, что установившийся ток короткого замыкания значительно больше номинального ($I_k>>I_{ном}$), номинальным током и последним слагаемым в квадратных скобках можно пренебречь. Тогда выражение для мгновенных значений тока короткого замыкания можно записать в упрощенном виде:

$$i_k = \sqrt{2}\cdot I_k\cdot\sin\left[\omega\cdot(t-t_k)+\psi-\varphi_k\right]-$$
$$-\left[\sqrt{2}\cdot I_k\sin(\psi-\varphi_k)\right]\cdot e^{-\frac{r_k\cdot(t-t_k)}{L_k}} \qquad (3.10)$$

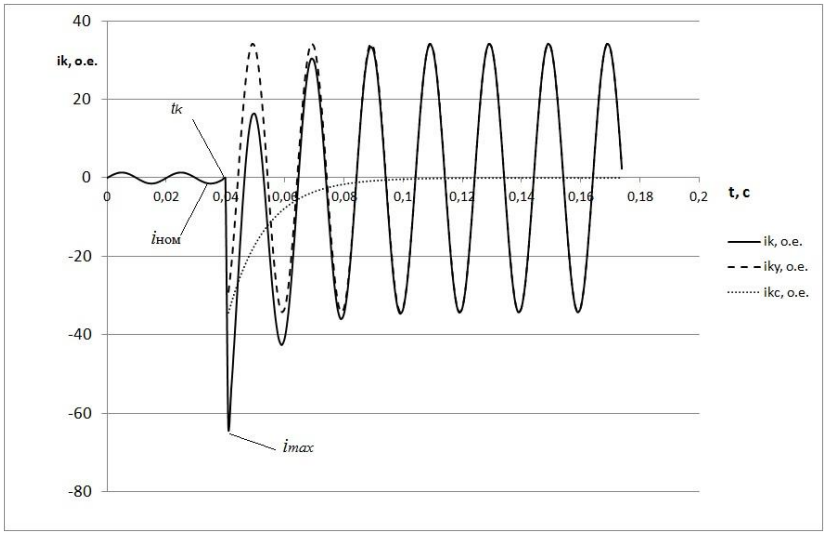


Рисунок 3.1 – Переходный процесс при коротком замыкании

Апериодическая (свободная) составляющая ($i_{кс}$) тока короткого замыкания имеет существенное значение в цепях, для которых выполняется условие: $\omega L_k >> r_k$, то есть индуктивное сопротивление много больше активного. Причина наличия апериодической составляющей в полном токе заключается в присутствии в цепи индуктивности $L_к$ и запасенной в ней энергии $\frac{L_k i^2}{2}$, которая не может измениться скачком.

Как следует из выражения (3.10) максимальное значение апериодической составляющей будет при условии $\psi - \varphi_k = \pm\pi/2$. При этом будет и максимальное значение ударного тока. Ток достигнет максимума через половину периода после короткого замыкания (см.рис.3.1).

3.2. Электродинамические (пондеромоторные) силы.

При расчете электродинамических усилий (ЭДУ), действующих на обмотку, обычно раздельно оценивают осевые и радиальные силы рис.3.2.

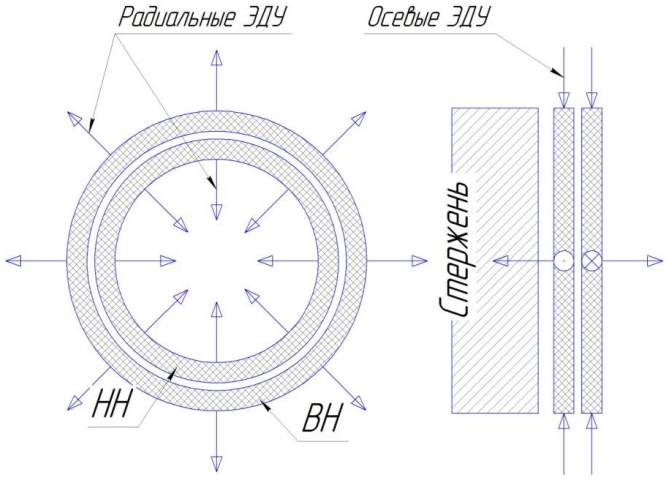


Рисунок 3.2 – Электродинамические усилия, действующие на обмотку

На рис.3.2 видно действие ЭДУ на обмотку: осевые силы сжимают обмотку в осевом направлении, радиальные силы оказывают растягивающее воздействие на внешнюю обмотку, а проводники внутренней обмотки – сжимают и изгибают. Очевидно, что осевые силы оказывают давление на межвитковую и межкатушечную изоляцию обмотки, для которой необходимо обеспечить необходимую прочность на сжатие. Воздействие радиальных сил различно для внешней и внутренней обмоток. В наиболее неблагоприятных условиях оказываются проводники внутренней обмотки, так как при сжатии витка в радиальном направлении возникают изгибающие усилия, при этом возможно разрушение монолитности обмотки и повреждение изоляции.

Механические силы возникают в результате взаимодействия тока в обмотке с магнитным полем обмоток. Расчет сил, так же как и расчет поля обмоток, представляет сложную задачу. Использование численных методов позволяет значительно упростить расчет, повысив при этом его точность.

Так как ЭДУ обмоток достигают наибольшей величины в режиме короткого замыкания, то для моделирования целесообразно использовать нестационарную постановку задачи.

3.3. Постановка задачи численного моделирования нестационарного магнитного поля

В общем случае задача нестационарного магнитного поля используется для анализа магнитного поля, возбуждаемого токами произвольной формы в нестационарных режимах. Подобные задачи возникают при расчете электрических устройств и машин постоянного и переменного тока. Результатом решения задач данного типа является: изменение во времени магнитной индукции, индуцированные и сторонние токи, механические силы и моменты, индуктивности и потокосцепления. Нестационарное магнитное поле может моделироваться совместно с присоединенной электрической цепью.

В качестве объекта моделирования выберем однофазный трансформатор малой мощности с броневой конструкцией магнитопровода. Эскиз продольного разреза такого трансформатора показан на рисунке 3.3. Отметим, что трансформатор имеет вертикальную ось симметрии. Поэтому моделировать достаточно только одну половину.

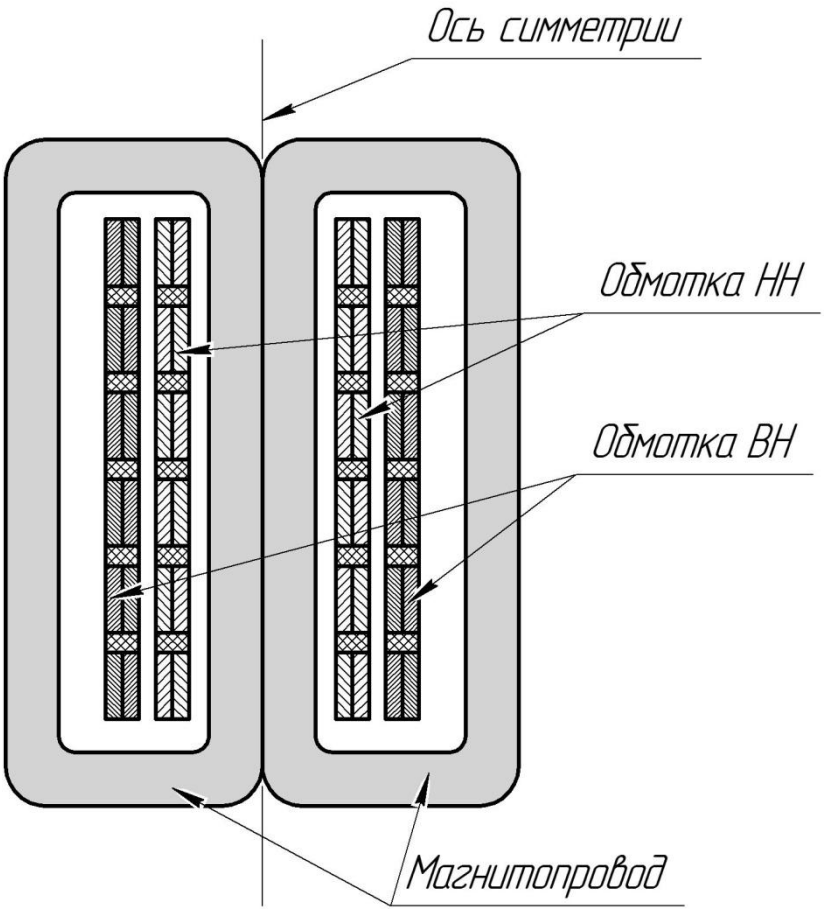


Рисунок 3.3 –Эскиз продольного разреза броневого трансформатора

Для моделирования нестационарного магнитного поля необходимо создать задачу ELCUT и выбрать соответствующий тип решателя рис.3.4.

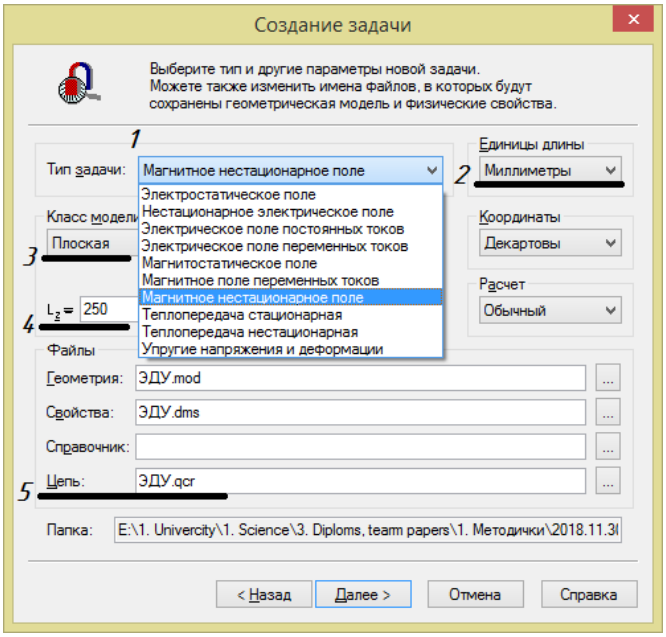


Рисунок 3.4 – Создание задачи нестационарного магнитного поля в программной среде ELCUT

В качестве единиц длины удобно использовать миллиметры. Выберете класс модели «Плоская». При нестационарной постановке задачи магнитного поля в программной среде ELCUT имеется возможность подключать к блокам модели внешнюю электрическую цепь. Для того чтобы моделировать внешнюю электрическую цепь необходимо при создании задачи в разделе «Цепь» выбрать уже имеющийся файл, либо указать название для создания нового файла внешней электрической цепи. В данной работе внешняя цепь отсутствует.

Далее необходимо установить временные параметры задачи рис.3.5. Здесь указывается конечный момент времени и требуемая временная дискретизация решения (шаг). В примере это величины 0,25 и 0,001 секунды соответственно. Решение начинается с момента времени $t = 0$ с. Для параметров, заданных в примере (рис.3.5), ELCUT решит 250 задач.

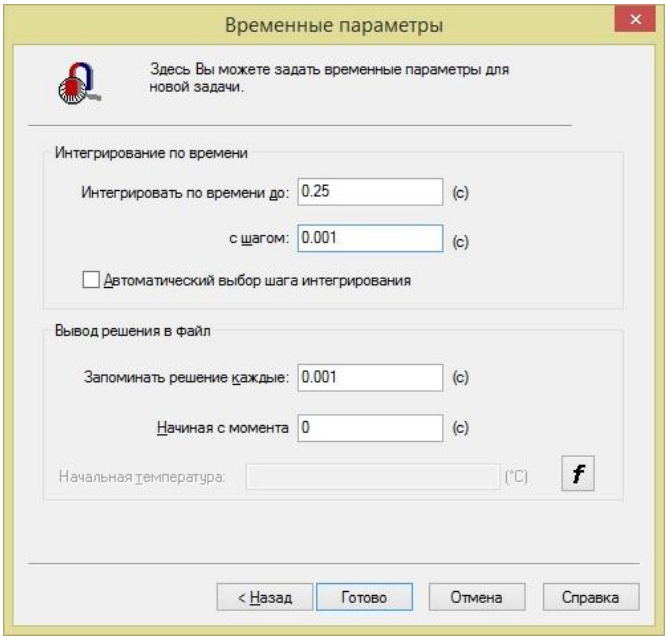


Рисунок 3.5 – Временные параметры задачи нестационарного магнитного поля

Из-за ограничения по числу узлов сетки для студенческой версии программы, рассматриваемая модель имеет значительные упрощения.

В качестве геометрической модели используем половину магнитной системы трансформатора – стержень, на котором установлены обмотки – высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения. На рис.3.6 представлена геометрическая модель с размерами.

Магнитопровод трансформатора шихтованный из листов электротехнической стали. Поэтому, активировав метку блока магнитопровода, необходимо задать в поле «магнитная проницаемость» нелинейную зависимость используемой стали, например, основную кривую намагничивания электротехнической стали 2013 (Приложение П2).

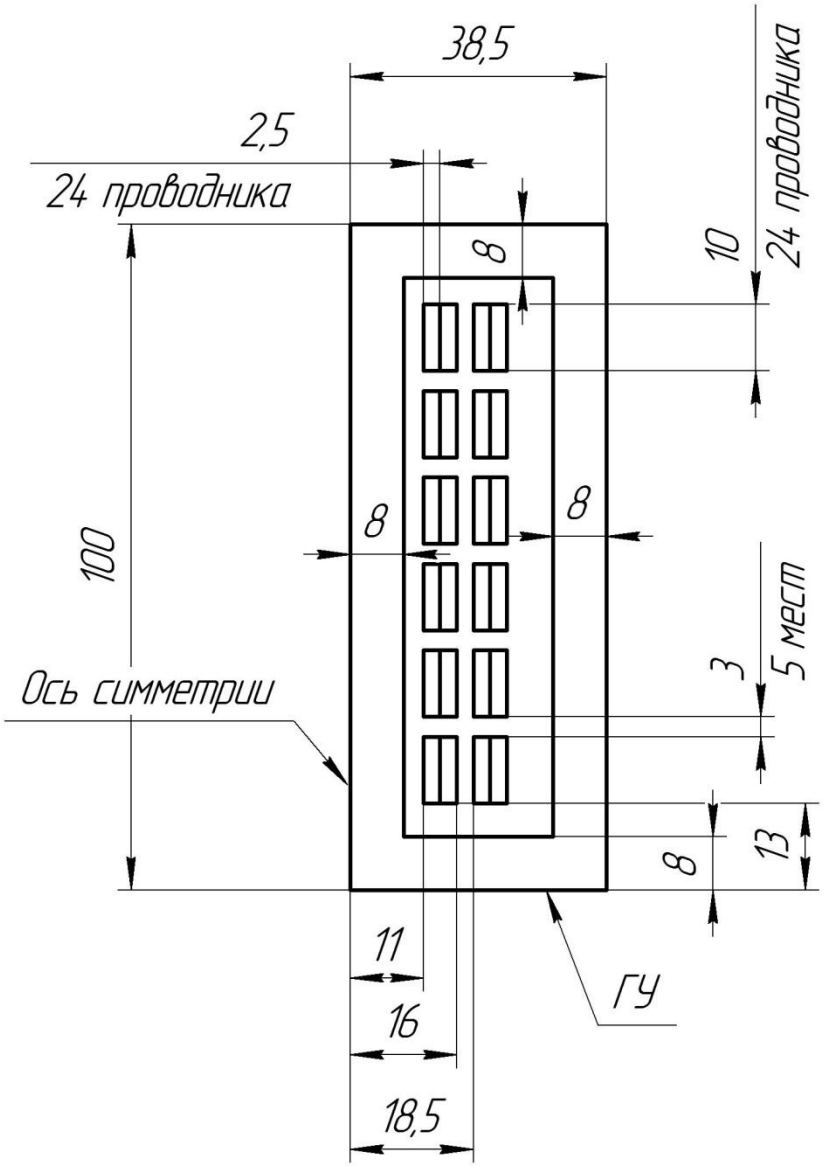


Рисунок 3.6 – Геометрическая модель трансформатора

Остальные блоки модели – медные проводники и воздушное пространство имеют относительную магнитную проницаемость равную $\mu_в = \mu_м = 1$.

Удельная электрическая проводимость меди

$\sigma = 41 \cdot 10^6$, 1/Ом·м.

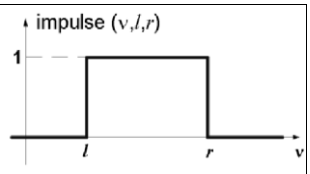
Обмотки рассматриваемого трансформатора – одноходовые винтовые, намотанные плашмя прямоугольным проводом. Большая сторона $b = 10$ мм, меньшая сторона провода – $a = 2{,}5$ мм. Один виток состоит из двух параллельных проводников, в катушке 6 витков. Вторичная обмотка представлена в виде приведенной к первичной, и имеет такие же геометрические размеры, и такое же количество витков, как первичная $w_2' = w_1$.

В качестве источников поля в нестационарных задачах могут быть заданы плотность тока или полное число ампер витков в функции времени. Для этого в ELCUT имеется возможность задавать арифметические выражения, в которых могут использоваться числовые константы (например: 125, 1e12, .E-2), знаки арифметических операций (+, -, /, *, ^), встроенные функции (например: abs – абсолютное значение, sin – синус, exp () экспонента и т.д.), переменные (*t* – время; *x, y, r, phi* – координаты) [2]. Некоторые встроенные функции представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Встроенные функции ELCUT

Название	Формула	Описание
sin	sin(α)	Синус аргумента. **Аргумент задается в градусах.**
exp	exp(α) = e^{α}	Экспонента аргумента. При вычислении функции может возникнуть ошибка переполнения.

impulse	$impulse(\nu,l,r)=\begin{cases}0, & если\ \nu<l\\ 1, & если\ l\le\nu\le r\\ 0, & если\ \nu>r\end{cases}$	 Импульс на отрезке [l,r]. Функция имеет три аргумента, третий аргумент должен быть не меньше второго. Функция принимает значение 1, когда первый её аргумент лежит на отрезке, концы которого определяют второй и третий аргументы и принимает значение 0 в остальных случаях.
sqrt	$sqrt(\alpha)=\sqrt{\alpha}$	Квадратный корень из аргумента. Аргумент должен быть не отрицателен.

В рассматриваемом примере ток короткого замыкания с момента времени $t = t_k$ изменяется по затухающей синусоидальной функции, представленной выражением (3.9). В интервале времени [0; t_k] ток равен номинальному току нагрузки

$$i = \sqrt{2} \cdot I_{ном} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{нг}) \qquad (3.11)$$

Для того, чтобы смоделировать короткое замыкание на зажимах трансформатора в момент времени t_k зададимся следующими начальными условиями и значениями параметров:

t_0 = 0 – начало процесса;

t_k = 0,03 с – момент начала короткого замыкания;

t_{k1} = 0,15 с – момент окончания короткого замыкания;

$j_{ном}=4\cdot10^6$, А/м^2 – номинальная плотность тока в обмотке;

Напряжение короткого замыкания и соответствующие сопротивления (полное, активное и реактивное)

$u_k=z_k$=0,041, о.е.

$u_{ka}=r_k$ =0,01, о.е.

$u_{kp}=x_k$ =0,04, о.е.

Коэффициент мощности нагрузки

$\cos\varphi_{нг}=1$

$\varphi_{нг}=\arccos(\cos\varphi_{нг})=0$;

Рассчитаем действующее значение установившегося тока короткого замыкания и соответствующую ему плотность тока в обмотке по выражению (3.2)

$$I_k = J_k = \frac{1}{u_k} = \frac{1}{0,041} = 24,3,\ o.e.$$

Короткое замыкание наиболее опасно, когда выполняется условие

$$\psi - \varphi_k = -\pi/2 .$$

Для этого значения и следует моделировать процесс.

$$L_k = \frac{x_k}{2\pi f} = \frac{0,04}{2\pi\cdot 50} = 0,000127,\ o.e.$$

В свойствах блока катушек первичной обмотки в соответствии с выражением (3.9) запишем следующее выражение:

$$j = 4e6\cdot sqrt(2)\cdot\sin(360\cdot 50\cdot t + 0) +$$
$$+(24.3e6\cdot\sin(360\cdot 50\cdot t - pi/2) -$$
$$-(sqrt(2)\cdot 24.3e6 - sqrt(2)\cdot 4e6)\cdot\exp(-0.01\cdot(t-0.03)/0.000127))\cdot$$
$$\cdot impulse(t, 0.03, 0.15)$$

(3.12)

В выражении (3.12) токи заменены соответствующими плотностями тока. Это не меняет качественную картину переходного процесса, а значения полных токов в проводниках мож-

но увидеть в результатах расчета, используя «Интегральный калькулятор» ELCUT.

В проводниках вторичной обмотки также необходимо задать плотность тока. Отличие состоит в том, что ток здесь течет в противоположном направлении. Следовательно, правую часть уравнения (3.12) необходимо взять в скобки и перед ней поставить знак «минус». Напомним, что при моделировании процесса мы используем приведенный ток вторичной обмотки.

Значения, входящие в выражение (3.12) пояснены на следующем рисунке.

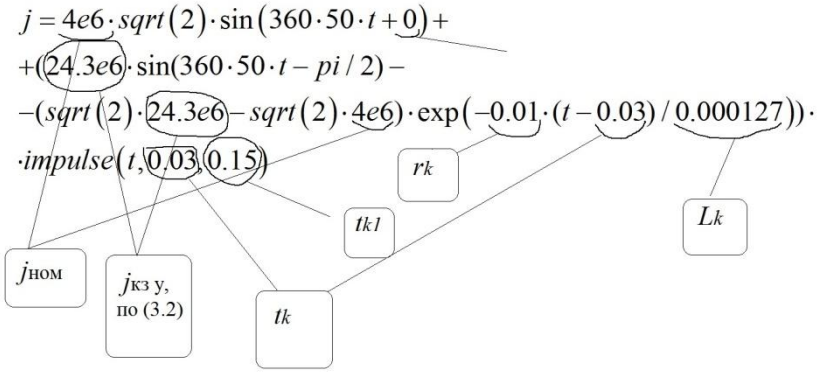


Рисунок 3.7 – Параметры, входящие в выражение (3.12)

После того, как были заданы физические свойства всех блоков геометрической модели, источники поля и граничные условия, необходимо построить сетку конечных элементов. В случае превышения числа узлов сеточной модели установленным ограничением студенческой версии ELCUT (255 узлов) необходимо изменить шаг дискретизации сеточной модели. Результатами решения задачи нестационарного магнитного поля являются: картины магнитного поля (магнитной индукции, напряженности магнитного поля и т.д.), омические потери в проводниках с заданной проводимостью, пондеромоторные силы и т.п. для каждого шага временной дискретизации.

3.4. Результаты решения задачи нестационарного магнитного поля

В постпроцессоре имеется возможность анализировать локальные или интегральные значения параметров (рис.3.8).

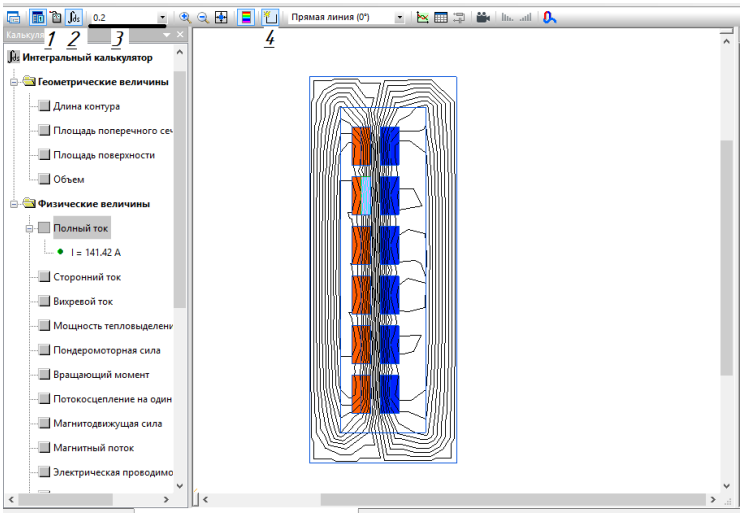


Рисунок 3.8 – Картина магнитного поля. (1) – локальные значения, (2) – интегральные значения, (3) – выбор шага по времени, (4) – добавление контура интегрирования

Изменяя значения в строке 3 рис.3.8, имеется возможность анализировать картины магнитного поля, соответствующие выбранному моменту времени.

Далее, в режиме добавления контура (4) выберете проводник обмотки и выведите на экран интегральные значения (2) в разделе «физические величины» выбрав, например, «Полный ток» появится мгновенное значение тока проводника на заданном временном шаге. Для активации кривой переходного процесса по току необходимо нажать правой кнопкой мыши по интегральной величине «Полный ток» и в появившемся окне выбрать «График по времени». После чего откроется зависимость тока выбранного проводника от времени, рис.3.9. Из представленного графика видно наличие апериодической составляющей

в полном токе и многократное превышение величины тока короткого замыкания над номинальным значением.

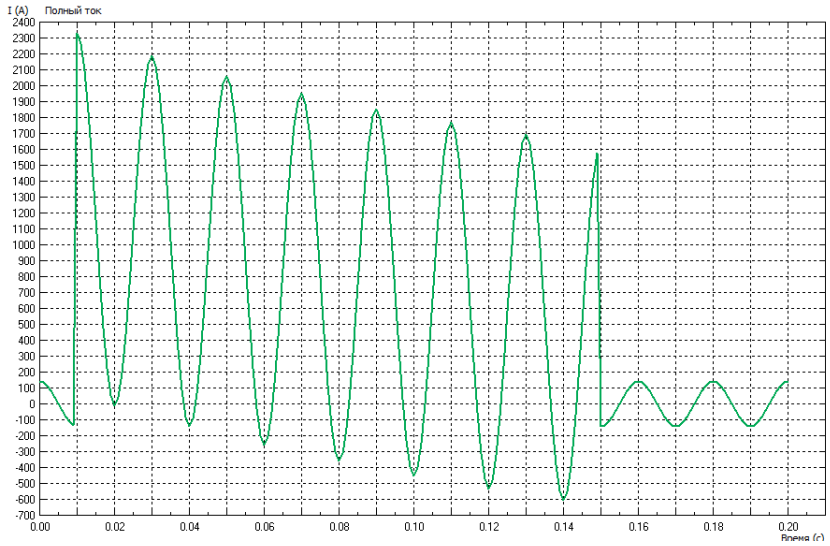


Рисунок 3.9 – Переходный процесс по току

Аналогичным образом выберите зависимость силы, действующей на выбранный проводник, в зависимости от времени рис.3.8.

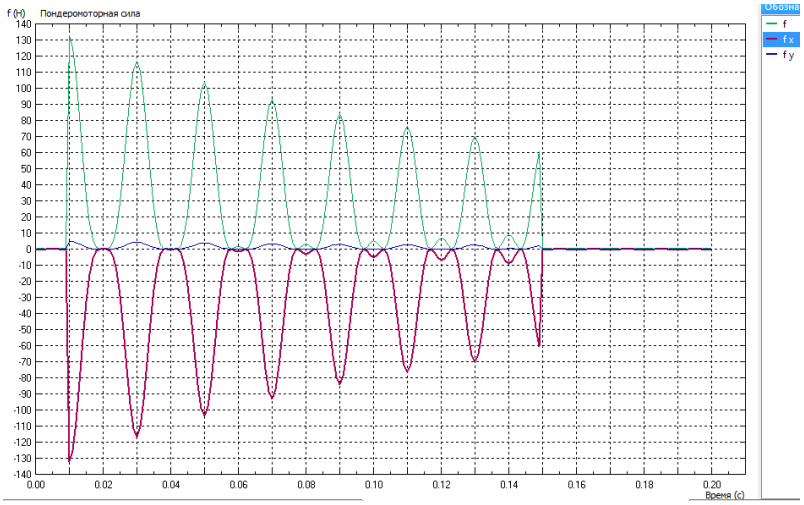


Рисунок 3.10 – Силы, действующие на проводник в зависимости от времени

На рис.3.10 представлены силы, действующие по осям *x*, *y* и величина полной силы. Из графика видно, что радиальная сила значительно больше осевой, а в номинальном режиме по сравнению с режимом короткого замыкания этими силами можно пренебречь. Наибольшей величины ЭДУ достигают в первоначальный момент времени, когда максимален ток короткого замыкания. Радиальная сила направлена к стержню и оказывает сжимающее действие на виток, в момент прохождения тока через ноль сила также равна нулю, после чего снова возрастает в том же направлении. Частота действия силы равна частоте тока и равна 50 Гц.

4. Моделирование магнитного поля переменных токов

Задача магнитного поля переменных токов используется для расчета магнитных полей, возбужденных токами, синусоидально изменяющимися во времени и, наоборот, для расчета токов, индуцированных переменным магнитном полем в проводящей среде (вихревых токов). Подобные задачи возникают при расчетах индукторов (в том числе систем индукционного нагрева), соленоидов, электрических машин и других устройств.

4.1. Задача магнитного поля переменных токов в ELCUT

Анализ магнитного поля переменных токов состоит в расчете электрического и магнитного поля, возбужденного приложенными переменными (синусоидально изменяющимися во времени) токами или внешним переменным полем.

Изменение поля во времени предполагается синусоидальным. Все компоненты поля и электрические токи изменяются как

$$z = z_0 \cos(\omega t + \varphi_z)$$

где z_0 – амплитудное значение, φ_z – фазовый угол, ω – угловая частота.

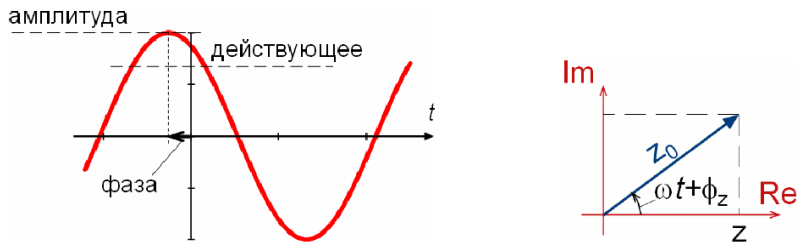


Рисунок 4.1 – Гармонически изменяющаяся во времени величина

Источником поля в задачах магнитного поля переменного токов являются синусоидально изменяющиеся во времени токи, представленные в виде полного числа ампер-витков или плотности тока. Кроме того, задав ненулевую проводимость выбранно-

го блока, имеется возможность использовать в виде источника поля напряжение. Магнитное поле переменных токов может моделироваться совместно с присоединенной электрической цепью. Цепь содержит произвольное количество пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, катушек) соединенных между собой, с источниками тока и напряжения, а также с массивными проводниками, находящимися в магнитном поле. В плоской задаче падение напряжения задается на единицу глубины модели, в осесимметричном случае напряжение задается на один виток проводника. Ненулевое напряжение, приложенное к проводнику, в осесимметричной задаче означает, что проводник имеет радиальный разрез, к противоположным сторонам которого приложено напряжение. На практике эту возможность удобно применять для описания известного напряжения, приложенного к кольцевой обмотке с массивными проводниками. В этом случае реальное напряжение на зажимах обмотки следует разделить на число еѐ витков. Нулевое приложенное напряжение означает, что концы проводника соединены накоротко.

Одним из решений задачи магнитного поля переменных токов может быть определение магнитных потерь в электрических машинах.

Магнитные потери, или, как их чаще называют, потери в стали возникают в участках магнитопровода с переменным магнитным потоком: статорах асинхронных и синхронных машин и якорях машин постоянного тока.

4.2. Потери в стали электрических машин. Уравнение Штейнмеца

Потери в стали обычно разделяют на две основные составляющие: потери на перемагничивание и вихревые токи. Они зависят от марки стали, толщины листов магнитопровода, частоты перемагничивания и индукции. На них оказывают влияние также различные технологические факторы. В процессе штамповки листов магнитопровода образуется наклеп, который изменяет структуру стали по кромкам зубцов и увеличивает потери

на гистерезис. Потери на вихревые токи возрастают в результате замыканий части листов магнитопровода между собой, возникающих из-за заусенцев, которые образуются при опиловке пазов, при забивке пазовых клиньев, из-за чрезмерной опрессовки магнитопровода и ряда других причин [12, 13]. Для борьбы с вихревыми токами применяются шихтованные в направлении протекании вихревых токов конструкции магнитопровода. Учет потерь в такой конструкции магнитопровода является задачей нетривиальной.

В инженерной практике для определения потерь на перемагничивание и вихревые токи при *синусоидальной форме кривой магнитного потока* используют полуэмпирическую формулу:

$$\Delta P_{cm} = k_m \left(\frac{\Delta P_{y\partial}}{m} \right)_{1/50} \cdot B^2 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} \cdot m_c \qquad (4.1)$$

где k_m – поправочный коэффициент, учитывающий увеличение потерь, вызванных технологическим процессом сборки сердечников, рекомендуется принимать поправочный коэффициент из диапазона k_m = 1,4…2 в зависимости от мощности машины, геометрии стальных участков (зубцы, ярмо) и т.п.;

$\left(\frac{\Delta P_{y\partial}}{m} \right)_{1/50}$ – удельные потери в стали на единицу массы при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц;

B – амплитудное значение индукции;

f – частота;

m_c – масса сердечника.

Уравнение (1) основано на упрощенном инженерном подходе, не предполагающем разделение потерь на потери от вихревых токов и гистерезис.

Основные потери в стали в асинхронных двигателях (АД) рассчитываются только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = s \cdot f_1$ (s – скольжение, f_1 – частота сети) в режимах, близких к номинальному, очень мала и

потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны.

Основанием данной методики являются представленные производителем данные по удельным потерям, полученным в результате измерения удельных потерь в образце электротехнической стали в аппарате Эпштейна по ГОСТ 12119-80 [6].

Кроме того, в инженерных расчетах также используется подход, основанный на уравнении Штейнмеца [4]:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_h + \Delta P_e = k_h \cdot f^{\beta} \cdot B^{\alpha} + k_e \cdot f^2 \cdot B^2 \qquad (4.2)$$

где ΔP_h – потери на перемагничивание, ΔP_e – потери на вихревые токи.

Эмпирические коэффициенты (обычно не целочисленные) α, β лежат в пределах: $2<\alpha<3$, $1<\beta<3$.

k_h – поправочный коэффициент потерь на гистерезис, k_e – поправочный коэффициент потерь на вихревые токи.

Расчеты и экспериментальные данные показывают значительное увеличение потерь при несинусоидальном магнитном потоке и значительном насыщении магнитной системы и т.д.

Для учета этих дополнительных факторов, существенно влияющих на результат, уравнение (4.2) дополняется третьим слагаемым – так называемыми дополнительными (избыточными) потерями:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_h + \Delta P_e + \Delta P_{ex} = k_h \cdot f^{\beta} \cdot B^{\alpha} + k_e \cdot f^2 \cdot B^2 + \\ + k_{ex} \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \qquad (4.3)$$

где k_{ex} – поправочный коэффициент добавочных потерь.

В общем случае энергия, расходуемая на перемагничивание, чаще всего определяется по площади квазистатической петли гистерезиса (S_h) и за f циклов при удельной плотности материала γ может быть найдена по:

$$\Delta P_h = \frac{f}{4\pi \cdot \gamma} \oint BdH = \frac{S_h \cdot f}{4\pi \cdot \gamma} \qquad (4.4)$$

Поправочный коэффициент потерь на вихревые токи может быть вычислен для материала с удельным электрическим сопротивлением ρ и толщиной листа $\Delta_{ст}$:

$$k_e = \frac{(\pi \cdot \Delta_{cm})^2}{6 \cdot \rho \cdot \gamma} \tag{4.5}$$

Поправочный коэффициент потерь на гистерезис может быть определен как:

$$k_h = \frac{\Delta p_{cm}}{B^2 \cdot m \cdot f} - \frac{\pi^2 \cdot \Delta_{cm}^2 \cdot f}{6 \cdot \rho \cdot \gamma} \tag{4.6}$$

где $\Delta p_{ст}$ – удельные потери в стали (Вт/кг).

Точное определение потерь аналитическими методами затруднено в связи со сложным распределением магнитной индукции по сечению машины. Численное моделирование позволяют уточнить величину и локализацию этих потерь.

4.3. Решение задачи магнитного поля в программной среде ELCUT

При создании задачи магнитного поля переменных токов необходимо указать частоту, класс модели и длину модели в осевом направлении рис.4.2.

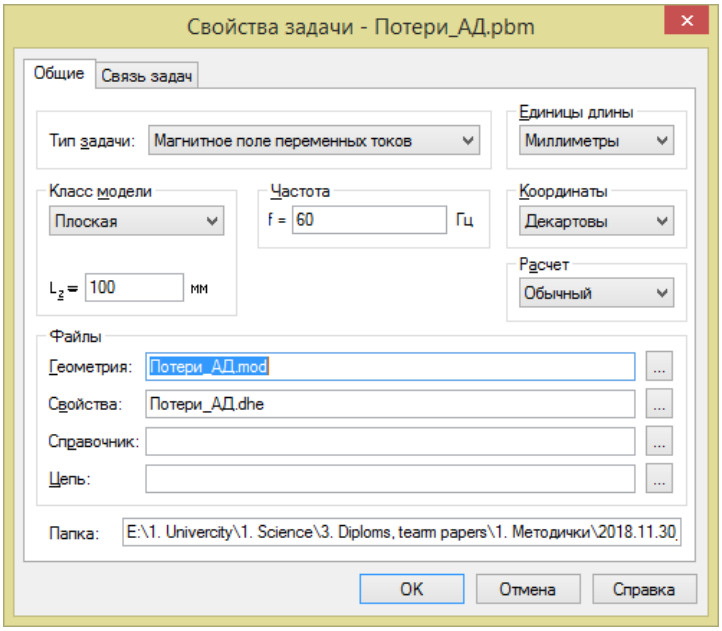


Рисунок 4.2 – Свойства задачи магнитного поля переменных токов

При решении задачи магнитного поля переменных токов в программной среде ELCUT необходимо задать свойства материалов всех блоков рассматриваемой геометрической модели. На рис.4.3 представлено окно свойств метки блока в задаче магнитного поля переменных токов.

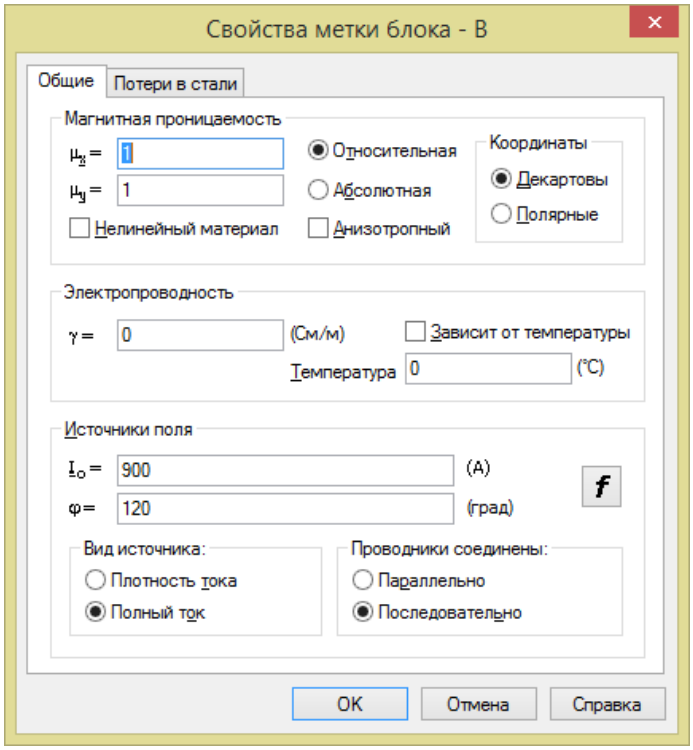


Рисунок 4.3 – Окно метки блоков задачи магнитного поля переменных токов

Как и в задаче магнитостатического магнитного поля необходимо указать магнитную проницаемость рассматриваемого блока модели, электропроводность и задать величину и вид источника поля. Блоки с ненулевой электропроводностью соответствуют массивным проводникам и, под воздействием переменного магнитного поля, в них будут наводиться вихревые токи. Для моделирования потерь в шихтованных сердечниках электрических машин необходимо задать нулевую электропроводность, а во вкладке «Потери в стали» рис.4.3 задать коэффициенты уравнения Штейнмеца.

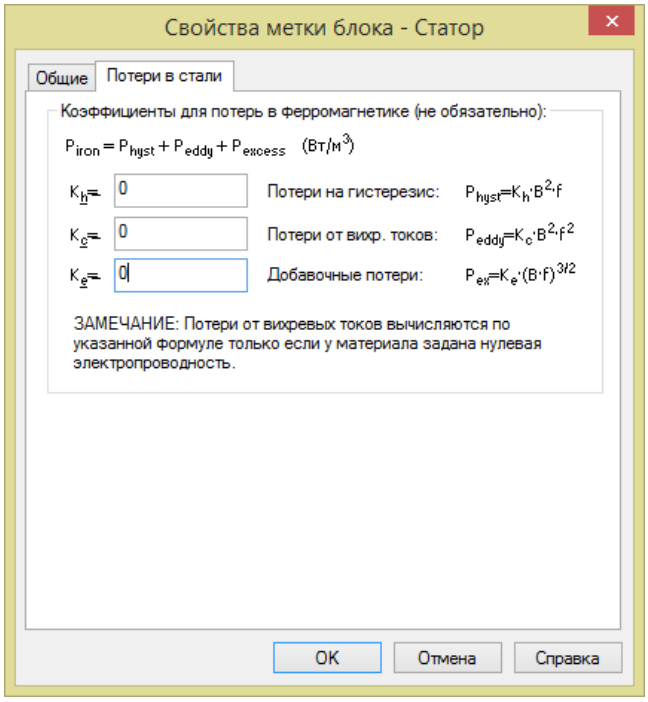


Рисунок 4.4 – Окно свойств для учета потерь в шихтованном магнитопроводе

При моделировании задач методом конечных элементов точность решения зависит от качества сетки, однако увеличение числа конечных элементов приводит к увеличению времени расчета и вычислительным мощностям ЭВМ. Важной особенностью электрических машин является их периодичность относительно полюса. Другими словами, процессы, происходящие в электрических машинах с достаточной степенью точности можно рассматривать только для одного полюса или пары полюсов, предварительно задав на границах условия периодичности или симметричности.

В ELCUT существует специальный вид граничных условий, который используется для уменьшения области решения, если в исходной модели присутствует периодическая симметрия (например, полюса в электрической машине). Периодические

условия задаются на противоположных сторонах модели и определяют, что значение поля по обе стороны границы либо полностью совпадает (четная периодичность), либо равно по величине и противоположно по знаку. Периодические условия являются более общими условиями, чем условия Дирихле и Неймана, так как они не предполагают, что поле симметрично (отсутствует нормальная компонента) или антисимметрично (отсутствует тангенциальная компонента) на рассматриваемой границе. Обе компоненты могут существовать, но они должны совпадать или быть противоположными.

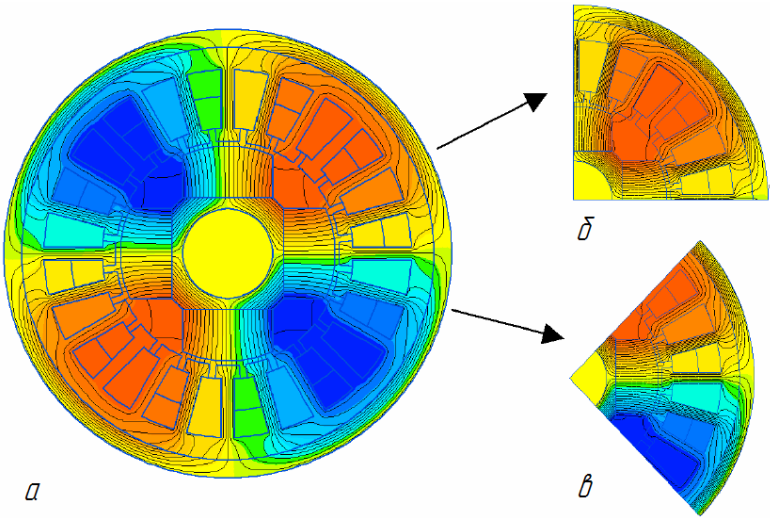


Рисунок 4.5 – Применение периодичных граничных условий

На рис.4.5 представлена картина поля в геометрической модели без задания граничных условий периодичности (а), с заданием четной периодичности (б) и с заданием нечетной периодичности (в). При задании граничных условий периодичности для модели, представленной на рис.4.5 удалось сократить количество элементов сеточной модели в 4 раза при прочих равных.

Результатами расчета магнитного поля переменных токов являются: векторный магнитный потенциал, плотность тока, напряжение, магнитная индукция, напряженность магнитного

поля, силы, моменты, омические потери, вектор Пойнтинга, энергия магнитного поля, импеданс, собственные и взаимные индуктивности, а также токи и напряжения в ветвях присоединенной электрической цепи.

5. Моделирование температурного поля

5.1. Источники тепла в электрической машине

Преобразование электрической энергии в электромеханических преобразователях сопровождается необратимыми потерями, выделяющихся в виде тепла. С точки зрения теплового напряжения наиболее уязвимой частью электрических машин и аппаратов является изоляция. При превышении допустимого значения температуры изоляция изменяет свою структуру, в результате чего ее старение происходит интенсивней и при дальнейшем повышении температуры изоляция полностью разрушается, что может привести к короткому замыканию и аварийной ситуации. Материалы, применяемые в качестве изоляционных, делятся на несколько групп в зависимости от максимально допустимого превышения температуры (см. приложение П.7). Истоками теплоты являются активные элементы конструкции – обмотки и, в меньшей степени, магнитопроводы ротора и статора, а стоками – внешняя поверхность корпуса машины. Рассмотрим с точки зрения теплового состояния машины сегмент асинхронной машины, заключающий в себе один паз статора и один паз ротора (рис.5.1).

По тепловому состоянию, все пазы находится в идентичных условиях. Будем считать, что тепловой поток в среднем сечении машины направлен только в радиальном направлении – от паза ротора в зазор и от паза статора к корпусу и далее – в окружающую среду. Аксиальным теплоотводом через вал и пазы ротора пренебрегаем.

Основными внутренними источниками тепла электрической машины служат электрические потери в обмотках и потери в стали магнитопровода статора.

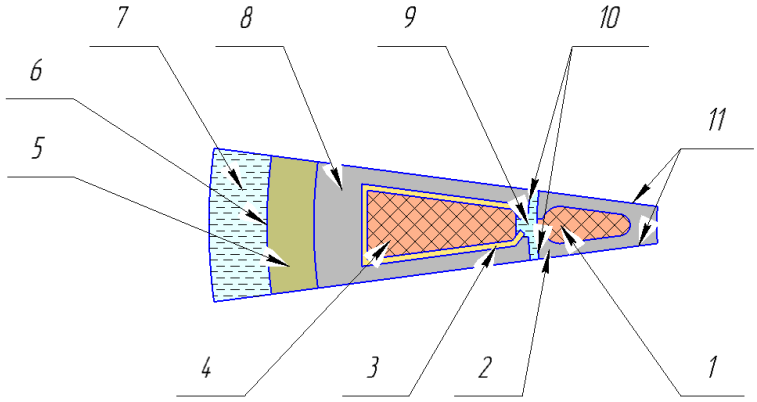


Рис.5.1 – Сегмент асинхронного двигателя

1 – обмотка ротора, 2 – магнитопровод ротора, 3 – пазовая изоляция статора, 4 – обмотка статора, 5 – корпус машины, 6 – внешняя поверхность корпуса, 7 – окружающий воздух, 8 – магнитопровод статора, 9 – воздушный зазор, 10 – поверхность, ограничивающая зазор, 11 – поверхности симметрии

Электрические потери в m_1-фазной обмотке статора определяются активным сопротивлением фазы обмотки R_1 и квадратом действующего значения тока I_1 [12, 13]:

$$\Delta p_{ф} = m_1 \cdot I_1^2 R_1$$

При моделировании тепловых процессов удобнее использовать потери, рассчитанные исходя из сечения пазов обмотки:

$$\Delta p_{уд} = I^2 R = j^2 q^2 \rho \frac{l}{q} = j^2 q \cdot \rho \cdot l = \rho \cdot j^2 \cdot l_{\delta} \cdot S \cdot k_{з}, \quad Вт \qquad (5.1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода при рабочей температуре [Ом*м];

j – плотность тока, [А/м^2];

q – сечение проводника, [м^2];

l_{δ} – длина проводника в пазу, [м];

S – площадь пазов, [м^2];

$k_{з}$ – коэффициент заполнения паза медью.

Для решения задачи теплового поля в программной среде ELCUT источники тепла задаются объемной плотностью тепловыделения – Q, [Вт/м^3], поэтому потери, рассчитанные по фор-

муле 5.1, следует разделить на объем пространства (V), которое является источником этого тепловыделения.

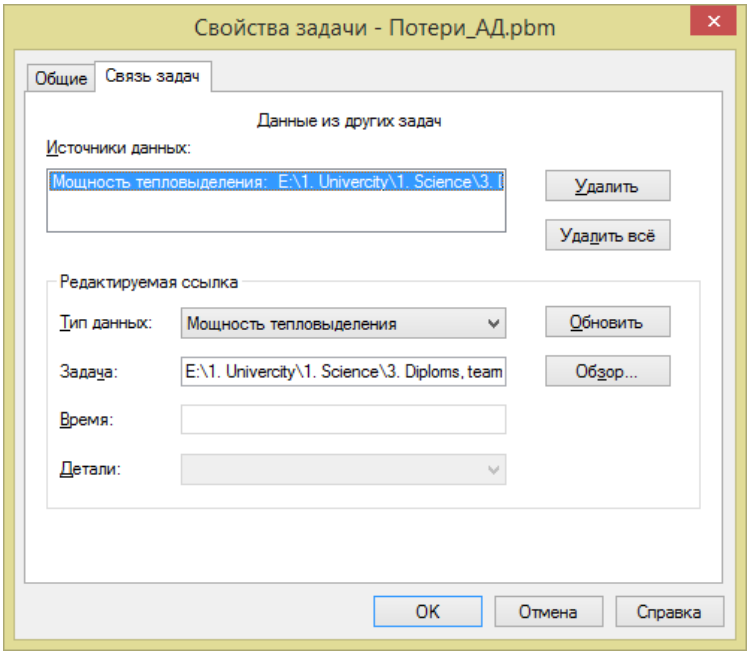
$$Q = \frac{P}{V} = \frac{\rho \cdot j^2 \cdot k_з \cdot l_\delta \cdot S}{l_\delta \cdot S} = \rho \cdot j^2 \cdot k_з, \quad Вт/м^3 \qquad (5.2)$$

где $V = l_\delta \cdot S$, $[м^3]$ – объем паза.

Основные магнитные потери в стали асинхронных двигателей могут быть определены по зависимостям (4.1) – (4.6).

Более подробно эти основные виды потерь описаны в руководствах по проектированию электрических машин и трансформаторов [12, 13, 22, 26].

Программный комплекс ELCUT позволяет решать связанные задачи. Например, магнитные потери в стальных частях асинхронного двигателя, найденный в результате решения задачи магнитного поля переменного тока, могут быть использованы в качестве тепловыделений в задаче стационарной теплопроводности. Для этого необходимо, во-первых, использовать одну и ту же геометрическую модель. Если по условиям задачи стационарной теплопроводности в геометрическую модель вносятся какие-то изменения, то необходимо также заново решить задачу магнитного поля переменных токов с актуальной геометрической моделью. Во-вторых, в свойствах задачи стационарной теплопроводности необходимо указать, что решается связанная задача. Для этого необходимо на этапе создания задачи стационарной теплопроводности указать тот же файл геометрической модели, который использовался при решении магнитного поля переменных токов. Для связи задач необходимо пройти по вкладке Задача –> Свойства –> Связь задач –> Обзор (рис. 5.2). Далее в проводнике выбрать файл .**pbm** задачи магнитного поля переменных токов.



5.2 – Установка связи задач

Во вкладке «Тип данных» необходимо выбрать «Мощность тепловыделений», после чего должна быть нажата кнопка «ОК».

5.2. Коэффициенты теплопроводности

5.2.1. Теплопроводность всыпных обмоток

При решении тепловой задачи физические свойства обмотки определяются коэффициентом теплопроводности λ. Обмотки машин в тепловом отношении представляют собой гетерогенные тела со сложным (особенно для всыпных обмоток) распределением коэффициента теплопроводности. Однако, при расчете поперечных перепадов температуры в обмотках эту гетерогенность, как правило, не учитывают, приписывая обмотке некоторый эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{экв}$ в направлении теплового потока. Обеспечение высокого значения $\lambda_{экв}$ – одна из важных задач конструирования обмоток, особенно

при большой площади их сечения, когда поперечные градиенты температуры во многом определяют нагрев обмоток.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмоток зависит от типа укладки, коэффициента заполнения $k_{из}$, коэффициента пропитки $k_п$, коэффициента теплопроводности изоляции провода $\lambda_и$, коэффициента теплопроводности пропиточного состава $\lambda_п$, диаметра провода $d_и$ и средней температуры обмотки $T_{ср}$. Эквивалентный коэффициент определяется сравнением термических сопротивлений элементарной ячейки сечения обмотки, выраженных через истинные и эквивалентные λ.

На практике коэффициент заполнения определяют «по квадратам», считая сечением провода не $\frac{\pi \cdot d_и^2}{4}$, а $d_и^2$. В этом случае:

$$k_{из} = \frac{w \cdot d_и^2}{S_п}$$

Его предельное значение равно 1 для рядной укладки и 1,55 для шахматной (w – число проводников в обмотке).

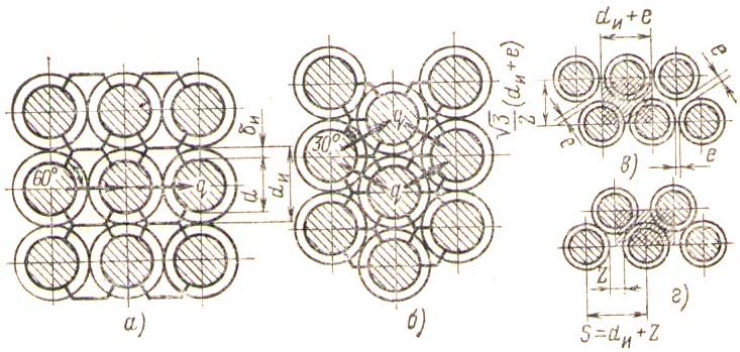


Рисунок 5.3 – Укладка проводов круглого сечения: *а* – рядная; *б* и *в* – шахматная плотная и свободная; *г* – шахматная со смещением из-за вытяжки проводов

Качество пропитки обмотки характеризуется коэффициентом пропитки $k_п$, который зависит от технологии пропитки.

Поскольку коэффициенты теплопроводности изоляции и меди отличаются на три порядка, можно принять, что температура по сечению жилы провода не меняется. Для упорядоченной обмотки при шахматной укладке проводом круглого сечения (см. рис. 5.3) получим [5]:

$$\lambda_{экв} = \lambda_{и}^{\text{і}} \cdot \left(\left[\arcsin \frac{0{,}89(\frac{d}{d_{и}})\sqrt{k_{из}} - 0{,}82}{0{,}95 - 0{,}77(\frac{d}{d_{и}})\sqrt{k_{из}}} + 1{,}57 \right] \otimes \otimes \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1 - 0{,}86(\frac{d}{d_{и}})^2 k_{из}}} - 0{,}9 \right) \qquad (5.3)$$

Здесь d и $d_{и}$ – диаметры голого и изолированного провода; $k_{из}$ – коэффициент заполнения «по квадратам»; $\lambda_{и}^{\text{і}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности промежутков между жилами:

$$\lambda_{и}^{\text{і}} = \frac{\delta_{и} - \delta_{в} - \delta_{пр}}{\frac{\delta_{и}}{\lambda_{и}} + \frac{\delta_{в}}{\lambda_{в.экв}} + \frac{\delta_{пр}}{\lambda_{пр}}} \qquad (5.4)$$

где $\delta_{и}$ – двусторонняя толщина изоляции провода;

$\delta_{в}$ – толщина воздушных промежутков между проводами;

$\delta_{пр}$ – толщина изоляционной прокладки между рядами обмотки;

$\lambda_{и}$, $\lambda_{в.экв}$, $\lambda_{пр}$ – коэффициенты теплопроводности соответствующих слоев.

В формуле (5.4) не известно значение $\lambda_{в.экв}$. В простейшем случае воздушными промежутками пренебрегают, но вводят эмпирический коэффициент ухудшения $\lambda_{экв}$ из-за некачественной пропитки.

Толщина воздушных промежутков между проводами для шахматной укладки рассчитывается по формуле:

$$\delta_в = 0{,}5 d_и \left[1 - 0{,}5 \sqrt{4 - \left(\frac{d}{d_и} \right)^2} \right] \qquad (5.5)$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности для всыпной неупорядоченной укладки:

$$\lambda_и^{\text{ı}} = \frac{\delta_и - \delta_в - \delta_{пр}}{\frac{\delta_и}{\lambda_и} + \frac{\delta_в}{\lambda_{в.экв}} + \frac{\delta_{пр}}{\lambda_{пр}}} \qquad (5.6)$$

Обратите внимание, что в формуле (5.6) в качестве единиц измерения диаметра провода используются мм, а температуры – градус Цельсия.

В качестве примера рассчитаем значение эквивалентного коэффициента теплопроводности всыпной обмотки статора.

Пример.

Обмотка из круглого провода со следующими исходными параметрами:

- диаметры голого и изолированного провода d = 0,48*10^{-3} м

и $d_{из}$ = 0,7*10^{-3} м;

- тип укладки – шахматная.

Будем учитывать воздушные промежутки между слоями эмпирическим коэффициентом ухудшения $\lambda_{экв}$ из-за некачественной пропитки. Примем коэффициент теплопроводности воздушных промежутков равным $\lambda_{в.экв}$ = 0,64.

Толщина воздушных промежутков между проводами для шахматной укладки рассчитывается по формуле:

$$\delta_в = 0{,}5 d_и \left[1 - 0{,}5 \sqrt{4 - \left(\frac{d}{d_и} \right)^2} \right] = 0{,}5 \cdot 0{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot \left[1 - 0{,}5 \cdot \sqrt{4 - \left(\frac{0{,}48 \cdot 10^{-3}}{0{,}7 \cdot 10^{-3}} \right)^2} \right] =$$

$$= 2{,}12 \cdot 10^{-5} \ м$$

Далее по формуле (3.4) находим эквивалентный коэффициент теплопроводности промежутков между жилами:

$$\lambda_u^{\text{ı}} = \frac{\delta_u - \delta_в - \delta_{пр}}{\frac{\delta_u}{\lambda_u} + \frac{\delta_в}{\lambda_{в.экв}} + \frac{\delta_{пр}}{\lambda_{пр}}} = \frac{2{,}2 \cdot 10^{-4} - 0{,}212 \cdot 10^{-4} - 0}{\frac{2{,}2 \cdot 10^{-4}}{0{,}23} + \frac{0{,}212 \cdot 10^{-4}}{0{,}64} + 0} =$$

$$= \frac{1{,}788 \cdot 10^{-4}}{9{,}57 \cdot 10^{-4} + 0{,}33 \cdot 10^{-4}} = 0{,}18 \quad Вт/м \cdot К$$

Затем по формуле (3.3) находим эквивалентный коэффициент теплопроводности:

$$\lambda_{экв} = \lambda_u^{\text{ı}} \cdot \left(\left[\arcsin \frac{0{,}89(\frac{d}{d_u})\sqrt{k_{из}} - 0{,}82}{0{,}95 - 0{,}77(\frac{d}{d_u})\sqrt{k_{из}}} + 1{,}57 \right] \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1 - 0{,}86(\frac{d}{d_u})^2 k_{из}}} - 0{,}9 \right) =$$

$$= 0{,}18 \cdot \left(\left[\arcsin \frac{0{,}89 \cdot \left(\frac{0{,}48 \cdot 10^{-3}}{0{,}7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{0{,}9} - 0{,}82}{0{,}95 - 0{,}77 \cdot \left(\frac{0{,}48 \cdot 10^{-3}}{0{,}7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{0{,}9}} + 1{,}57 \right] \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1 - 0{,}86 \cdot \left(\frac{0{,}48 \cdot 10^{-3}}{0{,}7 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0{,}9}} - 0{,}9 \right) = 0{,}265 \quad Вт/м \cdot К$$

5.2.2. Теплопроводность шихтованных магнитопроводов

Сердечники статора и ротора, шихтованные из листов электротехнической стали, являются гетерогенными телами, поскольку между листами находятся изоляционные слои, а контакт листов неидеален. Поэтому, рассматривая теплопередачу в направлении шихтовки (осевое направление), коэффициент теплопроводности должен быть рассчитан аналогично эквивалентному коэффициенту всыпных обмоток.

В радиальном направлении гетерогенностью пренебрегают, считая коэффициент теплопроводности пакета вдоль листов равным коэффициенту теплопроводности стали λ_c.

5.3. Задание физических свойств блоков и граничных условий

Для решения задачи расчета теплового поля, также как и в задачах расчета электромагнитного поля, необходимо определить физические свойства всех блоков геометрической модели и объемные плотности тепловыделения в активных частях моделируемого объекта.

В свойствах метки блока рис.5.4 геометрической модели необходимо задать теплопроводность, соответствующую материалу блока, если это обмотка, необходимо задать эквивалентную теплопроводность. Если теплопроводность зависит от температуры – введите эту зависимость, указав, что материал нелинейный, если теплопроводность материала различна в направлении координат, поставьте флажок в поле «анизотропный материал». Далее, для блоков, которые являются источниками поля (обмотка, зубцы и ярмо статора) необходимо задать объемную плотность тепловыделения.

В случае решения задачи нестационарного температурного поля необходимо также заполнить поля, соответствующие теплоемкости (C) и плотности (ρ) материала.

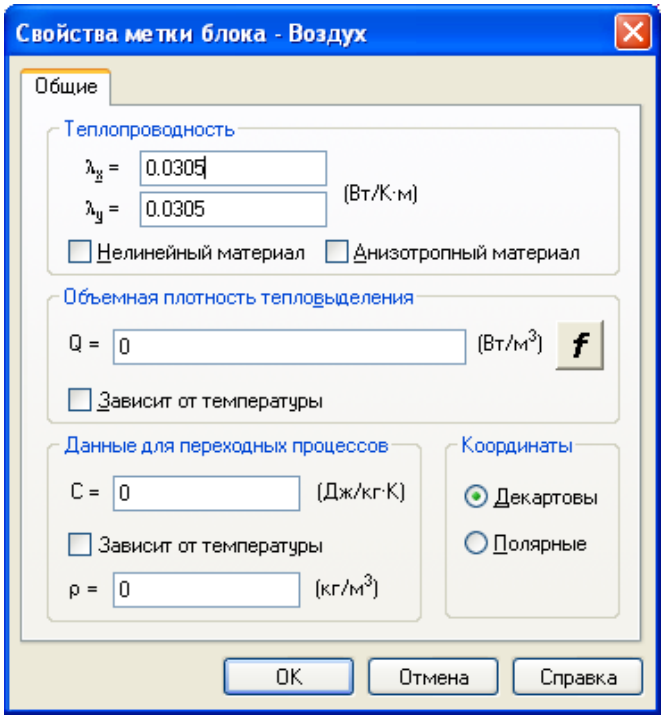


Рисунок 5.4 – Пример задания свойств блока «Воздух»

В качестве граничных условий в задаче стационарной теплопередачи могут быть заданы (рис.5.5):

1. Граничное условие I рода, которое характеризуется распределением температуры тела на границе: $T = T_{гр}$;
2. Граничное условие II рода – производная температуры по нормали к границе, то есть плотность теплового потока: $q_{x,y} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$;
3. Граничное условие III рода – соотношение между производной температуры по нормали к границе и значением $T_{гр}$, выраженное через температуру окружающей среды T_o и интенсивность теплообмена на границе посредством конвекции (характеризующееся коэффициентом теплоотдачи α) или излучения (характеризующееся коэффици-

ентом излучения $c_{пр}$): $-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha\left(T_{гр}-T_o\right)$ или

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=c_{np}\left[\left(\frac{T_{гр}}{100}\right)^4-\left(\frac{T_o}{100}\right)^4\right];$$

4. Поверхность с постоянной, заранее известной температурой;

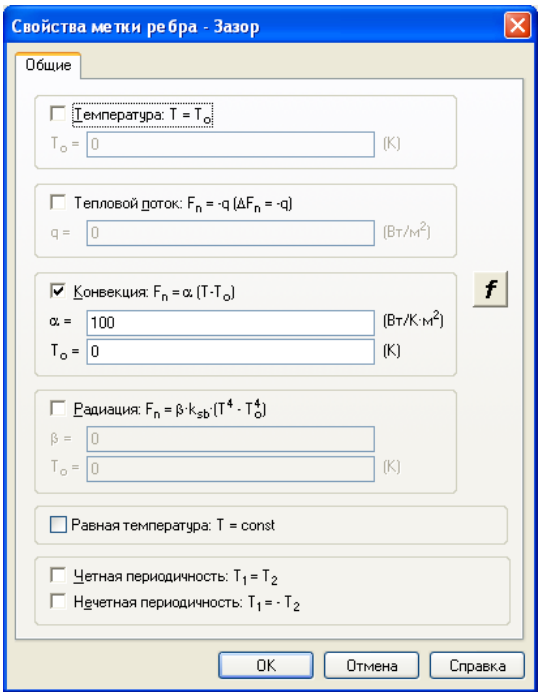


Рисунок 5.5 – Свойства метки ребер в задаче стационарной теплопередачи

5. Условия симметрии с четной и нечетной периодичностью.

По умолчанию на границе раздела сред (двух блоков) задано граничное условие IV рода, которое дает правило сопряжения температурных полей двух тел (1 и 2) на границе контакта: $\lambda_1\left(\frac{\partial T_1}{\partial n}\right)=\lambda_2\left(\frac{\partial T_2}{\partial n}\right)$.

В действительности тепловой контакт неидеален и поле температуры на границе раздела двух твердых тел претерпевает разрыв, учитываемый заданием скачка температуры [5].

5.4. Теплоотдача с внешней поверхности

В машинах малой мощности чаще всего тепловой поток отводится с внешней поверхности корпуса посредством естественной конвекции. С увеличением мощности на свободном концу вала устанавливается вентилятор, а корпус машины оребряется, в результате чего повышается эффективность теплоотдачи. Внутри машины воздух перемешивается, увлекаясь за вращающимся ротором, что способствует отводу тепла из зазора машины к корпусу. Кроме того, на торцах ротора АД заодно с короткозамыкающими кольцами отливаются лопатки вентилятора, способствующие активному перемешиванию воздуха и отводу тепла от лобовых частей к корпусу машины.

При рабочих температурах электрической машины тепло, отводящееся посредством излучения мало настолько, что им в большинстве случаев можно пренебречь.

Таким образом, при решении задачи стационарной теплопередачи необходимо задать коэффициент теплоотдачи на поверхностях машины, контактирующих с охлаждающей средой.

Задача определения коэффициента теплоотдачи с охлаждаемой поверхности является наиболее ответственной при расчете температурного поля электрической машины. В общем случае теплоотдача с поверхности является функцией множества переменных. Таких как: природа возникновения конвекции (свободная или вынужденная), режим течения (ламинарный, переходный или турбулентный), теплофизические свойства теплоносителя (плотность (ρ), теплопроводность (λ), кинематическая вязкость (v), теплоемкость (c)), геометрические размеры и форма обтекаемой поверхности и т.п.

В общем случае нестационарное течение сжимаемой вязкой жидкости может быть описано известной [1, 3, 25] системой уравнений, в которую входят уравнения Навье-Стокса, уравне-

ния неразрывности и состояния (связывающее между собой давление, плотность и температуру), а также эмпирической зависимостью между коэффициентом вязкости (μ) и температурой (T). В общем виде эта система уравнений не может быть решена, так как не могут быть определены граничные условия в неустановившемся движении вязкой жидкости [14].

Для сложной геометрии со значительным градиентом давления и наличием множества вихреобразующих элементов (например, внезапное сужение, расширение канала) задача многократно усложняется и поле скоростей в пространстве и коэффициент теплоотдачи с прилегающих поверхностей могут быть найдены только численным моделированием процессов. В подобных инженерных расчетах часто используется специализированное программное обеспечение (*AnsysFluent, Comsol* и т.п.), в основе которого лежат уравнения Навье-Стокса.

На сегодняшний день не существует универсальной математической модели для разрешения всего многообразия существующих задач газо- и гидродинамики [1]. Выбор модели течения среды зависит от множества факторов: общепринятых методик для определенного класса задач, геометрии потока, требуемого уровня точности, вычислительных мощностей и т.д.

Многочисленные исследования и опытные данные позволяют определять интенсивность теплообмена для наиболее распространенной геометрии, например, на оребренной поверхности, обдуваемой вентилятором, в воздушном зазоре, в аксиальных и радиальных каналах электрической машины с помощью критериев подобия.

Соблюдение теплового подобия при взаимодействии среды с твердым телом требует совпадения безразмерных граничных условий III рода для модели и реальной машины, что выражается числом Нуссельта[5]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda},$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности, l – характерный линейный параметр, λ – теплопроводность охлаждающей среды.

Критерии подобия вычисляются по характерным значениям параметров. Например, для течения охлаждающей среды в каналах характерным линейным параметром является гидравлический диаметр канала, рассчитываемый по формуле [5]:

$$d_г = \frac{4 \cdot F}{P},$$

где F – площадь сечения канала, P – его периметр.

Течение воздуха в зазоре электрических машин имеет сложную структуру, определяемую соотношением чисел Рейнольдса по осевой и окружной скоростям:

$$\mathrm{Re} = \frac{2 \cdot w \cdot \delta}{\nu},$$

$$\mathrm{Re}_\omega = \frac{\omega \cdot r_1 \cdot \delta}{\nu}.$$

где ν – динамическая вязкость охлаждающей среды.

Для них в качестве характерных величин принимаются удвоенная толщина одностороннего зазора 2·δ, расходная скорость и половина окружной скорости ротора $\frac{\omega \cdot r_1}{2}$.

При отсутствии осевого движения среды течение в зазоре ламинарно, если [5]

$$\mathrm{Re}_\omega < 41{,}2\sqrt{\frac{r_1}{\delta}}.$$

При

$$\mathrm{Re}_\omega = 41{,}2\sqrt{\frac{r_1}{\delta}}$$

и числе Тейлора:

$$Ta = \mathrm{Re}_\omega \cdot \sqrt{\frac{r_1}{\delta}} = \frac{\omega \cdot r_1^{0,5} \cdot \delta^{1,5}}{\nu} = 41{,}2$$

течение теряет устойчивость, в нем возникают тороидальные вихри. Дальнейшее увеличение частоты вращения приводит к развитию турбулентного течения с макровихрями.

Осевое движение среды в зазоре препятствует образованию макровихрей, поэтому переход к ламинарному течению с макровихрями происходит при $Ta > 41{,}2$. В турбулентном течении макровихри появляются при $Ta > Ta_{кр}^{1} = 0{,}702\,\mathrm{Re}^{0{,}845}$, а при $Ta > Ta_{кр}^{11} = 133{,}5\,\mathrm{Re}^{0{,}445}$ течение перестает зависеть от осевого расхода – такой режим называют развитым турбулентным с макровихрями.

Теплообмен в воздушном зазоре оказывает большое влияние на нагрев электрической машины, особенно при отсутствии каналов в роторе. У неявнополюсных машин с относительно малым зазором даже при аксиальной циркуляции воздуха осевое течение в зазоре практически отсутствует, и теплота от более высоко нагретых мест передается к менее нагретым. При осевом течении воздуха в зазоре теплота может передаваться через воздушный зазор, так и отводиться воздухом.

Число Грасгофа:

$$Gr = \frac{\rho_0^2 \cdot a_0 \cdot \beta \cdot \vartheta \cdot l_0^3}{\mu_0^2} = \frac{a_0 \cdot \beta \cdot \vartheta \cdot l_0^3}{\nu_0^2},$$

где a – ускорение массовых сил, β – коэффициент объемного расширения, ϑ – подогрев, μ – коэффициент динамической вязкости, ν_0 – кинематическая вязкость, a_0 – ускорение массовых сил.

Теплообмен в аксиальных каналах сердечника на участке стабилизированного ($Nu_{стаб}$) и нестабилизированного (Nu_x) течений при круговом сечении соответствует зависимостям:

$$Nu_{стаб} = 0{,}2 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}6} \cdot \left(\frac{0{,}02}{d}\right)^{0{,}18},$$

$$Nu_x = Nu_{стаб}\left(\frac{x_{стаб}}{x}\right).$$

Где $x_{стаб} = 73 \cdot d \cdot \mathrm{Re}^{0,48}$ – длина участка стабилизации (d – диаметр канала).

Уравнения применимы для каналов диаметром d = 0,01…0,06 м с шихтовкой пакетов сталью толщиной листов 0,35 мм при числах Рейнольдса $\mathrm{Re} = 4 \cdot 10^3 \ldots 6 \cdot 10^4$ и острых кромках входа.

Для каналов любых поперечных сечений и шероховатостей:

$$Nu_{стаб} = \frac{0,168 \cdot \sqrt{\xi} \cdot \mathrm{Re}^{0,96}}{3,27 + \ln\left(\frac{\sqrt{\xi}}{290}\right)},$$

пригодное при $\mathrm{Re} = (1,5 \ldots 5)10^4$ и острых кромках входа (ξ – коэффициент трения).

Теплообмен необдуваемых оболочек обусловлен излучением и свободной конвекцией, влияние которых при расчете охлаждения обдуваемых поверхностей не учитывается [5].

Опыты [5] показали, что из-за неравномерности температурного поля, наличия выступов и шероховатостей, вибрации, возмущения окружающей среды вращением вала теплоотдача необдуваемых корпусов электромашин превышает значения, следующие из уравнений теплообмена при свободной конвекции у вертикальных пластин. Коэффициент теплоотдачи корпуса свободной конвекцией $\alpha_{св}$ должен вычисляться с использованием уравнений:

$$Nu = 0,725 \cdot Gr^{0,225}$$

для машин с малым уровнем вибрации без выходного конца вала, и

$$Nu = 0,870 \cdot Gr^{0,225}$$

при наличии выходного конца вала и значительных вибрациях.

Уравнения справедливы для любого положения машины при $\mathrm{Gr} = 10^5 \ldots 10^9$ и отношениях длины корпуса к его диаметру l_k/D_k = 1,1…2,0. Число Грасгофа вычислено по D_k и превышению

(ожидаемому) температуры, причем определяющей является температура окружающего воздуха.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключаются преимущества и недостатки аналитических методов исследования электротехнических объектов по сравнению с численными?
2. Назовите основные принципы численного моделирования электромагнитных и тепловых полей.
3. В чем суть метода конечных элементов при решении полевых задач?
4. Какие типы задач позволяет решать программный комплекс ELCUT?
5. Какие классы моделей и в каких координатах можно решать в ELCUT?
6. Что такое геометрическая модель объекта и как она может создаваться в ELCUT?
7. Блоки в ELCUT. Их виды. Элементы блоков.
8. Физические свойства блоков. Способы задания физических свойств блоков.
9. Источники поля. Способы задания источников поля в различных задачах.
10. Граничные условия в задачах магнитостатики.
11. Как задаются свойства метки ребра?
12. Граничные условия Дирихле и Неймана.
13. Сетка конечных элементов. На что влияет количество элементов сетки и их размер?
14. В каких частях объекта должна быть самая «густая» сетка конечных элементов?
15. Что получается в результате решения магнитостатической задачи?
16. Какие параметры можно получить при использовании интегрального калькулятора ELCUT?
17. Как рассчитываются собственные и взаимные индуктивности обмоток?
18. Для чего служит сервис LableMover, и какие возможности исследователю он представляет?

19. Какие задачи термодинамики позволяет решать ELCUT?
20. Что в электрических машинах и аппаратах является источниками тепла?
21. От чего зависят магнитные и электрические потери в электромеханических преобразователях?
22. Какие пути тепловых потоков есть в электрических машинах?
23. От чего зависит нагрев элементов машин?
24. Что такое коэффициент теплопроводности, и от каких факторов он зависит?
25. Что такое коэффициент теплоотдачи, и от каких факторов он зависит?
26. Как моделируется коэффициент теплопроводности всыпных обмоток?
27. Какие граничные условия могут задаваться в задачах стационарной теплопередачи?
28. Как можно повысить коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности машины и аппарата?

6. Практикум численного моделирования электромагнитных и тепловых полей

Практические занятия необходимы для формирования у студентов компетенций по владению и умению применения численного метода конечных элементов при проведении научных и практических исследований в области анализа и синтеза электротехнических объектов. Предлагаемые темы практических занятий рассчитаны на продолжительность в четыре - шесть академических часов. Занятия строятся на исследовании конкретных электрических машин и аппаратов. Компьютерное моделирование дает возможность решения учебных задач оптимизационного проектирования и исследования, приближенных к задачам, возникающим при анализе реальных процессов и объектов электромеханики и электроэнергетики.

Практическое занятие № 1.

Тема: Моделирование Ш-образного электромагнита контактора методом конечных элементов (магнитостатическая задача)

Цель занятия.

Получение навыков моделирования статического магнитного поля методом конечных элементов в программном комплексе ELCUT.

1. Теоретическое описание.

Электромагнитная система контактора служит для замыкания (размыкания) силовых контактов при подаче (отключении) управляющего тока на обмотку электромагнита. При этом якорь магнита, преодолевая сопротивление возвратной пружины, притягивается к Ш-образному сердечнику. При проектировании электромагнита необходимо обеспечить величину притягивающей (пондеромоторной) силы, определяемой техническим заданием. Величина пондеромоторной силы определяет время срабатывания контактора – одну из его основных характеристик.

Величина пондеромоторной силы электромагнита зависит от эффективной площади воздушного зазора между якорем и статором и квадрата средней магнитной индукции в зазоре. В свою очередь, индукция в зазоре определяется магнитодвижущей силой (МДС) катушки *Iw* и суммарным магнитным сопротивлением сердечника и воздушного зазора R_{μ}

$$B_{\delta} = \frac{I \cdot w}{R_{\mu}}$$

Задача исследования состоит в определении величины требуемой МДС обмотки, по которой необходимо рассчитать обмоточные параметры катушки электромагнита.

Более полное описание теории решения магнитостатической задачи рассмотрено в разделе 2 настоящего пособия.

2. Исходные данные для моделирования и расчета

Геометрия сердечника и обмотки представлена на рис.4.1. Значения размеров для каждого варианта приведены в табл.4.1.

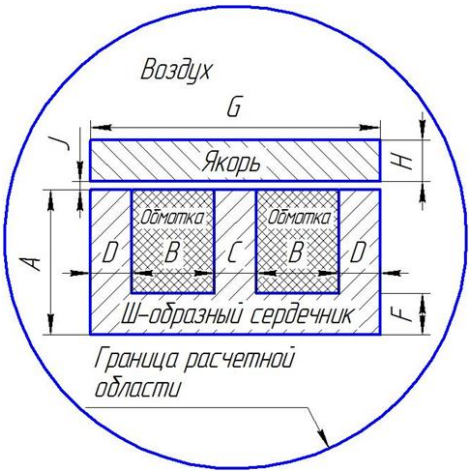


Рисунок 6.1 – Геометрические размеры электромагнита

Требуемая номинальная сила притяжения контактора задана для каждого варианта в таблице 6.1.

Для всех вариантов:

Номинальное напряжение обмотки $U = 12$ В.

Коэффициент заполнения медью окна катушки $k_з = 0{,}5$.

Материал магнитопровода: электротехническая сталь марки 2013.

Таблица 6.1

Варианты параметров модели

Вариант № п/п	*A*, мм	*B*, мм	*C*, мм	*D*, мм	*F*, *H*, мм	*J*, мм	*G*, мм	Толщина набора в направлении оси z, L_z, мм	Номинальная сила притяжения, *F*, Н
1	40	20	16	8	8	1	72	45	500
2	26	15	12	6	6	1	54	30	250
3	35	25	20	10	10	1,2	90	42	440
4	60	20	16	8	8	0,8	72	50	500
5	70	25	14	7	7	1,5	78	60	1800
6	65	15	30	15	15	1	90	55	1800

3. Задачи для численного моделирования

1. В соответствии с рис.4.1 и таблицей 4.1 построить геометрическую модель электромагнита.

2. Задать свойства блоков модели и граничное условие Дирихле на границе расчетной области.

3. В сервисной программе LabelMover изменяя величину магнитодвижущей силы источника поля (катушек), рассчитать и построить зависимость пондеромоторной сила от полного числа ампер-витков обмотки магнита $F = f(iw)$ для номинального зазора. Определить номинальную точку на графике.

4. Рассчитать обмоточные данные для номинальной силы притяжения магнита.

4. Содержание отчета

Результаты аналитического расчета и численного моделирования оформляются в печатном виде один экземпляр на бригаду. Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Краткое теоретическое описание.
3. Исходные данные (по вариантам).
4. Чертеж геометрической модели с указанием размеров.
5. Используемые материалы и их свойства, сведенные в таблицу и рисунки.
6. Зависимость пондеромоторной силы от полного числа ампер-витков обмотки магнита $F = f(iw)$ для номинального зазора в виде таблицы и графика. Выбор номинальной точки на графике.
7. Картину магнитного поля для номинального режима.
8. График магнитной индукции в воздушном зазоре для номинального режима.
9. Выводы к каждому рисунку.
10. Расчет обмоточных данных электромагнита;
11. Выводы по проделанной работе.

Практическое занятие №2

Тема: Моделирование электродинамических усилий в катушке трансформатора при коротком замыкании (задача нестационарного магнитного поля)

Цель занятия.

Получение навыков моделирования нестационарного магнитного поля методом конечных элементов в программной среде ELCUT.

1. Теоретическое описание

Короткое замыкание (КЗ) представляет собой аварийный режим работы электромеханического преобразователя, который возникает при эксплуатации устройства. В этом режиме многократно возрастают токи в обмотках электрических машин, что приводит к перегреву активных частей и ударным механическим силам, действующим на обмотки и их отдельные части. Защита электротехнических устройств от токов короткого замыкания обеспечивается использованием защитного оборудования (плавкие предохранители, автоматические выключатели и т.п.) для реализации токовой отсечки защищаемого участка электрической цепи. Однако срабатывание токовой отсечки происходит не сразу в момент короткого замыкания, а спустя некоторое время, которое зависит от типа применяемого оборудования и от схемы защитной цепи (например, наличие промежуточного оборудования, такого как промежуточное реле, увеличивает время срабатывания). Так как в цепях со значительно индуктивностью ($\omega L >> R$, этому условию удовлетворяют трансформаторы, электрические машины, линейные реакторы, дроссели и т.п.) присутствует апериодическая составляющая тока в момент короткого замыкания, которая имеет максимум, если короткое замыкание произошло в момент прохождения напряжения через ноль. Следовательно, максимальное значение ток КЗ имеет в первую половину периода после КЗ при $t = 0{,}005$ (с) при частоте питающего напряжения $f = 50$ Гц. Обычно к этому моменту защита еще не успевает сработать. Из-за инерционности тепловых процессов этого времени обычно недостаточно для перегрева обмоток, но

именно в этот момент времени электродинамические усилия между проводниками катушки имеют максимальное значение. Поэтому проверка обмоток на устойчивость к механическим воздействиям в режиме короткого замыкания является обязательным при проектировании электрических машин.

Задача исследования состоит в определении переходного процесса по току и механическим усилиям, действующим на проводники обмотки в режиме короткого замыкания маломощного бронестержневого трансформатора.

2. Исходные данные для моделирования и расчета.

Геометрическая модель представляет собой плоскопараллельное описание маломощного бронестержневого трансформатора (см. рис.3.3 в главе 3 настоящего пособия). Так как электромагнитные процессы в таком устройстве симметричны относительно средней линии стержня, использовать в качестве геометрической модели можно половину магнитной системы трансформатора с условием симметрии на середине стержня (рис.6.2).

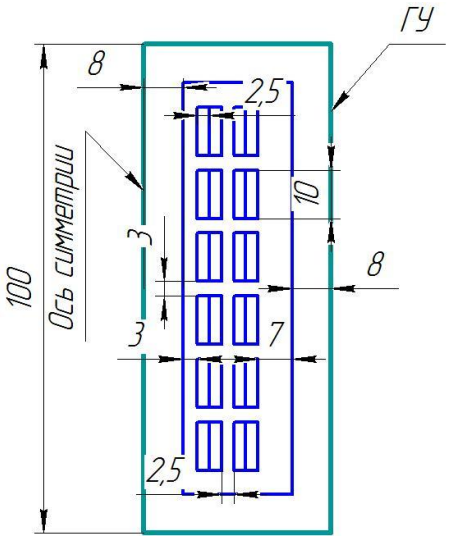


Рисунок 6.2 – Геометрическая модель бронестержневого маломощного трансформатора

В качестве материала магнитопровода задать электротехническую сталь (по вариантам), материал обмотки – медь, промежутки в окне трансформатора заполнены воздухом.

В качестве источников поля использовать плотность тока. Величина номинальной плотности тока и параметры трансформатора заданы по вариантам в таблице 6.2.

Таблица 6.2

Варианты заданий на практическую работу

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Марка стали	2013	2212	2412	1411	1512	2312	2013	1412	1513
Номинальная плотность тока, $j_{ном}$ ($А/мм^2$)	2	2,5	3	3,5	4	2,2	2,8	3,2	3,8
Время начала процесса расчета, t_0 ,(с)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Время начала короткого замыкания, t_k (с)	0,03	0,03	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21
Момент времени окончания короткого замыкания, $t_{к1.}$ (с)	0,3	0,28	0,26	0,24	0,22	0,2	0,18	0,16	0,14
Рассчитывать до… t_2 (с)	0,4	0,41	0,39	0,42	0,38	0,43	0,37	0,44	0,36
Напряжение короткого замыкания u_k=z_k, о.е.	0,0510	0,0403	0,0632	0,0316	0,0427	0,0506	0,0671	0,0500	0,0612
Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания u_{kp}=x_k , о.е.	0,05	0,04	0,06	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,06

Активная составляющая напряжения короткого замыкания $u_{ka}=r_k$, о.е.	0,01	0,005	0,02	0,01	0,015	0,008	0,06	0,03	0,012
Коэффициент мощности нагрузки $cos\varphi_{нг}$	1	1	1	1	0,95	0,95	0,8	0,8	0,8

Для всех вариантов:

- геометрическая модель соответствует рис.6.2;
- конечный момент времени расчета (Интегрировать по времени до) t_2 = 0,25 с;
- шаг интегрирования – 0,001 с;
- запоминать решение каждые 0,001 с;
- частота тока f = 50 Гц;
- удельная электропроводность меди $\sigma = 41 \cdot 10^6$, 1/Ом·м

3. Задачи численного моделирования

1) В соответствии с рис.6.2 построить геометрическую модель.
2) Задать свойства блоков модели и граничное условие Дирихле на границе расчетной области.
3) Найти зависимость тока проводника от времени, силы, действующие на проводники первичной и вторичной обмотки от времени, вращающего момента от времени.

4. Содержание отчета

Результаты аналитического расчета и численного моделирования оформляются в печатном виде один экземпляр на бригаду. Отчет должен содержать:

1) титульный лист;
2) краткое теоретическое описание;
3) исходные данные (по вариантам) на практическое занятие;

4) чертеж геометрической модели с указанием размеров;

5) используемые материалы и их свойства, сведенные в таблицу и рисунки;

6) максимальное значение ЭДУ по оси *x*, по оси *y*, для каждого блока проводника геометрической модели (оформить в виде таблицы, сделать вывод);

7) зависимость тока проводника от времени (сделать вывод по графику);

8) зависимость сил, действующих на проводник от времени (сделать вывод);

9) выводы по проделанной работе (о действии ЭДУ на проводники обмотки в режиме короткого замыкания).

Практическое занятие №3

Тема: Моделирование магнитных потерь в стали статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (задача магнитного поля переменных токов)

Цель занятия.

Получение навыков моделирования магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в программной среде ELCUT.

1. Теоретическое описание

Преобразование электрической энергии неизбежно связано с потерями, выделяющимися в виде тепла в активных частях машины. Разделяют несколько видов потерь: электрические (потери в меди), магнитные, механические и добавочные. Магнитные потери или потери в стали включают в себя потери в зубцах, ярмах магнитопровода и полюсах электрической машины, то есть в стальных участках магнитной системы, по которым замыкается переменный магнитный поток. Они зависят от марки стали, толщины листов, величины магнитной индукции и частоты перемагничивания. Магнитные потери состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи, выделяясь в активной стали, они дополнительно подогревают машину и наиболее уязвимую с точки зрения температурного воздействия часть – её изоляцию. Магнитные потери могут составлять до 50 % и выше (в высокочастотных электрических машинах) от общих потерь. Определение потерь аналитическими методами затруднено в связи со сложным распределением магнитной индукции по сечению машины. Численное моделирование позволяют уточнить величину и локализацию этих потерь. Определение потерь при численном моделировании основано на уравнении Штейнмеца:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_h + \Delta P_e = k_h \cdot f^{\beta} \cdot B^{\alpha} + k_e \cdot f^2 \cdot B^2$$

2. Исходные данные для моделирования и расчета.

Геометрия пары полюсов трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с числом пар полюсов $p = 4$ представлена на рис.6.3 и рис.6.4. Создание геометрической модели осуществляется стандартными инструментами ELCUT [2].

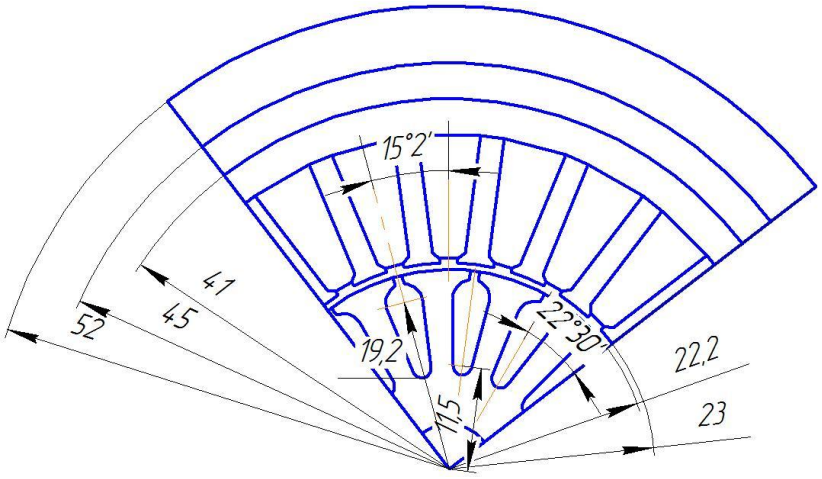


Рисунок 6.3 – Основные геометрические размеры моделируемой машины

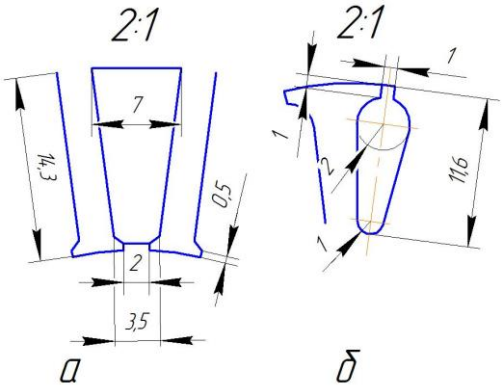
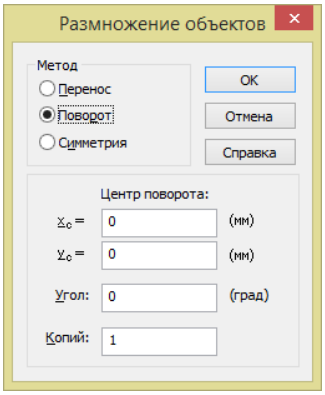


Рисунок 6.4 – Геометрические размеры зубцово-пазовой зоны моделируемого двигателя

Рекомендуется создавать геометрическую модель в следующей последовательности. По размерам вычертить паз ротора

вместе со шлицом, после чего, выделив получившийся блок, щелкнуть по нему ПКМ. В открывшемся окне выбрать поворот или дублирование, после чего ELCUT предложит задать необходимые данные операции рис.6.5.



6.5. Окно размножения объектов

Обмотка двигателя – однослойная полный ток паза, полный ток паза (*Iw*), тип электротехнической стали статор и ротора, толщина листа стали $\Delta_{ст}$ (мм) и коэффициенты увеличения потерь в стали по технологическим причинам для зубцов статора ($k_з$) и для ярма статора ($k_а$) даны в таблице 6.3.

Таблица 6.3

Некоторые физические свойства материалов и величина источника поля моделируемого двигателя

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Iw, A	850	860	870	880	890	900	910	920
Марка стали	1411	2013	1512	2212	1412	2312	2412	2412
Толщина листа, мм	0,35	0,5	0,5	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5
$K_а$	1,5	1,6	1,7	1,4	1,7	1,5	1,6	1,5
$K_з$	2	1,9	2,1	1,8	2,2	2,1	1,8	1,9

Величина удельных потерь в стали $\Delta p_{ст}$ и кривая намагничивания, удельное сопротивление и удельная плотность стали даны в приложении. Двигатель работает в номинальном режиме. Магнитными потерями в роторе пренебречь, задав для ротора только кривую намагничивания.

Коэффициенты уравнения Штейнмеца для зубцов статора при расчете потерь в единицах измерения (Вт/м^3):

$$k_e = k_з \frac{(\pi \cdot \Delta_{cm})^2}{6 \cdot \rho}$$

$$k_h = \frac{\gamma \cdot k_з \cdot \Delta p_{cm}}{B^2 \cdot f} - \frac{\pi^2 \cdot \Delta_{cm}^2 \cdot f}{6 \cdot \rho}$$

Для ярма рассчитать аналогично, подставив вместо $k_з$ коэффициент k_a.

Относительную магнитную проницаемость обмоток статора и ротора принять равной $\mu_c = \mu_p = 1$, электропроводность обмоток статора и ротора принять равной нулю.

3. Задачи численного моделирования

1. В соответствии с рис.6.3 и 6.4 построить геометрическую модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Задать свойства блоков модели и граничные условия на границе расчетной области (условие Дирихле и условия периодичности).
3. Определить величину магнитных потерь в стали статора.

4. Содержание отчета

Результаты аналитического расчета и численного моделирования оформляются в печатном виде один экземпляр на бригаду. Отчет должен содержать:

1) титульный лист;
2) краткое теоретическое описание;
3) исходные данные (по вариантам) на практическое занятие;

4) чертеж геометрической модели с указанием размеров;
5) используемые материалы и их свойства, сведенные в таблицу и рисунки;
6) картины линий магнитного поля;
7) распределение магнитной индукции по сечению зубца и ярма статора и ротора;
8) картину распределения потерь в стали;
9) результаты расчета потерь в стали статора;
10) выводы по проделанной работе.

Практическое занятие №4

Тема: Моделирование температурного поля асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (задача стационарной теплопередачи)

Цель занятия.

Получение навыков моделирования стационарной теплопередачи методом конечных элементов в программной среде ELCUT.

1. Теоретическое описание

При работе электрической машины в её активных частях (обмотки, магнитопровод) неизбежно выделяются потери (электрические, магнитные и т.п.) в виде тепла. При этом наиболее уязвимой частью в отношении теплового состояния оказывается изоляция электрических машин. Нагревание изоляции сверх определенных температур приводит к её разрушению. Поэтому все изоляционные материалы, использующиеся в электрических машинах, разделены по классам нагревостойкости, для которых стандартами регламентированы максимальные превышения температуры, при которых допускается длительная эксплуатация. Экономически выгодно производить электрические машины, которые развивали бы заданную мощность в минимально возможных геометрических размерах, так как при этом сокращаются затраты на активные материалы (медь, электротехническая сталь и т.п.). Это неизбежно приводит к повышению электромагнитных нагрузок на единицу массы и, следовательно, к повышенному нагреву активных частей. Поэтому уточненный расчет температурного поля – актуальная задача для совершенствования электрических машин. При численном моделировании МКЭ в программной среде ELCUT источником температурного поля являются объемные потери, которые, например, для обмоток электрических машин могут быть определены как:

$$Q = \frac{\Delta P_{эл}}{V} = \frac{\rho \cdot j^2 \cdot k_з \cdot l_\delta \cdot S}{l_\delta \cdot S} = \rho \cdot j^2 \cdot k_з, \ \ Вт/м^3$$

Объемные потери в стали удобно импортировать из задачи магнитного поля переменных токов, так как в этом случае они имеют уточненное значение по величине и локализации.

2. Исходные данные для моделирования и расчета

Тип задачи – стационарная теплопередача. Класс модели – плоская. Исследуемая машина – асинхронный двигатель малой мощности. Ввиду относительно малой величины воздушного зазора в рассматриваемой задаче можно ограничиться учетом теплопередачи в зазоре только теплопроводностью. Коэффициент теплопроводности воздуха принять постоянным. Это значительное допущение, которое вводится для упрощения.

В качестве геометрической модели использовать модель асинхронного двигателя, исследованного в предыдущей работе при решении задачи магнитного поля переменных токов (рис.6.4). В геометрическую модель добавить осевые охлаждающие каналы в теле корпуса – 8 каналов на всю машину, равномерно распределенные по окружности корпуса. Диаметр каналов $d_{о.к.}$ = 3 мм. Внешняя поверхность корпуса не обдувается (коэффициент теплоотдачи с поверхности электрической машины без обдува).

Варианты на практическое задание представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4.

Данные по вариантам на практическое задание

Вариант	Провод	Диаметр провода, мм		Витков в пазу	Компаунд, пропиточный лак	Стержни ротора	Тип охладителя	Скорость охладителя, м/с
		d	$d_{из}$					
1	ПЭВ-1	0,67	0,73	60	КП-50	АКМ2-1	Вода	7
2	ПСД	0,71	0,77	63	ПК-11	АКМ12-4	Возд.	15
3	ПСДК	0,75	0,815	68	КП-303Н	ЛМЦ58-2	Вода	5

4	ПЭТ-155	0,8	0,865	54	ПК-11	АМг-7	Возд.	13
5	ПЭТД	0,85	0,915	52	Элпласт-180	Л68	Возд.	10
6	ПСД	0,9	0,965	44	КП-303Н	АКМц10-2	Вода	8
7	ПСДК	0,95	1,015	46	Элпласт-180	ЛАН59-3-2	Возд.	17
8	ПЭТВ	0,85	0,915	48	КП-50	ЛС59-18	Вода	2
9	ПЭТ-155	0,67	0,73	52	КП-303Б	АК10	Возд.	12

Рассчитать эквивалентный коэффициент теплопроводности катушек. Для каждого нечетного варианта принять шахматный способ укладки проводов в катушке, а для каждого четного – всыпной способ укладки.

Коэффициент пропитки нечетным вариантам принять равным $k_n = 0{,}76$, а четным вариантам – $k_n = 0{,}52$.

Теплопроводности изоляции проводов и компаунда приведены в приложении.

Марка стали магнитопровода – в соответствии с предыдущим практическим заданием.

Корпус - из конструкционной стали марки Ст45.

Плотность тока в обмотке статора принять равной $j = 6$ А/мм^2, в обмотке ротора – $j = 3$ А/мм^2.

Задачи численного моделирования

1. Изменить геометрию, добавив канал охлаждения в тело корпуса. Решить заново задачу магнитного поля переменных токов с новой геометрией.
2. Задать свойства блоков и граничные условия модели, предварительно рассчитав необходимые параметры (объемные тепловыделения в обмотках статора и ротора, эквивалентный коэффициент теплопроводности катушек).

3. Импортировать объемные тепловыделения из задачи магнитного поля переменных токов в задачу стационарной теплопроводности.
4. Определить влияние потерь в стали на нагрев машины, для этого решить задачу без учета тепловыделений в обмотках, а затем с их учетом.
5. Решить задачу без принудительной циркуляции охлаждающей охлаждающего агента по каналам охлаждения.
6. Решить задачу с принудительной циркуляцией охлаждающего агента по каналам охлаждения в соответствии с вариантами.

3. Содержание отчета

Результаты аналитического расчета и численного моделирования оформляются в печатном виде один экземпляр на бригаду. Отчет должен содержать:

1) титульный лист;
2) краткое теоретическое описание;
3) исходные данные (по вариантам) на практическое занятие;
4) чертеж геометрической модели с указанием размеров;
5) используемые материала и их свойства, сведенные в таблицу и рисунки;
6) расчет потерь и объемных тепловыделений в обмотках статора;
7) расчет эквивалентного коэффициента теплопроводности обмотки статора;
8) расчет коэффициента теплоотдачи в канале охлаждения;
9) расчет коэффициента теплоотдачи на поверхности корпуса;
10) картины температурного поля и графики по сечению, проходящему через паз машины без учета потерь в обмотках и с их учетом;

11) картины температурного поля и графики по сечению, проходящему через паз машины без принудительного охлаждения и с учетом принудительного охлаждения;
12) выводы к каждому графику и картине температурного поля;
13) выводы по работе.

Заключение

Учебное пособие «Численное моделирование в электротехнике с использованием программной среды ELCUT» позволяет сформировать у студентов компетентность в области экспериментальных исследований методом численного моделирования сложных систем, объектов и явлений. Данное пособие составлено на основе достаточно большого количества литературных источников. Представленная работа, несмотря на конспективную краткость, содержит достаточный объем теоретического материала для начала освоения численного моделирования с использованием специализированного программного обеспечения. Более подробное описание теории изучаемых вопросов можно найти в работах, представленных в библиографическом списке.

В учебном пособии рассматриваются пять основных теоретических и практических задач:

- анализ причин необходимости применения численного моделирования методом конечных элементов в электротехнике;
- задачи стационарного магнитного поля;
- нестационарного магнитного поля;
- магнитного поля переменных токов;
- стационарной теплопроводности.

Для рассмотренных теоретических задач приводятся достаточно подробные практические примеры из области моделирования конкретных электромеханических систем.

Приведённые вопросы по курсу, а также методические указания к практическим занятиям, способствуют освоению профессиональных компетенций обучающимися.

Учебное пособие будет полезным для бакалавров направления подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» и магистрантов направления подготовки 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», а также аспирантам, занимающимся, численным моделированием процессов, происходящих в электротехнических системах.

Библиографический список

1. AnsysFluent 12.0 TheoryGuide [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm, свободный. – (дата обращения: 20.11.2018).
2. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. – СПб. : ООО «Тор», 2012. – 356 с.
3. Lienhard J.H. A heat transfer textbook / J.H. Lienhard IV, J.H. Lienhard V. – Cambridge, Massachusetts, USA, 2001.
4. Steinmetz C.P. On the law of hysteresis (originally published in1892) / C.P. Steinmetz // Proc. IEEE, vol. 72, no. 2. – 1984 pp. 196–221.
5. Борисенко А.И. Охлаждение промышленных электрических машин / А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
6. ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия (с Изменениями N 1-5, с Поправкой). – М.: ИПК Издательство стандартов, 1984. – 10 с.
7. ГОСТ Р 52719 – 2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. – 42 с.
8. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. Отд-ние, 1983, - 256 с., ил.
9. Зубков Ю.В., Иванников Ю.Н. Расчет максимальных превышений температуры обмоток вентильного двухкаскадного генератора с электромагнитным возбуждением // Труды 6-ой межд.науч.-техн.конф. «Электроэнергетика глазами молодежи», Иваново 2015., с.367-370.
10. Иванников Ю.Н. Повышение энергетической эффективности активного электромагнитного подшипника: Дис. … канд. техн. наук: 05.09.01 / Иванников Юрий Николаевич; Самарский государственный технический университет. – Самара, 2019. – 143.
11. Иванников Ю.Н. Постановка задачи численного моделирования газодинамических процессов охлаждения электромагнитных подшипников ГПА / Ю.Н. Иванников, Ю.А. Макаричев

// Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» №4(60) – 2018. С.102-112.
12. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. Пособие для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков [и др.]; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.
13. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов / И.П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.: ил.
14. Коротких А.Г., Шаманин И.В. Основы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 117 с.
15. Макаричев Ю.А. Исследование теплового состояния моментного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников, В.Н. Овсянников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика №4, том 62 – 2019. С.36 – 43.
DOI: 10.17213/0136-3360-2019-4-36-43.
16. Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Иванников Ю.Н. Исследование тепловых процессов автономного генератора совмещенного типа методом моделирования температурных полей // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». 2015. №4(48) . С.93-100.
17. Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. Моделирование температурных полей радиального электромагнитного подшипника // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» №3(43) – 2014. С.139-145.
18. Методы расчета электрических и магнитных полей: учебный комплект / [В.Э. Фризен и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 176 с.
19. Сабоннадьер Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц. – М.: Мир, 1989 – 12л.: ил.
20. Саттаров Р.Р. Основы математического моделирования электрических машин: учебное пособие / Уфимск. Гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 142 с.
21. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Учеб. Пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1976. – 544 с.
22. Хуторецкий Г.М. Проектирование турбогенераторов / Г.М. Хуторецкий, М.И. Токов, Е.В. Толвинская – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

23. Численные методы анализа электрических машин / Ответственный редактор Я.Б. Данилевич. –Л.: «Наука», Ленингр. Отд-ние, 1988, - 220 с., ил.
24. Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.: ил.
25. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г.Шлихтинг. – М.: «Наука», 1974. – 712 с.
26. Шуйский В.П. Расчет электрических машин (перевод с немецкого) / В.П. Шуйский. – Л.: «Энергия», Ленингр. отд-ние, 1968, - 732 с. ил.

Приложение

Таблица П.1

Удельные магнитные потери в стали в соответствии с ГОСТ 21427.2-83 «Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая»

Марка стали	Толщина, мм	Удельные магнитные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, не менее при напряженности магнитного поля, А/м	
		$P_{1.0/50}$	$P_{1.5/50}$	1000	2500
2011	0,65	3,8	9,0	1,48	1,6
2012	0,5 0,65 0,5	3,5 3,6 2,9	8,0 8,0 6,5	1,49 1,5 1,5	1,6 1,62 1,62
2013	0,65 0,5	3,1 2,5	7,0 5,6	1,53 1,54	1,64 1,65
2014	0,5	2,2	5,0	1,52	1,62
2111	0,65 0,5	4,3 3,5	10,0 8,0	1,45 1,46	1,58 1,58
2112	0,65 0,5	2,6 2,2	6,3 5,0	1,42 1,42	1,58 1,60
2211	0,65 0,5	3,0 2,6	7,0 5,8	1,4 1,4	1,56 1,56
2212	0,65 0,5	3,5 2,6	8,0 6,0	1,46 1,46	1,59 1,6
2311	0,65 0,5	2,5 1,9	5,8 4,4	1,36 1,38	1,52 1,54
2312	0,65 0,5	2,4 1,75	5,6 4,0	1,38 1,4	1,54 1,56
2411	0,5 0,35	1,6 1,3	3,6 3,0	1,37 1,37	1,49 1,50
2412	0,5 0,35	1,3 1,15	3,1 2,7	1,35 1,35	1,5 1,5
2413	0,5 0,35	- -	2,9 2,5	1,35 1,35	1,5 1,5
2421	0,28	$P_{1.0/400}$ 19,5	$P_{0.75/400}$ 10,7	1,35	1,4
1411	0,5 0,35	2 1,6			
1413	0,5 0,35	1,55 1,35			

1511	0,5 0,35	1,55 1,35			
1512	0,5 0,35	1,4 1,2			
1513	0,5 0,35	1,25 1,05			

Таблица П.2

Основная кривая намагничивания некоторых электротехнических сталей

2013		2212, 2312		2412	
B, Тл	H, А/м	B, Тл	H, А/м	B, Тл	H, А/м
0,4	56	0,4	68	0,4	67
0,5	63	0,5	76	0,5	77
0,6	70	0,6	86	0,6	90
0,7	78	0,7	96	0,7	109
0,8	88	0,8	140	0,8	133
0,9	99	0,9	190	0,9	166
1,0	110	1,0	240	1,0	217
1,1	125	1,1	300	1,1	295
1,2	141	1,2	400	1,2	399
1,3	200	1,3	550	1,3	585
1,4	300	1,4	1000	1,4	1230
1,5	620	1,5	1600	1,5	2500
1,6	1700	1,6	3400	1,6	5000
1,7	3400	1,7	7700	1,7	10000
1,8	7000	1,8	13400	1,8	15600
1,9	13000	1,9	19400	1,9	23900
2,0	20700	2,0	38800	2,0	59000
2,1	60000	2,1	65500	2,1	149000
2,2	130000	2,2	144000	2,2	239000
2,3	210000	2,3	224000	2,3	329000
2,4	290000	2,4	304000	2,4	419000

Таблица П.2 (продолжение)

1411, 1412, 1413		1511, 1512, 1513	
B, Тл	H, А/м	B, Тл	H, А/м
0,4	67	0,4	96
0,5	77	0,5	114
0,6	90	0,6	148

0,7	109	0,7	192
0,8	133	0,8	254
0,9	166	0,9	325
1,0	217	1,0	414
1,1	298	1,1	538
1,2	444	1,2	730
1,3	722	1,3	1080
1,4	1410	1,4	1940
1,5	3140	1,5	3850
1,6	5980	1,6	6700
1,7	10100	1,7	13000
1,8	18100	1,8	23000
1,9	33500	1,9	34000
2,0	88300	2,0	70000
2,1	167000	2,1	148000
2,2	246000	2,2	228000
2,3	326000		
2,4	405000		

Таблица П.3

Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Номинальный диметр неизолированного провода, мм^2	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2
0,08	0,1	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,1	0,122	0,00785	0,6	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	0,67	0,73	0,353
0,132	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,8	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,567

0,17	0,2	0,0227	0,9	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,709
0,19	0,22	0,0284	1	1,08	0,785
0,2	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
0,212	0,242	0,0353	1,12	1,2	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
0,236	0,271	0,0437	1,25	1,33	1,227
0,25	0,285	0,0491	1,32	1,405	1,368
0,265	0,3	0,0552	1,4	1,485	1,539
0,28	0,315	0,0616	1,5	1,585	1,767
0,3	0,335	0,0707	1,6	1,685	2,011
0,315	0,35	0,0779	1,7	1,785	2,27
0,335	0,37	0,0881	1,8	1,895	2,54
0,375	0,415	0,1104	2	2,095	3,14
0,4	0,44	0,1257	2,12	2,22	3,53
0,425	0,465	0,1419	2,24	2,34	3,94
0,45	0,49	0,159	2,36	2,46	4,36
0,475	0,515	0,1772	2,5	2,6	4,91
0,5	0,545	0,1963			

Таблица П.4

Некоторые свойства электротехнических сталей

Марка стали	Массовая доля кремния, %	Плотность стали, кг/м^3	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм^2/м
2011, 2012, 2013, 2014	до 0,4 включ.	7850	0,14
2111, 2112	св. 0,4 до 0,8 включ.	7820	0,17
2211, 2212	св. 0,8 до 1,8 включ.	7800	0,25
2311, 2312	св. 1,8 до 2,8 включ	7750	0,40
2411, 2412, 2413, 2421	св. 2,8 до 3,8 включ	7650	0,50

Таблица П.5

Теплопроводность сталей

Марки стали	20…	21…	22…	23…	24…, 34…
Содержание кремния, %	до 0,4 вкл.	0,4…0,8	0,8…1,8	1,8…2,8	2,8…3,8
Теплопроводность вдоль листов ($\lambda_в$), Вт/(К·м)	40…45	36…40	30…35	21…23	19…21
Теплопроводность поперек пакета ($\lambda_п$),Вт/(К·м)	3…4				

Таблица П.6

Теплопроводности некоторых материалов, применяемых в электромашиностроении

Сплавы алюминия

АКМ-2-1	АКМ4-4	АК10	АКМц10-2	АКМ12-4	АМг-7	АКЦ11-12
155	118	118	93,5	93,5	93,5	75

Медь, латунь, бронза

М00	М1	М2	ЛАН 59-3-2	ЛМЦ58-2	ЛС59-18	Л68	БрМг 0.5	БрА 7
387	387	387	83,7	71,2	105	113	243	80

Сталь конструкционная

08	10	20	35	45
60	57	50,6	49	48

Таблица П.7

Коэффициент теплопроводности изоляции обмоточных проводов

A (105)		E (120)		B (130)		F (155)		H (180)	
ПЭВ-1	ПЭМ-1	ПЭВЛ	ПЭПЛОТ	ПЭТВ	ПЭТЛО	ПСД	ПЭТ-155	ПСДК	ПЭТД
0,223	0,24	0,219	0,255	0,26	0,24	0,23	0,2	0,16	0,14

Таблица П.8

Теплопроводность некоторых компаундов и пропиточных лаков

B (130)		F (155)		H (180)	
КП-50	МЛ-92	КП-303Б	ПК-11	КП-303Н	Элпласт-180
0,54	0,179	0,216	0,177	0,5	0,187

Таблица П.9

Физические свойства воздуха при атмосферном давлении

T, ^oC –>	40	50	60	70	80	90	100
Плотность, ρ [кг/м^3]	1,13	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,95
Теплоемкость, C [Дж/(кг·^{o}C)]	1005	1005	1005	1009	1009	1009	1009
Теплопроводность, $\lambda\cdot10^{-2}$ [Вт/(К·м)]	2,76	2,83	2,9	2,96	3,05	3,13	3,21
Температуропроводность, $a\cdot10^{-6}$ [м^2/с]	24,3	25,7	26,2	28,6	30,2	31,9	33,6
Динамическая вязкость, $\mu\cdot10^{-6}$ [Па·с]	19,1	19,6	20,1	20,6	21,1	21,5	21,9
Кинематическая вязкость, $\nu\cdot10^{-6}$ [Па·с]	16,96	17,95	18,97	20,02	21,09	22,1	23,13
Коэффициент объемного теплового расширения, $\beta\cdot10^{-3}$ [град$^{-1}$]	3,2	3,1	3,0	2,91	2,83	2,76	2,68
Число Прандтля, Pr	0,699	0,698	0,696	0,694	0,692	0,69	0,688

Таблица П.10

Физические свойства воды при атмосферном давлении

T, ^oC –>	40	50	60	70	80	90	100
Плотность, ρ [кг/м^3]	992	988	983	978	972	965	958
Теплоемкость, C [Дж/(кг·^{o}C)]	4174	4181	4182	4187	4195	4208	4220
Теплопроводность, λ [Вт/(К·м)]	0,635	0,648	0,659	0,668	0,674	0,68	0,683
Температуропроводность, $a\cdot10^{8}$ [м^2/с]	15,3	15,7	16	16,3	16,6	16,8	16,9

Динамическая вязкость, $\mu \cdot 10^{-6}$ [Па·с]	653,3	549,4	469,9	406,1	355,1	314,9	282,5
Кинематическая вязкость, $\nu \cdot 10^{-6}$ [Па·с]	0,659	0,556	0,478	0,415	0,365	0,326	0,295
Коэффициент объемного теплового расширения, β [град$^{-1}$]	3,87	4,49	5,11	5,7	6,32	6,95	7,52
Число Прандтля, Pr	4,31	3,54	2,93	2,55	2,21	1,95	1,75

Учебное издание

МАКАРИЧЕВ Юрий Александрович
ИВАННИКОВ Юрий Николаевич

Численное моделирование МКЭ в электротехнике с использованием программной среды ELCUT

Редактор
Компьютерная верстка
Выпускающий редактор

Подп. в печать
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная
Усл. п.л. . Уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Рег. №
Заказ №

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8

Вопросы к зачету

1. Пакет прикладных программ Mathcad как средство моделирования электротехнических и электромеханических преобразователей.
2. Система инженерных и научных расчётов MathCAD. Общая характеристика системы и её отличия от других аналогичных математических систем.
3. Командное окно MathCAD. Строка меню и основные команды меню.
4. Ввод действительных чисел. Форматы представления чисел их установка и изменение.
5. Требования к имени переменной.
6. Простейшие арифметические действия и вывод промежуточных результатов на монитор.
7. Правила ввода векторов и матриц.
8. Операции над массивами и матрицами. Обращение к элементам векторов и матриц.
9. Извлечение и вставка частей матриц.
10. Работа системы в режиме прямых вычислений.
11. Назначение и применение процедуры *plot*.
12. Процедуры оформления графиков: задание масштаба, надписи осей, заголовка.
13. Вывод нескольких графиков в одних осях.
14. Способ задания цвета линии, символов точек, вида линии.
15. Оформление процедуры *text*.
16. Формирование подокон и работа с ними.
17. Функция *legend*.
18. Операторы ввода данных с клавиатуры.
19. Операторы управление вычислительным процессом.
20. Оператор условного перехода.
21. Оператор цикла с предусловием.
22. Арифметический оператор цикла.
23. Режим программирования. Виды файлов.
24. Особенности создания m-функций в MathCAD
25. Основные особенности оформления m- файлов
26. *Script* файл и правило его оформления.
27. Создание файл – функций.
28. Использование подокон для вывода численной информации.
29. Организация повторного вычисления и окончания вычислительного процесса.
30. Организация изменения данных в диалоговом режиме
31. Графическое оформление результатов расчетов
32. Организация управления цветом графика с помощью оператора *menu*
33. Моделирование установившегося тока внезапного короткого замыкания трансформатора
34. Моделирование свободного тока внезапного короткого замыкания трансформатора
35. Моделирование полного тока внезапного короткого замыкания трансформатора
36. Построение зависимостей составляющих токов внезапного короткого замыкания трансформатора в функции времени
37. Моделирование тока включения трансформатора под напряжение
38. Построение зависимости тока включения трансформатора в сеть в функции времени
39. Моделирование периодического тока внезапного короткого замыкания синхронного генератора
40. Моделирование апериодического тока внезапного короткого замыкания синхронного генератора
41. Моделирование полного тока и построение зависимостей мгновенных значений составляющих тока внезапного короткого замыкания синхронного генератора в функции времени
42. Расчет параметров схемы замещения АД для режима пуска
43. Расчет входного сопротивления для режима пуска асинхронного двигателя

44. Расчет пускового тока режима пуска асинхронного двигателя
45. Расчет пускового и максимального моментов режима пуска асинхронного двигателя
46. Решение обыкновенны х дифференциальных уравнений с помощью механизма *OLE, OLE2*.
47. Операции над полиномами.
48. Анализ экспериментальных данных. Интерполяция, регрессия в MathCAD
49. Элементы математической статистики в MathCAD
50. Обмен данными с другими программами в MathCAD
51. Работа с пакетом MathConex
52. Построение структурных схем и выполнение вычислений в MathCAD
53. Работа с Symbolic Mathematics
54. Расчет параметров схемы замещения режима пуска синхронного явнополюсного двигателя
55. Моделирование режима пуска синхронного явнополюсного двигателя с построением зависимости момента
56. Пакет прикладных программ Elcut как средство решения задач магнетизма, электростатики, теплопередачи и теории упругости.
57. Основные сведения об организации Elcut.
58. Типы документов, используемые в Elcut.
59. Характеристика основных типов задач, решаемых в Elcut.
60. Описание задачи. Структура базы данных.
61. Создание и ввод параметров задачи на примере задачи магнитостатики.
62. Задание связи между задачами.
63. Настройка временных параметров задачи.
64. Автоматический выбор шага во времени в нестационарных задачах.
65. Выбор единиц измерения длины и системы координат.
66. Терминология, применяемая при описании геометрии задачи..
67. Этапы создания геометрической модели.
68. Выделение, дублирование, перемещение, удаление объектов.
69. Присвоение меток геометрическим объектам.
70. Технология дискретизации области (разбиения на элементы).
71. Настройка изображения в окне модели.
72. Импорт и экспорт модели в системы автоматизированного проектирования.
73. Печать, копирование изображения модели.
74. Ввод параметров задачи. Ввод свойств материалов и граничных условий.
75. Создание новой метки и ввод ее свойств в задачах магнитостатики и нестационарного магнитного поля.
76. Ввод свойств метки в задаче магнитного поля переменных токов.
77. Ввод свойств метки в задаче электростатики.
78. Ввод свойств метки в задаче температурного поля.
79. Ввод свойств метки в задаче теории упругости.
80. Периодические граничные условия.
81. Работа с кривыми и формулами.
82. Способы достижения максимальной производительности при решении задач.
83. Анализ результатов решения. Формирование картины поля и отображаемые физические величины в задаче магнитостатики и нестационарного магнитного поля.
84. Формирование картины поля и отображаемые физические величины в задаче магнитного поля переменных токов.
85. Формирование картины поля и отображаемые физические величины в задаче электростатики.
86. Отображаемые физические величины в задачах расчета температурного поля и теории упругости.
87. Панель калькулятора. Просмотр локальных значений поля.
88. Мастер вычисления индуктивности, емкости, импеданса.
89. Графики. Выбор отображаемых величин.

90. Вычисление интегралов. Вычисляемые физические величины в электростатике.
91. Вычисляемые физические величины в магнитостатике и задачах нестационарного магнитного поля.
92. Вычисляемые физические величины в задачах температурного поля и теории упругости.
93. Таблицы и графики во времени.
94. Надстройки, поставляемые в составе Elcut
95. Программирование надстроек
96. Диалог – параметры надстройки
97. Диалог – пункт меню надстроек
98. Решение задачи магнитостатики в линейной и нелинейной постановке. Источники поля, граничные условия.
99. Нестационарная электромагнитная задача. Источники поля, граничные условия.