

Методы анализа электрических машин

Методы расчетов электромагнитных и тепловых полей
электротехнических объектов, часть 3

осенний семестр

2023

Методы анализа электрических машин

Занятия

- Лекции – 1 час/нед.
- Практические – 2 час/нед.
- Лабораторные – 0
- РГР (типовой расчет) – задачи 1 и 2-5
- Зачет с оценкой

БАРС

- КМ-1: домашнее задание (4н)
- КМ-2: контрольная работа 1 (8н)
- КМ-3: контрольная работа 2 (12н)
- КМ-4: типовой расчет, задача 1 (14н)
- КМ-5: типовой расчет, задачи 2-5 (16н)
- КМ-6: опрос по теории (16н)

MOOK

- Методы расчетов электромагнитных и тепловых полей ЭМ
- <https://stepik.org/course/91241/>
 - Основы метода зубцовых контуров
 - Гармонический анализ ЭМ
- Видео-лекции и задачи → КМ-2, КМ-3, Сертификат Stepik

Методы анализа электрических машин



Литература

1. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. Абрамкин Ю.В., Власов А.И., Кузнецов В.А. (под. ред. Иванова-Смоленского А.В.) - М.: Энергоатомиздат, 1986
2. Расчет параметров, электромагнитных сил и моментов в электрических машинах. Абрамкин Ю.В., Извеков В.И., Аванесов М.А. (под. ред. Иванова-Смоленского А.В.) - М.: Изд-во МЭИ, 1990
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. - М.: Издательство МЭИ, 2004
4. Ширинский С.В. Методы анализа электрических машин: учеб.пособие. - М.: Издательство МЭИ, 2017 (ISBN: 978-5-7046-1835-5)

Методы анализа электрических машин

Электронный учебно-методический комплекс

elmech.mpei.ac.ru (srv0-5.mpei.ac.ru)

Кафедра ЭМЭА

Электронная библиотека для студентов-электромехаников

- Учебно-методический комплекс **Электрические машины** (интенсивный курс для программы «Эталон» ИЭЭ)
- Учебно-методический комплекс **Электрические машины**
- Учебно-методический комплекс **Электрические машины автоматических устройств**
- Учебно-методический комплекс **Электромагнитные расчеты** (устаревший)
- Учебно-методический комплекс **Методы расчетов электромагнитных и тепловых полей электротехнических объектов** (часть 3, 7 семестр)
- Учебно-методический комплекс **Специальные электрические машины**

Онлайн-курсы и тренажеры

- Онлайн-курс **DriveConstructor** по-русски
- MOOK **Методы расчетов электромагнитных и тепловых полей ЭМ** (на Stepik.org)

Учебные пособия

- **Проектирование вентильных индукторных двигателей.** Фисенко В.Г., Попов А.Н.
- **Вентильно-индукторные двигатели.** Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А.

Методы анализа электрических машин

Электронный учебно-методический комплекс

Учебно-методический комплекс

"Методы расчетов электромагнитных и тепловых полей электротехнических объектов"
часть 3, 7 семестр

Содержание

1. Введение

2. Магнитное поле электрической машины

- [Магнитное поле](#)
- [Учет продольной неоднородности при анализе поля](#)
- [Магнитное поле в зазоре ЭМ](#)
- [Конформные преобразования](#)
- [Преобразование Шварца-Кристоффеля](#)
- [Упрощенная модель паза](#)
- [Четное и нечетное поля паза](#)
- [Напряженность магнитного поля](#)
- [Удельная магнитная проводимость зазора](#)
- [Магнитная проводимость зубцового деления](#)

3. Метод зубцовых контуров

- [Основы метода зубцовых контуров](#)

- [Тепловая схема плоской стенки](#)
- [Тепловая схема при двумерном поле](#)
- [Расчет тепловой схемы ЭМ](#)
- [Простейший анализ нестационарного процесса](#)

[Расчетное задание \(варианты\).](#)

[Расчетное задание \(задачи\).](#)

[Методические указания к выполнению расчетного задания \(старая версия\)](#)

[Вопросы к зачету.](#)

[Учебное пособие](#) - Методы анализа электрических машин. Ширинский С.В. - М.:
Издательство МЭИ, 2017 (в библиотеке и в копске МЭИ)

© Ширинский С.В.
каф. ЭМ, МЭИ, 2014-2022

Методы анализа электрических машин

Расчетное задание на сайте УМК

Варианты заданий

по курсу "Методы расчетов электромагнитных и тепловых полей электротехнических объектов", часть 3

№	ЗАДАЧА				
	первая	вторая	третья	четвертая	пятая
1	2 в.1	5 в.1	10 в.1	15 в.1	20 в.1
2	2 в.2	5 в.2	10 в.2	15 в.2	20 в.2
3	2 в.3	5 в.3	10 в.3	15 в.3	20 в.3
4	2 в.4	5 в.4	10 в.4	15 в.4	20 в.4
5	2 в.5	5 в.5	10 в.5	15 в.5	20 в.5
6	2 в.6	6 в.1	11 в.1	16 в.1	21 в.1
7	2 в.7	6 в.2	11 в.2	16 в.2	21 в.2
8	3 в.1	6 в.3	11 в.3	16 в.3	21 в.3
9	3 в.2	6 в.4	11 в.4	16 в.4	21 в.4
10	3 в.3	6 в.5	11 в.5	16 в.5	21 в.5

Задача: упражнение №____, вариант №____

Методы анализа электрических машин



Расчетное задание на сайте УМК

**Расчетное задание
по курсу
"Методы расчетов электромагнитных и тепловых полей электротехнических объектов", часть 3**

<p>Задачи</p> <p>первая</p> <p>вторая</p> <p>третья</p> <p>четвертая</p> <p>пятая</p> <p>Варианты заданий</p>	<p>Выберите в меню слева номер задачи</p> <p>В открывшемся окне найдите нужное упражнение и исходные данные для расчета в соответствии с вариантом задания</p> <p>© Ширинский С.В. каф.ЭМ, МЭИ, 2016-2022</p>
---	---

Методы анализа электрических машин

Расчетное задание на сайте УМК

Задачи

[первая](#)

[вторая](#)

[третья](#)

[четвертая](#)

[пятая](#)

[Варианты заданий](#)

Задача 1. Гармонический анализ магнитодвижущих с многофазных обмоток в зазоре электрической машины

Упражнение № 2. Для многофазной сложной двухслойной с токами прямой последовательности (принимая поверхность другого с

- построить матрицу структуры обмотки $[G]$;
- найти матрицу преобразования $[F]$ от токов ветвей к токам зуб.
- найти вектор токов зубцовых контуров для двух моментов t фазы равен максимальному положительному значению I_m и его поло.
- построить пространственные зависимости результирующей M для тех же токов зубцовых контуров, что в пункте *в*;

д) определить гармонический состав МДС обмотки вплоть до пер. Для всех этих гармоник определить: обмоточные коэффициенты относительной форме $k_{0v}^* = k_{0v}/k_{01}$; угловую скорость перемещени знаку и в относительной форме $\Omega_v^* = \Omega_v/\Omega_1$; амплитуды МДС относительной форме $F_v^* = F_v/F_1$;

е) для первоначальных гармоник определить амплитуды индукции невозбужденного сердечника в относительной форме $B_v^* = B_v/B$.

Вариант	1	2	3
<i>m</i>	3	3	3
<i>2p</i>	2	2	2

Задачи

[первая](#)

[вторая](#)

[третья](#)

[четвертая](#)

[пятая](#)

[Варианты заданий](#)

Для всех вариантов принять: $\tau=0,5$ м; $\delta=0,02$ м; $b_{п}/t_{z1}=0,4$; $f=50$ Гц; амплитудное значение тока фазы $I_m=500$ А; $k_{\delta 2}=1,0$; $y/\tau \approx 0,8$.

Упражнение № 3. Для многофазной простой двухслойной обмотки при питании ее фаз токами прямой последовательности определить то же, что и в упражнении 2 (принимая поверхность другого сердечника гладкой).

Таблица 3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
<i>m'</i>	3	4	5	6	3	4	5
<i>2p</i>	4	4	2	2	4	2	2
<i>q</i>	2	2	3	3	2	4	4
<i>a</i>	1	2	1	2	4	1	2
<i>w_к</i>	2	2	3	4	4	2	6

Для всех вариантов принять: $\tau=0,55$ м; $\delta=0,015$ м; $b_{п}/t_{z1}=0,5$; $f=50$ Гц; амплитудное значение тока фазы $I_m=500$ А; $k_{\delta 2}=1,0$; $y/\tau \approx 2/3$.

Упражнение № 4. Для многофазной простой двухслойной обмотки при питании ее фаз токами обратной последовательности определить то же, что и в упражнении 2 (принимая поверхность другого сердечника гладкой).

Таблица 4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7

Методы анализа электрических машин



КМ-1 на 4 неделе:

Элементарные магнитные поля в электрических машинах
(домашнее задание)

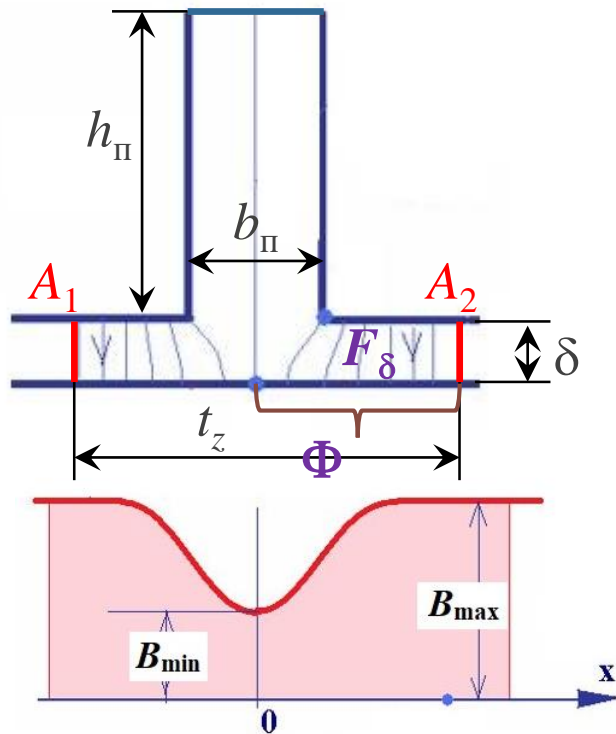
Элементарные магнитные поля в электрических машинах (домашнее задание)

КМ-1 (4 н.) – решение задач по численному расчету магнитного поля

- Создать модель магнитного поля в зазоре ЭМ с односторонней зубчатостью на протяжении одного / двух зубцовых делений:
поле возбуждения / поле от тока в пазу / поле «зубцового контура»
при условии получения максимальной индукции в зазоре $B_{\delta} = 0,7$ Тл
(расчетная длина машины $l_{\delta} = 0,1$ м)
- Построить картину поля в зазоре в пределах одного / двух зубцовых делений
- Построить кривую индукции вдоль гладкого сердечника
- Рассчитать коэффициент магнитной проводимости зазора для потока на половине зубцового деления / для потока зубцового контура

Поле возбуждения на протяжении одного зубцового деления (униполярное намагничивание)

Магнитное поле от внешнего источника, проходящее через зазор в одном направлении



- Зазор δ
- Открытый паз шириной $b_{\text{п}}$ и высотой $h_{\text{п}}$
- Зубцовое деление $t_z = b_{\text{п}} + b_z$

Граничные условия (векторный магнитный потенциал)

- условия Неймана

$$|A_1 - A_2| l_{\delta} = \Phi$$

- условия Дирихле A_1, A_2

$$\Phi = B_{\delta} S = B_{\delta} t_z l_{\delta} \quad (\text{для равномерного / гладкого зазора})$$

Кривая индукции на поверхности гладкого сердечника

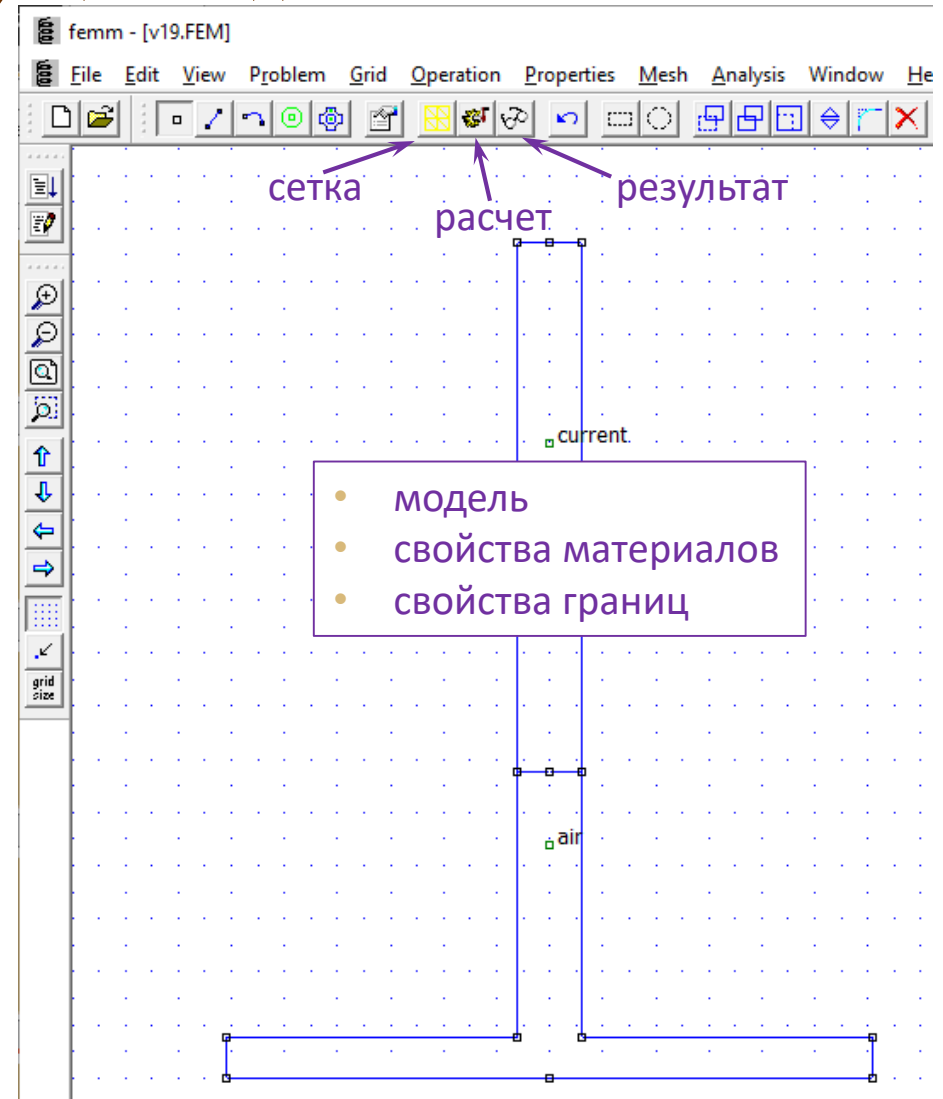
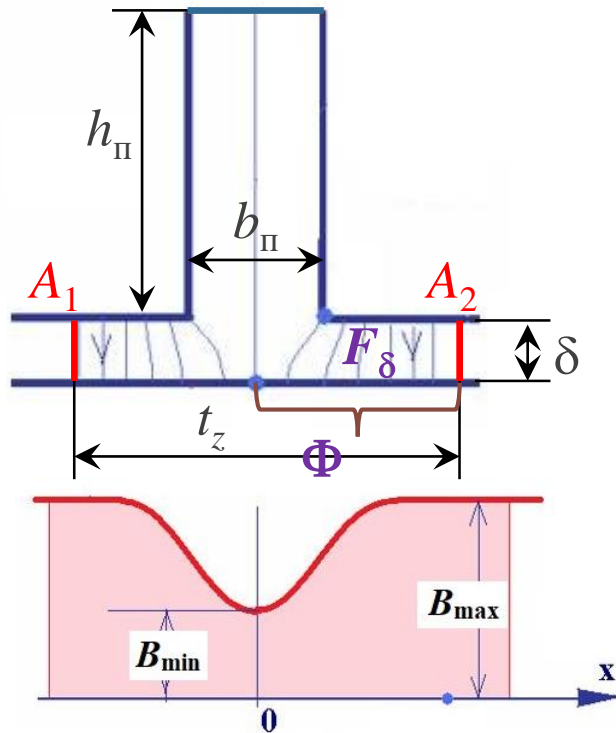
Коэффициент магнитной проводимости зазора для потока на половине зубцового деления

$$\lambda = \frac{\Lambda}{\mu_0 l_{\delta}} \quad \Lambda = \frac{\Phi}{F_{\delta}}, \text{ Гн}$$

Φ – поток через зазор на половине t_z
 F_{δ} – МДС зазора

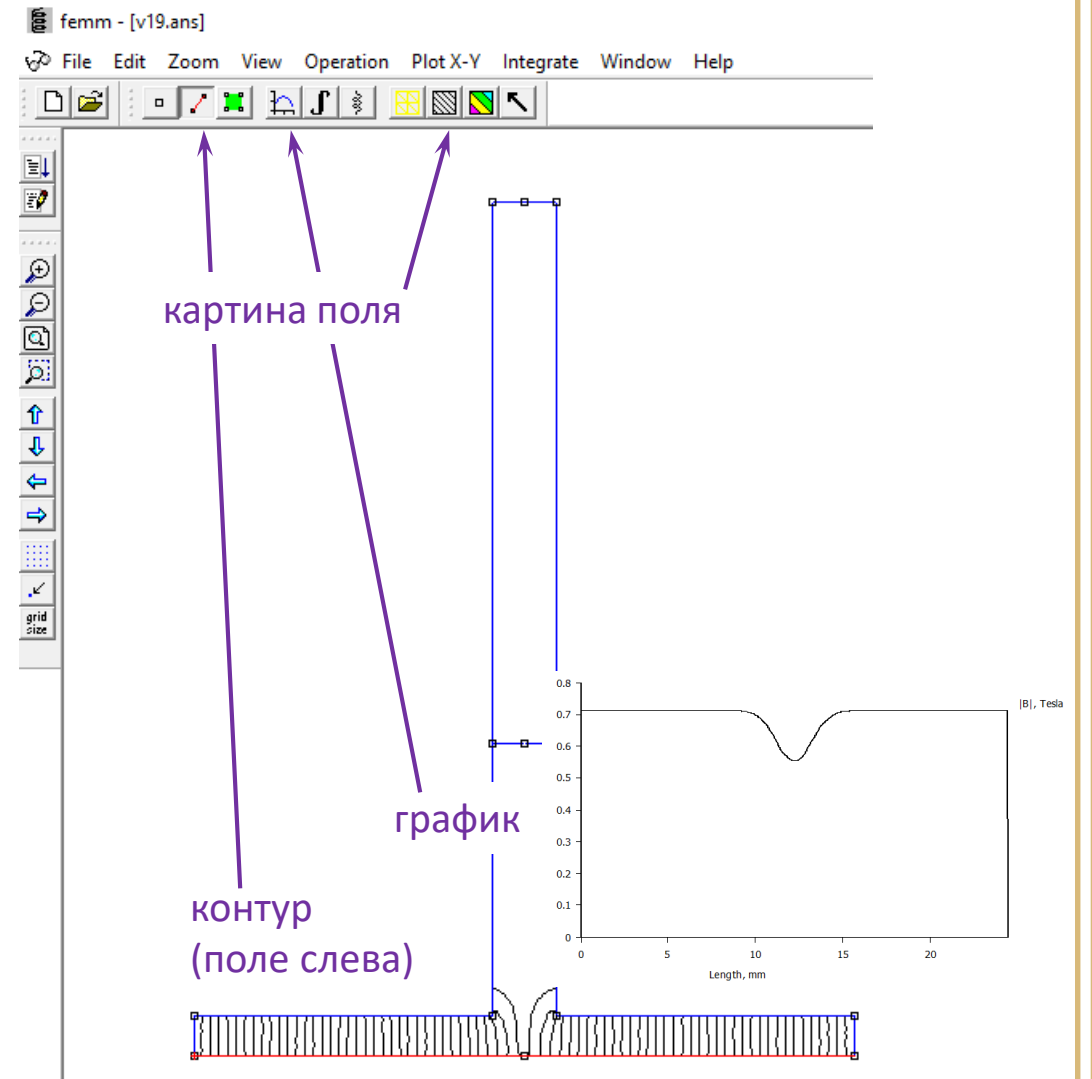
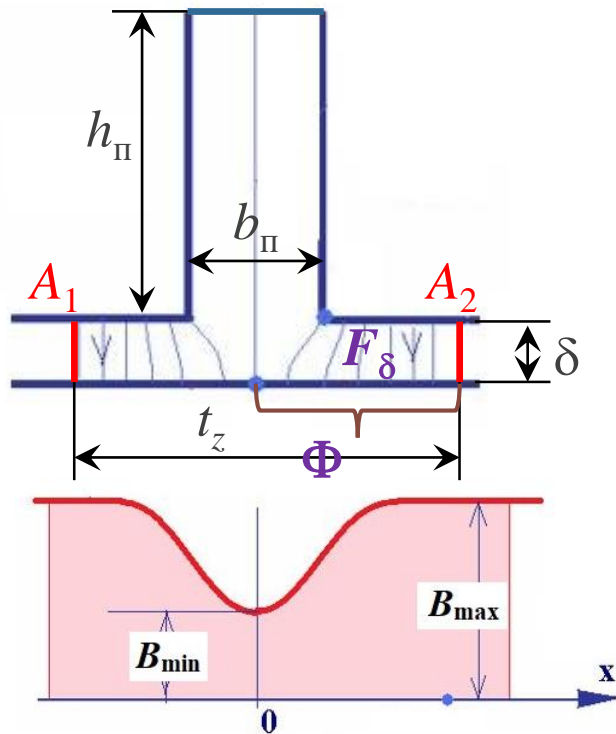
Поле возбуждения на протяжении одного зубцового деления (униполярное намагничивание)

Например, использование FEMM



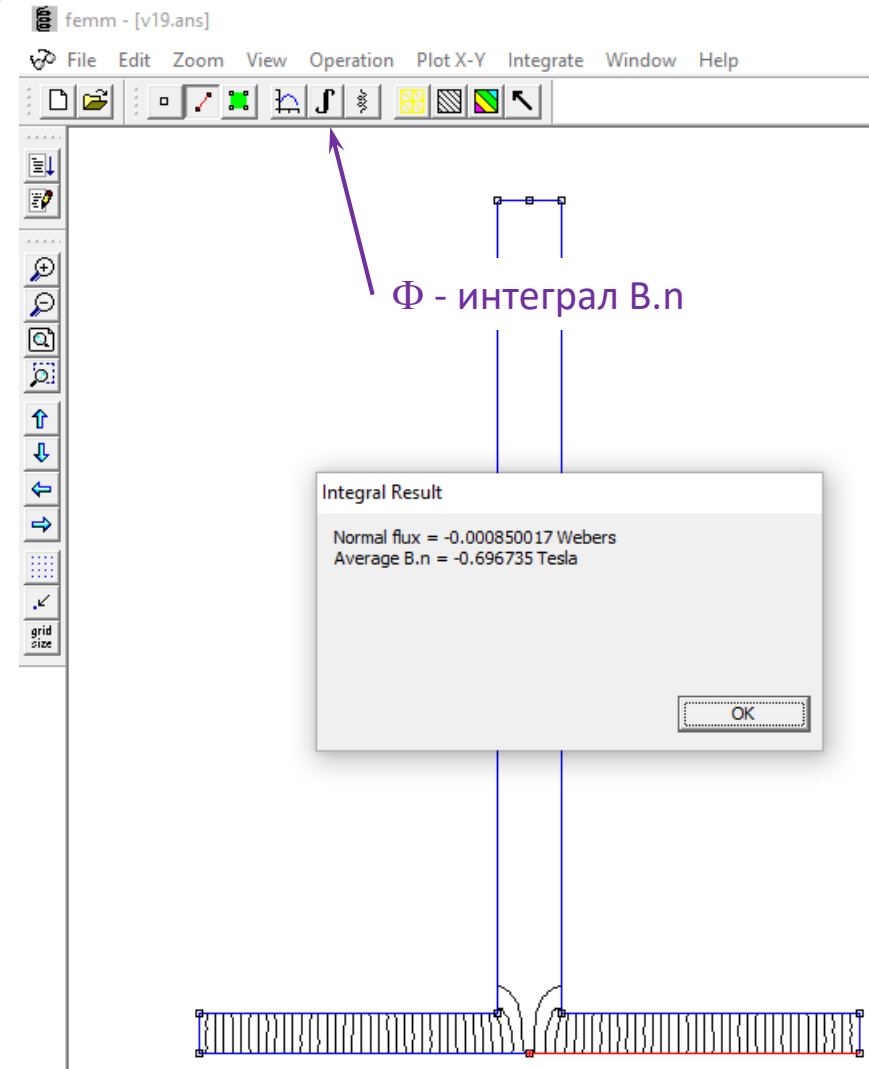
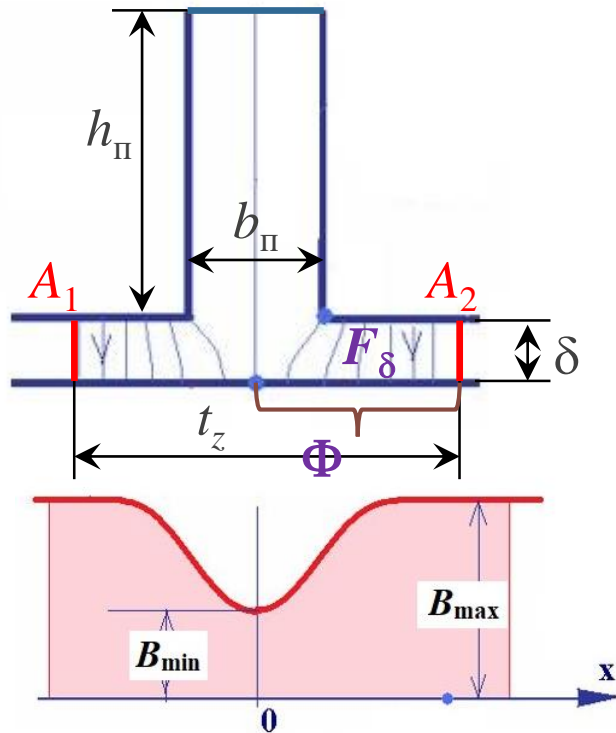
Поле возбуждения на протяжении одного зубцового деления (униполярное намагничивание)

Например, использование FEMM



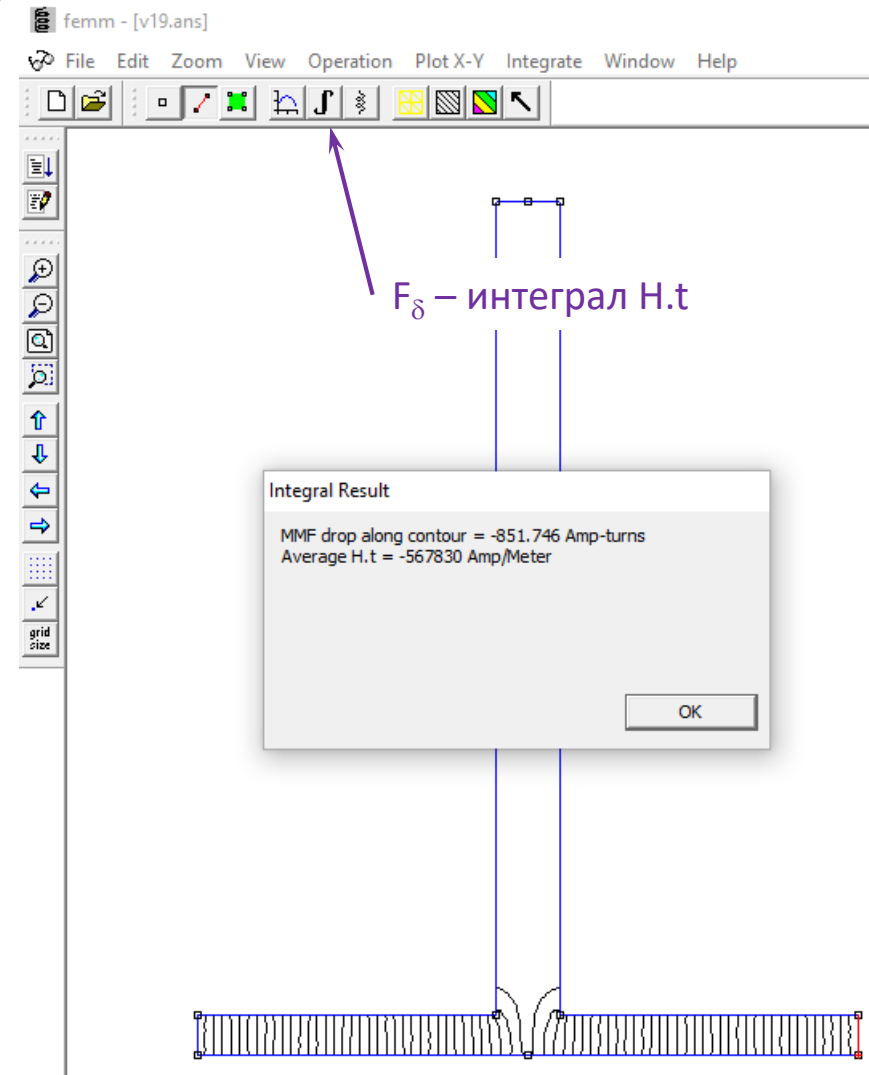
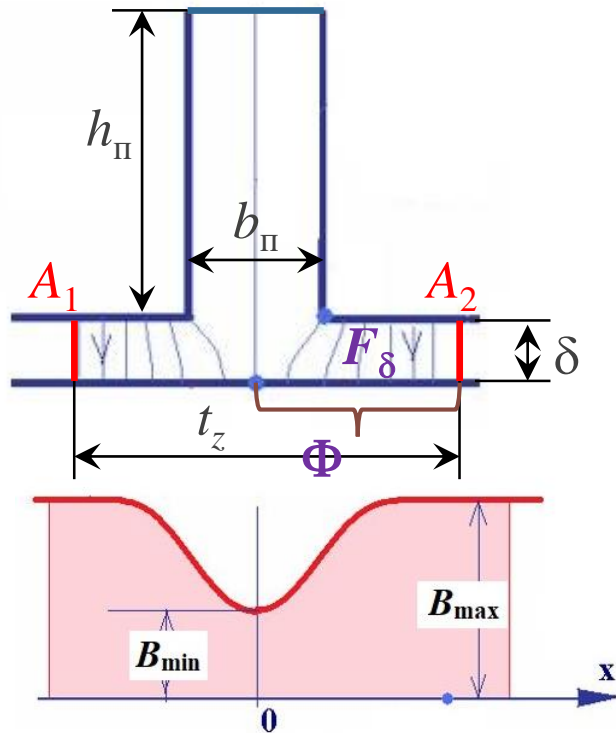
Поле возбуждения на протяжении одного зубцового деления (униполярное намагничивание)

Например, использование FEMM



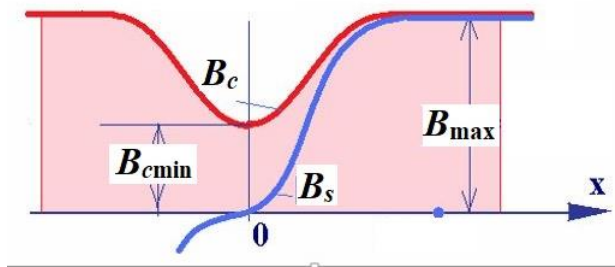
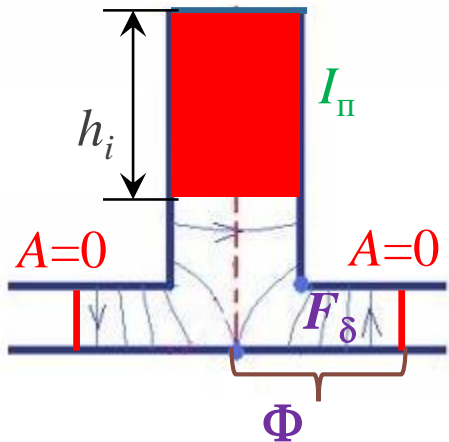
Поле возбуждения на протяжении одного зубцового деления (униполярное намагничивание)

Например, использование FEMM



Поле от тока в пазу на протяжении одного зубцового деления

Магнитное поле от тока в пазу



- Зазор δ
- Открытый паз шириной b_{II} и высотой h_{II}
- Зубцовое деление $t_z = b_{\text{II}} + b_z$
- Ток на высоте h_i $I_{\text{II}} = j_{\text{II}} S_i$ $B_{\delta\text{max}} = \frac{\mu_0 F_{\delta}}{\delta}$ $2F_{\delta} = I_{\text{II}}$

Граничные условия (векторный магнитный потенциал)

- условия Неймана
- граница $t_z - A = 0$

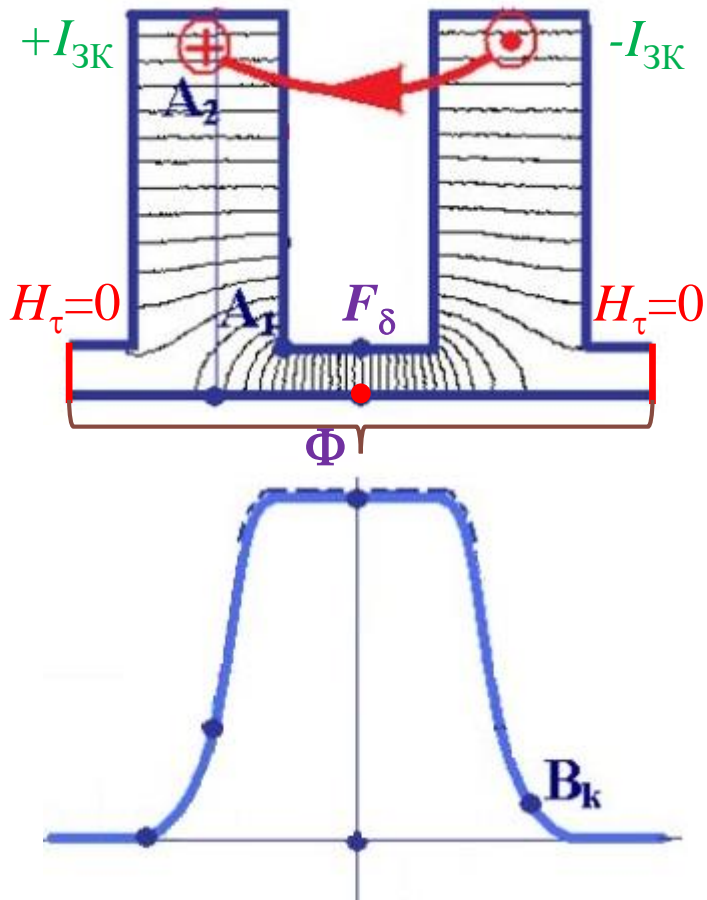
Кривая индукции на поверхности гладкого сердечника

Коэффициент магнитной проводимости зазора для потока на половине зубцового деления

$$\lambda = \frac{\Lambda}{\mu_0 l_{\delta}} \quad \Lambda = \frac{\Phi}{F_{\delta}}, \text{ Гн}$$

Поле зубцового контура на протяжении двух зубцовых делений

Магнитное поле от контура с током $I_{3К}$, охватывающего один зубец



- Зазор δ
- Открытые пазы шириной b_{Π} и высотой h_{Π}
- Два зубцовых деления $t_z = b_{\Pi} + b_z$
- Токи в пазах $I_{3К} = j_{\Pi} S_i$ $B_{\delta\max} = \frac{\mu_0 F_\delta}{\delta}$ $F_\delta = I_{3К}$

Граничные условия (векторный магнитный потенциал)

- условия Неймана (а также в одной точке $A = 0$)
- граница $t_z - H_\tau = 0$

Кривая индукции на поверхности гладкого сердечника

Коэффициент магнитной проводимости зазора

для потока зубцового контура

$$\lambda = \frac{\Lambda}{\mu_0 l_\delta} \quad \Lambda = \frac{\Phi}{F_\delta}, \text{ Гн}$$

Элементарные магнитные поля в электрических машинах (домашнее задание)

Варианты задания

номер варианта	вид поля	δ , мм	b_p , мм	h_p , мм	h_j , мм	b_z , мм
1	возбуждение	0,5	0,8	20	15	15
2	возбуждение	0,5	1,0	20	15	15
3	возбуждение	0,5	1,6	20	15	15
4	ток в пазу	0,5	0,8	20	15	15
5	ток в пазу	0,5	1,0	20	15	15
6	ток в пазу	0,5	1,6	20	15	15
7	ток ЗК	0,5	0,8	20	15	15
8	ток ЗК	0,5	1,0	20	15	15
9	ток ЗК	0,5	1,6	20	15	15

Элементарные магнитные поля в электрических машинах (домашнее задание)

Варианты задания

номер варианта	вид поля	δ , мм	b_p , мм	h_p , мм	h_j , мм	b_z , мм
10	возбуждение	1,0	1,6	25	18	18
11	возбуждение	1,0	2,0	25	18	18
12	возбуждение	1,0	3,2	25	18	18
13	ток в пазу	1,0	1,6	25	18	18
14	ток в пазу	1,0	2,0	25	18	18
15	ток в пазу	1,0	3,2	25	18	18
16	ток ЗК	1,0	1,6	25	18	18
17	ток ЗК	1,0	2,0	25	18	18
18	ток ЗК	1,0	3,2	25	18	18

Элементарные магнитные поля в электрических машинах (домашнее задание)

Варианты задания

номер варианта	вид поля	δ , мм	b_p , мм	h_p , мм	h_j , мм	b_z , мм
19	возбуждение	1,5	2,4	30	20	22
20	возбуждение	1,5	3,0	30	20	22
21	возбуждение	1,5	4,8	30	20	22
22	ток в пазу	1,5	2,4	30	20	22
23	ток в пазу	1,5	3,0	30	20	22
24	ток в пазу	1,5	4,8	30	20	22
25	ток 3К	1,5	2,4	30	20	22
26	ток 3К	1,5	3,0	30	20	22
27	ток 3К	1,5	4,8	30	20	22

Отчет (домашнее задание)

- Титульный лист
 - Задание (с числ. данными по варианту)
 - Картина поля
 - Кривая индукции
 - Расчет проводимости зазора
-
- в формате pdf послать на адрес ОСЭП
 - на 4 неделе
 - при необходимости – исправить расчет

Профиль «Электромеханика»

Направление 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, профиль – Электромеханика

Базовая дисциплина – Электрические машины

Профилирующие дисциплины:

- Методы расчетов электромагнитных и тепловых полей электротехнических объектов (5-6-7 семестр)
- Решение задач практической электромеханики (6 семестр)
- Основы проектирования силовых трансформаторов электроэнергетики (6 семестр)
- Основы проектирования электрических машин технологического оборудования (7-8 семестр)
- Анализ процессов в электрических машинах и трансформаторах в ненормальных и аварийных режимах работы (7 семестр)
- Анализ неустановившихся процессов в электрических машинах и трансформаторах (8 семестр)
- Электромеханические системы электрических машин и аппаратов (7 семестр)
- Электрические машины и трансформаторы для специальных применений (8 семестр)
- Методы мониторинга состояния электрических машин и трансформаторов (8 семестр)

Курсовые проекты: Трансформатор; Асинхронный двигатель; Синхронный генератор

Профиль «Электромеханика»

Выпускная работа бакалавра

- Тема / руководитель
- Преддипломная практика
- Защита ВКР
- Содержание: обзорная часть / расчетная часть
- Графическая часть – презентация PowerPoint
- Бланк задания и титульный лист
- Рецензия и отзыв руководителя
- Бумажный и электронный экземпляр (pdf)

Онлайн ресурсы

Официальный сайт кафедры ЭМЭЭА для студентов: <https://app.simplenote.com/p/v95NTp>

Электронная библиотека для студентов электромехаников: <http://elmech.mpei.ac.ru> (<http://srv0-5.mpei.ac.ru>)

Международные программы: https://mpei.ru/internationalactivities/international_programs_for_students_MPEI/

Магистратура 13.04.02 Программа – Электромеханическое преобразование энергии и методы его исследования

- Выбор программы магистратуры
- Приемная комиссия
- Вступительные испытания (ВМ и ТОЭ)
- Программа обучения
- НИР
- Магистерская диссертация
- Ежегодная студенческая конференция