

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева
Кафедра «Электроэнергетика»

Методические указания
по выполнению курсовой работы

учебной дисциплины (модуля)

«Компьютерные технологии в проектировании»
(4 семестр)

Уровень профессионального образования:
высшее образование – бакалавриат

Направление (специальность) подготовки:
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль (специализация) подготовки:

Электроснабжение

Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: (очная, заочная)

Тула 2015 г.

Методические указания по выполнению курсовой работы учебной дисциплины «Компьютерные технологии в проектировании» разработаны доцентом Ю.И. Гореловым и обсуждены на заседании кафедры «Электроэнергетика» института высокоточных систем им. В.П. Грязева, протокол заседания кафедры № 6 от "03" июня 2015 г.

Зав. кафедрой _____ В.М. Степанов

Оглавление

<u>1</u>	<u>Цель и задачи выполнения курсовой работы.....</u>	<u>6</u>
<u>2</u>	<u>Основные требования к курсовой работе.....</u>	<u>6</u>
2.1	Технологические требования.....	6
2.2	Технические требования.....	6
2.3	Рекомендации по выполнению расчетов.....	7
2.4	Порядок расчетов.....	8
2.5	Требования к оформлению отчета.....	9
<u>3</u>	<u>Варианты заданий для курсовой работы.....</u>	<u>10</u>
3.1	Методические указания по выбору варианта курсовой работы.....	10
3.2	Варианты курсовой работы.....	11
3.3	Физические параметры материалов индуктора и нагреваемых образцов.....	19
3.3.1	Удельные параметры нагреваемого металла.....	19
	Список литературы.....	20

1 Цель и задачи выполнения курсовой работы

Настоящие методические указания служат пособием для студентов, выполняющих курсовую работу по дисциплине «Компьютерные технологии в проектировании». Целью курсовой работы является получение студентами практических навыков по моделированию и проектированию электротехнических устройств с использованием программного комплекса ELCUT.

2 Основные требования к курсовой работе

2.1 Технологические требования

Толщина слоя под закалку: $\delta = 1$ мм

Температура поверхности изделия в конце нагрева: $t_{\text{кон}} = 750 \pm 20$ °С

Перепад температур в слое под закалку: $\Delta t \leq 100$ °С

Перепад температур по поверхности нагреваемого участка: $\Delta t \leq 150$ °С

Время нагрева: $\tau_{\text{нагр}} \leq 25$ с.

Режим нагрева: «по теплопроводности».

2.2. Технические требования

Индуктор получает питание через согласующий трансформатор отстабилизированного источника тока повышенной частоты. Ток в первичной обмотке трансформатора может регулироваться в диапазоне от 2 до 50 А.

Частота источника 100 кГц. Форма кривой тока – чистая синусоида.

Величина тока в индукторе лежит в пределах 3...20 кА.

Зазор между индуктором и нагреваемой заготовкой от 2 до 5 мм.

2.3. Рекомендации по выполнению расчетов

На данной частоте глубина проникновения токов в холодную сталь составляет примерно 0,25 мм. В процессе нагрева изменяются свойства слоев металла (удельное сопротивление, теплопроводность, теплоемкость и др.), поэтому нагреваемый металл целесообразно разбить на слои в зоне нагрева. На глубине проникновения необходимо выделить два слоя равной толщины (для учета насыщения стали в зоне выделения максимальной полезной мощности).

Для учета изменения тепловых свойств стали, а также более точного построения кривой насыщения в металле выделим еще 4-5 слоев за первыми двумя. Толщина слоев при удалении от поверхности металла возрастает в геометрической прогрессии. Например, третий слой в 2 раза больше второго, четвертый в 2 раза больше третьего и т. д. Суммарная толщина слоев должна быть в 5-10 раз больше глубины проникновения токов в металл, так как в процессе нагрева величина глубины проникновения увеличивается. В процессе расчета будем дискретно (по шагам) изменять свойства слоев с ростом температуры.

Требуется провести не менее пяти шагов расчета (таблица 1).

Таблица 1

Шаг расчета	Температура поверхности в конце нагрева, °С/К
1	200/473
2	400/673
3	600/873
4	700/973
5	750/1023

Задачу нестационарной теплопередачи необходимо рассматривать как нелинейную, так как теплоемкость и теплопроводность металла зависят от температуры. Однако в этом случае время расчетов многократно возрастает, и такая задача не всегда имеет решение (итерационный процесс не сходится, и в этом случае необходимо уменьшить шаг расчета по времени). В случае, если требуемый шаг расчета по времени получается очень маленьким (больше десяти точек за один шаг), проще с целью экономии машинного времени каждый раз при смене шага расчета вводить новые значения теплопроводности и теплоемкости в метки блоков слоев металла.

На время расчетов значительное влияние оказывают:

- 1) частота источника электромагнитного поля в задаче магнитного поля переменных токов;
- 2) количество блоков с отличными от нуля значениями теплопроводности.

Для минимизации времени расчетов выставляем «прикидочный» режим в обеих задачах, а в задаче нестационарного теплообмена исключаем теплообмен внешней поверхности нагреваемого металла с окружающей средой, так как нагрев происходит относительно быстро и потери во внешнюю среду незначительны.

Для того чтобы исключить индуктор, воздух и экраны из расчетов поля температур, устанавливаем в метках соответствующих блоков в задаче нестационарной теплопередачи каждого шага нулевое значение теплопроводности.

Одним из технологических требований к операции индукционного нагрева, согласно заданию, является обеспечение равномерности нагрева посечению заготовки. Недопустимы локальные перегревы (допустимый перепад температур вдоль поверхности нагреваемого участка составляет 150 °С).

Регулировать поток энергии, передаваемой электромагнитным полем от индуктора к заготовке, можно, изменяя угол наклона плоскости индуктора к заготовке. При этом меняется настил тока в заготовке (напряженность магнитного поля на поверхности заготовки). Также можно применять электромагнитные экраны для прикрытия участков заготовки, нагрев которых нежелателен. Экраны представляют собой короткозамкнутые витки (в осесимметричном случае) или пластины (при нагреве плоских заготовок), выполненные из меди, устанавливаемые между индуктором и заготовкой.

Толщина экрана должна в несколько раз превышать глубину проникновения тока в медь на расчетной частоте. Конструкция экранов и индуктора должна предусматривать простоту установки на нагреваемую заготовку.

2.4. Порядок расчетов

На каждом шаге необходимо провести связанный расчет задач магнитного поля переменных токов и нестационарной теплопередачи.

Зададим начальные условия моделирования:

1. Необходимо определить начальную магнитную проницаемость слоев металла. Для этого проводим пробный расчет электромагнитного поля в слоях, подставляя значения магнитной проницаемости примерно в соответствии с кривой намагничивания. Считаем, что напряженность поля на поверхности металла составляет $10^3 \cdot 10^4$ А/м, а на глубине проникновения токов в холодный металл 0,5.-1 А/м. После проведения пробного расчета определяем средние напряженности поля в слоях металла и корректируем магнитные проницаемости слоев. Для сокращения объема вычислений будем считать, что магнитная проницаемость слоев за время нагрева остается неизменной.

2. Для задачи нестационарной теплопередачи необходимо задать начальную температуру. Для этого проводим расчет температурного поля с мощностью тепловыделения во всех блоках модели, равной нулю, и заданной величиной температуры (293 °К) на всех ребрах сметки. Связываем полученную задачу с задачей нестационарной теплопередачи на первом шаге.

В итоге схема связанных расчетов будет выглядеть так, как показано на рисунке 1. Для удобства дальнейшей работы с моделью на каждом из шагов расчета создаем новые файлы задач и сразу связываем их между собой в соответствии со схемой (рисунок 1).

3. Определение параметров согласующего трансформатора производится по следующим формулам:

Напряжение на индукторе, В:

где - суммарная мощность тепловыделения во всех слоях заготовки в наиболее загруженном режиме, Вт; - мощность джоулевых потерь в индукторе, Вт; - суммарные потери в экранах, Вт; η_1, η_2 - коэффициент запаса, учитывающий потери в токопроводах; η_3 - коэффициент мощности индуктора (может быть определен с помощью мастера импеданса для наиболее загруженного режима); - ток индуктора (задается изначально и остается постоянным весь период нагрева), А.

Коэффициент трансформации, д. е.:

где $U_1 = 513$ В – первичное напряжение трансформатора для всех вариантов.

Ток в первичной обмотке, А:

где - суммарная потребляемая мощность в наиболее загруженном режиме, Вт.

Число витков в первичной обмотке, д. е.:

где N_2 – число витков во вторичной обмотке согласующего трансформатора для всех вариантов.

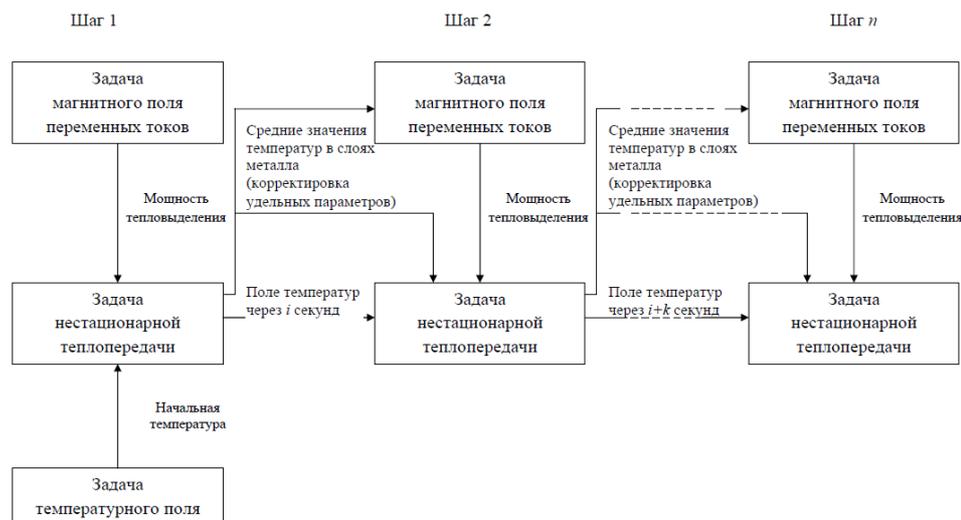


Рисунок 1 Схема выполнения связанных расчетов

2.5. Требования к оформлению отчета

В отчет вносятся следующие данные и показатели.

1. Исходные данные:

- a) геометрическая модель;
- b) удельные свойства материалов;
- c) технологические параметры нагрева (режим, рассчитанное время);
- d) параметры преобразователя частоты;
- e) таблица удельных параметров материалов слоев на каждом из шагов расчета.

2. Рассчитанные величины:

- a) подобранное значение тока в индукторе, число витков и ток в первичной обмотке согласующего трансформатора (во вторичной обмотке – 1 виток);
- b) картина электромагнитного поля на начальном этапе нагрева, значения напряженности магнитного поля в слоях металла и усредненные для слоя присвоенные значения магнитной проницаемости (представить в виде таблицы);
- c) расчет параметров согласующего трансформатора;
- d) графики нагрева: $t(z, \tau)$ – требуется построить либо трехмерный график, либо семейство кривых $t(\tau)$ в различных слоях;
- e) график распределения температур вдоль контура, проведенного вглубь нагреваемого металла. Здесь следует показать конечный перепад температур на слое под закалку (примерная длина контура - 1,5 мм);
- f) график распределения температур вдоль контура, проведенного по поверхности нагреваемой детали;
- g) картина температур в конце нагрева;
- h) графики изменения мощности:
 - 1-й – полезной $P_{\text{пол}} = f(z, \tau)$,
 - 2-й – полезной суммарной $P_{\text{пол } \Sigma} = f(\tau)$,
 - 3-й – потерь в индукторе $P_{\text{пот. и}} = f(\tau)$,
 - 4-й – потерь в экране $P_{\text{пот. э}} = f(\tau)$.

3. Чертежи индуктора и экранов на листах формата А4.

4. Заключение по работе, содержащее данные по основным пунктам проверки корректности выбранного режима нагрева (конечное время нагрева, перепад температур в слое под закалку, перепад температур по поверхности нагреваемого участка заготовки и т. п.).

А также основные выбранные и рассчитанные параметры установки индукционного нагрева. Такие, как токиндуктора, мощность и т. п.

5. Текст отчета снабдить подробными комментариями по каждому шагу расчета и представить полученные результаты в виде графиков и таблиц.

3 Варианты заданий для курсовой работы

3.1 Методические указания по выбору варианта курсовой работы

Вид геометрической модели выбирается по первой букве фамилии:

Вариант 1 – А, Ж, Н, У, Ч.

Вариант 2 – Б, З, О, Ф, Ш.

Вариант 3 – В, И, П, Х, Щ.

Вариант 4 – Г, К, Р, Ц, Э.

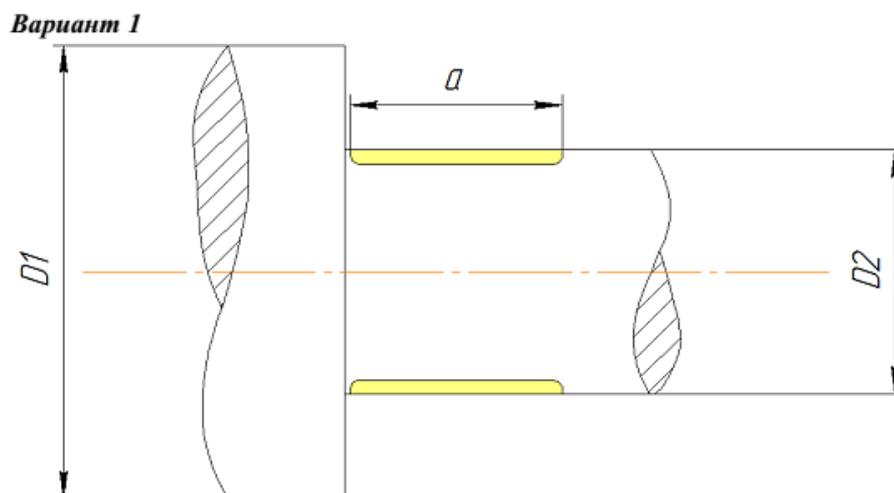
Вариант 5 – Д, Л, С, Ю.

Вариант 6 – Е, М, Т, Я.

Размеры модели выбираются по таблице, приведенной в каждом из вариантов заданий.

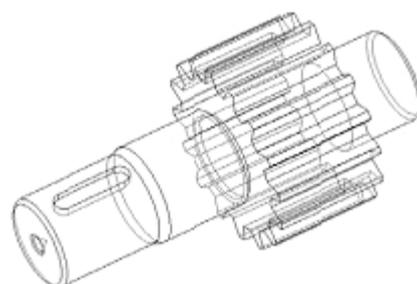
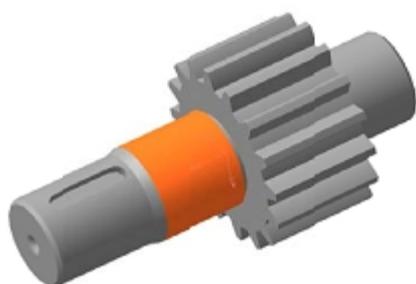
Номер подварианта соответствует сумме цифр дня рождения.

3.2 Варианты курсовой работы

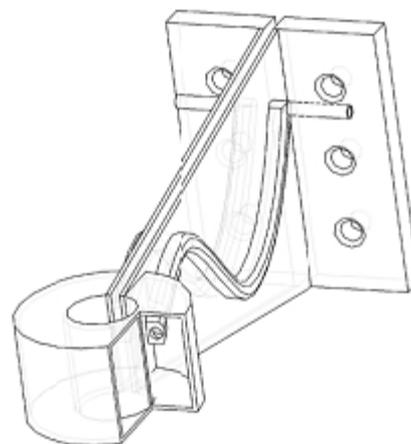
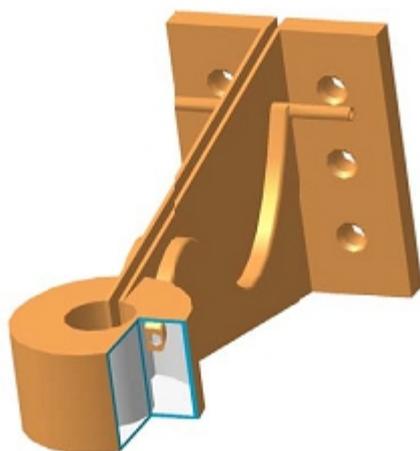


№ п/п	$D1$, мм	$D2$, мм	a , мм
1	40	10	10
2	38	11	11
3	36	11	11
4	34	12	15
5	32	13	15
6	33	12	15
7	35	11	14
8	37	11	20
9	39	10	20
10	41	11	15
11	45	12	15

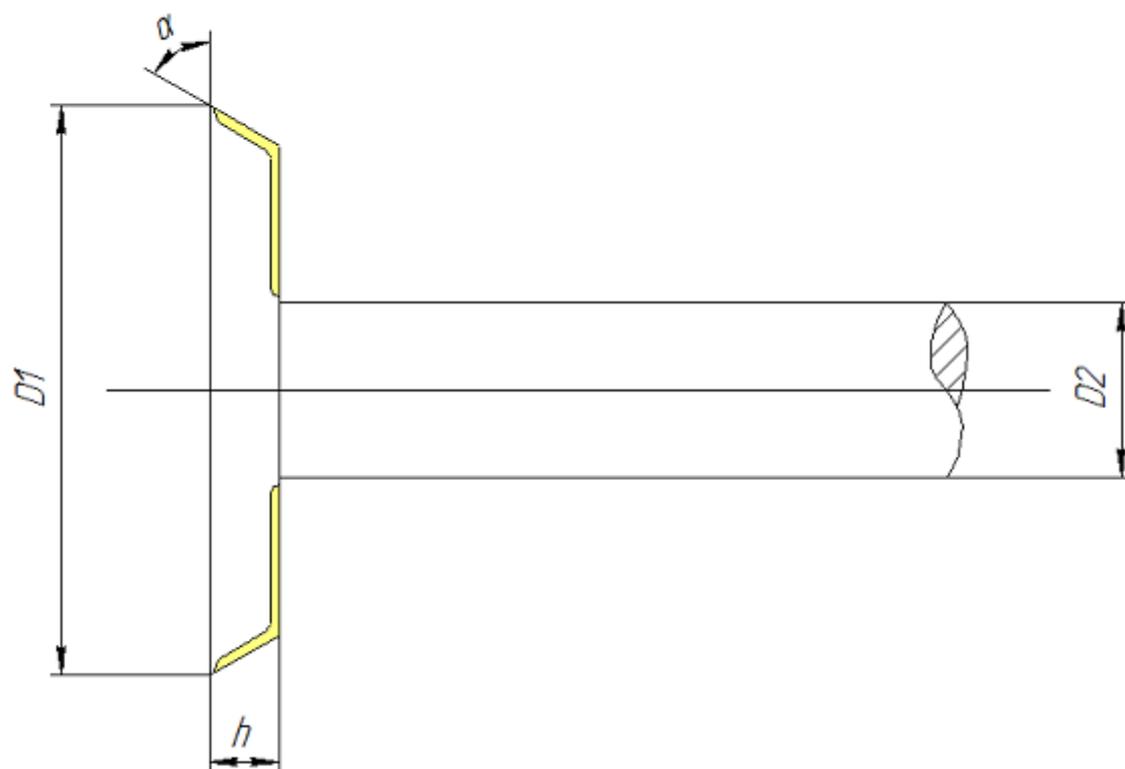
Внешний вид нагреваемой детали (вал-шестерня)



Примерный вид индуктора

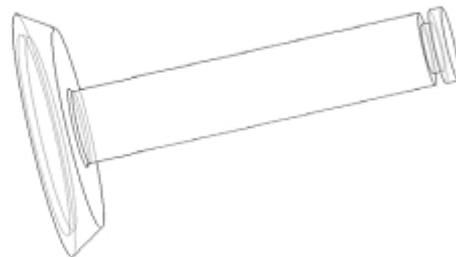


Вариант 2

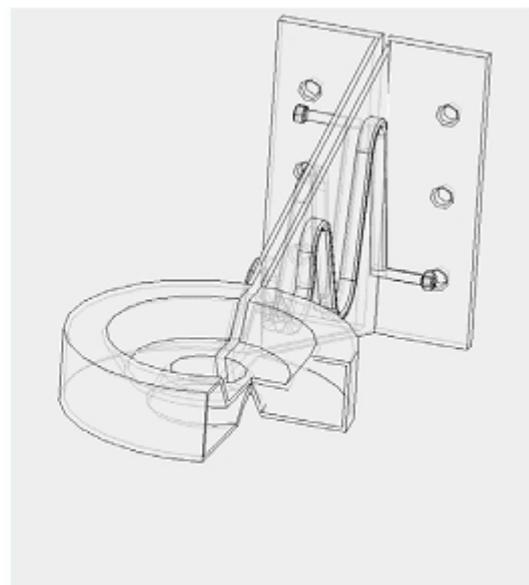
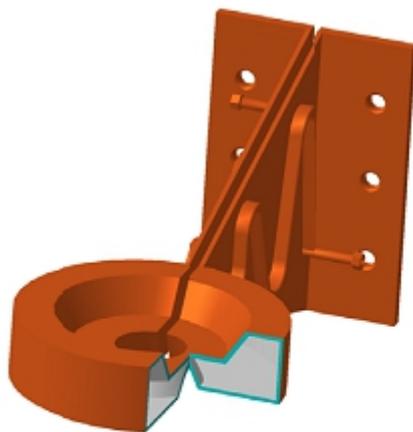


№ п/п	$D1$, мм	$D2$, мм	h , мм	α , град
1	53	10	5	45
2	55	11	6	60
3	57	11	7	46
4	59	12	8	60
5	61	13	5	45
6	65	12	6	60
7	55	10	5	45
8	60	11	8	60
9	65	10	5	45
10	50	11	6	60
11	55	12	8	45

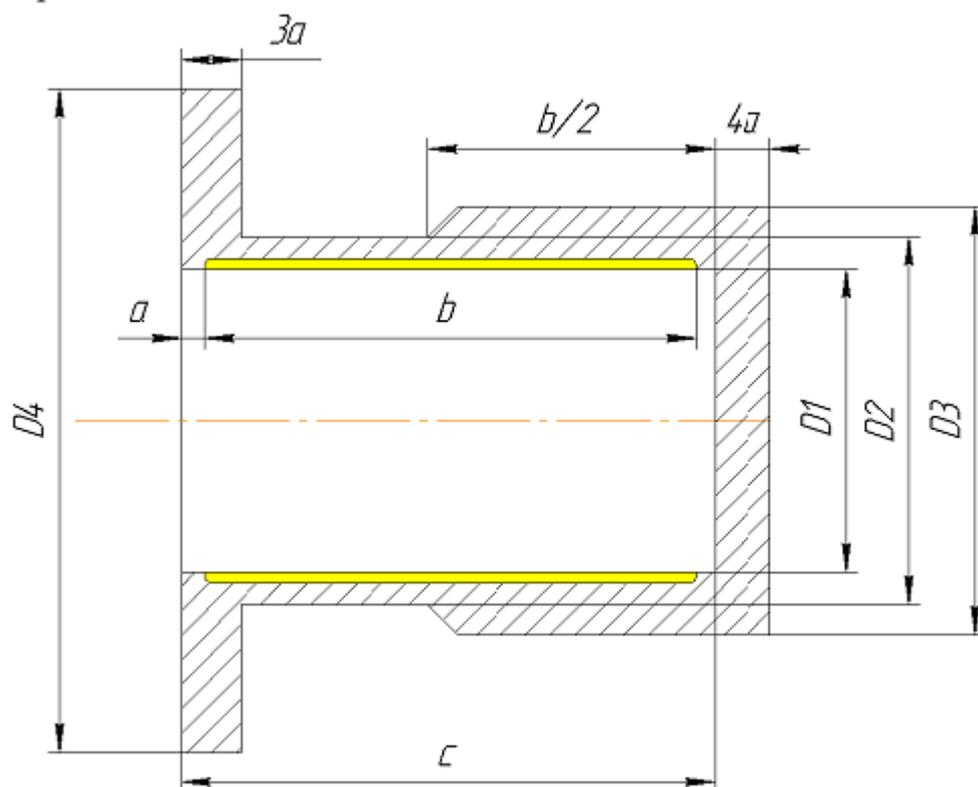
Внешний вид нагреваемой детали (клапан)



Примерный вид индуктора

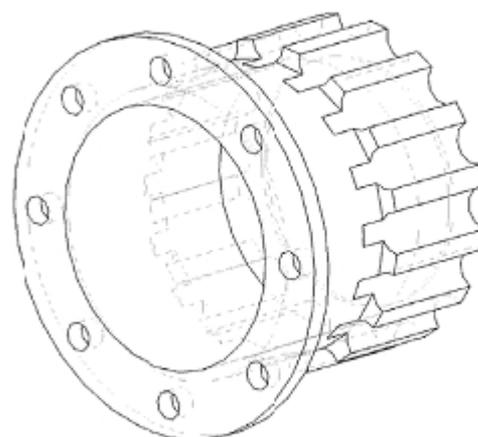
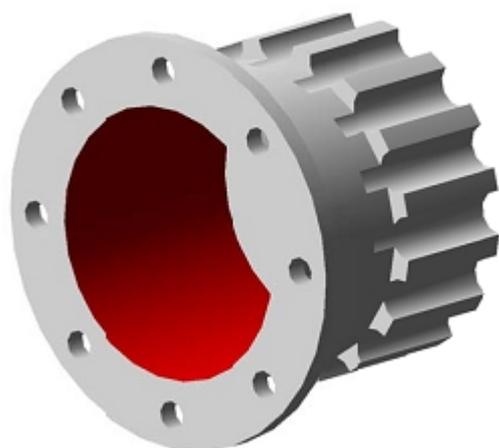


Вариант 3

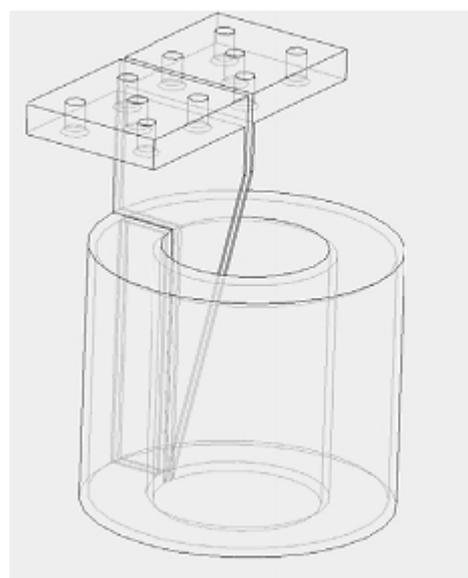
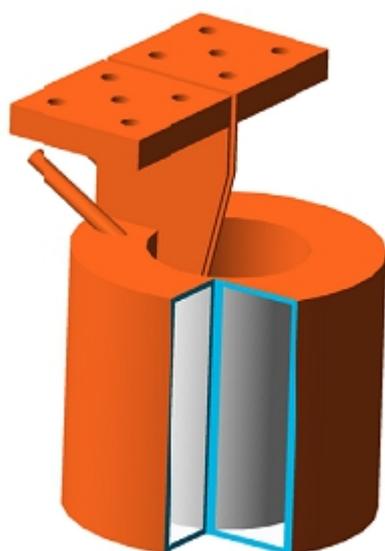


№ п/п	a , мм	b , мм	c , мм	$D1$, мм	$D2$, мм	$D3$, мм	$D4$, мм
1	1,5	35	45	40	60	80	110
2	2	30	50	45	65	80	100
3	1,5	30	45	50	60	75	100
4	2	40	50	55	70	80	110
5	1,5	40	60	40	55	70	100
6	2	30	45	60	70	80	100
7	1,5	30	50	55	65	80	110
8	2	40	45	50	60	75	100
9	1,5	50	65	55	80	90	110
10	2	45	55	40	60	80	100
11	1,5	40	50	35	50	60	100

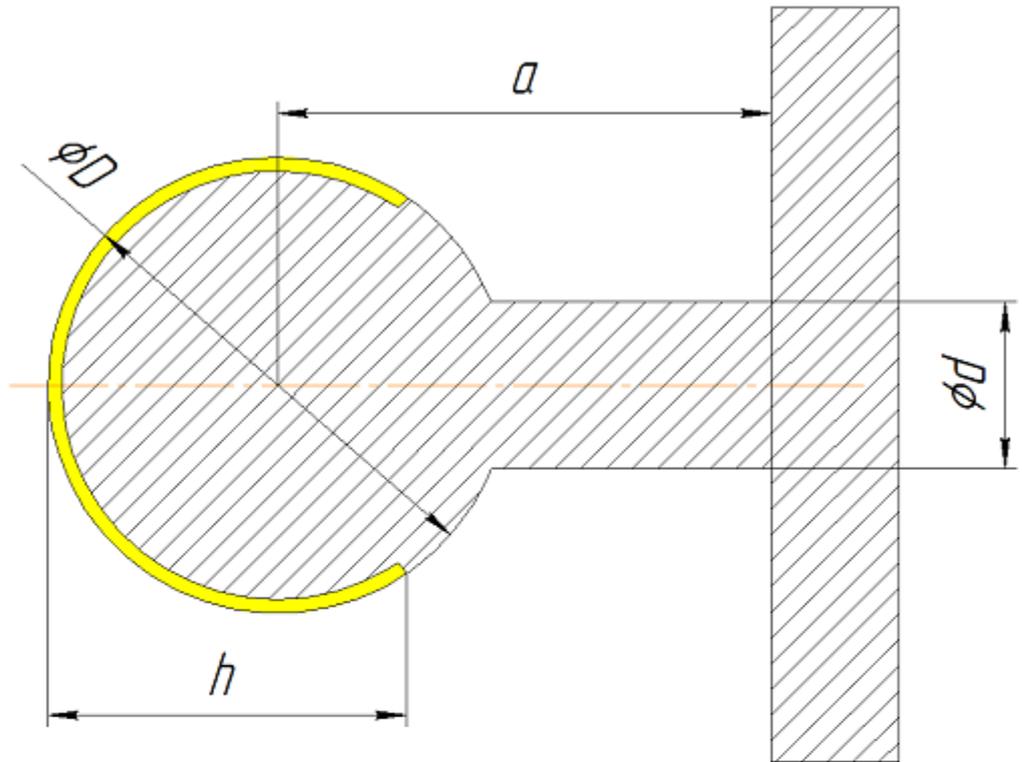
Внешний вид нагреваемой детали (полумуфта)



Примерный вид индуктора

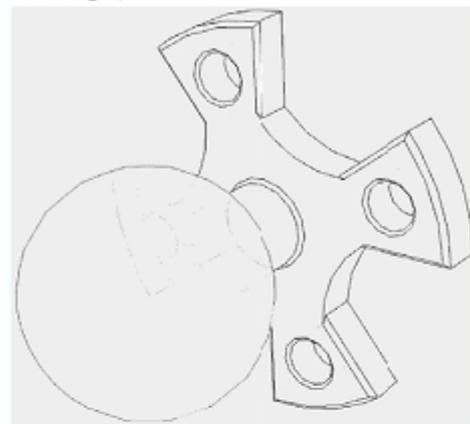
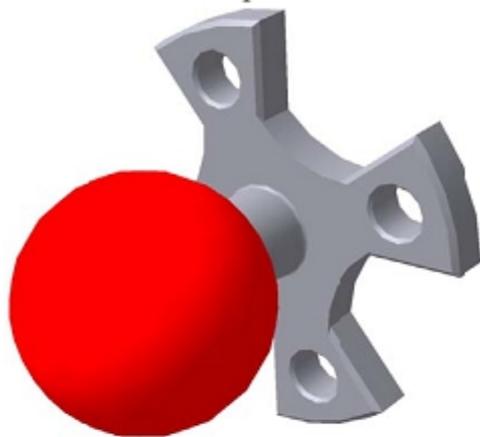


Вариант 4

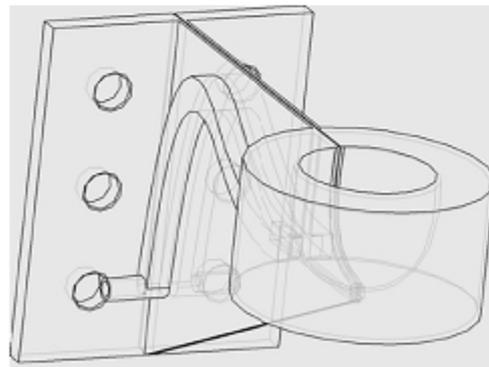
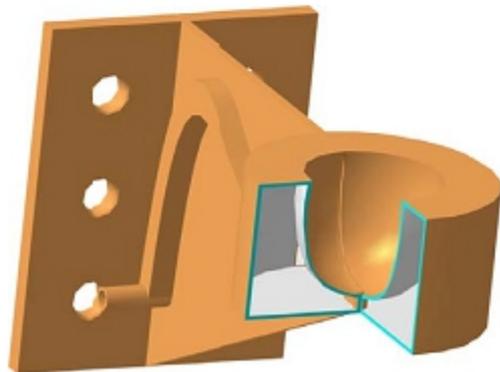


№ п/п	a , мм	d , мм	D , мм	h , мм
1	40	18	30	5
2	45	25	40	6
3	55	28	50	7
4	42	20	35	5
5	55	27	45	6
6	65	30	55	7
7	70	32	60	5
8	75	38	65	6
9	80	40	70	7
10	85	40	75	5
11	90	40	80	6

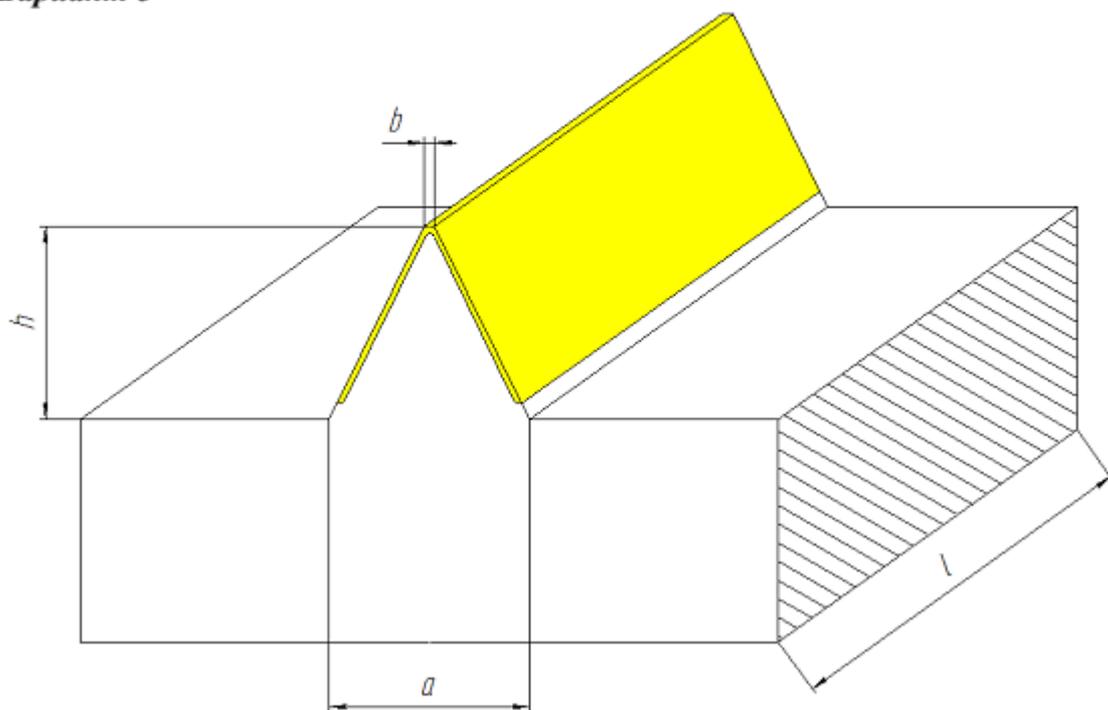
Внешний вид нагреваемой детали (шаровая опора)



Примерный вид индуктора

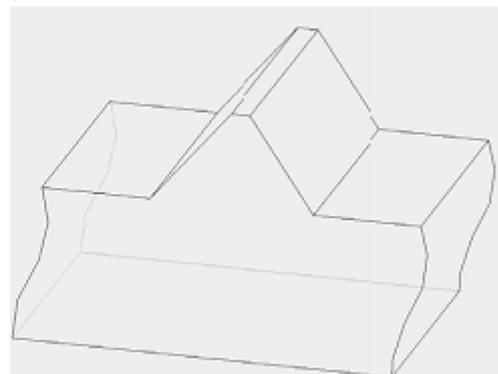
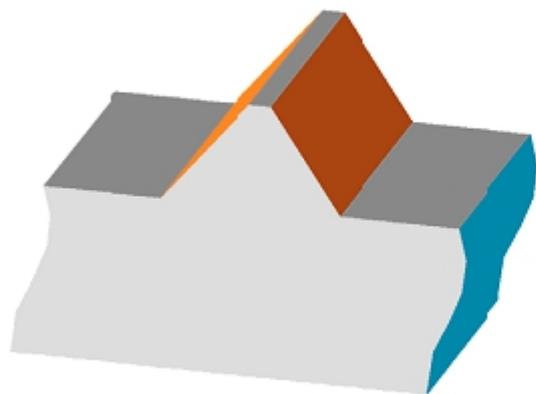


Вариант 5

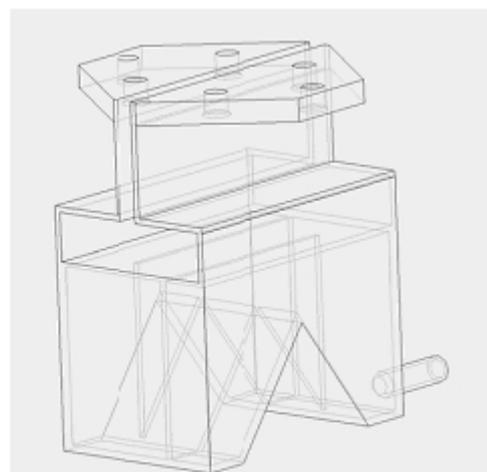
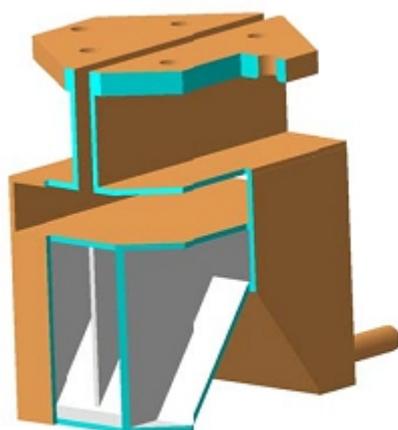


№ п/п	a , мм	b , мм	h , мм	l , мм
1	30	2	32	50
2	40	2	45	50
3	50	3	45	70
4	35	4	40	50
5	45	4	40	50
6	55	4	50	60
7	60	5	60	70
8	65	5	70	70
9	70	5	70	70
10	75	7	60	80
11	80	10	60	100

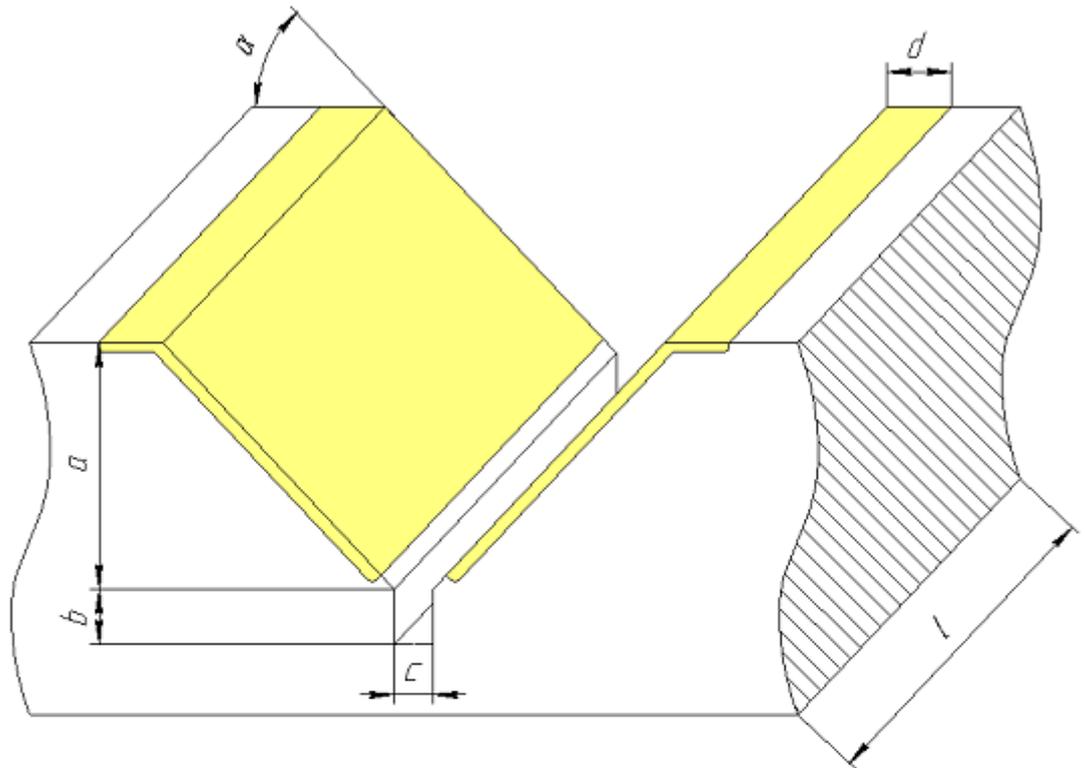
Внешний вид нагреваемой детали (станина 1)



Примерный вид индуктора

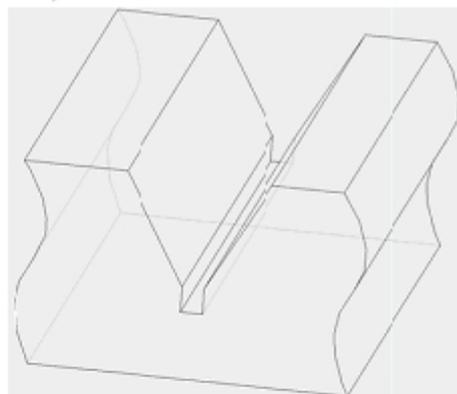
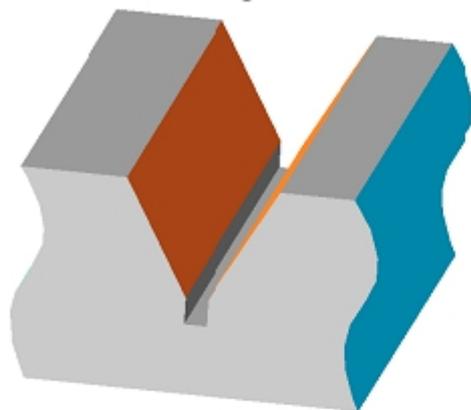


Вариант 6

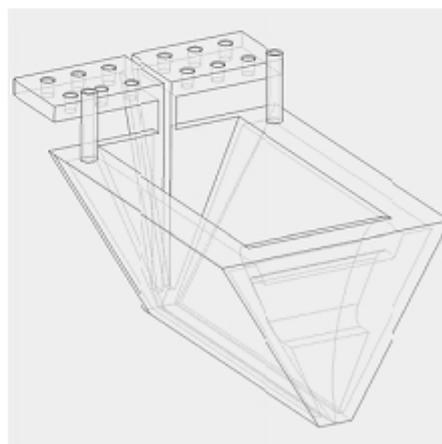
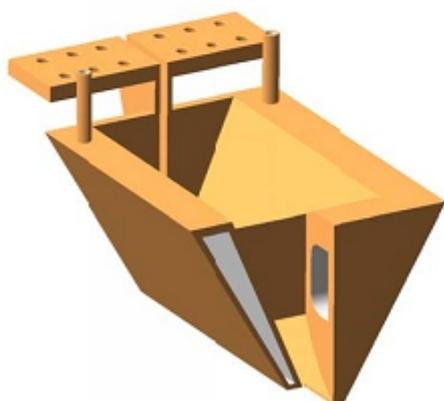


№ п/п	a , мм	b , мм	c , мм	d , мм	l , мм	α , град
1	40	5	5	5	50	60
2	45	4	10	6	50	65
3	55	4	8	7	60	60
4	60	6	8	5	60	65
5	45	8	6	6	50	60
6	65	10	10	7	70	60
7	60	12	5	5	70	60
8	65	7	10	6	70	65
9	70	7	8	7	80	60
10	75	6	8	5	80	60
11	50	6	8	6	60	60

Внешний вид нагреваемой детали (станина 2)



Примерный вид индуктора



3.3 Физические параметры материалов индуктора и нагреваемых образцов

3.3.1 Удельные параметры нагреваемого металла

1. Удельное электрическое сопротивление

$$\rho_{15} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\rho_{800} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

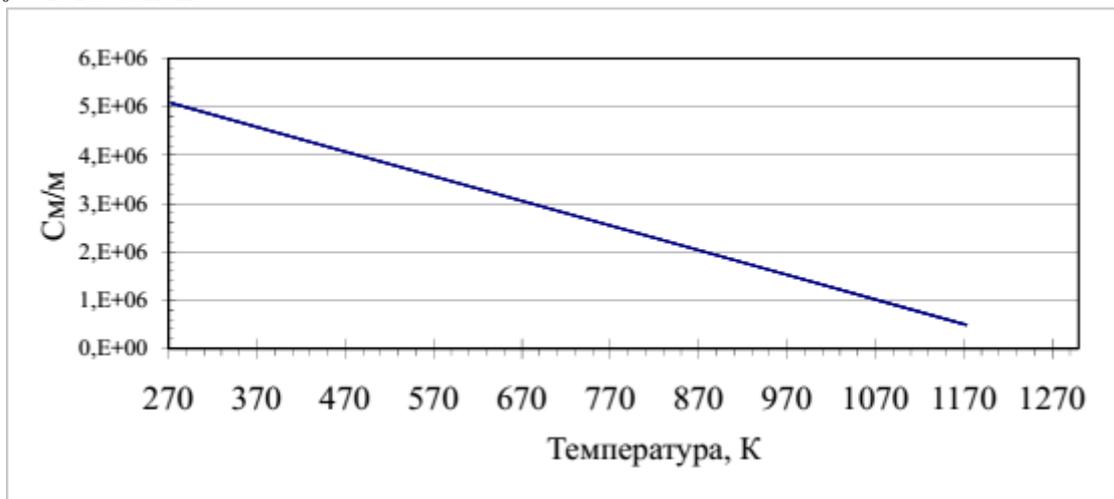


Рисунок2 Зависимость удельной проводимости от температуры

2. Удельная теплопроводность

$$\lambda_{15} = 51,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\lambda_{900} = 33,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

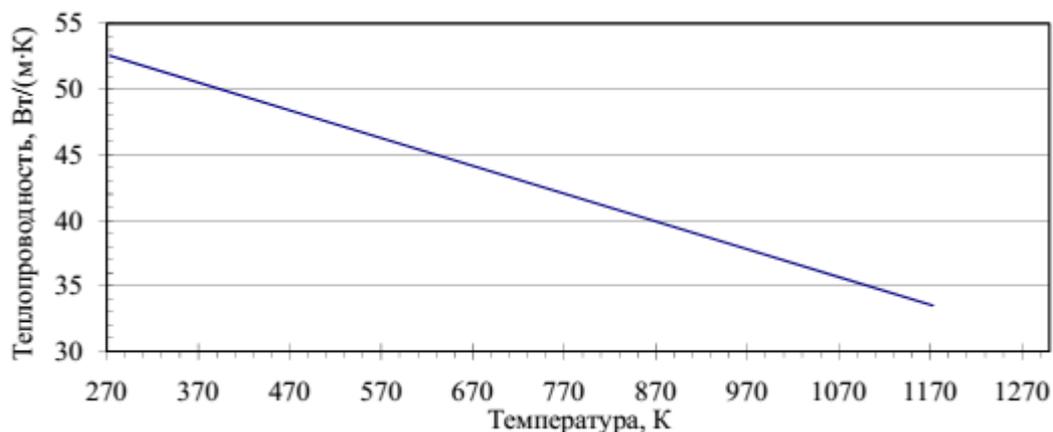


Рисунок 3 Зависимость удельной теплопроводности от температуры

3 Удельная теплоемкость

$$c_{50} = 468 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c_{900} = 640 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

3. Удельная теплоемкость (рис. П.2.3)

$$c_{50} = 468 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c_{900} = 640 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

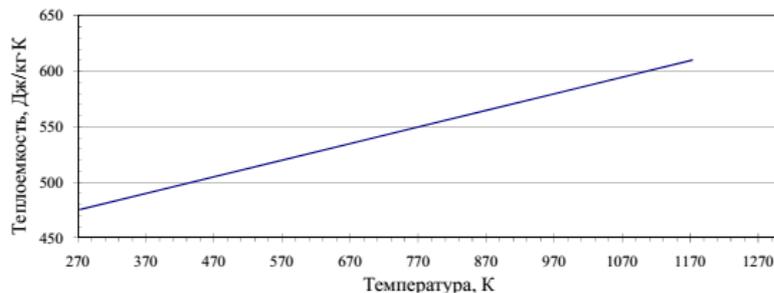


Рисунок 4 Зависимость удельной теплоемкости от температуры

4 Плотность $\gamma = 7900 \text{ кг/м}^3$.

5 Усредненная кривая намагнитчивания.

Считаем, что при больших значениях напряженности сталь насыщается, и относительная магнитная проницаемость не превышает значения 3,5 при любых значениях напряженности.

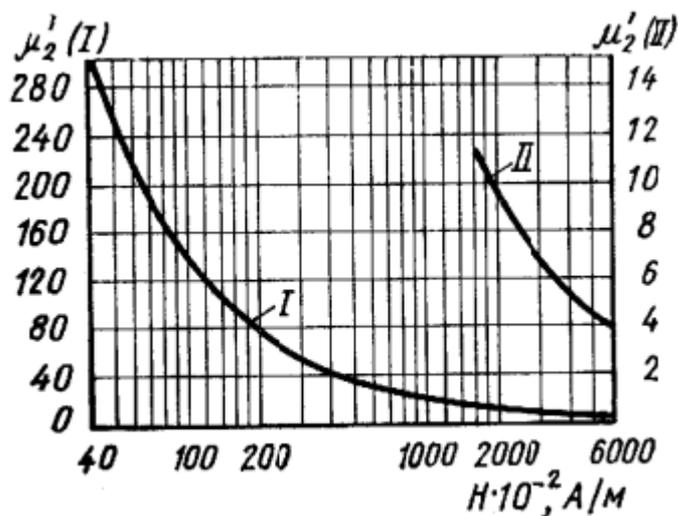


Рисунок 5 Зависимость относительной магнитной проницаемости стали от напряженности магнитного поля

Список литературы

1. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 4.2. Руководство пользователя. СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2000. 130 с.
2. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г. И. Бабат. Л. : Энергия, 1965. 522 с.
3. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева / М. Г. Лозинский. М. : АН СССР, 1958. 472 с.

4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. М. : Высш. шк., 1978. 528 с.
5. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.5. Руководство пользователя. СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2007. 298 с.