

Практическое занятие №3

Определение полезной, расчётной и установленной мощности электронагревательной установки

- Задание: 1. Определить полезную, расчётную и установленную мощность электронагревательной установки (ЭНУ) при нагреве материала от начальной температуры $t_1 = 10^0C$, до конечной температуры t_2 за время τ_k .
2. Вычислить температуру и скорость нагрева материала через время $\tau = 0; 0,05 \cdot \tau_k; 0,1 \cdot \tau_k; 0,25 \cdot \tau_k; 0,75 \cdot \tau_k; \tau_k; 2 \cdot \tau_k; 3 \cdot \tau_k$.
3. Построить зависимость $t = f(\tau)$.
4. Рассчитать время нагрева материала до температуры $t = 0,5 \cdot t_2$.
5. Определить графическим способом постоянную времени нагрева.

Таблица 1 - Исходные данные для расчётов (таблица вариантов).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Шифр технологического процесса	н.т.	з.с.	з.к.	п.д.	п.к.	п.в.	н.о.	н.с.	н.п.	п.п.
Масса M , кг	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625
Время τ_k , час	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

МЕТОДИКА РАСЧЁТА

1.1. Полезная мощность электронагревательной установки (ЭНУ):

$$P_{\text{пол}} = \frac{m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau_k} = G \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \text{Вт} \quad (1)$$

где m - масса, кг, нагреваемого материала;

c - теплоёмкость, Дж/кг \cdot 0C , нагреваемого материала;

t_1, t_2 - начальная и конечная температуры нагрева, 0C ;

τ_k - время нагрева, с;

$G = \frac{m}{\tau_k}$ - производительность установки, кг/с.

1.2. Расчётная мощность ЭНУ:

$$P_p = \frac{P_{пол}}{\eta}, Вт \quad (2)$$

где η – коэффициент, учитывающий потери в электрических и технологических элементах установки. Для электрических водонагревателей-термосов $\eta=0,85\dots0,95$, принимаем $\eta=0,95$.

1.3. Ориентировочные значения теплового КПД для некоторых электронагревательных установок сельскохозяйственного применения:

- электрические водонагреватели-термосы – 0,85...0,95;
- проточные элементные водонагреватели – 0,95...0,98;
- электродные водогрейные и паровые котлы – 0,70...0,96;
- электрические калориферы – 0,85...1,0.

1.4. Установленная мощность ЭНУ:

$$P_y = k_3 \cdot P_p, Вт \quad (3)$$

где $k_3=1,1\dots1,3$ – коэффициент запаса, учитывающий необходимость увеличения мощности из-за старения нагревателей, возможное снижение питающего напряжения, увеличения потерь в процессе эксплуатации и др. $K_3=1,1\dots1,3$, принимаем $K_3=1,3$.

2.1. Уравнение нагрева материала:

$$t = t_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} + t_2 \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}), ^\circ C \quad (4)$$

где t – текущие значения температуры, $^\circ C$;

τ – текущие значения времени нагрева, с.

Для удобства расчётов составляем таблицу 2.

Таблица 2 - Расчёт температур нагрева материала ($\tau_k=6120$ с).

	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	$0,1 \cdot \tau_k$	$0,25 \cdot \tau_k$	$0,5 \cdot \tau_k$	$0,75 \cdot \tau_k$	τ_k	$2 \cdot \tau_k$	$3 \cdot \tau_k$
τ, c								
$\frac{\tau}{T}$								
$e^{\frac{\tau}{T}}$								
$e^{-\frac{\tau}{T}} = 1/e^{\frac{\tau}{T}}$								
$(1 - e^{-\frac{\tau}{T}})$								
$t, ^\circ C$								
$\frac{e^{-\frac{\tau}{T}}}{1 - e^{-\frac{\tau}{T}}}$								
$\frac{dt}{d\tau}$								

2.2. Скорость нагрева материала:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{t_y - t_1}{T} \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} = \frac{t - t_1}{T} \cdot \frac{e^{-\frac{\tau}{T}}}{1 - e^{-\frac{\tau}{T}}} \quad (5)$$

3. По данным расчёта из таблицы 2 построить графики зависимостей $t=f(\tau)$,

$$\frac{dt}{d\tau} = f(\tau).$$

По графику $t = f(\tau)$ определяем для каждого варианта установившееся значение температуры (t_y) по асимптоте, проведенной к графику.

Зная t_y , скорость нагрева материала можно определить по формуле (5).

4. Время нагрева материала до определённой температуры:

$$\tau = T \cdot \ln \frac{t_y - t_1}{t_y - t}, c. \quad (6)$$

5. Определяем постоянную времени нагрева графически или аналитически.

1 – ый способ по формуле:

$$T = \frac{m \cdot c}{k \cdot F} \quad (7)$$

где $m \cdot c$ – тепловоспринимающая способность материала;

k – коэффициент теплопередачи;

F – площадь материала, m^2 .

2 - ой способ: графический (по касательной).

Таблица 2 - Технологические параметры

Технологический процесс и нагреваемый материал		шифр	Теплоём- кость материала, $Dж/кг \cdot ^\circ C$	Расчётная конечная температура $t_2, ^\circ C$	Постоян- ная времени T , С
Полное наименование					
Нагрев вода для технологических нужд		н.т.	4190	85-90	2300
Запаривание	Соломенной резке	з.с.	1460	102-110	2600
	Картофеля и корнеплодов	з.к.	1550	98-105	2500
Пастеризация молока	Длительная	п.д.	3920	65	2100
	Кратковременная	п.к.	3920	71	2200
	Высокотемпературная	п.в.	3920	85-96	2400
Нагрев воздуха для	Отопление ж/в помещений	н.о.	1000	30-40	1900
	Сушки семенного зерна	н.с.	1000	60-70	2000
	Сушки продовольствен. зерна	н.п.	1000	120-140	2700
Нагрев почвы парников и теплиц		п.п.	850	18-23	1800

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Исходные данные для расчётов (задание).
2. Формулы для расчётов.
3. График зависимости $t = f(\tau)$, $\frac{dt}{d\tau} = f(\tau)$.
4. Графически определить постоянную времени нагрев.
5. Выводы.

Практическое занятие №4
Выбор параметров трансформатора для
электроконтактного нагрева

Цель занятия: 1.Изучить основные области применения электроконтактного нагрева, его преимущества и недостатки.

2.Освоить методику расчёта параметров трансформатора для электроконтактного нагрева.

Задание: 1.Рассчитать полезную, полную и расчётную мощность трансформатора для электроконтактного нагрева материала (далее трансформатора).

2.Рассчитать напряжение и рабочий ток вторичной обмотки трансформатора.

Таблица 1 - Исходные данные для расчётов (таблица вариантов).

	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l, \text{ мм}$	370	380	390	400	410	420	430	440	415	405
$d, \text{ мм}$	25	30	35	40	45	50	55	52	48	43
$t_2, ^\circ\text{C}$	600	620	640	660	680	700	720	740	730	710
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

1.ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА

Основные области применения электроконтактного нагрева следующие:

- 1) прямой нагрев металлических деталей (заготовок) несложной формы (валов, осей труб и т. п.) при их термической и механической обработке;
- 2) контактная сварка;
- 3) наплавка при восстановлении изношенных металлических деталей;
- 4) прогрев трубопроводов с целью размораживания, предотвращения замерзания, подогрев циркулирующей жидкости и др.

Принцип электроконтактного нагрева деталей поясняется рисунком 1.

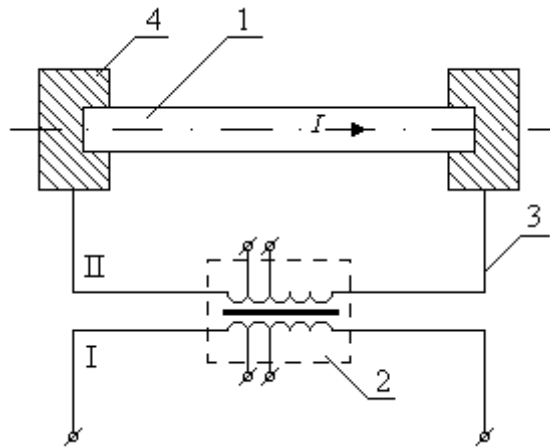


Рисунок 1 - Принципиальная схема электроконтактного нагрева: 1 – заготовка; 2 – нагревательный трансформатор; 3 – проводящие шины; 4 – зажимы (контакты).

Деталь 1, включённая в электрическую цепь, нагревается протекающим по ней током и является потребителем электроэнергии.

Основные преимущества электроконтактного нагрева заключается в следующем:

- 1) этот способ более универсален, чем, например, индукционный, где при нагреве разных деталей каждый раз приходится менять индуктор;
- 2) большая скорость нагрева ($10 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$), что позволяет получать более качественную по сравнению с нагревом в печах структуру металла;
- 3) значительно меньше (в 9 – 10 раз) окисление и угар металла по сравнению с печами сопротивления;
- 4) высокая технологическая культура и санитарные условия работы.

К недостаткам электроконтактного нагрева относятся:

- 1) возможность нагрева только деталей простой формы;
- 2) необходимость в специальных нагревательных трансформаторах на большие вторичные токи;
- 3) необходимость зажимать детали, поэтому контактный нагрев более целесообразен для мелкосерийного производства.

2. МЕТОДИКА РАСЧЁТА

2.1. Полезная мощность $P_{пол}$ трансформатора электроконтактного нагрева материала определяется по формуле:

$$P_{пол} = \frac{m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau_n}, \text{кВт} \quad (1)$$

где m – масса нагреваемой заготовки, кг:

$$m = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \cdot j \quad (2)$$

d – диаметр заготовки, м;

l – длина заготовки, м;

j – плотность стали, принимается $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;

c – средняя удельная теплоёмкость стали, принимается $0,48 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

t_1, t_2 – начальная и конечная температура нагрева принять $t_1=20^\circ\text{C}$;

τ_n – продолжительность нагрева:

$$\tau_n = \frac{\Delta M}{\Delta \rho} \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \text{с} \quad (3)$$

ΔM – масса заготовки длиной 1 м, кг/м;

$\Delta \rho$ – средняя интенсивность подвода энергии на единицу длины нагреваемой заготовки, по опытным данным $\Delta \rho=160 \dots 250 \text{ кВт/м}$.

2.2. Полная мощность трансформатора:

$$S = \frac{k_3 \cdot P_{пол}}{\eta \cdot \cos \varphi}, \text{кВт} \quad (4)$$

где k_3 – коэффициент запаса, принимается в пределах $1,1 \dots 1,3$;

η – КПД, принимается в зависимости от соотношения $\frac{l}{d^2}$ из таблицы 2

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности, принимается в зависимости от соотношения $\frac{l}{d^2}$ из таблицы 2.

Таблица 2 - Данные для расчётов

$\frac{l}{d^2}, \text{ мм}^{-1}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
η	0,5	0,62	0,68	0,73	0,76	0,78	0,8	0,81	0,82	0,83	0,84
$\cos\varphi$	0,64	0,7	0,75	0,77	0,8	0,82	0,83	0,84	0,84	0,84	0,84
τ_n	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45

2.3. Трансформаторы установок электроконтактного нагрева обычно работают в повторно-кратковременном режиме, который характеризуется продолжительностью включения ($ПВ$), тогда полная расчётная мощность определяется по формуле:

$$S_{расч} = S \cdot \sqrt{ПВ} \quad (5)$$

где $ПВ$ – продолжительность включения в относительных единицах:

$$ПВ = \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_n} \cdot 100\% \quad (6)$$

τ_n - время на смену заготовки (время паузы), принимается из таблицы 2.

$ПВ$ округляется до большего стандартного ближайшего значения: 0,15; 0,25; 0,40; 0,60.

2.4. Напряжение вторичной обмотки трансформатора, которое необходимо подвести к заготовке:

$$U = \sqrt{\frac{P_{пол} \cdot R_t}{\eta_{мп}}}, B \quad (7)$$

где $\eta_{мп}$ – КПД трансформатора, принимается 0,9...0,95;

R_t – сопротивление заготовки при средней температуре нагрева:

$$R_t = k_n \cdot \rho_i \cdot \frac{l}{\pi \cdot d^2}, Ом \quad (8)$$

k_n – коэффициент поверхностного эффекта:

$$k_n = 1 + \frac{a^4}{3}, \quad \text{при } a < 1, \quad (9)$$

$$k_n = a + \frac{1}{4} + \frac{3}{64 \cdot a}, \quad \text{при } a > 1; \quad (10)$$

a - безразмерный параметр, определяется по формуле:

$$a = \frac{d}{4 \cdot Z_a} \quad (11)$$

Z_a – глубина проникновения тока в металл, м:

$$Z_a = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_t}{\mu \cdot f}} \quad (12)$$

μ – магнитная проницаемость, при высоких значениях тока, наблюдающихся при электроконтактном нагреве углеродистых сталей, можно принять $\mu=100$;

ρ_t – удельное сопротивление стали для среднего за время нагрева перепада температур:

$$\rho_t = \rho_{20} \cdot (1 + 0,0055 \cdot \Theta + 9 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta^2), \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (13)$$

ρ_{20} – удельное сопротивление при температуре 20 °С, принимается $0,135 \cdot 10^{-6}$ Ом·м;

$\Theta = \frac{t_1 - t_2}{2}$ - средний перепад температур.

2.5. Рабочий ток:

$$I = \frac{\frac{P_{\text{пол}}}{3}}{U}, \text{ А} \quad (14)$$

2.6. Напряжение холостого хода трансформатора сложное из напряжений на заготовке (U) в рабочий период и потерь во вторичной цепи (ΔU):

$$U_{x.x.} = U + \Delta U \quad (15)$$

Для такого тока можно принять $\Delta U = 0,1 \cdot U_{\bar{o},\bar{o}}$, тогда $\bar{U}_{x.x.} = 1,1 \cdot U_{x.x.}$.

2.7. На основании проведённых расчётов заносим основные параметры трансформатора в таблицу 3.

Таблица 3 - Основные характеристики нагревательных трансформаторов

Полная мощность трансформатора, кВ·А.	Вторичное напряжение, В.	Напряжение холостого хода трансформатора, В	Рабочий ток, А	Расчетная мощность трансформатора, кВ·А

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Исходные данные для расчётов (задание);
2. Формулы для расчётов;
3. Выводы.

Практическое занятие №5

Расчёт параметров диэлектрического нагрева

Задание: Рассчитать параметры генератора тока высокой частоты (ТВЧ) и размеры камеры для высокочастотной сушки зерна.

Таблица 1 - Исходные данные для расчётов (таблица вариантов)

	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\omega_1, \%$	18,0	18,1	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9
$G, \text{кг}$	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
$\varepsilon \cdot \text{tg} \delta$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$E_{\text{дон}} \cdot 10^3, \text{В/м}$	5,0	5,5	6,0	8,0	8,5	9,0	9,5	7,5	7,0	6,5
$\omega_2, \%$	13,1	13,9	13,3	13,8	13,5	13,2	13,4	13,6	13,0	13,7
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

1. ОСНОВЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Диэлектрический нагрев осуществляется в высокочастотном электрическом поле. Для нагрева электрически не проводящих материалов – диэлектриков.

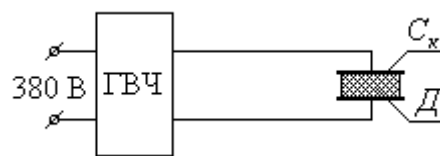


Рисунок 1 - Принципиальная схема диэлектрического нагрева: ГВЧ – генератор высокой частоты; C_k – рабочий конденсатор; Д – диэлектрик

Диэлектрик Д помещается между обкладками рабочего конденсатора C_k , в котором происходит нагрев материала, является диэлектрическим нагревателем.

Основные особенности высококачественного нагрева диэлектриков состоят в следующем:

- 1.нагрев токами высокой частоты является прямым нагревом;
- 2.токи высокой частоты позволяют осуществлять избирательный нагрев благодаря возможности концентрации мощности;
- 3.при ВЧ нагреве достигается высокая концентрация мощности единицы объёма нагреваемой среды.

К недостаткам диэлектрического нагрева следует отнести высокую стоимость оборудования, более высокий (во многих случаях) удельный расход электроэнергии, необходимость в квалифицированном обслуживающем персонале.

2.МЕТОДИКА РАСЧЁТА

2.1.Полезная мощность высокочастотного генератора для сушки зерна:

$$P_{пол} = W \cdot r, кВт \quad (1)$$

где W – количество влаги, испаряемой в единицу времени:

$$W = G \cdot \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2}, кг / с \quad (2)$$

G – производительность сушилки, кг/с;

ω_1, ω_2 – начальная и конечная влажность зерна, %;

r – удельная теплота, затрачиваемая на испарение влаги, при начальной температуре зерна $20^{\circ}C$ можно принять $r=2,51 \cdot 10^6$ кДж/кг.

2.2.Допустимая скорость сушки зерна:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{324 \cdot (\omega_1 - \omega_2 - 3) \cdot (100 - \omega_2)}, \frac{кг}{кг \cdot с} \quad (3)$$

2.3.Минимальное значение частоты:

$$f_{min} = 1.8 \cdot 10^{13} \cdot \frac{\rho \cdot r}{\eta_k} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot tg \delta} \cdot \frac{1}{E_{дон}^2}, Гц \quad (4)$$

где ρ – плотность влаги, принимаем $\rho=1000$ кг/м³;

$\varepsilon \cdot tg \delta$ – фактор потерь;

$E_{дон}$ – допустимая напряжённость электрического поля в нагреваемом материале, В/м;

η_k – КПД рабочего конденсатора, принимается 0,8...0,9.

После расчёта принимается большая частота из разрешённого диапазона, f_p , МГц: 5,28; 13,56; 27,12; 40,68; 810,36; 152,5; 300; 2375; 22125.

2.4. Удельная мощность, выделяемая в единице объёма зерна:

$$\Delta P = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f_p \cdot E^2 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (5)$$

2.5. Необходимый объём рабочей камеры:

$$V = \frac{P_{\text{пол}}}{\Delta P}, \text{ м}^3 \quad (6)$$

2.6. Расстояние между обкладками рабочего конденсатора:

$$d = \frac{U_k}{E_{\text{дон}}}, \text{ м} \quad (7)$$

где U_k – напряжение, подводимое к рабочему конденсатору (напряжение стандартных генераторов: 6; 7,5; 10 кВ).

Задаваясь размером широкой обкладки конденсатора “ b ”, можно определить высоту “ h ”, исходя из того, что $V = d \cdot b \cdot h$.

2.7. Потребляемая мощность генератора:

$$P = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_k \cdot \eta_{\varepsilon} \cdot \eta_z \cdot \eta_m}, \text{ кВт} \quad (8)$$

где η_{ε} – электрический КПД колебательного контура, $\eta_{\varepsilon}=0,65 \dots 0,70$;

η_z – КПД генератора, $\eta_z=0,65 \dots 0,85$;

η_m – технологический КПД, $\eta_m=0,8 \dots 0,9$.

2.8. Удельный расход электроэнергии:

$$a = \frac{P}{W}, \text{ кВт/кг} \quad (9)$$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Исходные данные для расчётов (задание).

2. Формулы для расчётов.

3. Выводы.

Практическое занятие №6

Расчет параметров индуктора установки для высокочастотного нагрева

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Установки индукционного нагрева применяют на ремонтных заводах и предприятиях. Токи средней и высокой частоты используют для сквозного нагрева деталей перед горячей деформацией, при восстановлении их методами наплавки, металлизации и пайки, а также для поверхностной закалки деталей и других технологических операций. Для нагрева или поверхностной закалки на средней и высокой частоте применяют специальные индукционные нагреватели. Основным элементом которых является индуктор.

ЗАДАНИЕ

Задание на выполнение практической работы выдается преподавателем каждому студенту индивидуально согласно таблице 1.

ЗАДАНИЕ. Рассчитать параметры индуктора на частоте $f=8000$ Гц для нагрева заготовок; удельную мощность принять $P_0=0,1 \cdot 10^{-2}$ кВт/мм², напряжение на индукторе $U_{\text{и}}=750$ В

Диаметр и длина (D_2 и a_2) заготовки приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Таблица вариантов

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D_2 мм	45	55	50	40	60	45	55	50	40	45	55
a_2 мм	190	210	160	180	220	160	190	150	160	120	110

Вариант	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
D_2 , мм	40	50	60	45	50	55	60	45	50	55	40
a_2 , мм	130	200	140	130	140	140	150	150	130	120	150

Вариант	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
D ₂ мм	60	45	40	55	50	60	40	45	50	55	60	40
a ₂ мм	110	140	100	110	120	120	110	180	190	200	100	120

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Индукторы изготавливают из материалов высокой электропроводности, например из меди. Наиболее выгодно нагревать индукционным способом материалы с высокой магнитной проницаемостью.

1. Горячая глубина проникновения тока в заготовку:

$$\Delta K = \frac{503}{\sqrt{f}} \text{ мм} \quad (1.1)$$

где f - частота, Гц;

2. Показатель формы слоя заготовки

$$Z_2 = \frac{D_2}{\sqrt{2} \Delta K} \quad (1.2)$$

где D_2 – диаметр заготовки, мм;

3. Диаметр индуктора:

$$D_1 = 1,7 D_2, \text{ мм} \quad (1.3)$$

4. Длина индуктора:

$$a_1 = a_2 + D_1 \text{ мм} \quad (1.4)$$

где a_2 – длина заготовки

5. Коэффициент приведения параметров:

$$a_n = \frac{K_m^2}{K_2^2 + A_2^2} \quad (1.5)$$

где A_2 - поправочный коэффициент формы заготовки,

K_2 -поправочный коэффициент для учета самоиндукции:

$$K_2 = f \left(\frac{D_2}{a_2} \right) \quad (1.6)$$

K_m -поправочный коэффициент для учета взаимоиндукции.

Значения коэффициентов K_2 и K_1 приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Значения коэффициентов K_2 и K_1 для учета самоиндукции

D/a	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
K	0,98	0,96	0,92	0,88	0,85	0,82	0,79	0,76	0,74	0,71
D/a	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6
K	0,55	0,52	0,5	0,48	0,46	0,44	0,43	0,41	0,4	0,39
D/a	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	10	15
K	0,3	0,28	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,2	0,15

Продолжение таблицы 2

D/a	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7
K	0,69	0,64	0,61	0,58	0,56
D/a	3,8	4,0	4,5	5,0	5,5
K	0,37	0,36	0,34	0,32	0,30
D/a	20	25	30	50	100
K	0,12	0,1	0,09	0,06	0,03

6. Приведенное активное сопротивление заготовки определяется по формуле:

$$r_2^1 = a_n r_2 = a_n \pi \rho_2 \cdot \frac{Z_2^2 A_2}{a_2}, \text{ Ом} \quad (1.7)$$

где ρ_2 - удельное сопротивление заготовки в нагретом состоянии принять:

$$\rho_2 = 1 \cdot 10^{-3}, \text{ Ом} \cdot \text{мм} \quad (1.8)$$

7. Приведенное реактивное сопротивление заготовки:

$$x_2^l = a_n K_2 (1 - B_2) x_2 = a_n K_2 (1 - B_2) 2\pi f \frac{\pi^2 D_1^2}{a_2} \cdot 10^{-10}, \text{ Ом} \quad (1.9)$$

Таблица 3 - Значение самоиндукции

$\frac{D_1}{a_1}$	K_m при различных значениях a_1/a_2								
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,75	2,0	2,5
0,05	0,9	0,83	0,77	0,71	0,67	0,62	0,57	0,5	0,4
0,1	0,89	0,82	0,76	0,7	0,66	0,62	0,56	0,49	0,39
0,2	0,85	0,79	0,74	0,69	0,65	0,6	0,55	0,48	0,39
0,4	0,77	0,72	0,67	0,63	0,6	0,56	0,52	0,45	0,37
0,6	0,7	0,65	0,61	0,57	0,54	0,51	0,47	0,42	0,33
0,8	0,63	0,58	0,56	0,52	0,49	0,46	0,42	0,38	0,3
1,0	0,58	0,54	0,5	0,47	0,44	0,42	0,38	0,34	0,28

Таблица 4 - Таблица параметров заготовки

Z_2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
A_2	0	0,1	0,34	0,36	0,28	0,24	0,2	0,18	0,16	0,13	0,11	0,09	0,08
B_2	0,1	0,96	0,8	0,49	0,35	0,28	0,24	0,2	0,17	0,14	0,11	0,09	0,08

где B_2 – поправочный коэффициент формы заготовки.

8. Глубина проникновения тока в медь индуктора:

$$\Delta = \frac{70}{\sqrt{f}}, \text{ м} \quad (1.10)$$

9. Активное сопротивление индуктора:

$$r_1 = r_{1n} \cdot K_r = \rho_1 \cdot K_r \cdot \frac{\pi D_1'}{a_1 \tau_1 q_3}, \text{ Ом} \quad (1.11)$$

где r_{1n} – сопротивление индуктора постоянному току

ρ_1 - удельное сопротивление меди принять $0,0175 \cdot 10^{-3}$ ом мм

τ_1 – толщина стенки индуктора, принять $1 \cdot 10^{-3}$ м,

q_3 – коэффициент заполнения, равный 0,85,

$$D_1' = D_1 + 2\tau \text{ - наружный диаметр индуктора} \quad (1.12)$$

K_r – коэффициент учитывающий увеличение сопротивления под действием поверхностного эффекта

Таблица 5 - Таблица данных индуктора

τ/Δ_1	0,5	1,0	1,5	2	2,5	3	4	5
K_2	1,01	1,2	1,5	1,8	2,45	3	4	5
K_x	0,1	0,6	1,2	1,7	2,4	3	4	5

10. Реактивное сопротивление индуктора:

$$x_l = 2\pi f \frac{\pi^2 D^2}{a_1} \cdot K_l \cdot 10^{-10} \text{ Ом} \quad (1.13)$$

где $K_l = f\left(\frac{D_1}{a_1}\right)$ - поправочный коэффициент для учета самоиндукции.

11. Полное эквивалентное электрическое сопротивление индуктора (приведенное):

$$Z_9 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (r_1 + r_2^1)^2}, \text{ м} \quad (1.14)$$

12. К.п.д. и коэффициент мощности индуктора:

$$\eta_u = \frac{r_2^1}{r_1 + r_2^1}; \quad \cos\varphi_u = \frac{r_1 + r_2^1}{Z_9} \quad (1.15)$$

13. Полезная и полная мощность в заготовке:

$$P_m = P_0 \pi D_2 a_2 \text{ кВт} \quad (1.16)$$

$$P_2 = P_m + \Delta P_m = \frac{0.00374 a_1}{\lg \frac{D_1}{D_2}} + P_m \text{ кВт} \quad (1.17)$$

где ΔP_r - тепловые потери через изолирующий цилиндр

14. Ток и напряжение индуктора (приведенные):

$$I_u' = \sqrt{\frac{P_2 \cdot 10^3}{r_2'}}, \text{ А} \quad (1.18)$$

$$U_u' = I_u' Z_9 \text{ В} \quad (1.19)$$

15. Параметры индуктора

а) полная подведенная мощность

$$P_u = \frac{P_2}{\eta_u}, \text{ кВт} \quad (1.20)$$

б) число витков

$$\omega = \frac{U_u}{U'_u} \quad (1.21)$$

в) ток индуктора

$$I = \frac{I_u}{\omega} \text{ А} \quad (1.22)$$

г) активное, реактивное и полное сопротивление

$$r_u = \omega^2 (r_1 + r'_2); x_u = \omega^2 (x_1 - x'_2); Z_u = \omega^2 Z_o \quad (1.23)$$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. В отчете привести пример расчета по использованным формулам параметров индуктора.
2. Построить графические зависимости.
3. Провести анализ полученных зависимостей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Область применения устройств высокочастотного нагрева.
2. Объяснить физическую сущность высокочастотного нагрева.
3. Каким образом меняются параметры индуктора.