

Практическое занятие №5

Расчёт параметров диэлектрического нагрева

Задание: Рассчитать параметры генератора тока высокой частоты (ГВЧ) 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.

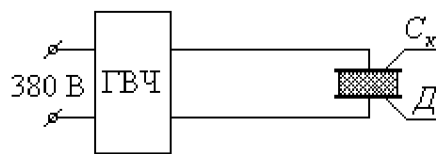


Рисунок 1 - Принципиальная схема диэлектрического нагрева: ГВЧ – генератор высокой частоты; C_k – рабочий конденсатор; Д – диэлектрик

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:

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

где W – количество влаги, испаряемой в единицу времени:

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

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°C можно принять $r = 2,51 \cdot 10^6 \text{ кДж/кг}$.

2.2. Допустимая скорость сушки зерна:

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

2.3. Минимальное значение частоты:

$$f_{\text{min}} = 1,8 \cdot 10^{13} \cdot \frac{\rho \cdot r}{\eta_k} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot \text{tg} \delta} \cdot \frac{1}{E_{\text{дон}}^2}, \text{ Гц} \quad (4)$$

где ρ – плотность влаги, принимаем $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$;

$\varepsilon \cdot \text{tg} \delta$ – фактор потерь;

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

η_k – КПД рабочего конденсатора, принимается $0,8 \dots 0,9$.

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:

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

где $\eta_{\text{э}}$ – электрический КПД колебательного контура, $\eta_{\text{э}} = 0,65 \dots 0,70$;

$\eta_{\text{г}}$ – КПД генератора, $\eta_{\text{г}} = 0,65 \dots 0,85$;

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 $U_0 = 750$ 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:

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

Таблица 3 - Значение самоиндукции

$\frac{D_1}{a_1}$	Км 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 B₂ – 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):

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

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

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

13. Полезная и полная мощность в заготовке:

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

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

где ΔP_r - тепловые потери через изолирующий цилиндр

14. Ток и напряжение индуктора (приведенные):

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

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

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

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

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.