

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
«Северный Арктический федеральный университет»

Институт энергетики и транспорта

Кафедра электротехники и энергетических систем

Электрический расчёт

Индукционной тигельной печи

Методические указания
к выполнению расчётно – графической
работы по электротехнологическим установкам

Архангельск
2014

Рассмотрены и рекомендованы к изданию
методической комиссией института энергетики и транспорта
«Северного Арктического федерального университета»
«26» 03.2014 г.

Составители:

А.А. Горяев, доц., канд. техн. наук,
Н.Б. Баланцева, доц. Канд. техн. наук

Рецензент

С.В. Петухов, доц., канд. техн. наук

УДК 621.3.031

Горяев А.А., Баланцева Н.Б. Расчёт индукционной тигельной печи:
методические указания к выполнению расчётно – графической работы № 6 по
электротехнологии. – Архангельск: Изд – во САФУ, 2014. – 19 с.

Подготовлены кафедрой электротехники и энергетических систем ИЭиТ.
В настоящих указаниях приведён поэтапный расчёт индукционной тигельной
печи. Приведены порядок выполнения работы и требования к его оформлению.
Предназначены для студентов специальности 140100.62 всех форм обучения.
Табл. 5, библиогр 5.

@ Северный Арктический
федеральный университет
имени М.В. Ломоносова
Горяев А.А.
Баланцева Н.Б.
2014

В соответствии с учебным планом студенты специальности 140100.62
выполняют расчётно – графическую работу по дисциплине
«Электротехнологические установки» по теме «Электрический расчёт
индукционной тигельной печи (ИТП)»

Введение

Под индукционной установкой понимают весь комплекс устройств, обеспечивающих осуществление электротермического процесса.

Индукционной печью называется часть индукционной установки, включающая индуктор, каркас, камеру для плавки и т. д.

При плавке в тигельной печи ферромагнитных металлов разогрев шихты в первый период до точки Кюри ($740 \sim 770^\circ\text{C}$), магнитная проницаемость сохраняет свою величину и разогрев шихты произойдёт не только за счёт тепла, выделяемого от циркуляции в ней вихревых токов, но и за счёт потерь на её перемагничивание, которое в этот период наблюдается в шихте. После точки Кюри ферромагнитные тела теряют свои магнитные свойства ($\mu = 1$) и индукционная тигельная печь по принципу действия подобна воздушному трансформатору.

Мощность и тепло, выделяемое вихревыми токами, зависят от частоты переменного магнитного поля.

Для эффективной работы печи без сердечника приходится питать их токами повышенной частоты.

Каждой ёмкости печи и сопротивлению шихты соответствует своя оптимальная частота питающего тока. При частоте, ниже оптимальной, КПД печи сильно понижается, выше оптимальной – почти не изменяется.

С увеличением ёмкости печи частоту тока можно снизить.

Электрический расчёт индукционной тигельной печи

Для проведения электрического расчёта необходимо знать:

- вид металла;
- характерный размер кусков шихты;
- температуру загружаемой шихты;
- температуру плавления и разливки;
- Удельные электросопротивления шихты для вышеуказанных температур;
- теплосодержание или энтальпию, теплоёмкость и скрытую теплоту плавления металла;
- ёмкость тигля;
- производительность печи;
- длительность процесса плавки;
- длительность вспомогательных операций;
- параметры питающей сети.

1. Расчёт мощности индукционной тигельной печи (ИТП)

Полезная мощность ИТП определяется по выражению

$$P_{пол} = \frac{qG}{3.6\tau_{пл}}, Вт,$$

где - q – теплосодержание расплавляемого металла при температуре разливки, Дж/кг;

G – ёмкость печи, т;

$\tau_{пл}$ – продолжительность плавки, ч.

Суммарные тепловые потери ΔP_m составляют 10% полезной мощности печи $P_{пол}$.

Термический КПД η_m индукционной тигельной печи составляет 75 ÷ 95% и определяется по выражению

$$\eta_m = \frac{P_{пол}}{P_{пол} + \Delta P_m}.$$

Активная мощность P_2 , передаваемая в загрузку ИТП определяется по выражению

$$P_2 = P_{пол} + \Delta P_m, Вт.$$

Активная мощность $P_{п}$ ИТП ориентировочно определяется по выражению

$$P_{п} = P_2 / \eta_э, Вт$$

где $\eta_э$ – электрический КПД индуктора ИТП.

Значение $\eta_э$ может составлять 70 ÷ 95%.

При плавке алюминия $\eta_э = 0,5 ÷ 0,6$, при плавке чугуна и стали

$\eta_э = 0,7 ÷ 0,85$.

Мощность источника питания $P_{ист}$ должна быть несколько больше (на 5 ÷ 10%) активной мощности $P_{п}$. Это связано с тем, что источник питания должен покрывать потери $\Delta P_{т.к}$ в токопроводе и конденсаторах.

Мощность источника питания определяется по выражению (Приложение 2)

$$P_{ист} = P_{п} + \Delta P_{т.к}.$$

После определения установочной мощности печной установки и выбора частоты тока производится подбор источника питания.

2. Расчёт частоты источника питания индукционной тигельной печи

Минимальная частота тока печи с кусковой шихтой определяется

$$f \geq \frac{3 \cdot 10^6 \rho_2}{\mu_{r2} \cdot d_2^2} \cong f_{\min}$$

где ρ_2 – удельное электрическое сопротивление материала загрузки, Ом*м;

μ_{r2} – относительная магнитная проницаемость материала загрузки;

f – частота тока, Гц;

d_2 – внутренний диаметр тигля.

Определив f_{\min} , производят предварительный расчёт частоты, исходя из шкалы частот источников питания электротермических установок – 50; 500; 1000; 2400; 4000; 8000; 10000 Гц.

3. Расчёт основных геометрических размеров индукционной тигельной печи

Полезный объём тигля определяется

$$V = \frac{G}{\gamma_2},$$

где G – ёмкость тигля, т;

где - G – ёмкость тигля, т;

γ_2 – удельная плотность расплава, т/м³.

Средний внутренний диаметр тигля определяется из выражения

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{4c_1V}{\pi}}.$$

Высота загрузки, м

$$a_2 = \frac{D_2}{c_1}.$$

Высота индуктора

$$a_1 = c_3 a_2.$$

Толщина футеровки

$$\Delta_{\phi} = c_2 D_2, м$$

Для стали $c_1 = 0,7$; $c_2 = 0,11$; $c_3 = 1,1$;

для чугуна $c_1 = 0,7$; $c_2 = 0,5$; $c_3 = 1,1$;

для алюминия $c_1 = 0,9$; $c_2 = 0,3$; $c_3 = 1,1$.

Проверим значение Δ_{ϕ}

$$\Delta_{\phi} = 0,08 \sqrt[4]{G}, м$$

где G – полезная ёмкость тигля, т.

Исходя из того, что между индуктором и загрузкой должно быть минимально возможное расстояние, округляем Δ_{ϕ} в меньшую сторону.

Внутренний диаметр индуктора

$$D_1 = D_2 + 2\Delta_{\phi} + 2\Delta_{из}, м,$$

где $\Delta_{из}$ – толщина тепловой изоляции, располагаемой между футеровкой и индуктором (5 ÷ 8 мм).

Удельная поверхностная мощность определяется по выражению

Высота мениска определяется по выражению

Высота мениска

$$h_m = \frac{0,32 \times 10^{-4} P_0}{\gamma \sqrt{\rho_2 f}}, м,$$

где γ – плотность расплава, кг/м³;

ρ_2 – удельное сопротивление расплава, Ом*м;

f – частота источника питания, Гц.

Высота мениска (h_m) обычно не превышает 15% полной высоты металла по оси тигля (a_2).

4. Расчёт параметров системы индуктор – нагрузка

Глубина проникновения тока в материал нагрузки определяется по выражению

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{f}}.$$

При расчёте в «горячем режиме» значение ρ_2 (Ом*м) соответствует значению удельного сопротивления нагрузки в расплавленном состоянии.

Глубина проникновения тока в материал индуктора определяется по выражению

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\frac{\rho_1}{f}}, \text{ м.}$$

где f – частота питания источника, Гц;

ρ_1 – удельное сопротивление меди индуктора, $2 \cdot 10^{-8}$ Ом*м.

Активное сопротивление нагрузки

$$R_2 = \pi \rho_2 m_2^2 \frac{A}{a_2}, \text{ Ом.}$$

Внутреннее реактивное сопротивление

Внутреннее реактивное сопротивление нагрузки

$$X_{.m2} = \frac{\pi \rho_2 m_2^2 B}{a_2}, \text{ Ом.}$$

$$m_2 = \frac{d_m}{\sqrt{2 \Delta_m}},$$

где A и B – коэффициенты, которые, в свою очередь, являются функциями аргумента m_2 .

При расчёте в «горячем режиме» $d_{ш} = D_2$. В этом случае

$$A = B = \frac{\sqrt{2}}{m_2},$$

так как $D_2 \gg \Delta_2$. Следовательно, активное и внутреннее реактивное сопротивления загрузки будет определяться по выражению

$$R_2 = X_{m2} = \pi \rho_2 m_2^2 \frac{A}{a_2}, \text{ Ом.}$$

Активное и внутреннее реактивное сопротивления условного одновиткового индуктирующего провода определяется по выражению

$$R_1 = X_{m1} = \rho_1 \frac{\pi D_1^1}{\Delta_1 a_1 \kappa_{з.и.}}, \text{ Ом,}$$

где $D_1^1 = D_1 + \Delta_1$ – расчётный диаметр индуктора, м

$\kappa_{з.и.} = 0,75 \div 0,9$ – коэффициент заполнения индуктора, равный отношению высоты индуктирующего витка без изоляции к шагу навивки, обычно $\kappa_{з.и.} = 0,8$.

Δ_1 – глубина проникновения тока в материал загрузки.

Реактивное сопротивление рассеяния условного одновиткового индуктора рассчитывается по выражению

$$X_s = \frac{2\pi f \mu_0 S_h}{a_2}, \text{ Ом,}$$

где S_h – расчётная площадь поперечного сечения воздушного зазора

$$S_h = \pi \frac{D_1^2 - D_2^2}{4}, \text{ м}^2.$$

Реактивное сопротивление обратного замыкания

$$X_e = X_{10} \frac{\kappa_1 a_1}{a_1 - \kappa_1 a_2}, \text{ Ом,}$$

где X_{10} - реактивное сопротивление отрезка a_1 пустого индуктора бесконечной длины

$$X_{10} = 2\pi f \mu_0 \frac{\pi D_1^2}{4a_1}, \text{ Ом};$$

$k_1 < 1$ – поправочный коэффициент, учитывающий магнитное сопротивление обратного замыкания, известный как коэффициент Нагаока., $k_1 = 0,8$.

Приведённые активные и реактивные сопротивления загрузки определяются по выражениям

$$R_2^1 = cR_2, \text{ Ом},$$

$$X_2^1 = c \left\{ X_{m2} + X_s + \left[R_2^2 + (X_{m2} + X_s)^2 \right] / X_e \right\},$$

где c - коэффициент приведения параметров.

$$c = \frac{1}{\left(\frac{R_2}{X_e} \right)^2 + \left(1 + \frac{X_{m2} + X_s}{X_e} \right)^2}$$

Эквивалентные сопротивления нагруженного индуктора определяются по выражениям (без учёта сопротивлений подводящих шин)

$$R_u = R_1 + R_2^1, \text{ Ом};$$

$$X_u = X_{m1} + X_2^1, \text{ Ом};$$

$$Z_u = \sqrt{R_u^2 + X_u^2}, \text{ Ом};$$

Коэффициент мощности индуктора определяется по выражению

$$\cos \varphi_u = \frac{R_u}{Z_u}, \text{ Ом}.$$

5. Расчёт числа витков индуктора

Более точный расчёт электрического КПД индуктора

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_2}{P_u} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} = \frac{P_2}{\Delta P_u + P_2};$$

где ΔP_u – электрические потери в индукторе.

Ток условного одновиткового индуктора

$$I_u^1 = \sqrt{\frac{P_n}{R_2^1}}.$$

Напряжение на условном одновитковом индукторе

$$U_u^1 = Z_u I_u^1.$$

Число витков индуктора

$$N = \frac{U_u}{U_u^1},$$

витков индуктора определяется

Ток индуктора

$$I_u = \frac{I_u^1}{N}.$$

Ориентировочная
определяется по

$$a_1^1 = \frac{a_1}{N + 1} k_{\text{э.и.}},$$

высота индуктирующего витка
выражению

где

$(N + 1)$ – учитывает навивку

$N + 1$ – учитывает навивку индуктора.

Толщина стенки водоохлаждаемой трубки d должна соответствовать частоте тока

$$d \geq 1.57d_1$$

Напряжённость магнитного поля на внутренней поверхности индуктора

$$H_u = \frac{I_1 N}{a_1}.$$

Для тигельных печей напряжённость магнитного поля в зазоре составляет
 $H = 10^4 \div 10^5$ А/м.

6. Расчёт конденсаторной батареи

Реактивная мощность конденсаторной батареи, необходимая для компенсации $\cos\varphi$ установки (при питании токами повышенной частоты $\cos\varphi \approx 0.6$) определяется по выражению

$$Q_{к.б.} = P_n (tg\varphi_p - tg\varphi_k) \frac{U_{б.н.}^2}{U_u^2} \kappa_{\sigma}, \text{вар},$$

где P_n – мощность, подводимая к индуктору, Вт;

κ_{σ} – общий коэффициент запаса (1,1 ÷ 1,3);

$U_{б.н.}$ – номинальное напряжение конденсаторных банок, В;

U_u – напряжение на индукторе, В;

$tg\varphi_k = 0.39$ – при директивном коэффициенте мощности = 0,93;

$tg\varphi_p$ – значение при расчётном коэффициенте мощности.

Ёмкость конденсаторной батареи

$$C_{к.б.} = \frac{Q_{к.б.}}{2\pi f U_u^2}, \Phi.$$

По значению мощности и ёмкости конденсаторной батареи выбираются конденсаторы (Приложение 3)

Число банок конденсаторной батареи выбирается по выражению

$$N_{\sigma} = \frac{C_{к.б.}}{C_{10}}, \quad 11$$

где C_{10} – номинальная ёмкость одной банки (Приложение 3).

Электрические потери в источнике питания определяются

$$\Delta P_{\text{э.б.}} = Q_{\text{к.б.}} \times \text{tg} \delta, \text{кВт},$$

где $\text{tg} \sigma$ – тангенс угла электрических потерь, $\sigma \approx 0,5^\circ$.

7. Энергетический баланс установки

Электрические потери в индукторе определяются по выражению

$$\Delta P_{\text{э.и.}} = R_1 I_1^2 N^2, \text{Вт}.$$

Потери в токопроводе определяются

$$\Delta P_{\text{ток}} = \sum_{i=1}^m R_i I_i^2, \text{Вт}.$$

Ориентировочно $\Delta P_{\text{ток}}$ можно принять равным 5% от мощности источника $P_{\text{ист}}$.

Мощность, потребляемая от источника питания

$$P_{\text{ист}} = \Delta P_{\text{э.и.}} + \Delta P_{\text{э.б.}} + \Delta P_{\text{ток}} + P_2, \text{Вт}.$$

Электрические потери в источнике питания

$$\Delta P_{\text{и.п.}} = P_{\text{ист}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{пр}}} - 1 \right), \text{Вт},$$

где $\eta_{\text{пр}}$ – КПД преобразователя $\eta_{\text{пр}} \approx 0,92$.

Активная мощность, потребляемая от сети

$$P_C = P_{\text{ист}} + \Delta P_C$$

Общий КПД плавильной установки

$$\eta = P_{\text{пол}}/P.$$

Удельный расход электроэнергии

$$\eta_y = \frac{P_{\text{пол}}}{P_c}.$$

$$W' = \frac{C_p}{\eta},$$

$$W' = 2.78 \times 10^{-4} \frac{q}{\eta}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

где q – теплосодержание, Дж/кг.;

C_p - энтальпия, кВт – ч/кг.

Длительность плавки

$$t_{\text{пл}} = G \frac{W'}{P_c}, \text{ч.}$$

Производительность установки по расплавлению и перегреву определяется по выражению

$$m = \frac{G}{t_{\text{пл}}}, \frac{m}{\text{ч}}.$$

Фактическая производительность с учётом вспомогательного времени определяется по выражению

$$m' = \frac{G}{t_{\text{пл}} + t_{\text{всп}}}, \frac{m}{\text{ч}}.$$

результаты расчёта, приводятся в таблице.

Основные характеристики индукционной тигельной печи (ИТП)

№	Характеристики	Единицы измерения	Величина
1	Ёмкость ИТП	т	
2	Мощность ИТП	кВт	
3	Мощность установки	кВт	
4	Напряжение	В	
5	Частота	Гц	

6	Коэффициент мощности ИТП (без компенсации)		
7	Коэффициент мощности ИТП (с компенсацией)		
8	Производительность ИТП	т/ч	
9	КПД установки		
10	Удельный расход электроэнергии	кВт – ч/т	

Варианты для выполнения расчётно – графической работы

№ варианта	Ёмкость печи, т	Металл
1	1	медь
2	1,2	медь
3	1,5	медь
4	3,0	медь
5	1	алюминий
6	1,5	алюминий
7	2,0	алюминий
8	1	сталь
9	1,5	сталь
10	2,0	сталь
11	3,0	сталь
12	1	чугун
13	1,5	чугун
14	2,0	чугун
15	3,0	чугун

Продолжительность плавки принять – 1,5 часа.

Приложение 1

Тепловые характеристики металлов

Металл	Температура плавления °С	Температура разливки °С	Теплосодержание / (энтальпия) в расплавленном состоянии Дж/кг (кВт-ч/кг)	Удельное сопротивление в холодном состоянии Ом*м	Удельное сопротивление в расплавленном состоянии Ом*м	Плотность при температуре разливки т/м ³
Алюминий	660	730	1,44*10 ⁶ /(0,4)	3*10 ⁻⁸	24*10 ⁻⁸	2,5
Медь	1085	1230	0,79*10 ⁶ /(0,22)	2*10 ⁻⁸	21*10 ⁻⁸	8,3
Сталь	1400	1600	1,42*10 ⁶ /(0,39)	0,2*10 ⁻⁶	1,37*10 ⁻⁶	7,2
Чугун	1100	1300	0,9*10 ⁶ /(0,25)	0,25*10 ⁻⁶	1,5*10 ⁻⁶	6,7

Приложение 2

Источники питания ИТП (тиристорные преобразователи частоты)

Тип	Выходные параметры		
	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота, Гц	Номинальное напряжение, В
СЧИ – 100/3	100	3000	400
СЧИ – 250/3	250	3000	800
ТПЧ – 160 – 2,4	160	2400	800
ТПЧ – 250 – 2,4	250	2400	800
ТПЧ – 250 - 8	250	8000	500
ТПЧ – 320 - 1	320	1000	800
ТПЧ – 500 – 2,4	500	2400	800
ТПЧ - 1	630	500 или 1000	800
ТПЧ – 800 – 0,5	800	500	800
ТПЧ – 800 - 1	800	1000	800
ТПЧ – 1000 – 2,4	1000	2400	800
ТПЧ – 1600 – 0,5	1600	500	800
ТПЧ – 1600 - 1	1600	1000	800
ТПЧ – 2400 – 0,5	2400	500	800
ТПЧ – 2400 - 1	2400	1000	800
ТПЧ – 3200 – 0,5	3200	500	800
ТПЧ – 3200 - 1	3200	1000	800

Приложение 3

Конденсаторы

Тип конденсаторов	Напряжение, В	Реактивная мощность, 10^3 вар	Ёмкость, мкФ
ЭСВ – 0,8 - 0,5	800	200	99,5
ЭСВ – 1 – 0,5	1000	200	63,6
ЭСВ – 1,6 – 0,5	1600	200	24,9
ЭСВ – 2 – 0,5	2000	200	15,9
ЭСВ – 0,8 – 1	800	250	62,2
ЭСВ – 1 – 1	1000	250	39,8
ЭСВ – 1,6 – 1	1600	250	15,5
ЭСВ – 2 – 1	2000	250	9,9
ЭСВ – 0,5 – 2,4	500	300	79,6
ЭСВ – 0,8 – 2,4	800	300	31,2
ЭСВ – 1,6 – 2,4	1600	300	7,8
ЭСВ – 1 – 2,4	1000	300	19,9
ЭСВ – 2 – 2,4	2000	350	4,9
ЭСВ – 0,5 – 4	500	350	55,7
ЭСВ – 0,8 – 4	800	350	21,8
ЭСВ – 1 – 4	1000	350	13,9
ЭСВ – 1,6 – 4	1600	350	5,4
ЭСВ – 2 – 4	2000	350	3,5
ЭСВ – 0,5 – 10	500	400	25,5
ЭСВ – 0,8 – 10	800	400	9,9

Список использованной литературы

- 1 Иванова Л.И. Индукционные тигельные печи: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. /Л.И. Иванова, Л.С. Грובה, Б.А. Сокунов, С.Ф. Сарапулов. Екатеринбург: Изд- во УГТУ – УПИ, 2002. – 87с.
- 2 Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. М.:Металлургия, 1979. 247с.
- 3 Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов/ А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунер; Под ред. А.Е. Слухоцкого. Л., Энергоиздат, Ленинградское отд – ние, 1981. 328с.
- 4 Болотов А.В., Шепель Г.А. Электротехнологические установки: Учебник для вузов по спец. «Электроснабжение промпредприятий» . М.: Высш. шк., 1988. – 336с.
- 5 Электротермическое оборудование: Справочник/ Под общей ред. А.П.Альтгаузена. М.: Энергия, 1980. – 416с.

Оглавление

<u>Введение</u>	<u>3</u>
<u>Электрический расчёт индукционной тигельной печи</u>	<u>3</u>
<u>1. Расчёт мощности индукционной тигельной печи (ИТП)</u>	<u>4</u>
<u>2. Расчёт частоты источника питания индукционной тигельной печи</u>	<u>5</u>
<u>3. Расчёт основных геометрических размеров индукционной тигельной печи</u>	<u>6</u>
<u>4. Расчёт параметров системы индуктор – загрузка</u>	<u>7</u>
<u>5. Расчёт числа витков индуктора</u>	<u>10</u>
<u>6. Расчёт конденсаторной батареи</u>	<u>11</u>
<u>7. Энергетический баланс установки</u>	<u>12</u>
<u>Приложение 1</u>	<u>16</u>
<u>Приложение 2</u>	<u>17</u>
<u>Приложение 3</u>	<u>18</u>
<u>Список использованной литературы</u>	<u>19</u>