

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра электротехники и микропроцессорной электроники

Инж. Легезина А.А., инж. Лисафин А.Б., проф. д. т. н. Фарнасов Г.А.

**Электротехника и электроника.**

Примеры расчетов параметров металлургических электроустановок.

Учебное пособие по выполнению КНИР, выпускных работ бакалавров, дипломных проектов специалистов, магистерских диссертаций с использованием моделирования в пакете SIMULINK программы MatLab.

Специальности: 150101; 150102; 150103; 150104; 150109; 130405; 220301; 080801

Москва, 2011

### **Аннотация.**

В данном пособии приведены примеры расчётов (математические модели) наиболее распространённых задач определения электрических параметров металлургических электроустановок. Оно подготовлено для студентов специальности 080801 (прикладная информатика в энергосбережении), для которых может быть использовано при выполнении упражнений и домашних заданий по электротехническим дисциплинам и спецкурсу, курсовых и выпускных работ бакалавров, магистерских диссертаций, дипломных проектов специалистов.

Полезно также для студентов специальностей: 150101 – металлургия черных металлов; 150102 – металлургия цветных металлов; 150103 – теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей; 150104 – технология литейного производства; 150109 – металлургия техногенных и вторичных ресурсов; 130405 – обогащение полезных ископаемых; 220301 – автоматизация технологических процессов и производств.

Для специальностей 220301 и 080801 приведены примеры моделирования методики расчёта в пакете SIMULINK программы MatLab.

## Содержание

1. Трёхфазный трансформатор, работающий на мостовой выпрямитель с дуговой нагрузкой .....	5
2. Электромагнитный кристаллизатор для разливки алюминиевых сплавов.....	14
3. Индукционная канальная печь для плавки медных сплавов.....	21
4. Магнитодинамический насос для транспортировки и разливки металлических расплавов.....	30
5. Установка для высокочастотного индукционного нагрева стальных деталей под термообработку.....	39
6. Высокочастотный индукционный плазмотрон для получения электроплавленных сфероидизированных материалов.....	43
7. Индукционная тигельная печь для выплавки синтетического чугуна.....	48
8. Индукционная печь с «холодным» тиглем для выплавки жаропрочных сплавов.....	57
9. Установка для обработки металлических расплавов импульсным током .....	65
10. Асинхронный трёхфазный двигатель с короткозамкнутым ротором.....	69
11. Установка с вращающимся полем для очистки стружки от масла.....	76
12. Кольцевой статор для перемешивания жидкого чугуна в ковше.....	81
13. Плоский статор для перемешивания жидкой стали в ковше.....	87
14. Электромагнитный лоток для транспортировки и разливки жидкого алюминия.....	93
15. Статор электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок.....	100
16. Печь сопротивления.....	106
17. Моделирование методики расчёта параметров статора электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (п.15) в пакете SIMULINK программы MatLab.....	117
18. Моделирование методики расчёта параметров индукционной канальной печи (п.3) в пакете SIMULINK программы MatLab.....	121

19. Моделирование методики расчёта параметров индукционной тигельной печи (п.7) в пакете SIMULINK программы MatLab.....	126
20. Литература.....	131

# 1. Трехфазный трансформатор, работающий на мостовой выпрямитель с дуговой нагрузкой.

Задача: рассчитать параметры трехфазного трансформатора, работающего в схеме мостового выпрямителя с дуговой нагрузкой. [1,2].

В задании выполняют расчет параметров трехфазного печного трансформатора  $Tr$ , трехфазного выпрямителя  $B$  на тиристорах  $VS$ , реактора  $P(L)$  для стабилизации горения электрической дуги ( $AB$ - автоматический выключатель;  $CP$  – сглаживающий реактор) (рис. 1.1).

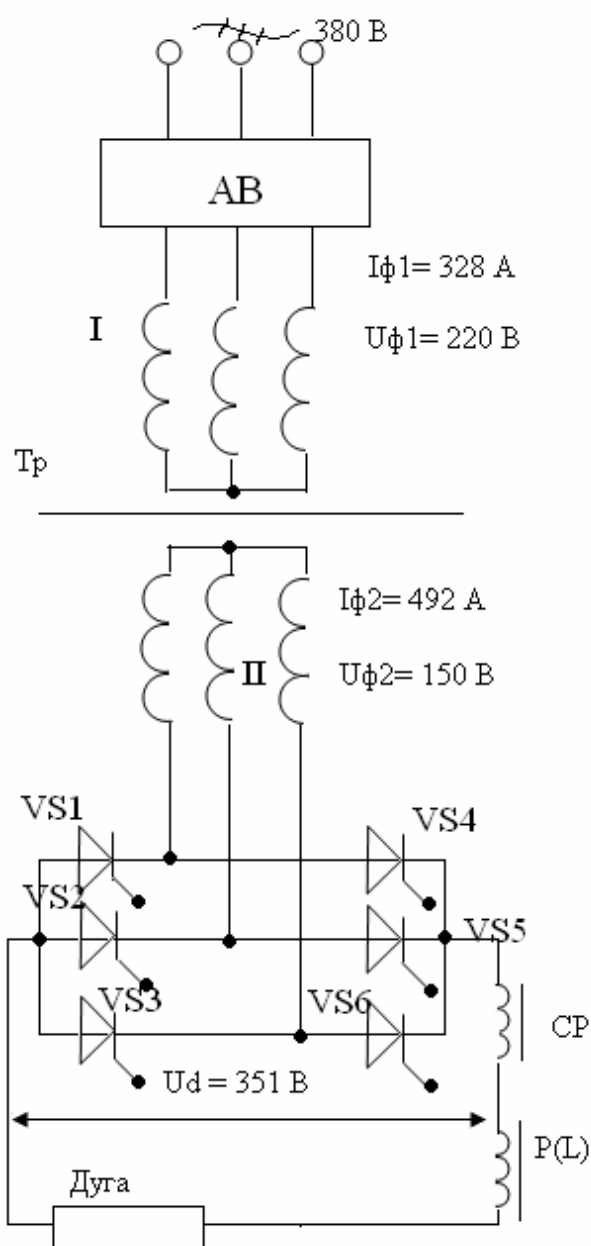


Рисунок 1.1. Схема выпрямителя

Мостовая схема.

Действующее значение фазного напряжения вторичных обмоток трансформатора

$$U_{2\phi} = \frac{U_d}{K_{cx}} = \frac{540 \text{ В}}{2,34} = 231 \text{ В}, \quad (1.1)$$

где:  $U_d = 540 \text{ В}$  – среднее значение выпрямленного напряжения (при  $\alpha = 0$ , заданная величина);

$K_{cx} = 2,34$  – коэффициент схемы.

Минимальное выпрямленное напряжение

$$U_{\min} = U_d \cdot \cos \alpha = 540 \text{ В} \cdot \cos 70^\circ = 184 \text{ В}, \quad (1.2)$$

где:  $\alpha$  – угол управления, эл. град. (заданная величина).

Действующее значение линейного напряжения вторичных обмоток трансформатора

$$U_{2л} = \sqrt{3} \cdot U_{2\phi} = 1,73 \cdot 231 \text{ В} = 400 \text{ В}. \quad (1.3)$$

Максимальное прямое напряжение на вентиле

$$U_{\text{пр.мах}} = \sqrt{6} \cdot U_{2л} \cdot \sin \alpha = 2,45 \cdot 400 \text{ В} \cdot \sin 70^\circ = 920 \text{ В}. \quad (1.4)$$

Максимальное обратное напряжение на вентиле

$$U_{\text{обр.мах}} = \sqrt{6} \cdot U_{2л} = 2,45 \cdot 400 \text{ В} = 980 \text{ В}. \quad (1.5)$$

Максимальное значение тока вентилей

$$I_{\text{Вмах}} = I_d = \frac{S_n}{U_{2\phi}} = \frac{400000 \text{ В} \cdot \text{А}}{231 \text{ В}} = 578 \text{ А}, \quad (1.6)$$

где:  $I_d$  – среднее значение выпрямленного тока (заданная величина).

Среднее значение тока вентилей

$$I_{\text{Вср.}} = \frac{I_d}{3} = \frac{578 \text{ А}}{3} = 178 \text{ А}. \quad (1.7)$$

Действующее значение тока вентилей

$$I_B = \frac{I_d}{\sqrt{2}} = \frac{578 \text{ А}}{1,41} = 410 \text{ А}. \quad (1.8)$$

Далее производят выбор тиристора из справочника. Если действующее значение тока вентиля превышает ток тиристора из справочника, то в «плечо» включают несколько вентилях в параллель.

Коэффициент трансформации трансформатора

$$n = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{10000 \text{ В}}{231 \text{ В}} = 43,29, \quad (1.9)$$

где:  $U_{1\phi}$  - действующее значение фазного напряжения первичной обмотки трансформатора (380 В; 10 кВ; 35 кВ; заданная величина).

Действующее значение тока первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = 0,82 \cdot \frac{I_d}{n} = 0,82 \cdot \frac{578 \text{ А}}{43,29} = 11 \text{ А}. \quad (1.10)$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = 0,82 \cdot I_d = 0,82 \cdot 578 \text{ А} = 474 \text{ А}. \quad (1.11)$$

Расчетное значение полной мощности первичной обмотки трансформатора

$$S_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_1 = 3 \cdot 10000 \text{ В} \cdot 11 \text{ А} = 330 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (1.12)$$

Расчетное значение полной мощности вторичной обмотки трансформатора

$$S_2 = 3 \cdot U_{2\phi} \cdot I_2 = 3 \cdot 231 \text{ В} \cdot 474 \text{ А} = 328 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (1.13)$$

Полная мощность трансформатора

$$S_{\tau} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{(330 + 328) \text{ кВ} \cdot \text{А}}{2} = 330 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (1.14)$$

По справочнику выбираем тип трансформатора мощностью  $S_{\text{н}} = 400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ; схема соединений обмоток «звезда-звезда»; мощность потерь в стали  $\Delta P_0 = 0,9 \text{ кВт}$ ; мощность потерь при коротком замыкании  $\Delta P_k = 5,5 \text{ кВт}$ ; ток холостого хода  $i_0(\%) = 2,1$ ; напряжение короткого замыкания  $U_k(\%) = 5$ ; коэффициент мощности в режиме нагрузки  $\cos \varphi_{2\text{н}} = 0,8$  при  $\beta = 0,5$ .

Составляется схема замещения фазы А приведенного трансформатора (рис. 1.2).

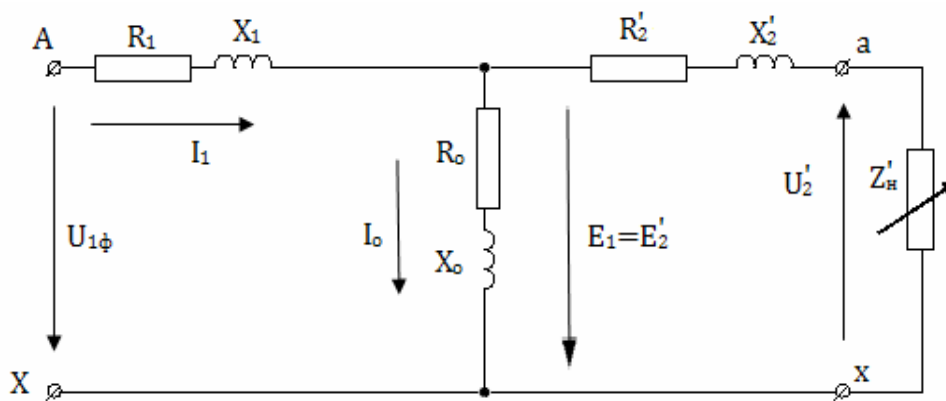


Рис. 1.2. Схема замещения фазы А приведенного трансформатора

Ток холостого хода

$$I_0 = \frac{I_{1\phi} \cdot i_0(\%)}{100} = \frac{11 \text{ A} \cdot 2,1}{100} = 0,23 \text{ A} . \quad (1.15)$$

Полное сопротивление намагничивающей ветви

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_0} = \frac{10000 \text{ В}}{0,23 \text{ А}} = 43478 \text{ Ом} = 43,5 \text{ кОм} . \quad (1.16)$$

Активное сопротивление намагничивающей ветви, обусловленное потерями в стали

$$R_0 = \frac{\Delta P_0}{3 \cdot I_0^2} = \frac{900 \text{ Вт}}{3 \cdot (0,23 \text{ А})^2} = 5,6 \text{ кОм} . \quad (1.17)$$

Сопротивление взаимной индукции, обусловленное основным магнитным потоком

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{(43,478 \text{ кОм})^2 - (5,625 \text{ кОм})^2} = 43,1 \text{ кОм} . \quad (1.18)$$

Параметры обмоток трансформатора (согласно заданному значению напряжения и потерь мощности  $\Delta P_k$  при коротком замыкании):

— полное сопротивление обмоток

$$Z_k = Z_1 + Z_2' = \frac{U_{\text{кф}}}{I_1} = \frac{500 \text{ В}}{11 \text{ А}} = 45,4 \text{ Ом} , \quad (1.19)$$

$$\text{где: } U_{\text{кф}} = U_{1\phi} \cdot \frac{U_k}{100} = 10000 \text{ В} \cdot \frac{5}{100} = 500 \text{ В} . \quad (1.20)$$

— активное сопротивление

$$R_k = R_1 + R'_2 = \frac{\Delta P_k}{3 \cdot I_1^2} = \frac{5500 \text{ Вт}}{3 \cdot (11 \text{ А})^2} = 15,7 \text{ Ом}. \quad (1.21)$$

— реактивное сопротивление

$$X_k = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{(45,4 \text{ Ом})^2 - (15,7 \text{ Ом})^2} = 42,4 \text{ Ом}. \quad (1.22)$$

При равенстве активных потерь, числа витков, их средних длин и потоков рассеяния, сопротивления первичной и вторичной обмоток приведенного трансформатора примерно одинаковы, т.е.:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{15,7 \text{ Ом}}{2} = 7,8 \text{ Ом}. \quad (1.23)$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_k}{2} = \frac{42,4 \text{ Ом}}{2} = 21,2 \text{ Ом}. \quad (1.24)$$

$$Z_1 = Z'_2 = \frac{Z_k}{2} = \frac{45,4 \text{ Ом}}{2} = 22,7 \text{ Ом}. \quad (1.25)$$

Приведенный к первичной обмотке вторичный ток

$$I'_{2\phi} = I_{1\phi} = \frac{I_{2\phi}}{n} = \frac{578 \text{ А}}{43,29} = 13,4 \text{ А}. \quad (1.26)$$

К.п.д. трансформатора

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{2n}}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{2n} + \Delta P_0 + \beta^2 \cdot \Delta P_k} \cdot 100 = \frac{0,5 \cdot 400 \text{ кВ} \cdot \text{А} \cdot 0,8 \cdot 100}{0,5 \cdot 400 \text{ кВ} \cdot \text{А} \cdot 0,8 + 0,9 \text{ кВт} + 0,5^2 \cdot 5,5 \text{ кВт}} = 98,6 \% \quad (1.27)$$

Угол магнитного запаздывания

$$\delta = \arcsin \frac{\Delta P_0}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_0} = \arcsin \frac{900 \text{ Вт}}{3 \cdot 10000 \text{ В} \cdot 0,23 \text{ А}} = 7,5^\circ. \quad (1.28)$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_0 = \cos(90^\circ - 7,5^\circ) = 0,13. \quad (1.29)$$

Расчет индуктивности сглаживающего фильтра,  $L_d$ .

Коэффициенты пульсаций  $q_1$  напряжений (токов) после выпрямителей имеют значения:

- однополупериодный однофазный ..... 1,57;
- двухполупериодный однофазный ..... 0,67;
- трехфазный нулевой схемы ..... 0,25;
- трехфазный мостовой схемы ..... 0,057.

$$L_d = \frac{q_2 \cdot R_n}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{осн}}} = \frac{0,0143 \cdot 0,9 \text{ Ом}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Гц}} = 0,000041 \text{ Гн} = 41 \text{ мкГн}, \quad (1.30)$$

где:  $R_n = \frac{U_d}{I_d} = \frac{540 \text{ В}}{578 \text{ А}} = 0,9 \text{ Ом}$  - суммарное активное сопротивление нагрузки;

$f_{\text{осн}} = 50 \text{ Гц}$  – частота тока основной гармоники;

$q_2 = 0,0143$  – коэффициент пульсаций тока (заданная величина) после индуктивного фильтра.

Коэффициент сглаживания фильтра

$$K_c = \frac{q_1}{q_2} = \frac{0,057}{0,0143} = 4. \quad (1.31)$$

Однако величины индуктивности  $L_d$  недостаточно для обеспечения устойчивого (без обрывов) горения электрической дуги. Для этого приходится рассчитывать дополнительную индуктивность (реактор)  $L_p$ , величина которой из опыта может составлять  $0,1 \div 0,5 \text{ мГн}$  (для печей малой емкости). В процессе плавки наиболее ответственный момент, когда сопротивление нагрузки минимально (минимальное падение напряжения на дуге  $U_d = 40 \div 50 \text{ В}$ ):

$$R_{d,\text{min}} = \frac{U_{d,\text{min}}}{I_{d,\text{max}}} = \frac{46 \text{ В}}{578 \text{ А}} = 0,08 \text{ Ом}. \quad (1.23)$$

Номинальный режим плавки характеризуется, как правило, напряжением

$U_{d,\text{ном}} = (150 \div 200) \text{ В}$  и током на  $(10 \div 15)\%$  меньшим максимального:

$$I_{\text{д.ном}} = I_{\text{max}} - 10\% I_{\text{max}} = 578 \text{ A} - 57,8 \text{ A} = 520 \text{ A}.$$

Сопротивление дуги в номинальном режиме

$$R_{\text{д.ном}} = \frac{U_{\text{д.ном}}}{I_{\text{д.ном}}} = \frac{150 \text{ В}}{520 \text{ А}} = 0,3 \text{ Ом} . \quad (1.33)$$

Тогда:

$$L_p \geq \frac{R_{\text{д.мин}} \cdot t_3}{\ln \left[ 1 + \frac{0,3}{\left( \frac{R_{\text{д.ном}}}{R_{\text{д.мин}}} - 1,3 \right)} \right]} = \frac{0,08 \text{ Ом} \cdot 10 \text{ мс}}{\ln \left[ 1 + \frac{0,3}{\left( \frac{0,3 \text{ Ом}}{0,08 \text{ Ом}} - 1,3 \right)} \right]} = 0,3 \text{ мГн} , \quad (1.34)$$

где:  $t_3 = 10 \text{ мс}$  – время запаздывания реакции системы автоматического регулирования на возмущение в дуге.

Реактор может представлять собой катушку индуктивности из электрического провода или водоохлаждаемой медной трубки, намотанной на один стержень замкнутого магнитопровода (рис. 1.3).

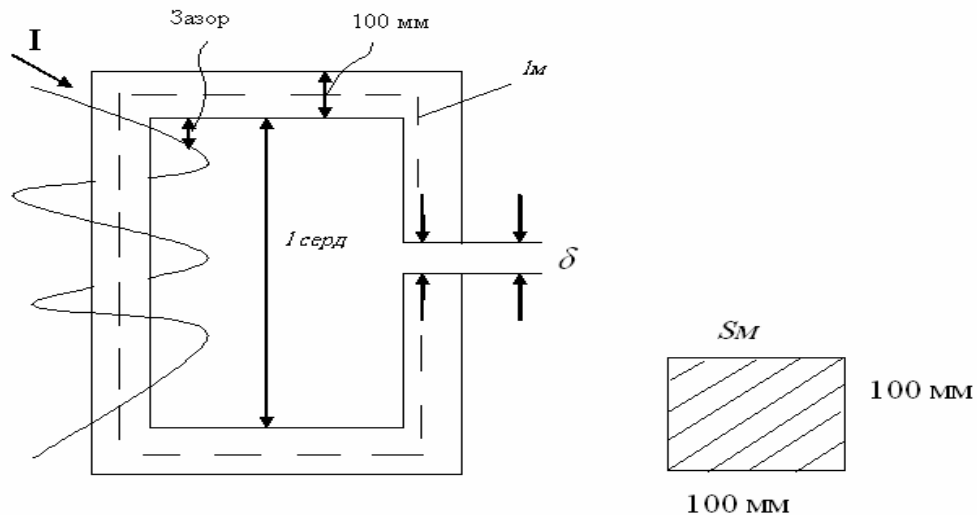


Рисунок 1.3 Схема реактора.

Допустимая плотность тока для провода не более  $2 \text{ А/мм}^2$ , а для водоохлаждаемой трубки – до  $50 \text{ А/мм}^2$ . Принимаем ток дуги  $I_d$  с запасом  $I_{3d} = 700 \text{ А}$ , а плотность тока

допустимую  $\sim 30 \text{ А/мм}^2$ . Тогда допустимое сечение трубки составит

$$S_{\text{п.тр.}} = \frac{I_{3\text{д}}}{i_{\text{доп}}} = \frac{700 \text{ А}}{30 \text{ А/мм}^2} = 23,4 \text{ мм}^2. \text{ Выбираем внутренний диаметр трубки } d_{\text{вн}} = 6 \text{ мм. Тогда}$$

сечение трубки  $S_{\text{тр.}} = \pi \cdot (R_{\text{нар}}^2 - r_{\text{вн}}^2) = 3,14 \cdot (R_{\text{нар}}^2 - 3^2)$ . Пусть  $S_{\text{тр.}} \approx 30 \text{ мм}^2$ . Тогда

$$30 \text{ мм}^2 = 3,14 \cdot (R_{\text{нар}}^2 - 9), \text{ т.е. } R_{\text{нар}} = 5 \text{ мм}.$$

Индуктивность однослойной катушки

$$L_p = \frac{w^2 \cdot \mu_0 \cdot S_d}{\delta + l_m / \mu} = \frac{w^2 \cdot \mu_0 \cdot S_d}{\delta} = \frac{w^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,01 \text{ м}^2}{3 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = w^2 \cdot 4,18 \cdot 10^{-6}, \quad (1.35)$$

где:  $w$  - число витков катушки;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная проницаемость;

$\delta = 3 \text{ мм}$  – толщина зазора в сердечнике магнитопровода;

$S_d = 100 \cdot 100 \text{ мм}^2 = 0,01 \text{ м}^2$  – площадь зазора в магнитопроводе.

$$\text{Отсюда: } w = \sqrt{\frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{4,18 \cdot 10^{-6}}} = \sqrt{\frac{3}{4,18}} \cdot 10^2 = 9 \text{ витков}.$$

При диаметре трубки 10 мм и толщине изоляции 5 мм получим длину однослойной катушки  $(10 \text{ мм} + 5 \text{ мм}) \cdot 9 \text{ витков} = 15 \text{ мм} \cdot 9 \text{ витков} = 135 \text{ мм}$ . Добавим сюда два зазора между трубкой и сердечником по 30 мм каждый. Тогда получим длину сердечника под катушкой  $l_{\text{сер.к.}} = 135 \text{ мм} + 60 \text{ мм} = 195 \text{ мм} \approx 200 \text{ мм}$  (по вертикали). По горизонтали длину сердечника примем 250 мм. Определим длину магнитного пути

$$l_m = 200 \text{ мм} + 197 \text{ мм} + 50 \text{ мм} \cdot 4 + 250 \text{ мм} \cdot 2 + 50 \text{ мм} \cdot 4 = 1297 \text{ мм} = 1,3 \text{ м}.$$

Магнитный поток

$$\Phi = \frac{F}{R_{1\text{м}} + R_{\text{дм}}} = \frac{w \cdot I_3}{\frac{l_m}{\mu \cdot \mu_0 \cdot S_1} + \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S_1}}, \quad (1.36)$$

где:  $F$  – намагничивающая сила, А ;

$R_{1\text{м}}$  – магнитное сопротивление сердечника;

$R_{\text{дм}}$  – магнитное сопротивление зазора;

$\mu = 500 \div 5000$  Гн/м – магнитная проницаемость материала сердечника (заданная величина);

$S_1$  – сечение сердечника, м<sup>2</sup>.

$$\Phi = \frac{700 \text{ А} \cdot 9 \text{ витков}}{\frac{1,3 \text{ м}}{5000 \text{ Гн/м} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,01 \text{ м}^2} + \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,01 \text{ м}^2}} = 0,02 \text{ Вб}.$$

Индукция

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_{\text{д}}} = \frac{0,02 \text{ Вб}}{0,01 \text{ м}^2} = 2 \text{ Тл}. \quad (1.37)$$

## 2. Электромагнитный кристаллизатор для разливки алюминиевых сплавов.

Наиболее эффективна разливка слитков алюминиевых сплавов диаметром свыше 300 мм в электромагнитный кристаллизатор (рис.2.1.), т.к. дает наименьшие отходы на обточку поверхности перед последующей термообработкой, регулирует кристаллическую структуру и повышает ресурс работы оборудования. [3].

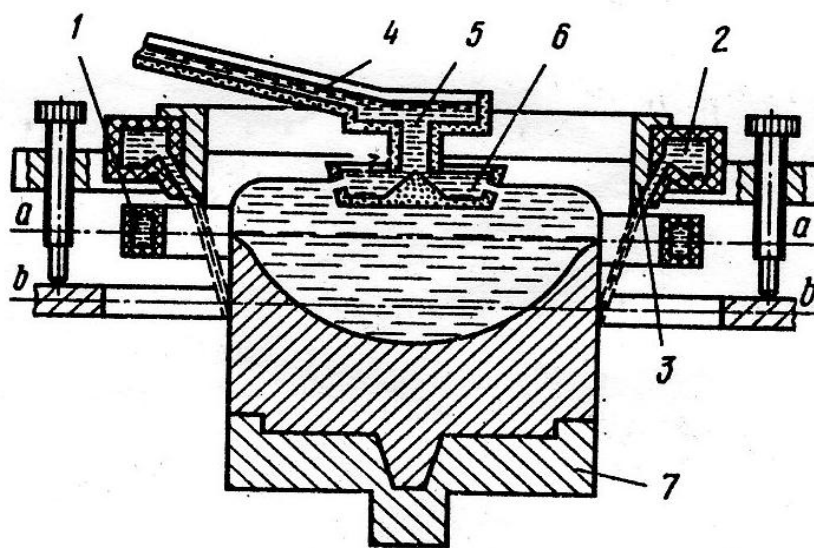


Рисунок 2.1. Схема установки непрерывного литья с формированием слитка электромагнитным полем: 1 – индуктор; 2 – кольцевой охладитель; 3 – электромагнитный экран; 4 – лоток для подачи металла; 5 – распределительная коробка; 6 – плавающая чаша; 7 – поддон.

Задача: рассчитать электрические параметры электромагнитного кристаллизатора для непрерывного литья слитка диаметром  $D_{\text{сл}} = 345$  мм из алюминиевого сплава.

Расчетная схема приведена на рис. 2.2; скорость литья  $v = 2,3$  м/ч  $= 0,64 \cdot 10^{-3}$  м/с ;  $\xi = 0,025$  — коэффициент линейной усадки;  $\delta = 20$  мм — расстояние от индуктора (без изоляции) до боковой поверхности жидкой зоны;  $a = 7$  мм — расстояние от нижнего среза индуктора до оси отверстий;  $c = 1,5$  мм — толщина изоляции индуктора;  $e = 2$  мм — расстояние от индуктора до экрана;  $d_0 = 2$  мм — диаметр отверстий, через которые

охлаждающаяся жидкость подается на поверхность слитка;  $d = 5$  мм — толщина стенки проточки;  $f = 2500$  Гц — частота переменного тока индуктора.

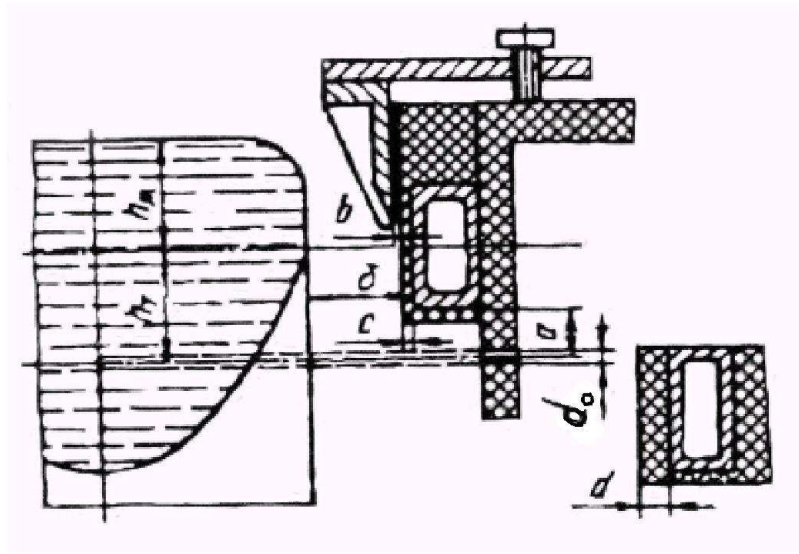


Рисунок 2.2. Расчетная схема.

Диаметр жидкой зоны

$$D_{ж.з.} = D_{сл} \cdot (1 + \xi) = 0,345 \text{ м} \cdot (1 + 0,025) = 0,354 \text{ м} = 354 \text{ мм} . \quad (2.1)$$

Диаметр индуктора

$$D_{и} = D_{ж.з.} + \delta = 354 \text{ мм} + 20 \text{ мм} = 374 \text{ мм} . \quad (2.2)$$

Выберем высоту жидкой зоны  $h_{ж} = 25$  мм. Определим высоту твердой зоны  $h_{т}$  из графиков рис. 2.3 и 2.4. Для заданной скорости  $v$  по кривой 5 получим  $h_{т} = 32$  мм. Высота индуктора  $h_{и}$  задается так, чтобы граница жидкой и твердой фаз находилась приблизительно на уровне его середины, т.е.  $h_{и} = 40$  мм. Экран выполняют из меди. Наименьшее значение угла  $\Psi_3$ , под которым подается охлаждающая вода на слиток, обеспечивает получение поверхности без продольных складок. Из опыта этот угол находится в пределах  $30 \div 35^\circ$ . Выбираем  $\Psi_3 = 34^\circ$ .

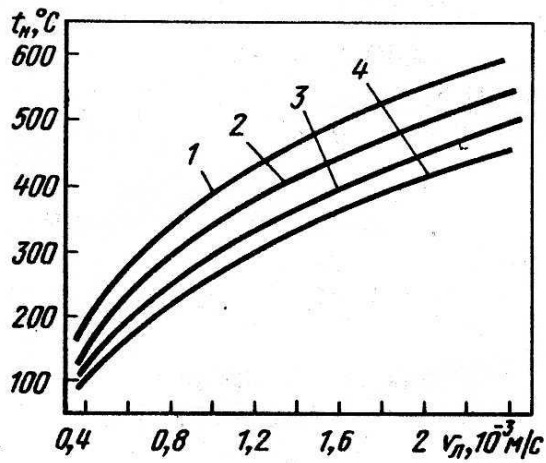


Рисунок 2.3. Расчётные значения  $t_n = \varphi(v_n)$  при  $\alpha_t, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

1 – 3440; 2 – 4300; 3 – 5150; 4 – 6000.

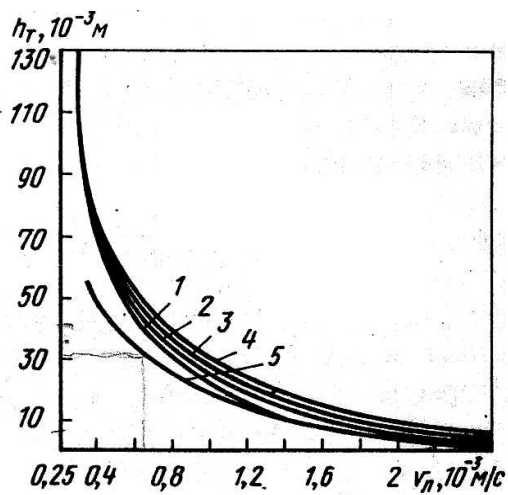


Рисунок 2.4. Зависимость  $h_t = \varphi(v_n)$ : 1 – 4 – расчётные; 5 – экспериментальные

значения; для кривых 1 – 4  $\alpha_t$  те же, что и на рис. 2.3.

Ток индуктора

$$I_n = \sqrt{\frac{\gamma \cdot g \cdot h_{ж}}{\theta_1}} \cdot h_n = \sqrt{\frac{2400 \frac{\text{КГ}}{\text{М}} \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 0,025 \text{ М}}{0,92 \cdot 10^{-7}}} \cdot 0,04 \text{ М} = 3200 \text{ А}, \quad (2.3)$$

где: функция, определяемая по кривым рис.2.5  $\theta_1 = \varphi(h, \beta, \omega_0)$  с безразмерными

параметрами:  $f = \frac{h_{\text{и}}}{a}$ ;  $\beta = \frac{r_0}{a}$ ;  $\omega_0 = \mu \cdot \delta \cdot f \cdot a^2$ . Здесь:  $r_0 = r'_0 - \frac{1}{2} \cdot \Delta_{\text{э.м.}}$ ;  $a = a' - \frac{1}{2} \cdot \Delta_{\text{э.и.}}$  - расчетные радиусы жидкой зоны и индуктора;  $r_0^2$  и  $a'$  - истинные радиусы жидкой зоны и индуктора;  $\Delta_{\text{э.м.}}$  и  $\Delta_{\text{э.и.}}$  - эквивалентные глубины проникновения магнитного поля в жидкий металл и индуктор. Для жидкого алюминия  $\Delta_{\text{э.м.}} = 0,5$  см, а для меди  $\Delta_{\text{э.и.}} = 0,134$  см (при  $f = 2500$  Гц);  $\gamma = 2400$  г/м<sup>3</sup> - плотность жидкого алюминия;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения.

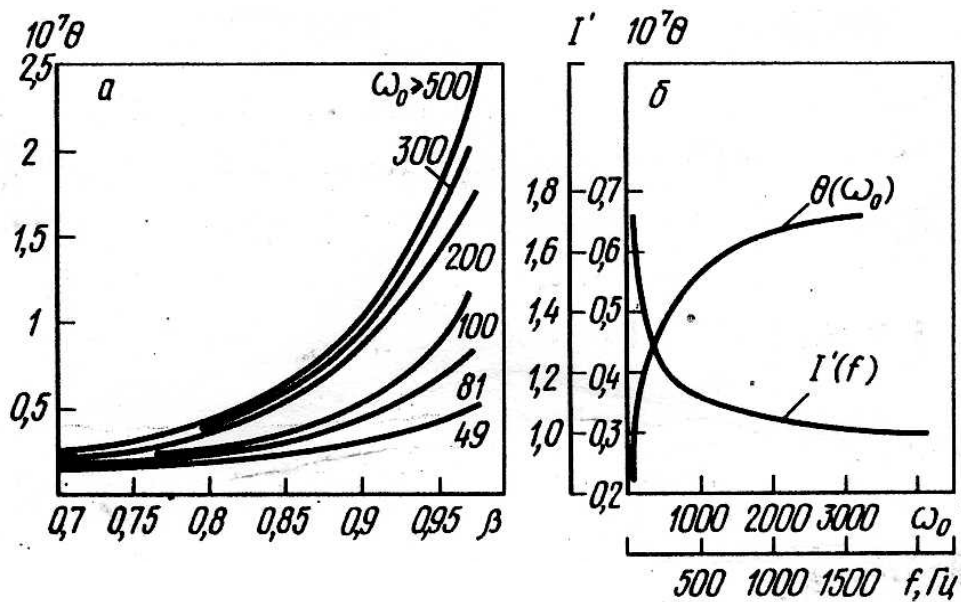


Рисунок 2.5 Зависимость  $\theta(\beta)$  для разных значений  $\omega_0 \cdot I'(f) = \frac{I(f)}{I}$  ( $f = 2500$  Гц).

С учетом экранирования ток индуктора  $I'_{\text{и}} = (1,1 \div 1,15) \cdot I_{\text{и}} = 1,1 \cdot 3200 \text{ А} = 3520 \text{ А}$ .  
Скорректируем величину тока (таблица 2.1.) по экспериментальным данным, т.е.  
 $I_{\text{и}} = 3500 \text{ А}$ , напряжение на индукторе 32 В, потребляемая индуктором активная мощность  
 $P_{\text{и}} = 28 \text{ кВт}$ .

Размеры слитков, мм	Частота тока, Гц	Ток индуктора, А	Напряжение на индукторе, В	Потребляемая мощность, кВт
d=144	2500	2400	16	12
	500	3300	4,4	9,8
d=194	2500	2700	20	18
	500	3600	5,5	13
	50	5900	1,8	9,0
d=345	2500	3500	32	28
	500	4300	7,8	21
	50	6900	2,8	14,2
d=480	2500	4500	40	42
300X1270	2500	4600	70-80	65
300X1570	2500	4600	80-90	75

Полная мощность индуктора

$$S_{\text{и}} = U_{\text{и}} \cdot I_{\text{и}} = 32 \text{ В} \cdot 3500 \text{ А} = 112 \text{ кВ} \cdot \text{А} . \quad (2.4)$$

Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi_{\text{и}} = \frac{P_{\text{и}}}{S_{\text{и}}} = 0,25 .$$

Тогда активное сопротивление индуктора

$$R_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{I_{\text{и}}} = \frac{32 \text{ В}}{3500 \text{ А}} = 0,009 \text{ Ом} . \quad (2.5)$$

В тоже время собственное активное сопротивление индуктора

$$R_{\text{л}} = \frac{\rho_{\text{и}} \cdot \pi \cdot D_{\text{и}}}{h_{\text{и}} \cdot \Delta_{\text{э.и.}}} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см} \cdot 3,14 \cdot 37,4 \text{ см}}{4 \text{ см} \cdot 0,134 \text{ см}} = 0,000438 \text{ Ом} , \quad (2.6)$$

где: удельное электрическое сопротивление меди индуктора  $\rho_{\text{и}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см} .$

Такое различие в активных сопротивлениях свидетельствует о том, что следует рассматривать систему “индуктор – слиток” как взаимосвязанную. Тогда  $P_{\text{и}}$  является мощностью потерь, т.е.

$$P_{\text{и}} = I_{\text{и}}^2 \cdot R_1 = (3500 \text{ А})^2 \cdot 0,000438 \text{ Ом} = 5,365 \text{ кВт} . \quad (2.7)$$

Остальная мощность должна поглощаться слитком. Вносимые нагрузкой (слитком) сопротивления активное  $R'_2$  и индуктивное  $X'_2$  определим из данных рис. 2.6.

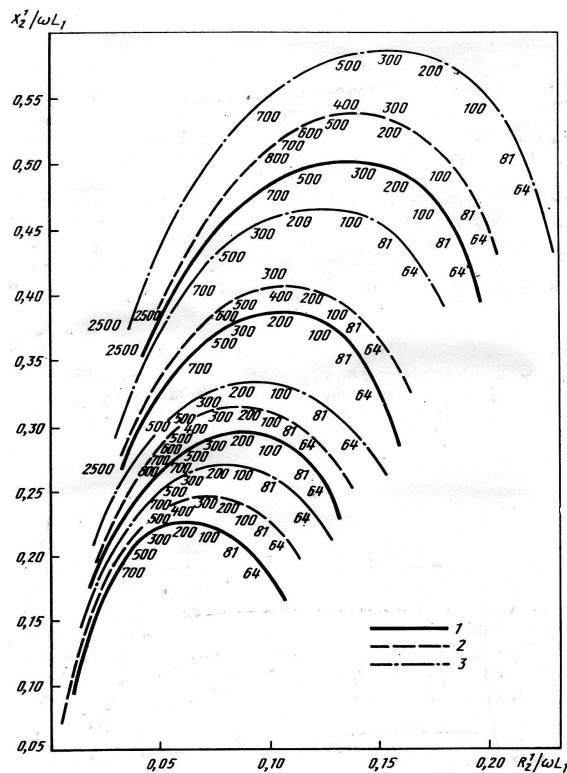


Рисунок 2.6. Графики сопротивлений, вносимых нагрузкой в индуктор: 1 –  $\alpha = 0,15$ ; 2 –  $0,20$ ; 3 –  $0,25$ .

Индуктивность индуктора

$$L_1 = \omega \cdot \frac{\pi^2 \cdot D_{\text{и}}^2}{h_{\text{и}}} \cdot K_a = 15 \cdot \frac{3,14^2 \cdot (0,374 \text{ м})^2}{0,04 \text{ м}} \cdot 1,05 = 54,3 \text{ Гн} , \quad (2.8)$$

где: число витков принимаем  $w = 15$  ;

$K_a = \frac{\Psi_e}{D_{\text{и}}} = 1,05$  - поправочный коэффициент, учитывающий конечные размеры индуктора.

Собственное индуктивное сопротивление индуктора

$$X_1 = \omega \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 2500 \text{ Гц} \cdot 54,3 \text{ Гн} = 0,0085 \text{ Ом} . \quad (2.9)$$

Потери мощности в слитке (без учета рассеяния)

$$P_{\text{сл}} = P_{\text{и}} - P_{\text{пи}} = 28 \text{ кВт} - 5,3655 \text{ кВт} = 22,6345 \text{ кВт}, \quad (2.10)$$

или  $P_{\text{сл}} = 22 \text{ кВт} = I_{\text{и}}^2 \cdot R'_2$ ; откуда  $R'_2 = 0,00185 \text{ Ом}$  – приведённое активное сопротивление.

Отношение  $\frac{R'_2}{\omega \cdot L_1} = \frac{0,00185 \text{ Ом}}{0,0085 \text{ Ом}} = 0,22$ . В этом случае выбираем  $X'_2 = 0,5 \text{ Ом}$ .

Полное сопротивление индуктора со слитком

$$Z_{\text{и}} = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} = \sqrt{(0,000438 \text{ Ом} + 0,00185 \text{ Ом})^2 + (0,0085 \text{ Ом} + 0,5 \text{ Ом})^2} = 0,51 \text{ Ом} \quad (2.11)$$

Напряжение на индукторе с учетом влияния слитка

$$U'_{\text{и}} = I_{\text{и}} \cdot Z_{\text{и}} = 3500 \text{ А} \cdot 0,51 \text{ Ом} = 1,2 \text{ В}. \quad (2.12)$$

Коэффициент мощности системы

$$\cos \varphi_c = \frac{R_1 + R'_2}{Z_{\text{и}}} = \frac{0,000438 \text{ Ом} + 0,00185 \text{ Ом}}{0,51 \text{ Ом}} = 0,0045. \quad (2.13)$$

Низкий коэффициент мощности системы свидетельствует о неточности методики расчета. Поэтому режим компенсации определяем с учетом эмпирических данных (таблица 2.1), а именно:

$$S = \sqrt{P_{\text{и}}^2 + Q^2} = \sqrt{(28 \text{ кВт})^2 + Q^2}, \quad (2.14)$$

откуда  $Q^2 = S^2 - (28 \text{ кВт})^2$ , т.е.  $Q = 108 \text{ кВАр}$ .

Емкость конденсаторной батареи

$$C = \frac{Q_c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2} = \frac{82,6 \text{ кВАр}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2500 \text{ Гц} \cdot (32 \text{ В})^2} = 0,005 \text{ Ф}, \quad (2.15)$$

где: компенсирующая емкостная реактивная мощность

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = 28 \text{ кВт} \cdot (3,376 - 0,4245) = 82,6 \text{ кВАр}, \quad (2.16)$$

$Q_1$  – реактивная мощность системы “индуктор - садка” при  $\cos \varphi_1 = 0,25$ ;

$Q_2$  – реактивная мощность, потребляемая при средневзвешенном  $\cos \varphi_2 = 0,92$ .

### 3. Индукционная канальная печь для плавки медных сплавов.

В литейном производстве для выплавки сплавов цветных металлов широко применяют индукционные канальные печи (рис.3.1).[4].

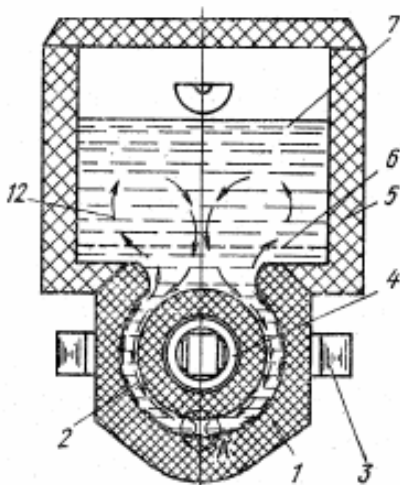


Рисунок 3.1. Схема индукционной канальной печи.

Основная масса расплавляемого металла 7 располагается в ванне печи 5, которая сообщается с плавильным каналом 2, также заполненным расплавом. Расплав в канале и прилегающем участке ванны образует замкнутое проводящее кольцо. Внутри этого кольца вставляется индуктор 4, навитый на стержень замкнутого магнитопровода 3. Система индуктор – магнитопровод может быть представлена как печной трансформатор.

В канале с расплавом индуцируется ток и выделяется тепловая энергия, идущая на расплавление шихты, перегрев и выдержку расплава. Футеровка, образующая печной канал, называется подовым камнем 1.

Задача: рассчитать электрические параметры индукционной канальной печи вместимостью 0,4 т для плавки латуни.

Расплавляемый металл – латунь марки ЛЦ-40; температура разливки  $T_p = 1070^\circ\text{C}$ , энтальпия металла при температуре разливки  $C_p = 169 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ ; удельное электросопротивление при температуре разливки  $\rho_2 = 40 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Рабочая (сливаемая)

масса металла  $G = 500$  кг; длительность плавки  $\tau_m = 0,32$  ч. Питающее напряжение  $U_c = 500$  В; сеть трехфазная; частота тока  $f = 50$  Гц. Задаем общий к.п.д. печи  $\eta = 0,88$ .

Активная мощность печи

$$P_a = \frac{G \cdot C_p}{\tau_m \cdot \eta} = \frac{400 \text{ кг} \cdot 169 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}}{0,88 \cdot 0,324} = 240 \text{ кВт} . \quad (3.1)$$

Для равномерной загрузки трехфазной сети принимаем число индукционных единиц, равное трем. Мощность каждой единицы  $P_{ia} = 80$  кВт .

Магнитопроводы выполняем стержневыми. Тогда можно задаться значением коэффициента  $C_m = 0,275$ .

Принимаем естественный  $\cos \varphi = 0,75$ .

Полная мощность индуктивной единицы

$$S_{ii} = \frac{P_a}{\cos \varphi} = \frac{80 \text{ кВт}}{0,75} = 107 \text{ кВ} \cdot \text{А} . \quad (3.2)$$

Принимаем, что индуктор будет изготавливаться из равностенной водоохлаждаемой медной трубки. Поэтому задаемся величиной отношения массы стали магнитопровода к массе меди индуктора  $\psi = 27$ .

Принимаем величину магнитной индукции в магнитопроводе из стали 1511 (ГОСТ 21427.3-750 В)-1Тл и величину плотности тока в индукторе  $\delta_1 = 8,5$  МА/м<sup>2</sup>.

Сечение сердечника магнитопровода:

$$S_c = C_m \cdot \sqrt{\frac{S_{ii} \cdot \psi}{f \cdot B \cdot \delta_1}} = 0,275 \cdot \sqrt{\frac{107 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot 10^3 \cdot 27}{50 \text{ Гц} \cdot 1 \text{ Вб/м}^2 \cdot 8,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2}} = 0,02 \text{ м}^2 . \quad (3.3)$$

где  $B$  - магнитная индукция в сердечнике, 1 Вб/м<sup>2</sup>.

Принимаем толщину листа магнитопровода равной 0,35 мм; межлистовую изоляцию выполняем нанесением слоя лака толщиной 0,01 мм. Находим коэффициент заполнения магнитопровода  $r_c = 0,9$  по приведенным ниже данным:

Толщина стального листа, мм .....0,35    0,50

Коэффициент заполнения  $r_c$  при изоляции из:

Бумаги толщиной 0,03 мм.....0,85    0,88

Лака толщиной 0,01 мм.....0,90    0,92

Сечение сердечника с учетом межлистовой изоляции:

$$S'_c = \frac{S_c}{r_c} = \frac{0,02 \text{ м}^2}{0,9} = 0,0222 \text{ м}^2. \quad (3.4)$$

Плавильные каналы в большинстве случаев имеют круговое продольное сечение. Соответственно для уменьшения рассеяния магнитного потока круглое сечение имеет такую же катушку индуктора. Поэтому для сокращения длины индуктора целесообразно приблизить форму сечения сердечника к кругу, т.е. выполнять его ступенчатым (рис. 3.2).

Принимаем число ступеней сердечника равное трем. Тогда коэффициент заполнения сердечником окружности, описанной вокруг него,  $r_d = 0,81$ .

Диаметр окружности, описанной вокруг ступенчатого стержня:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S_c}{\pi \cdot r_d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 222 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{3,14 \cdot 0,81}} = 0,187 \text{ м}. \quad (3.5)$$

Вычерчиваем эскиз сечения сердечника (рис. 3.2)

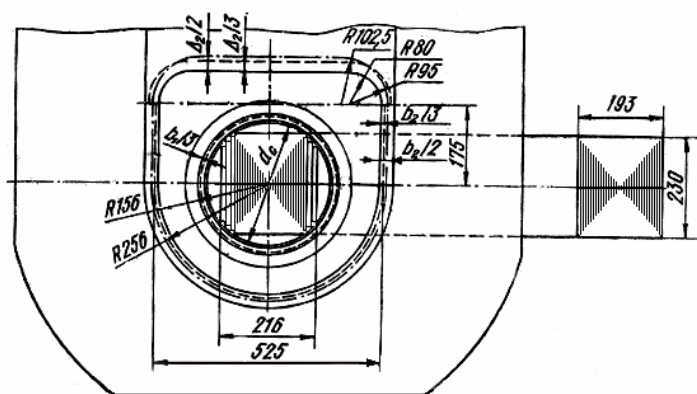


Рисунок 3.2. Эскиз сечения сердечника.

Число витков индуктора

$$w_1 = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_c} = \frac{500 \text{ В}}{4,44 \cdot 50 \text{ Гц} \cdot 1 \text{ Вб/м}^2 \cdot 0,02 \text{ м}^2} = 112,6, \quad (3.6)$$

где:  $U_1$  – напряжение индуктора, которое принимается равным э.д.с. индуктора  $E_1 = U_1$ .

Принимаем  $w_1 = 112$ .

Сила тока в индукторе

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{107 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{А}}{500 \text{ В}} = 214 \text{ А}. \quad (3.7)$$

Глубина проникновения тока в материал индуктора

$$\Delta_1 = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{50 \text{ Гц}}} = 0,01 \text{ м}, \quad (3.8)$$

где:  $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное электросопротивление индуктора (меди).

Сечение трубки индуктора

$$S_1 = \frac{I_1}{\delta_1} = \frac{214 \text{ А}}{8,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2} = 2,52 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2. \quad (3.9)$$

Из действующего сортамента выбираем равностенную медную трубку так, чтобы ее радиальный размер был  $1,5 \cdot \Delta_1 = 0,015 \text{ м}$ . Берем прямоугольную трубку сечением  $(15 \times 10) \cdot 10^6 \text{ м}^2$  с толщиной стенки  $0,002 \text{ м}$ , которая много меньше глубины проникновения тока в медь индуктора, что сводит на нет потери мощности в трубке. Радиальный размер сечения витка индуктора  $b_1 = 0,015 \text{ м}$ , осевой размер  $h_b = 0,01 \text{ м}$ .

Сечение выбранной трубки индуктора равно  $S_{\text{тр}} = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ .

Таким образом, плотность тока в индукторе составляет

$$J = \frac{214}{8,4 \cdot 10^{-5}} = 2,5 \text{ МА/м}^2.$$

Толщину изоляции между витками принимаем  $2b_{\text{из}} = 0,002 \text{ м}$ . Тогда высота индуктора составит

$$h_1 = (h_b + 2b_{\text{из}}) \cdot w_1 = (1,0 \text{ м} + 0,2 \text{ м}) \cdot 10^{-2} \cdot 112 = 1,344 \text{ м}. \quad (3.10)$$

Толщину изолирующего бакелитового цилиндра принимаем  $a = 0,01 \text{ м}$ .

Внутренний диаметр индуктора (по меди)

$$D_1 = d_c + 2a + 2b_{из} = 0,187 \text{ м} + 2 \cdot 0,01 \text{ м} + 0,002 \text{ м} = 0,209 \text{ м}. \quad (3.11)$$

Средний диаметр индуктора

$$D_{лср} = D_1 + 2b_1 = 0,209 \text{ м} + 2 \cdot 0,015 \text{ м} = 0,239 \text{ м}. \quad (3.12)$$

Активное сопротивление индуктора

$$r_1 = \frac{1,15 \cdot \rho_1 \cdot w_1 \cdot \pi \cdot D_{лср}}{S_1} = \frac{1,15 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 112 \cdot 3,14 \cdot 0,239 \text{ м}}{2,52 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2} = 7,62 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}, \quad (3.13)$$

где: 1,15 – средний коэффициент, учитывающий неравномерное распределение тока по сечению  $S_1$  индуктирующего провода.

Электрические потери в индукторе

$$P_{э.и.} = I_1^2 \cdot r_1 = (214 \text{ А})^2 \cdot 7,67 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} = 3512 \text{ Вт} = 3,5 \text{ кВт}. \quad (3.14)$$

Масса меди индуктора

$$G_m = S_1 \cdot w_1 \cdot \pi \cdot D_{лср} \cdot d_m = 2,52 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot 112 \cdot 3,14 \cdot 0,239 \text{ м} \cdot 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 18,85 \text{ кг}, \quad (3.15)$$

где:  $d_m = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность меди.

Масса стали магнитопровода

$$G_c = \Psi \cdot G_m = 18,85 \text{ кг} \cdot 27 = 509 \text{ кг}. \quad (3.16)$$

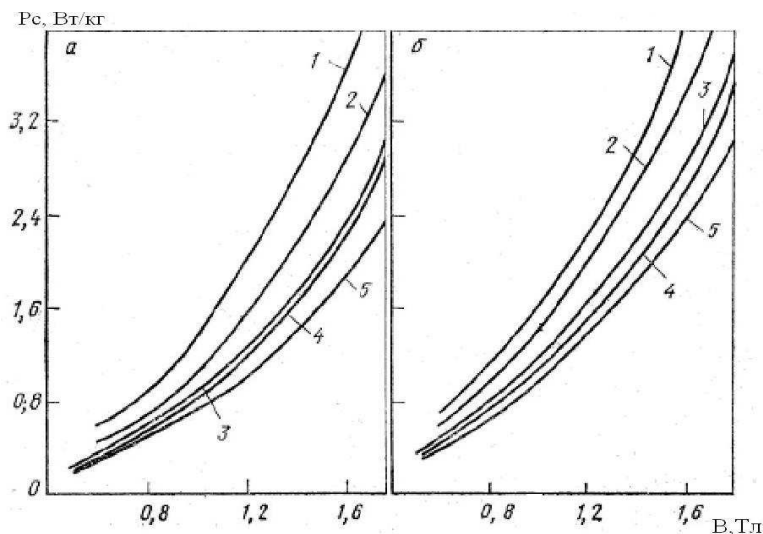


Рисунок 3.3. Удельные потери в электротехнической стали при  $b_{л} = 0,35 \text{ мм}$  (а) и  $b_{л} = 0,5 \text{ мм}$  (б); 1-сталь Э41; 2-Э42; 3-Э310; 4-Э320; 5-Э330.

По рис.3.3 находим удельные потери в стали  $\rho_c = 1,2$  Вт/кг при индукции  $B = 1$  Т.

Электрические потери в стали магнитопровода

$$P_c = \rho_c \cdot G_c = 1,2 \text{ Вт/кг} \cdot 509 \text{ кг} = 610,8 \text{ Вт} . \quad (3.17)$$

Полные электрические потери в меди и стали индукционной единицы

$$P_{\text{э.п.}} = P_{\text{э.м.}} + P_c = 3500 \text{ Вт} + 610,6 \text{ Вт} = 4110,8 \text{ Вт} . \quad (3.18)$$

Сила тока в канале

$$I_2 = I_1 \cdot w_1 = 112 \cdot 214 \text{ А} = 23968 \text{ А} . \quad (3.19)$$

Глубина проникновения тока в канале

$$\Delta_2 = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{40 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{50 \text{ Гц}}} = 0,045 \text{ м} . \quad (3.20)$$

Сечение канала

$$S_2 = \frac{I_2}{\delta} = \frac{23968 \text{ А}}{10^7 \text{ А/м}^2} = 0,0024 \text{ м}^2 , \quad (3.21)$$

где: плотность тока в канале  $\delta_2 = 10^7 \text{ А/м}^2$ .

В аналогичных печах часто задаются каналы сечением  $(2,2 \times 9,0) \times 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Принимаем на каждый индуктор два параллельных канала такого размера. Тогда общее сечение двух каналов составит:

$$S_2 = (2,2 \cdot 9,0) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 2 = 0,00396 \text{ м}^2 . \quad (3.22)$$

Уточняем получающуюся плотность тока в каналах

$$\delta_2 = \frac{23968 \text{ А}}{0,00396 \text{ м}^2} = 6 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} . \quad (3.23)$$

Активная мощность, выделяемая в канале

$$P_2 = P_{\text{ла}} - P_{\text{э.п.}} = 80000 \text{ Вт} - 3500 \text{ Вт} = 76500 \text{ Вт} . \quad (3.24)$$

Активное сопротивление канала

$$r_2 = \frac{P_2}{I_2^2} = \frac{76500 \text{ Вт}}{(23968 \text{ А})^2} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} . \quad (3.25)$$

Активное сопротивление канала в свою очередь можно записать в виде

$$r_2 = \frac{\rho_2 \cdot l_2 \cdot k_{\text{п.э.}}}{S_2},$$

где:  $l_2$  - активная длина канала, м<sup>2</sup>.

$\rho_2$  – удельное сопротивление жидкого металла,  $40 \cdot 10^8$  Ом·м;

$k_{\text{п.э.}}$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение переменного тока по сечению канала (рис. 3.4).

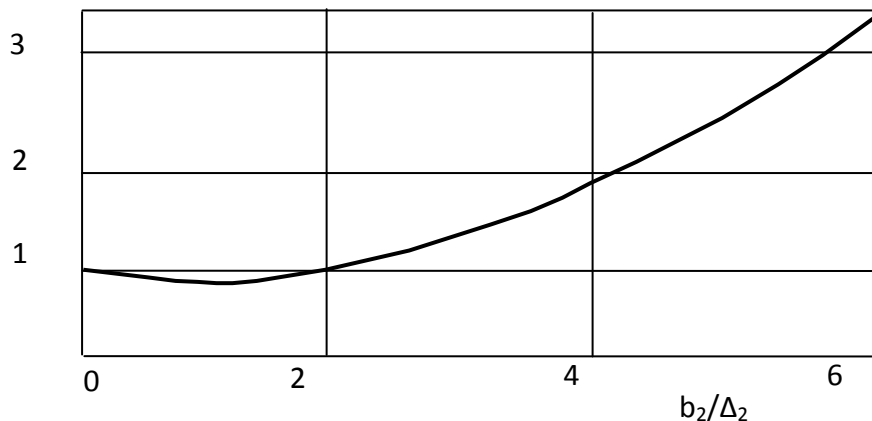


Рис. 3.4. График для определения поправочного коэффициента  $k_{\text{п.э.}}$ .

Коэффициент  $k_{\text{п.э.}}$  зависит от размеров сечения канала, от частоты тока и удельного сопротивления металла. Для каналов овального и прямоугольного сечений, с соотношением сторон более 3:1  $k_{\text{п.э.}}$  определяют из графика (рис. 3.4) по аргументу  $b_2/\Delta_2$ , где:  $b_2$  – ширина канала, м.

Осевой размер канала  $h_2 = 0,09$  м превышает радиальный размер канала  $b_2 = 0,022$  м.

Находим параметр  $b_2 / \Delta_2 = 2,2 / 4,5 = 0,49$ .

По графику (рис.3.4) определяем, что коэффициент  $k_{\text{п.э.}}$ , учитывающий неравномерное распределение переменного тока по сечению канала, в данном случае равен единице.

Активная длина канала

$$l_2 = \frac{r_2 \cdot S_2}{\rho_2 \cdot k_{\text{п.э.}}} = \frac{1,33 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot 0,00396 \text{ м}^2}{40 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 1} = 1,32 \text{ м} . \quad (3.26)$$

Расчет индуктивного сопротивления индукционной единицы.

Коэффициент Роговского

$$K_R = 1 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{\pi \cdot h_1} = 1 - \frac{0,015 \text{ м} + 0,022 \text{ м} + 0,096 \text{ м}}{3,14 \cdot 1,344 \text{ м}} = 0,97. \quad (3.27)$$

«Площадь рассеяния»

$$S_s = \pi \cdot D_{\text{cp}} \cdot b_s = 3,14 \cdot 0,108 \text{ м} \cdot 0,239 \text{ м} = 0,08 \text{ м}^2, \quad (3.28)$$

где:  $b_s$  – ширина площади рассеяния

$$b_s = \frac{b_1}{3} + \frac{b_2}{3} + b_3 = \frac{0,015 \text{ м}}{3} + \frac{0,022 \text{ м}}{3} + 0,096 \text{ м} = 0,108 \text{ м}. \quad (3.29)$$

Коэффициент

$$K_s = 1 + \frac{\alpha_1}{3,5} \cdot \left( 1 + \frac{\pi \cdot h_1}{b_s} \cdot \frac{1}{3} \cdot \alpha_1 \right) = 1 + \frac{0,93}{3,5} \cdot \left( 1 + \frac{3,14 \cdot 1,344 \text{ м}}{0,108 \text{ м}} \cdot \frac{0,93}{3} \right) = 4,48, \quad (3.30)$$

где:

$$\alpha_1 = \frac{h_1 - h_2}{h_1} = \frac{1,344 \text{ м} - 0,09 \text{ м}}{1,344 \text{ м}} = 0,93.$$

Индуктивное сопротивление индукционной единицы, приведенное к индуктору

$$x = \frac{8 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot S_s \cdot K_R \cdot K_s \cdot 10^{-6}}{h_1} = \frac{8 \cdot 50 \text{ Гц} \cdot (112)^2 \cdot 0,08 \text{ м}^2 \cdot 0,97 \cdot 4,48 \cdot 10^{-6}}{1,344 \text{ м}} = 1,30 \text{ Ом}. \quad (3.31)$$

Активное сопротивление канала, приведенное к индуктору

$$r'_2 = r_2 \cdot w_2^2 = 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot (112)^2 = 1,67 \text{ Ом}. \quad (3.32)$$

Активное сопротивление индукционной единицы

$$r = r_1 + r'_2 = 0,0767 \text{ Ом} + 1,67 \text{ Ом} = 1,75 \text{ Ом}. \quad (3.33)$$

Полное сопротивление индукционной единицы

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{(1,75 \text{ Ом})^2 + (1,30 \text{ Ом})^2} = 2,19 \text{ Ом}. \quad (3.34)$$

Естественный коэффициент мощности печи

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{1,75 \text{ Ом}}{2,19 \text{ Ом}} = 0,80. \quad (3.35)$$

Уточним основные электрические параметры печи.

Сила тока в индукторе

$$I_1 = \frac{U_1}{z} = \frac{500 \text{ В}}{2,19 \text{ Ом}} = 228 \text{ А} . \quad (3.36)$$

Электрические потери в индукторе

$$P_{\text{э.и.}} = I_1^2 \cdot r_1 = (228 \text{ А})^2 \cdot 0,0767 \text{ Ом} = 3987 \text{ Вт} . \quad (3.37)$$

Полная мощность индукционной единицы

$$S_{\text{и}} = U_1 \cdot I_1 = 500 \text{ В} \cdot 228 \text{ А} = 114 \text{ кВ} \cdot \text{А} . \quad (3.38)$$

Активная мощность индукционной единицы

$$P_{1\text{а}} = S_{\text{и}} \cdot \cos \varphi = 114000 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot 0,8 = 91,2 \text{ кВт} . \quad (3.39)$$

Сила тока в канале

$$I_2 = I_1 \cdot w_1 = 228 \text{ А} \cdot 112 = 25,5 \text{ кА} . \quad (3.40)$$

Мощность, выделяющаяся в каналах (на одну индукционную единицу)

$$P_2 = I_2^2 \cdot r_2 = (25500 \text{ А})^2 \cdot 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} = 86483 \text{ Вт} = 86 \text{ кВт} . \quad (3.41)$$

Полные электрические потери

$$P_{\text{э.п.}} = P_{\text{э.и.}} + P_{\text{с}} = 3987 \text{ Вт} + 610,8 \text{ Вт} = 4598 \text{ Вт} = 4,6 \text{ кВт} . \quad (3.42)$$

Электрический к.п.д. печи

$$\eta_{\text{э.п.}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{э.п.}}} = \frac{86483 \text{ Вт}}{86483 \text{ Вт} + 4598 \text{ Вт}} = 0,95 . \quad (3.43)$$

Определим реактивную мощность конденсаторной батареи  $Q_{\text{с}}$ , необходимую для конденсации  $\cos \varphi = 0,51$  до  $\cos \varphi = 1$  (на одну индукционную единицу)

$$Q_{\text{с}} = P_{1\text{а}} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 91200 \text{ Вт} \cdot 0,74 = 67488 \text{ В} \cdot \text{Ар} , \quad (3.44)$$

где:  $\operatorname{tg} \varphi = x / r = 1,3 \text{ Ом} / 1,75 \text{ Ом} = 0,74$  .

#### 4. Магнитодинамический насос для транспортировки и разливки металлических расплавов.

При разливке, особенно цветных металлов и сплавов, качество отливок зависит от степени насыщения жидкого расплава газами и неметаллическими включениями при операциях передачи его от плавильной печи до формы. Применение магнитодинамических насосов позволяет в значительной степени устранить эти негативные явления, одновременно осуществляя подогрев расплава и его дозировку в форму, и наиболее эффективно в процессах непрерывного литья. [5]

По принципу действия одновитковый трансформаторного типа насос, например МДН-3 (рис.4.1), мало отличается от канальной индукционной печи. Кольцевой трубопровод 2 (канал МДН с жидким металлом) охватывает центральный стержень замкнутого магнитопровода 3, набранного из листов трансформаторной стали, с расположенной на нём обмоткой 4, которая выполнена в виде катушки из изолированного провода. Магнитопровод с катушкой называют индуктором. Металл к каналу подводится по металлопроводу 5, а отводится к форме – по металлопроводу 8. Участок 1 является рабочей зоной (р.з.) МДН. Она находится в зазоре шихтованного магнитопровода 6 электромагнита, обмотки которого выполнены в виде двух катушек 7, размещённых по обе стороны от рабочей зоны.

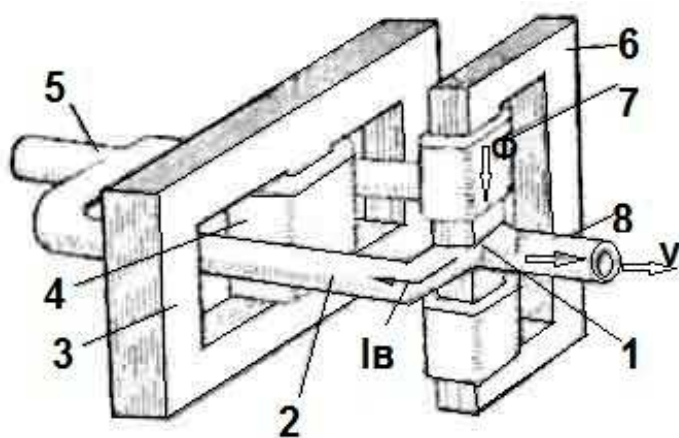


Рисунок 4.1. Схема насоса МДН-3

Подведённое к катушке 4 переменное напряжение вызывает появление в нём тока  $I_u$ , который создаёт в магнитопроводе 3 переменный магнитный ток  $\Phi_u$ , индуктирующий в жидком металле канала 2 кольцевой ток  $I_b$ . При э.д.с. в канале в несколько вольт величина тока в нём достигает нескольких тысяч ампер, плотность тока – до  $5 \div 20 \text{ МА/м}^2$ , удельная мощность – до  $25 \text{ МВт/м}^3$ , что позволяет проводить эффективный нагрев расплава. После подачи в катушки 7 электромагнита переменного тока  $I_g$  в его магнитопроводе 6 создаётся пульсирующий магнитный поток  $\Phi_g$ , часть которого  $\Phi_{p.z.}$ , проходящая через рабочую зону, взаимодействует с током  $I_b$ , создавая в металле объёмные электромагнитные силы  $F$  и движение расплава со скоростью  $v$  по отводящему металлопроводу 8.

Задача: рассчитать электрические параметры магнитодинамического насоса для подогрева и порционной разливки алюминиевых сплавов, если: масса загрузки ванны  $G = 160 \text{ кг}$ ; массовый расход металла на отливку  $G_m = 0,1 \text{ кг/с}$ ; потребляемая индуктором активная мощность  $P_u = 16 \text{ кВт}$ ; частота тока питающей сети  $f = 50 \text{ Гц}$ ; напряжение питания индуктора  $U_u = 380 \text{ В}$  и электромагнита  $U_g = 220 \text{ В}$ ; ток в обмотке индуктора  $I_u = 60 \text{ А}$  и электромагнита  $I_g = 90 \text{ А}$ ; сечение провода обмотки  $S_{пр.} = 19,7 \text{ мм}^2$ ; коэффициент мощности системы “индуктор – канал”  $\cos \varphi_c = 0,7$ ; ток в канале – не менее  $10 \text{ кА}$ .

Расчёт индуктора с каналом.

Полная мощность, подводимая к индуктору

$$S_u = \frac{P_u}{\cos \varphi_c} = \frac{16000 \text{ Вт}}{0,7} = 23 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (4.1)$$

Сечение сердечника магнитопровода

$$S_c = C_m \cdot \sqrt{\frac{S_u \cdot \Psi}{f \cdot B_c \cdot \delta_u}} = 0,275 \cdot \sqrt{\frac{23000 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot 50}{50 \text{ Гц} \cdot 1 \text{ Тл} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2}} = 0,03 \text{ м}^2, \quad (4.2)$$

где:  $C_m = 0,275$  - коэффициент формы для стержневого однофазного магнитопровода;

$\Psi = 50$  – отношение массы стали  $G_c$  к массе меди  $G_{\text{мед.}}$  индуктора при воздушном охлаждении;

$\delta_{\text{и}} = (2 \div 4) \text{ МА/м}^2$  – плотность тока в индукторе при воздушном охлаждении;

$B_c = 1 \text{ Тл}$  – магнитная индукция в магнитопроводе из стали 1511.

Сечение сердечника с учётом межлистовой изоляции

$$S'_c = \frac{S_c}{k_c} = \frac{0,03 \text{ м}^2}{0,9} = 0,033 \text{ м}^2, \quad (4.3)$$

где:  $K_c = 0,9$  – коэффициент заполнения.

Диаметр окружности, описанной вокруг ступенчатого стержня

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S'_c}{\pi \cdot k_d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 333 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{3,14 \cdot 0,81}} = 22,88 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 0,228 \text{ м}, \quad (4.4)$$

где:  $K_d = 0,81$  – коэффициент заполнения сердечником окружности при числе ступеней, равном трём.

Число витков индуктора

$$w'_u = \frac{U_u}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot S_c} = \frac{380 \text{ В}}{4,44 \cdot 50 \text{ Гц} \cdot 1 \text{ Тл} \cdot 0,03 \text{ м}^2} = 57 \text{ витков}. \quad (4.5)$$

Сила тока в индукторе

$$I_u = \frac{S_u}{U_u} = \frac{23000 \text{ В} \cdot \text{А}}{380 \text{ В}} = 60 \text{ А}. \quad (4.6)$$

Расчётная плотность тока в индукторе

$$J = \frac{I_u}{S_{\text{пр}}} = \frac{60 \text{ А}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2} = 3 \text{ МА/м}^2. \quad (4.7)$$

Она оказалась в пределах нормы.

При заданном сечении провода его радиус  $r_{\text{пр.}} = 2,5 \text{ мм}$ .

Глубина проникновения тока в материал индуктора

$$\Delta_{\text{и}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{и}}}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{50 \text{ Гц}}} = 10 \text{ мм}, \quad (4.8)$$

где:  $\rho_{\text{и}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное электросопротивление меди.

Глубина проникновения превышает радиус провода, поэтому нагрева полем не будет.

Проверим правильность расчёта числа витков индуктора по допустимой силе тока канала с металлом

$$I'_{\text{в}} = I_{\text{у}} \cdot w'_{\text{у}} = 60 \text{ А} \cdot 57 \text{ витков} = 3420 \text{ А}, \quad (4.9)$$

что значительно меньше указанного в задании. Выберем величину тока канала  $I_{\text{в}} = 12000 \text{ А}$ .

Тогда число витков индуктора

$$w_{\text{у}} = \frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{у}}} = \frac{12000 \text{ А}}{60 \text{ А}} = 200 \text{ витков}. \quad (4.10)$$

Толщину изоляции между витками принимаем  $2 \cdot b_{\text{из.}} = 0,002 \text{ м}$ .

Тогда высота индуктора

$$h_{\text{у}} = (h_{\text{в}} + 2 \cdot b_{\text{из.}}) \cdot w_{\text{у}} = (0,005 \text{ м} + 0,002 \text{ м}) \cdot 200 \text{ витков} = 1,4 \text{ м}, \quad (4.11)$$

где:  $h_{\text{в}} = 0,005 \text{ м}$  – осевой размер провода.

Толщину изолирующего бакелитового цилиндра принимаем  $a = 0,01 \text{ м}$ .

Внутренний диаметр индуктора (по меди)

$$D_1 = d_{\text{с}} + 2 \cdot a + 2 \cdot b_{\text{из.}} = 0,228 \text{ м} + 0,02 \text{ м} + 0,002 \text{ м} = 0,25 \text{ м}. \quad (4.12)$$

Средний диаметр индуктора

$$D_{\text{ср.1}} = D_1 + b_1 = 0,25 \text{ м} + 0,0025 \text{ м} = 0,2525 \text{ м}. \quad (4.13)$$

Активное сопротивление индуктора

$$r_1 = \frac{1,15 \cdot \rho_{\text{у}} \cdot w_{\text{у}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ср.1}}}{S_{\text{пр}}} = \frac{1,15 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 200 \text{ витков} \cdot 3,14 \cdot 0,25 \text{ м}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2} = 5,78 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}. \quad (4.14)$$

Электрические потери в индукторе

$$P_{\text{э.и.}} = I_{\text{у}}^2 \cdot r_1 = (60 \text{ А})^2 \cdot 5,78 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} = 208 \text{ Вт}. \quad (4.15)$$

Масса меди индуктора

$$G_{\text{мед.}} = S_{\text{пр.}} \cdot w_{\text{и}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ср.1}} \cdot d_{\text{м}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot 200 \text{ витков} \cdot 3,14 \cdot 0,25 \text{ м} \cdot 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 28 \text{ кг} , \quad (4.16)$$

где:  $d_{\text{м}} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность меди.

Масса стали магнитопровода

$$G_{\text{с}} = \Psi \cdot G_{\text{мед.}} = 50 \cdot 28 \text{ кг} = 1400 \text{ кг} . \quad (4.17)$$

Электрические потери в стали магнитопровода

$$P_{\text{э.с.}} = p_{\text{с}} \cdot G_{\text{с}} = 0,58 \text{ Вт/кг} \cdot 1400 \text{ кг} = 816 \text{ Вт} , \quad (4.18)$$

где:  $p_{\text{с}} = 0,58 \text{ Вт/кг}$  – удельные потери в стали при индукции  $B = 1 \text{ Тл}$  .

Полные электрические потери в стали и меди индуктора с сердечником

$$P_{\text{э.п.}} = P_{\text{э.и.}} + P_{\text{э.с.}} = 208 \text{ Вт} + 816 \text{ Вт} = 1024 \text{ Вт} . \quad (4.19)$$

Зададим плотность тока в канале  $\delta_{\text{к}} = 10 \text{ МА/м}^2$  . Тогда сечение канала

$$S_{\text{к}} = \frac{I_{\text{в}}}{\delta_{\text{к}}} = \frac{12000 \text{ А}}{10 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2} = 0,0012 \text{ м}^2 . \quad (4.20)$$

Глубина проникновения тока в жидкий алюминий в канале

$$\Delta_{\text{к}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{Al}}}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{50 \text{ Гц}}} = 32 \text{ мм} . \quad (4.21)$$

Если выполнить сечение канала квадратным, то сторона будет равна 35 мм , а

$\Delta_{\text{к}} = 32 \text{ мм}$  , т.е. в металле будет выделяться энергия.

Активная мощность, выделяемая в канале

$$P_{\text{к}} = P_{\text{и}} - P_{\text{э.п.}} = 16000 \text{ Вт} - 1024 \text{ Вт} = 14376 \text{ Вт} , \quad (4.22)$$

Активное сопротивление канала

$$r_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{\text{в}}^2} = \frac{14376 \text{ Вт}}{(12000 \text{ А})^2} = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} . \quad (4.23)$$

Активная длина канала

$$l_{\text{к}} = \frac{r_{\text{к}} \cdot S_{\text{к}}}{\rho_{\text{Al}} \cdot K_{\text{п.э.}}} = \frac{1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot 0,0012 \text{ м}^2}{20 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 0,5} = 1,2 \text{ м} , \quad (4.24)$$

где:  $K_{п.з.} = 0,5$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение переменного тока по сечению канала.

Индуктивное сопротивление системы “индуктор - канал”, приведённое к первичной обмотке (индуктору)

$$X = \frac{4 \cdot f \cdot w_u^2 \cdot S_{\Delta} \cdot K_R \cdot K_a \cdot 10^{-6}}{h_1} = \frac{4 \cdot 50 \text{ Гц} \cdot (200 \text{ витков})^2 \cdot 0,128 \text{ м}^2 \cdot 0,95 \cdot 5,8 \cdot 10^{-6}}{1,4 \text{ м}} = 4,03 \text{ Ом} \quad (4.25)$$

где:  $K_R$  – коэффициент Роговского;

$$K_R = 1 - \frac{l_{оп} + l_{в} + l_3}{\pi \cdot h_a} = 1 - \frac{0,125 \text{ м} + 0,035 \text{ м} + 0,05 \text{ м}}{3,14 \cdot 1,4 \text{ м}} = 0,95 ;$$

$K_a$  – коэффициент, учитывающий влияние на рассеяние магнитного поля разности высот обмотки и канала;

$$K_a = 1 + \frac{h_u - l_{в}}{3,5 \cdot h_u} \cdot \left[ 1 + \frac{\pi}{3} \cdot \frac{h_u - l_{в}}{l_{в} + \frac{1}{3} \cdot (l_{оп} + l_{в})} \right] = 1 + \frac{1,4 \text{ м} - 0,035 \text{ м}}{3,5 \text{ м} \cdot 1,4 \text{ м}} \cdot \left[ 1 + \frac{3,14}{3} \cdot \frac{1,4 \text{ м} - 0,035 \text{ м}}{0,035 \text{ м} + \frac{1}{3} \cdot (0,125 \text{ м} + 0,035 \text{ м})} \right] = 5,8$$

$S_{\Delta}$  – площадь приведённого зазора между витком и индуктором;

$$S_{\Delta} = S_3 + \frac{S_{ou} + S_k}{3} = 0,128 \text{ м}^2$$

$S_3$  – площадь поперечного сечения зазора между индуктором и каналом,  $\text{м}^2$ ;

$S_{ou}$  – площадь поперечного сечения индуктора,  $\text{м}^2$ ;

$S_k$  – площадь поперечного сечения канала,  $\text{м}^2$ .

Активное сопротивление канала (фактическое), приведённое к индуктору

$$r'_k = r_k \cdot w_u^2 = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot (200 \text{ витков})^2 = 4,16 \text{ Ом} . \quad (4.26)$$

Активное сопротивление системы “индуктор - канал”

$$r = r_k + r'_k = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} + 4,16 \text{ Ом} = 4,1601 \text{ Ом}. \quad (4.27)$$

Полное сопротивление системы “индуктор – канал”

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{(4,16 \text{ Ом})^2 + (4 \text{ Ом})^2} = 5,76 \text{ Ом}. \quad (4.28)$$

Электрический к.п.д. системы

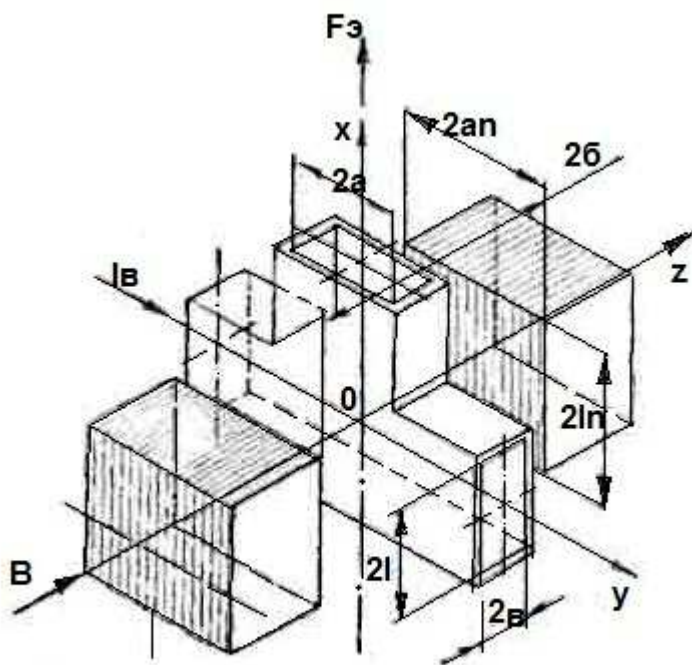
$$\eta_{\text{эл}} = \frac{P_k}{P_k + P_{\text{эл.п.}}} = \frac{14976 \text{ Вт}}{14976 \text{ Вт} + 1024 \text{ Вт}} = 0,93. \quad (4.29)$$

Естественный коэффициент мощности системы

$$\cos \varphi_c = \frac{r}{z} = \frac{4,16 \text{ Ом}}{5,76 \text{ Ом}} = 0,72. \quad (4.30)$$

Полученный коэффициент мощности отличается от заданного менее чем на 10 %, поэтому уточнение электрических параметров не проводим.

Расчёт электромагнита.



(a)

Рисунок 4.2. Рабочая зона МДН-3.

Электрические параметры электромагнита рассчитывают для условия, когда его магнитная система и магнитная система “индуктор - канал” работают взаимосвязанно, и известна величина тока канала  $I_b$  (рис. 4.2). Для металлургических МДН характерна большая величина  $2b$  немагнитного зазора электромагнита ( $0,05 \div 0,5$  м), обусловленная увеличенной толщиной стенок канала. Это вызывает большое рассеяние магнитного поля в зазоре. Обычно рабочий поток  $\Phi_p$ , действующий на металл в р.з., составляет ( $5 \div 9$ ) % от потока, создаваемого полюсами электромагнита  $\Phi_0$ . Хотя индукция в р.з. не превышает ( $0,1 \div 0,3$ ) Тл, на её создание затрачивается значительная мощность.

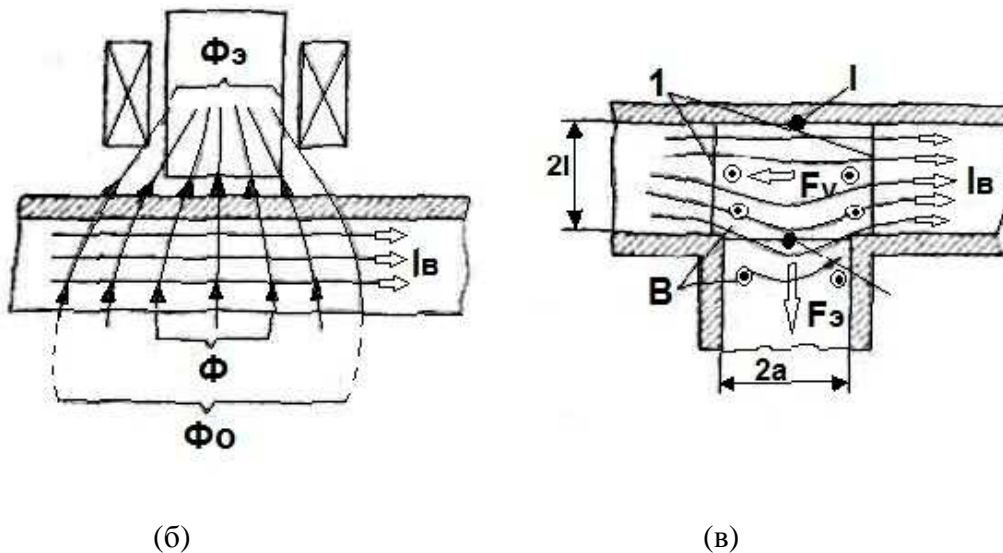


Рисунок 4.3. Рабочая зона МДН-3.

При взаимодействии в р.з. тока  $I_b$  с рабочим магнитным потоком  $\Phi_p$  в металле возникают объёмные электромагнитные силы

$$F_x = J \cdot B, \quad (4.31)$$

где:  $J = I_b / 4 \cdot a \cdot b$  – плотность тока;

$B = \Phi_p / 4 \cdot l \cdot a$  – индукция.

Это приводит к тому, что между точками I и II возникает перепад давлений  $p_x$ , равный отношению интегральной электромагнитной силы  $F_x$  к площади выходного сечения р.з.

$$p_3 = 2 \cdot j \cdot B \cdot l \cdot \cos \Psi. \quad (4.32)$$

Одновременно, зная массовый расход металла  $G_m = 0,1$  кг/с, сечение выходного канала  $S_k = 0,0012$  м<sup>2</sup>, можно оценить напор (давление) его на выходе к отливке

$$p_k = \frac{G_m}{S_k} = \frac{100 \text{ г/с}}{0,0012 \text{ м}^2} = 0,085 \text{ МПа}. \quad (4.33)$$

Принимая  $p_k = p_3$ , находим

$$B = \frac{p_3}{2 \cdot J \cdot l \cdot \cos \Psi} = \frac{p_3}{2 \cdot \frac{I_B}{4 \cdot a \cdot b} \cdot l \cdot \cos \Psi} = \frac{0,85 \text{ Па} \cdot 10^6}{2 \cdot \frac{12000 \text{ А}}{4 \cdot 0,037 \text{ м} \cdot 0,035 \text{ м}} \cdot 0,1 \text{ м} \cdot 0,72} = 0,25 \text{ Тл}, \quad (4.34)$$

В рабочей зоне магнитная индукция  $B$  представляет собой сумму индукций, создаваемых индуктором  $B_u$  и электромагнитом  $B_3$ :  $B = B_u + B_3$ ,

Откуда

$$B_3 = B - B_u = 0,25 \text{ Тл} - 0,08 \text{ Тл} = 0,17 \text{ Тл}, \quad (4.35)$$

$$\text{где: } B_u = \frac{\Phi_u}{S_c} = \frac{0,0024 \text{ Вб}}{0,03 \text{ м}^2} = 0,08 \text{ Тл};$$

$\Phi_u$  - магнитный поток, создаваемый индуктором

$$\Phi_u = \frac{\omega_u \cdot I_u \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot S_c}{l_m} = \frac{200 \text{ В} \cdot 60 \text{ А} \cdot 500 \text{ Гн/м} \cdot 43,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,03 \text{ м}^2}{1,5 \text{ м}} = 0,0024 \text{ Вб} \quad (4.36)$$

$\mu = 500 \div 5000$  Гн/м – магнитная проницаемость сердечника;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость провода катушки;

$l_m = 1,5$  м – длина магнитного пути сердечника.

Рабочий магнитный поток электромагнита

$$\Phi_{p.з.} = B_3 \cdot S_6 = 0,17 \text{ Тл} \cdot 0,018 \text{ м}^2 = 0,003 \text{ Вб}, \quad (4.37)$$

где:  $S_6 = 0,135 \text{ м} \cdot 0,135 \text{ м} = 0,018 \text{ м}^2$  – площадь зазора между полюсами электромагнита.

Далее рассчитывают электрические параметры катушки электромагнита.

## 5. Установка для высокочастотного индукционного нагрева стальных деталей под термообработку.

Широко применяют индукционный нагрев заготовки под штамповку, прокатку, гибку; для проведения поверхностной индукционной заковки; для термообработки (отжиг, отпуск, нормализация, закалка) и др. процессов. В этом случае (рис. 5.1) нагрев детали 1 вихревыми токами осуществляют от индуктора 2, создающего магнитное поле [7]. Для расчета параметров процесса и установки применяют метод по общему потоку [6], как наиболее простой и универсальный. Метод основан на составлении и расчете магнитной схемы замещения нагруженного индуктора.

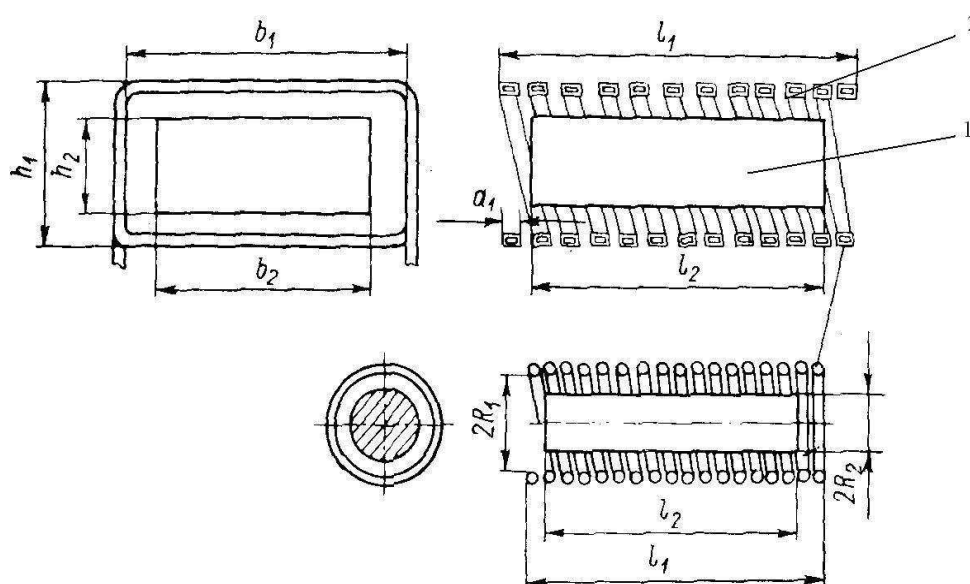


Рисунок 5.1. Геометрические размеры системы индуктор-деталь.

Задача: рассчитать параметры индуктора (диаметр  $d_1 = 65$  мм, длина  $l_1 = 75$  мм), в котором нагревается цилиндрическая заготовка из немагнитной стали (диаметр  $d_2 = 50$  мм, длина  $l_2 = 75$  мм; удельное электрическое сопротивление  $\rho_2 = 74 \cdot 10^{-6}$  Ом·см) на частоте  $f = 10$  кГц.

Глубина проникновения поля в медь индуктора

$$\Delta_1 = \frac{7,12}{\sqrt{f}} = \frac{7,12}{\sqrt{10000 \text{ Гц}}} = 0,0712 \text{ см} = 0,712 \text{ мм}. \quad (5.1)$$

Глубина проникновения поля в стальную заготовку

$$\Delta_2 = 5030 \cdot \sqrt{\frac{\rho_z}{f}} = 5030 \cdot \sqrt{\frac{74 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}}{10000 \text{ Гц}}} = 0,43 \text{ см} = 4,3 \text{ мм} . \quad (5.2)$$

Активное сопротивление пустого индуктора

$$r_1 = \frac{1,75 \cdot R_1 \cdot \sqrt{f} \cdot w^2}{l_1} \cdot K_{r1} \cdot 10^{-6} = \frac{1,75 \cdot 5,3 \text{ см} \cdot \sqrt{10000 \text{ Гц}} \cdot (5 \text{ витков})^2}{7,5 \text{ см}} \cdot 0,36 \cdot 10^{-6} = 0,0011 \text{ Ом}, \quad (5.3)$$

где:  $R_1 = 53 \text{ мм}$  - радиус внутреннего диаметра индуктора с учетом тепловой изоляции;

$w = 5$  – число витков индуктора (из практики);

$K_{r1} = 0,36 \text{ мм}$  – коэффициент, зависящий от толщины стенки трубки.

Индуктивное сопротивление пустого индуктора

$$x_1 = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{f \cdot R_1^2 \cdot w^2}{l_1 + 0,9 \cdot l_1} = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{10000 \text{ Гц} \cdot (5,3 \text{ см})^2 \cdot (5 \text{ витков})^2}{7,5 \text{ см} + 0,9 \cdot 7,5 \text{ см}} = 0,12 \text{ Ом} . \quad (5.4)$$

Активное сопротивление цилиндрической детали для горячего режима

$$r_2 = 6,28 \cdot \frac{\rho_2 \cdot R_2}{\Delta_2 \cdot l_2} \cdot \Phi = 6,28 \cdot \frac{74 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см} \cdot 2,5 \text{ см}}{0,43 \text{ см} \cdot 7,5 \text{ см}} \cdot 0,31 = 0,000328 \text{ Ом} , \quad (5.5)$$

где:  $m$  – коэффициент, определяемый  $= \frac{\sqrt{2} \cdot R_2}{\Delta_2} = \frac{1,41 \cdot 2,5 \text{ см}}{0,43 \text{ см}} = 8,19$ ;

$\Phi = 0,31$  – поправочный коэффициент при  $m = 8,19$  .

Индуктивное сопротивление по току внутри заготовки

$$x_{2м} = 6,28 \cdot \frac{\rho_2 \cdot R_2}{\Delta_2 \cdot l_2} \cdot \Psi = 6,28 \cdot \frac{74 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см} \cdot 2,5 \text{ см}}{0,43 \text{ см} \cdot 7,5 \text{ см}} \cdot 1 = 0,00036 \text{ Ом} , \quad (5.6)$$

где:  $\Psi = 1$  – поправочный коэффициент для  $m = 8,19$  .

Индуктивное сопротивление в зазоре между индуктором и заготовкой

$$x_s = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot \frac{R_1^2 - R_2^2}{l_2} = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot 10000 \text{ Гц} \cdot \frac{(5,3 \text{ см})^2 - (2,5 \text{ см})^2}{7,5 \text{ см}} = 0,0072 \text{ Ом} . \quad (5.7)$$

Индуктивное сопротивление обратного замыкания

$$x_0 = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{f \cdot R_1^2 \cdot k_{x1}}{l_1 - l_2 \cdot k_{x1}} = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{10000 \text{ Гц} \cdot (5,3 \text{ см})^2 \cdot 0,5}{7,5 \text{ см} - (7,5 \text{ см} \cdot 0,5)} = 0,0092 \text{ Ом}, \quad (5.8)$$

где:  $k_{x1} = 0,5$  – поправочный коэффициент самоиндукции, зависящий от длины индуктора

$$(\text{при } \frac{2 \cdot R_1}{l_1} = \frac{2 \cdot 53 \text{ мм}}{75 \text{ мм}} = 1,4).$$

Коэффициент приведения параметров

$$C = \frac{x_0^2}{r_2^2 + (x_0 + x_s + x_{2м})} = \frac{(0,0092 \text{ Ом})^2}{(0,0003 \text{ Ом})^2 + (0,0092 + 0,0072 + 0,00036)} = 0,34. \quad (5.9)$$

Активное сопротивление нагруженного индуктора

$$r_{\text{н}} = r_1 + r_2 \cdot C \cdot w^2 = 0,0011 \text{ Ом} + 0,0003 \text{ Ом} \cdot 0,34 \cdot (5 \text{ витков})^2 = 0,00365 \text{ Ом}. \quad (5.10)$$

Индуктивное сопротивление нагруженного индуктора

$$\begin{aligned} x_{\text{н}} &= C \cdot \left[ x_s + x_{2м} + \frac{r_2^2 + (x_s + x_{2м})^2}{x_0} \right] \cdot w^2 = \\ &= 0,034 \cdot \left[ 0,0072 \text{ Ом} + 0,00036 \text{ Ом} + \frac{(0,00033 \text{ Ом})^2 + (0,0072 \text{ Ом} + 0,00036 \text{ Ом})^2}{0,0092 \text{ Ом}} \right] \cdot (5 \text{ витков})^2 = 0,117 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Полное сопротивление нагруженного индуктора

$$Z_{\text{н}} = \sqrt{r_{\text{н}}^2 + x_{\text{н}}^2} = \sqrt{(0,00365 \text{ Ом})^2 + (0,117 \text{ Ом})^2} = 0,117 \text{ Ом}. \quad (5.12)$$

Электрический к.п.д.

$$\eta_{\text{н}} = \frac{r_{\text{н}} - r_1}{r_{\text{н}}} = \frac{0,00365 \text{ Ом} - 0,0011 \text{ Ом}}{0,00365 \text{ Ом}} = 0,7. \quad (5.13)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{\text{н}} = \frac{r_{\text{н}}}{Z_{\text{н}}} = \frac{0,0055 \text{ Ом}}{0,117 \text{ Ом}} = 0,047. \quad (5.14)$$

Активная и индуктивная мощность индуктора

$$P_{\text{ан}} = \frac{U_{\text{н}}^2 \cdot r_{\text{н}}}{Z_{\text{н}}^2} = \frac{(300 \text{ В})^2 \cdot 0,0055 \text{ Ом}}{(0,177 \text{ Ом})^2} \cdot 10^{-3} = 36 \text{ кВт}, \quad (5.15)$$

где:  $U_{\text{н}} = 300 \text{ В}$  (заданная величина).

$$Q_{\text{ЛН}} = \frac{U_{\text{н}}^2 \cdot x_{\text{н}}}{Z_{\text{н}}^2} = \frac{(300 \text{ В})^2 \cdot 0,117 \text{ Ом}}{(0,177 \text{ Ом})^2} \cdot 10^{-3} = 769 \text{ кВ} \cdot \text{Ар} . \quad (5.16)$$

Ток индуктора

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{Z_{\text{н}}} = \frac{300 \text{ В}}{0,177 \text{ Ом}} = 2564 \text{ А} . \quad (5.17)$$

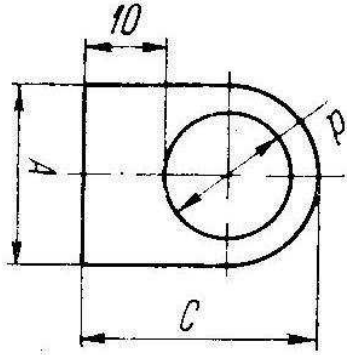


Рисунок 5.2. Сложные профили токопроводов для индукторов промышленной частоты.

Выбираем трубку индуктора (рис. 5.2) внутренним диаметром  $D_{\text{в}} = 12 \text{ мм}$ , толщиной стенки  $4 \text{ мм}$ , наружным диаметром  $D_{\text{н}} = 20 \text{ мм}$ . Тогда сечение трубки:

$$S_{\text{тр}} = \left( \pi \cdot \frac{D_{\text{н}}^2}{4} - \pi \cdot \frac{D_{\text{в}}^2}{4} \right) + (B - A) \cdot A = 3,14 \cdot \left[ \frac{(20 \text{ мм})^2}{4} - \frac{(12 \text{ мм})^2}{4} \right] + (26 \text{ мм} - 20 \text{ мм}) \cdot 20 \text{ мм} = 320 \text{ мм}^2 = 320 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (5.18)$$

Плотность тока в сечении трубки

$$J_{\text{тр}} = \frac{2564 \text{ А}}{320 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 8 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} = 8 \frac{\text{МА}}{\text{м}^2} , \quad (5.19)$$

что меньше допустимой плотности тока  $J_{\text{д}} = 8,5 \frac{\text{МА}}{\text{м}^2}$ . Значит трубка проходит.

## 6. Установка с высокочастотным индукционным плазмотроном для получения электроплавленных сфероидизированных материалов.

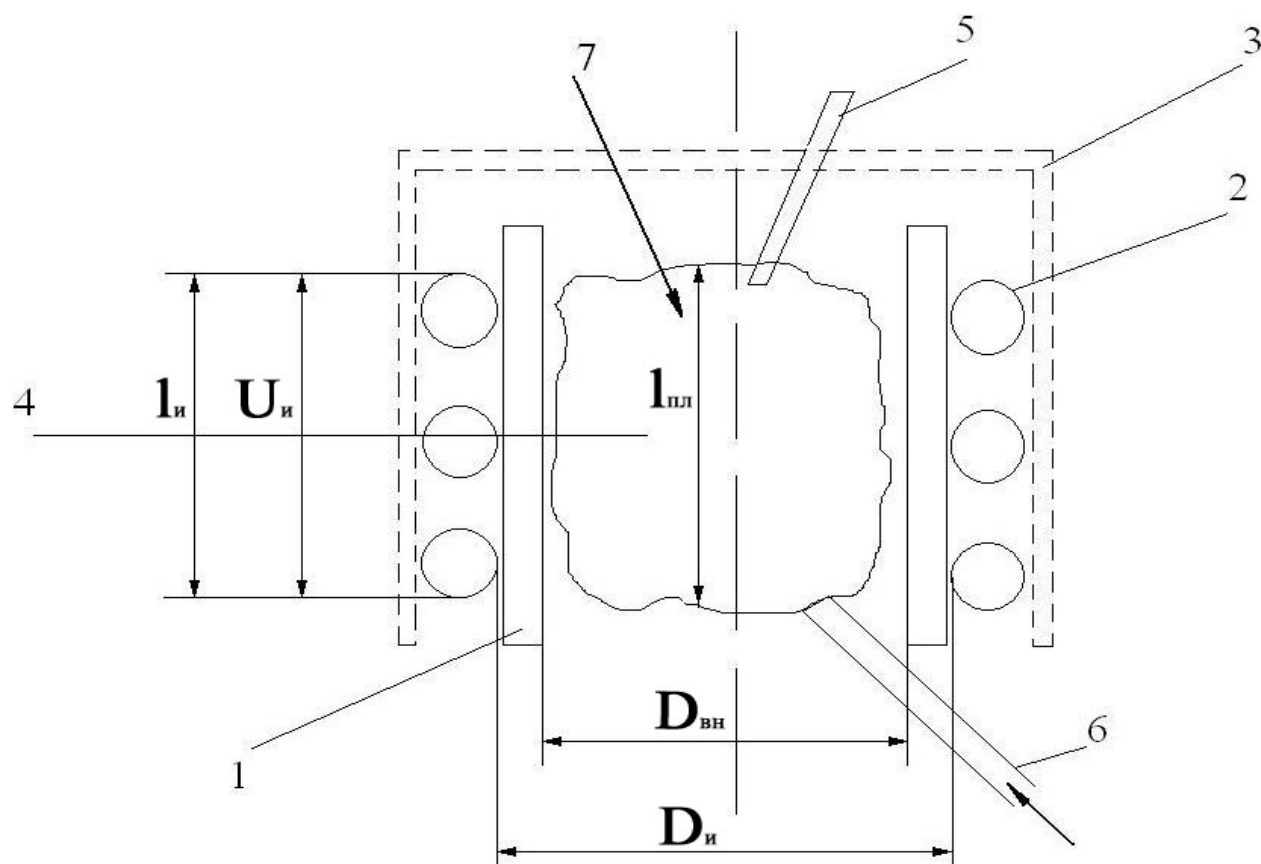


Рисунок 6.1. Схема индукционного плазмотрона.

В такой установке (рис 6.1) в кварцевую камеру 1 подают плазмообразующий газ 7 и порошок, например оксида кремния 6. [5] Вокруг камеры размещают индуктор 2 и защитный стальной корпус 3. Подают однофазное переменное напряжение  $U_{и}$  на индуктор и вводят в камеру иницирующий электрод 5 из вольфрама, который после нагрева начинает создавать газовую плазму 4. Достоинства способа – поддержание одинаковой регулируемой по сечению температуры плазмы и низкая скорость истечения газа из камеры. Это позволяет в один приём оплавливать оксидные частицы фракцией до 200 мкм высокой чистоты.

Задача: рассчитать параметры индуктора, если внутренний диаметр камеры  $D_{вн} = 100$  мм, длина плазмы в камере  $l_{пл} = 90$  мм, внутренний диаметр индуктора

$D_u = 130$  мм, число витков индуктора  $w = 3$ , длина индуктора  $l_u = 80$  мм, ток индуктора  $I_u = 3$  кА.

Для оценочного расчёта можно использовать метод по общему потоку, основанный на магнитной схеме замещения нагруженного индуктора, считая, что внутри него размещено цилиндрическое электропроводное тело в виде высокотемпературной плазмы.

Минимальная частота источника питания

$$f_{\min} = \pi \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_r}{\mu_r \cdot D_{\text{вн}}^2} = 3,14 \cdot 10^6 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{1 \cdot (0,1 \text{ м})^2} = 314000 \text{ Гц}, \quad (6.1)$$

где:  $\rho_r = 0,1$  Ом·см - удельное электрическое сопротивление газовой плазмы водорода;

$\mu_r = 1$  - относительная магнитная проницаемость плазмы водорода.

Ближайшая разрешённая радиочастота 440 кГц; её выбираем за рабочую  $f_p$ .

Глубина проникновения вихревых токов в плазму

$$\Delta_r = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_r}{\mu_r \cdot f_p}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}}{1 \cdot 440000 \text{ Гц}}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \quad (6.2)$$

Приемлемо для нагрева газа.

Для водоохлаждаемой трубки зададим допустимую плотность тока в индукторе  $J_{\text{нд}} = 8,5$  МА/м<sup>2</sup>. Выберем трубку внутренним диаметром  $d_{\text{в}} = 16$  мм, наружным диаметром  $d_{\text{н}} = 24$  мм, толщиной стенки 4 мм.

Тогда её сечение

$$S_{\text{тр}} = (\pi \cdot r_{\text{н}}^2 - \pi \cdot r_{\text{в}}^2) + (B - A) \cdot A = 3,14 \cdot [(12 \text{ мм})^2 - (8 \text{ мм})^2] + 6 \text{ мм} \cdot 24 \text{ мм} = 395 \text{ мм}^2 = 395 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (6.3)$$

При таком сечении максимальная плотность тока составит

$$J_{\text{м}} = \frac{I_{\text{п}}}{S_{\text{тр}}} = \frac{3000 \text{ А}}{395 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 7,6 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 = 7,6 \text{ МА/м}^2, \quad (6.4)$$

что меньше допустимой величины.

Глубина проникновения тока в медь индуктора

$$\Delta_u = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_u}{f_p}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{440000 \text{ Гц}}} = 0,1067 \text{ мм}, \quad (6.5)$$

где:  $\rho_u = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  - удельное электрическое сопротивление меди индуктора.

Значение  $\Delta_u$  много меньше толщины стенки трубки, поэтому в ней будет выделяться значительная мощность потерь.

Активное сопротивление пустого индуктора

$$r_1 = \frac{1,75 \cdot R_u \cdot \sqrt{f_p} \cdot w^2 \cdot K_{r1} \cdot 10^{-6}}{l_u} = \frac{1,75 \cdot 6,5 \text{ см} \cdot \sqrt{440000 \text{ Гц}} \cdot (3 \text{ витка})^2 \cdot 0,58 \cdot 10^{-6}}{8,2 \text{ см}} = 0,0048 \text{ Ом} \quad (6.6)$$

где:  $R_u = 6,5 \text{ см}$  - внутренний радиус индуктора;

$l'_u = d_n \cdot 3 + 2 \cdot b = 24 \text{ мм} \cdot 3 + 2 \cdot 5 \text{ мм} = 82 \text{ мм} = 8,2 \text{ см}$  - длина индуктора;

$b = 5 \text{ мм}$  - толщина изоляции трубки;

$K_{r1} = 0,58$  - коэффициент, зависящий от толщины стенки трубки.

Индуктивное сопротивление пустого индуктора

$$x_1 = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{f_p \cdot R_u^2 \cdot w^2}{l_u + 0,9 \cdot l_u} = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{440000 \text{ Гц} \cdot (6,5 \text{ см})^2 \cdot (3 \text{ витка})^2}{8,2 \text{ см} + 0,9 \cdot 8,2 \text{ см}} = 2,6 \text{ Ом}. \quad (6.7)$$

Активное сопротивление плазменного разряда длиной  $l_r = 9 \text{ см}$  и диаметром

$D_{\text{вн}} = 100 \text{ мм}$

$$r_2 = 6,28 \cdot \frac{\rho_r \cdot R_r}{\Delta_r \cdot l_r} \cdot \Phi = 6,28 \cdot \frac{0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см} \cdot 5 \text{ см}}{10^{-3} \text{ см} \cdot 9 \text{ см}} \cdot 0,02 = 6,9 \text{ Ом}, \quad (6.8)$$

где:  $m$  - коэффициент, определяемый как  $\frac{\sqrt{2} \cdot R_r}{\Delta_r} = \frac{1,41 \cdot 5 \text{ см}}{1 \cdot 10^{-3} \text{ см}} = 0,007$ ;

$\Phi = 0,02$  - поправочный коэффициент для  $m = 0,007$ .

Индуктивное сопротивление потоку внутри плазмы

$$x_{2m} = 6,28 \cdot \frac{\rho_r}{\Delta_r} \cdot \frac{R_r}{l_r} \cdot \Psi = 6,28 \cdot \frac{0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}}{1 \cdot 10^{-3} \text{ см}} \cdot \frac{5 \text{ см}}{9 \text{ см}} \cdot 0,04 = 13,9 \text{ Ом}, \quad (6.9)$$

где:  $\Psi = 0,04$  - поправочный коэффициент для  $m = 0,007$ .

Индуктивное сопротивление в зазоре между индуктором и плазмой

$$x_s = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot f_p \cdot \frac{R_1^2 - R_2^2}{l_r} = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot 440000 \text{ Гц} \cdot \frac{(6,5 \text{ см})^2 - (5 \text{ см})^2}{9 \text{ см}} = 0,21 \text{ Ом} . \quad (6.10)$$

Индуктивное сопротивление обратного замыкания

$$x_0 = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{f_p \cdot R_1^2 \cdot K_{x1}}{l_1 - l_2 \cdot K_{x1}} = 24,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{440000 \text{ Гц} \cdot (6,5 \text{ см})^2 \cdot 0,6}{8,2 \text{ см} - 9 \text{ см} \cdot 0,6} = 0,16 \text{ Ом} , \quad (6.11)$$

где:  $K_{x1} = 0,6$  - поправочный коэффициент самоиндукции, зависящий от длины индуктора

$$(\text{при } \frac{2 \cdot R_1}{l_1} = \frac{2 \cdot 65 \text{ мм}}{82 \text{ мм}} = 1,58).$$

Коэффициент приведения параметров

$$C = \frac{x_0^2}{r_2^2 + (x_0 + x_s + x_{2м})^2} = \frac{(0,16 \text{ Ом})^2}{(6,9 \text{ Ом})^2 + (0,16 \text{ Ом} + 0,21 \text{ Ом} + 13,9 \text{ Ом})^2} = 0,0001. \quad (6.12)$$

Активное сопротивление нагруженного контура

$$r_n = r_1 + r_2 \cdot C \cdot w^2 = 0,0048 \text{ см} + 6,9 \text{ Ом} \cdot 0,0001 \cdot (3 \text{ витка})^2 = 0,0091 \text{ Ом} . \quad (6.13)$$

Индуктивное сопротивление нагруженного индуктора

$$x_n = C \cdot \left[ x_s + x_{2м} + \frac{r_2^2 + (x_s + x_{2м})^2}{x_0} \right] \cdot w^2 = 0,0001 \cdot \left[ 0,21 \text{ Ом} + 13,9 \text{ Ом} + \frac{(6,9 \text{ Ом})^2 + (0,21 \text{ Ом} + 13,9 \text{ Ом})^2}{0,16 \text{ Ом}} \right] \cdot (3 \text{ витка})^2 = 1,4 \text{ Ом} \quad (6.14)$$

Полное сопротивление нагрузочного контура

$$z_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2} = \sqrt{(0,0091 \text{ Ом})^2 + (1,4 \text{ Ом})^2} = 1,41 \text{ Ом} . \quad (6.15)$$

Электрический к.п.д.

$$\eta_n = \frac{r_n - r_1}{r_n} = \frac{0,0091 \text{ Ом} - 0,0048 \text{ Ом}}{0,0091 \text{ Ом}} = 0,47 . \quad (6.16)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_n = \frac{r_n}{z_n} = \frac{0,0091 \text{ Ом}}{1,41 \text{ Ом}} = 0,006 . \quad (6.17)$$

Напряжение на нагруженном индукторе

$$U_{\text{н}} = I_{\text{н}} \cdot z_{\text{н}} = 3000 \text{ А} \cdot 1,41 \text{ Ом} = 4230 \text{ В} . \quad (6.18)$$

Активная мощность индуктора

$$P_{\text{ан}} = \frac{U_{\text{н}}^2 \cdot r_{\text{н}}}{r_{\text{н}}^2} = \frac{(4230 \text{ В})^2 \cdot 0,0091 \text{ Ом}}{(1,41 \text{ Ом})^2} = 81900 \text{ Вт} = 82 \text{ кВт} . \quad (6.19)$$

## 7. Индукционная тигельная печь для выплавки синтетического чугуна.

Индукционные тигельные печи применяют в литейных цехах металлургических и машиностроительных предприятиях для выплавки сплавов цветных и черных металлов [4,9].

Задача: рассчитать параметры индукционной тигельной печи вместимостью 0,25 т для выплавки синтетического чугуна из лома.

Полезный объем тигля (рис.7.1)

$$V = \frac{G}{d_2} = \frac{250 \text{ кг}}{7200 \text{ кг/м}^3} = 0,035 \text{ м}^3, \quad (7.1)$$

где:  $G = 250 \text{ кг}$  - вместимость печи;

$d_2 = 7200 \text{ кг/м}^3$  - плотность расплава чугуна.

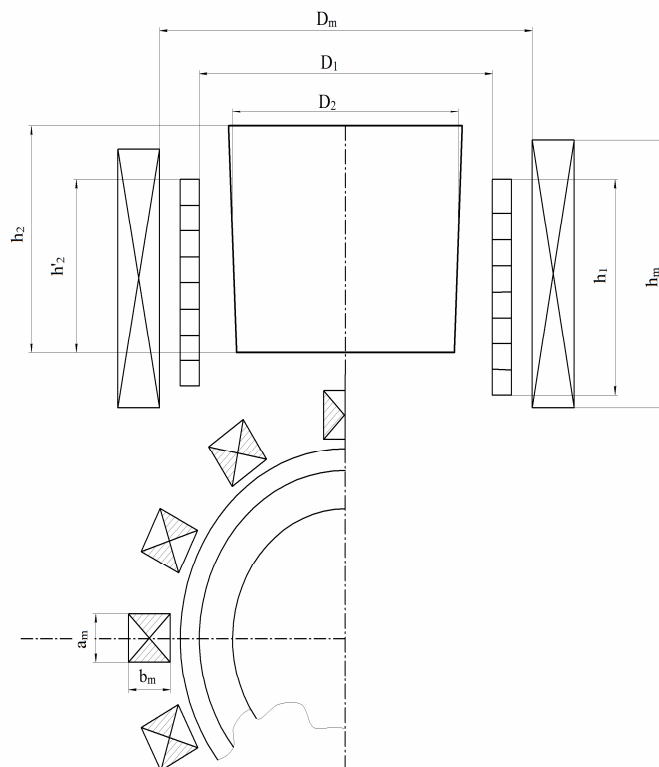


Рисунок 7.1 Эскиз к электрическому расчету тигельной печи.

По графику (рис.7.2) выбираем значение  $\bar{h}_2 = 1,4$  (из практики), представляющее собой отношение высоты расплава  $h_2$  к внутреннему диаметру плавильного тигля (в среднем сечении)  $D_2$ , т.е.

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2}{D_2}. \quad (7.2)$$

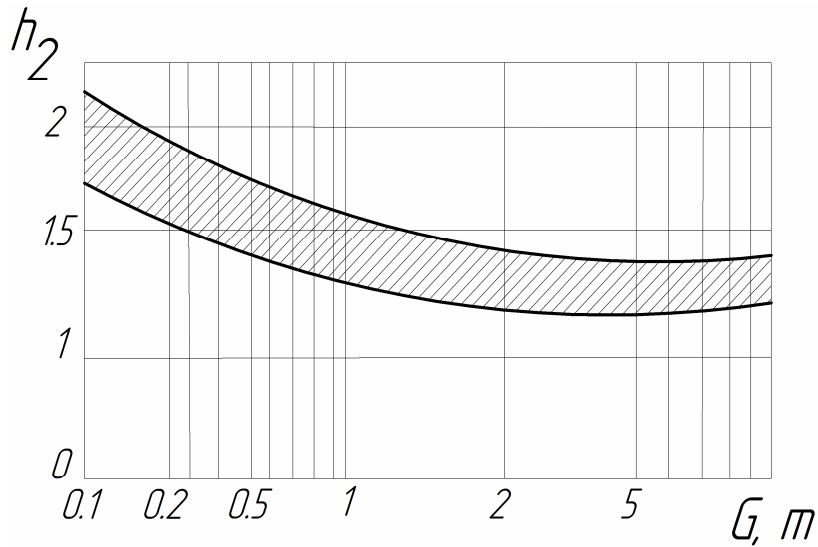


Рисунок 7.2 График к определению диаметра тигля.

Тогда внутренний диаметр плавильного тигля

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot \bar{h}_2}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,035 \text{ м}^3}{3,14 \cdot 1,4}} = 0,32 \text{ м}, \quad (7.3)$$

где:  $\bar{h}_2 = 1,4$  – для тигельной печи вместимостью 0,25 т.

Высота расплава в тигле

$$h_2 = D_2 \cdot \bar{h}_2 = 0,32 \text{ м} \cdot 1,4 = 0,448 \text{ м}. \quad (7.4)$$

Высота внутренней полости тигля

$$h_t = k_1 \cdot h_2 = 1,3 \cdot 0,448 \text{ м} = 0,58 \text{ м}, \quad (7.5)$$

где:  $k_1 = 1,3$  – коэффициент учитывает наличие мениска и изменяется в пределах  $1,2 \div 1,4$ .

Толщина футеровки стенки тигля (рис.7.3)

$$b_\phi = 0,08 \cdot \sqrt[4]{G} = 0,08 \cdot \sqrt[4]{0,25 \text{ т}} = 0,056 \text{ м}. \quad (7.6)$$

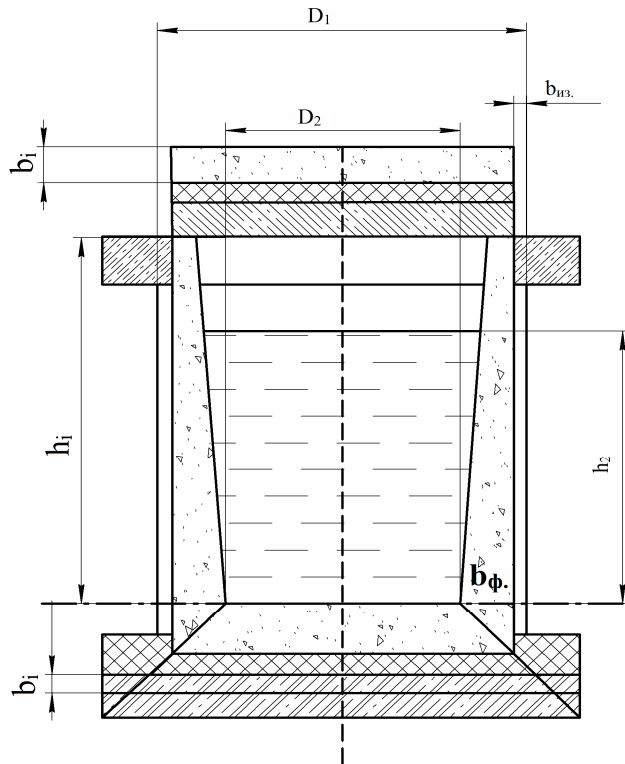


Рисунок 7.3 Эскиз футеровки печи.

Внутренний диаметр индуктора

$$D_1 = D_2 + 2 \cdot b_{\phi} + 2 \cdot b_{из} = 0,32 \text{ м} + 2 \cdot 0,056 \text{ м} + 2 \cdot 0,03 \text{ м} = 0,492 \text{ м}, \quad (7.7)$$

где:  $b_{из} = 0,03 \text{ м}$  - толщина тепловой изоляции между футеровкой и индуктором.

Высота индуктора (без учета холостых витков)

$$h_1 = h_2 \cdot h'_1 = 0,448 \text{ м} \cdot 1,1 = 0,493 \text{ м}, \quad (7.8)$$

где:  $h'_1 = 1,1$  - относительная высота индуктора (обычно  $1,0 \div 1,2$ ).

Минимальная частота источника питания

$$f_{\min} = \frac{\pi \cdot 10^6 \cdot \rho_{ш}}{\mu'_{ш} \cdot d_{ш}^2} = \frac{3,14 \cdot 10^6 \cdot (127 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м})}{1 \cdot (0,043 \text{ м})^2} = 2170 \text{ Гц}, \quad (7.9)$$

где:  $\rho_{ш} = 127 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  - удельное электрическое сопротивление шихты (чугуна);

$d_{ш} = 0,043 \text{ м}$  - характерный поперечный размер среднего куска шихты;

$\mu'_{ш} = 1$  - относительная магнитная проницаемость шихты.

Принимаем в качестве рабочей частоты  $f = 2400 \text{ Гц}$ .

Глубина проникновения тока в материал индуктора

$$\Delta_{\text{и}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{и}}}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{2400 \text{ Гц}}} = 0,0014 \text{ м} = 1,4 \text{ мм}, \quad (7.10)$$

где:  $\rho_{\text{и}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное электрическое сопротивление меди индуктора.

Активное и реактивное сопротивления индуктора

$$r_{\text{и}} = x_{\text{и}} = \frac{\rho_{\text{и}} \cdot \pi \cdot D_1'}{k_{\text{зи}} \cdot \Delta_{\text{и}} \cdot h_1} = \frac{2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 3,14 \cdot 0,493 \text{ м}}{0,9 \cdot 0,0014 \text{ м} \cdot 0,493 \text{ м}} = 0,0498 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2, \quad (7.11)$$

где:  $D_1' = D_1 + \Delta_{\text{и}} = 0,492 \text{ м} + 0,0014 \text{ м} = 0,493 \text{ м}$  – расчетный диаметр индуктора;

$k_{\text{зи}} = 0,9$  – коэффициент заполнения индуктора.

Глубина проникновения тока в материал загрузки

$$\Delta_{\text{ш}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ш}}}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{127 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{2400 \text{ Гц}}} = 0,0116 \text{ м} = 11,6 \text{ мм}. \quad (7.12)$$

Линейный размер выбранного куска шихты  $d_{\text{ш}} = 13,7 \text{ мм}$  превышает глубину проникновения тока 11,3 мм в кусок шихты, что приемлемо.

Относительный радиус расплава

$$R_2' = \frac{D_2}{\sqrt{2} \cdot \Delta_{\text{ш}}} = \frac{0,32 \text{ м}}{\sqrt{2} \cdot 0,0116 \text{ м}} = 20. \quad (7.13)$$

Активное и реактивное сопротивления шихты

$$r_{\text{ш}} = x_{\text{ш}} = \frac{\pi \cdot D_2^2 \cdot \rho_{\text{ш}} \cdot \Psi_{\text{а}}}{\sqrt{2} \cdot \Delta_{\text{ш}}^2 \cdot h_2} = \frac{3,14 \cdot (0,32 \text{ м})^2 \cdot 127 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 0,05}{1,41 \cdot (0,0116 \text{ м})^2 \cdot 0,448 \text{ м}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/виток}^2 \quad (7.14)$$

где:  $\Psi_{\text{а}} = \frac{1}{R_2'} = \frac{1}{20} = 0,05$  – вспомогательная функция.

Реактивное сопротивление воздушного зазора:

$$x_3 = \frac{2 \cdot \pi^3 \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot f \cdot 10^{-7}}{h_2} = \frac{2 \cdot 3,14^3 \cdot [(0,492 \text{ м})^2 - (0,32 \text{ м})^2] \cdot 2400 \text{ Гц} \cdot 10^{-7}}{0,448 \text{ м}} = 5,705 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 \quad (7.15)$$

Реактивное сопротивление пустого индуктора

$$x_{10} = \frac{2 \cdot \pi^3 \cdot D_1^2 \cdot f \cdot 10^{-7}}{h_1} = \frac{2 \cdot 3,14^3 \cdot (0,492 \text{ м})^2 \cdot 2400 \text{ Гц} \cdot 10^{-7}}{0,493 \text{ м}} = 7,296 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2. (7.16)$$

Реактивное сопротивление обратного замыкания

$$x_0 = \frac{x_{10} \cdot h_1}{h_1 - k_1 \cdot h_2'} = \frac{7,296 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 \cdot 0,493 \text{ м}}{0,493 \text{ м} - 0,7 \cdot 0,448 \text{ м}} = 20,05 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2, (7.17)$$

где:  $k_1 = \frac{D_1}{h_1} = \frac{0,492}{0,493} = 0,99$  – поправочный коэффициент, определяется из графика (рис.

7.4) и равен для индуктора без магнитопровода – 0,7.

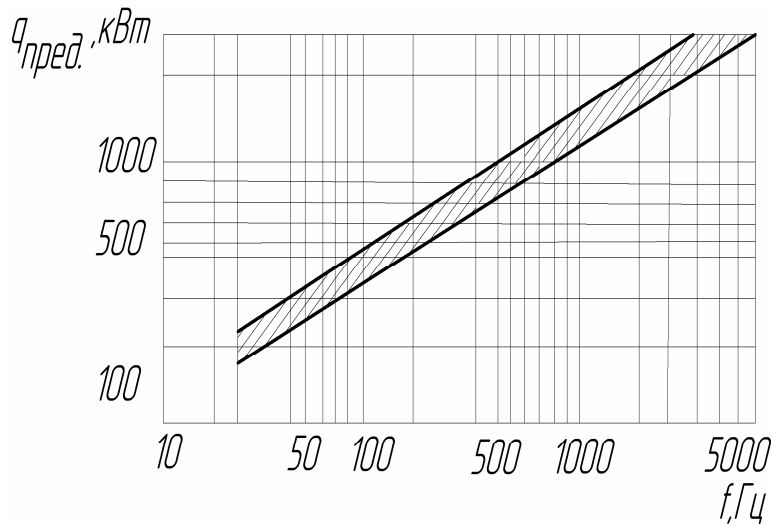


Рисунок 7.4 График для нахождения значения поправочного коэффициента

Коэффициент приведения параметров загрузки к току индуктора

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\left(\frac{r_{\text{ш}}}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_{\text{ш}} + x_3}{x_0}\right)^2} = \frac{1}{\left(\frac{2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/виток}^2}{20,05 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2}\right)^2 + \left(1 + \frac{2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/виток}^2 + 5,705 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2}{20,05 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2}\right)^2} = (7.18)$$

$$= 0,595$$

Приведенные активное  $r'_{\text{ш}}$  и реактивное  $x'_{\text{ш}}$  сопротивления загрузки (шихты)

$$r'_{\text{ш}} = C_{\text{пр}} \cdot r_{\text{ш}} = 0,595 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 = 0,143 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2, (7.19)$$

$$\begin{aligned}
x'_{ш} &= C_{пр} \cdot \left[ (x_{ш} + x_3) + \frac{(x_{ш} + x_3)^2 + r_{ш}^2}{x_0} \right] = \\
&= 0,595 \cdot \left[ \left( (0,24 \cdot 10^{-3} + 5,705 \cdot 10^{-3}) \text{ Ом/виток}^2 + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{((0,24 \cdot 10^{-3} + 5,705 \cdot 10^{-3}) \text{ Ом/виток}^2)^2 + (0,24 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2)^2}{20,05 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2} \right) \right] = \quad (7.20) \\
&= 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2
\end{aligned}$$

Эквивалентные активное  $r_3$ , реактивное  $x_3$  и полное  $z_3$  сопротивления системы «индуктор-расплав»

$$r_3 = r_u + r'_{ш} = 0,0498 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 + 0,143 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 = 0,1928 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 \quad (7.21)$$

$$x_3 = x_u + x'_{ш} = 0,0498 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 + 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 = 4,6498 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 \quad (7.22)$$

$$\begin{aligned}
z_3 &= \sqrt{r_3^2 + x_3^2} = \sqrt{(0,1928 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2)^2 + (4,6498 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2)^2} = \\
&= 4,65 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 \quad (7.23)
\end{aligned}$$

Электрический КПД индуктора с нагрузкой

$$\eta_3 = \frac{r'_{ш}}{r_3} = \frac{0,143 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2}{0,1928 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2} = 0,74. \quad (7.24)$$

Коэффициент мощности индуктора с нагрузкой

$$\cos \varphi = \frac{r_3}{z_3} = \frac{0,1928 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2}{4,65 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2} = 0,04. \quad (7.25)$$

Активная мощность источника питания

$$P_1 = \frac{P_{пол}}{\eta_3 \cdot \eta_t \cdot \eta_{всп}} = \frac{125 \text{ кВт}}{0,74 \cdot 0,825 \cdot 0,9} = 227,5 \text{ кВт}, \quad (7.26)$$

где:  $\eta_t = 0,825$  – тепловой КПД печи;

$\eta_{всп} = 0,9$  – КПД, учитывающий потери в короткой сети и конденсаторной батарее;

$P_{пол} = 125 \text{ кВт}$  – полезная мощность, необходимая для нагрева, плавления шихты и перегрева расплава.

В качестве источника питания выбираем тиристорный преобразователь частоты мощностью 240 кВт, выходное напряжение которого  $U = 950 \text{ В}$ .

Т.к. мы не делали тепловой расчет печи, то значения  $P_{\text{пол}}$ ,  $\eta_t$ ,  $\eta_{\text{всп}}$  взяты из производственных данных.

Число витков индуктора при этом напряжении

$$w = U \cdot \sqrt{\frac{\cos \varphi}{P_{\text{н}} \cdot z_{\text{э}}}} = 950 \cdot \sqrt{\frac{0,06}{151 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot 4,65 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2}} = 8,78 \text{ витков}, \quad (7.27)$$

где:  $P_{\text{н}} = P_{\text{пол}} + P_{\text{п}} = 125 \text{ кВт} + 26 \text{ кВт} = 151 \text{ кВт}$  – суммарная мощность плавления;

$P_{\text{п}} = 26 \text{ кВт}$  – мощность тепловых потерь (из опытных данных).

Ориентировочная высота индуцирующего витка

$$h'_b = \frac{h_1 \cdot k_{\text{зн}}}{w} = \frac{0,493 \text{ м} \cdot 0,9}{8,78 \text{ витков}} = 50,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (7.28)$$

Выбираем трубку диаметром 46 мм при числе витков  $w_{\text{н}} = 10$ .

Тогда окончательно имеем коэффициент заполнения

$$k_{\text{зн}} = \frac{h'_b \cdot w_{\text{н}}}{h_1} = \frac{46 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 10 \text{ витков}}{0,493 \text{ м}} = 0,93. \quad (7.29)$$

Номинальное напряжение печи

$$U_{\text{н}} = \frac{U \cdot w_{\text{н}}}{w} = \frac{950 \text{ В} \cdot 10 \text{ витков}}{8,78 \text{ витков}} = 1082 \text{ В}. \quad (7.30)$$

Активное  $r_{\text{н1}}$ , индуктивное  $x_{\text{н1}}$  и полное  $z_{\text{н1}}$  сопротивления индуктора

$$r_{\text{н1}} = r_{\text{э}} \cdot w_{\text{н}}^2 = 0,1928 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 \cdot (10 \text{ витков})^2 = 0,01928 \text{ Ом}. \quad (7.31)$$

$$x_{\text{н1}} = x_{\text{э}} \cdot w_{\text{н}}^2 = 4,6498 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 \cdot (10 \text{ витков})^2 = 0,46498 \text{ Ом}. \quad (7.32)$$

$$z_{\text{н1}} = z_{\text{э}} \cdot w_{\text{н}}^2 = 4,65 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2 \cdot (10 \text{ витков})^2 = 0,465 \text{ Ом}. \quad (7.33)$$

Сила тока в индукторе

$$I_{\text{и}} = \frac{U_{\text{н}}}{z_{\text{н1}}} = \frac{1082 \text{ В}}{0,465 \text{ Ом}} = 2327 \text{ А}. \quad (7.34)$$

Настил тока в индукторе

$$H_{\text{и}} = \frac{I_{\text{и}} \cdot w_{\text{н}}}{h_1} = \frac{2327 \text{ А} \cdot 10 \text{ витков}}{0,493 \text{ м}} = 47,2 \text{ кА/м}. \quad (7.35)$$

Активная мощность, подведенная к индуктору

$$P_u = U_u \cdot I_u \cdot \cos \varphi = 1082 \text{ В} \cdot 2327 \text{ А} \cdot 0,06 = 151,1 \text{ кВт} . \quad (7.36)$$

Электрические потери в индукторе

$$P_{эл} = P_u \cdot \left[ (1 - \eta_s) + 0,5 \cdot \frac{h_x}{h_l} \right] = 151,1 \text{ кВт} \cdot \left[ (1 - 0,74) + 0,5 \cdot \frac{0,0986 \text{ м}}{0,493 \text{ м}} \right] = 54,4 \text{ кВт} , \quad (7.37)$$

где:  $h_x = 0,2 \cdot h_l = 0,2 \cdot 0,493 \text{ м} = 0,0986 \text{ м}$  – высота холостых витков, составляющая 20 % от высоты рабочих витков.

Выбираем тип конденсатора [3] по напряжению  $U_n = 1082 \text{ В}$ .

Тип КСЭК – 1,2 – 150 на напряжение  $U_{к.б.} = 1200 \text{ В}$ , емкость  $C_6 = 32 \text{ мкФ}$ , реактивная мощность  $150 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{Ар}$ .

Реактивная (емкостная) мощность конденсаторной батареи, необходимая для компенсации от  $\cos \varphi = 0,06$  до  $\cos \varphi = 0,6$

$$Q'_{к.б.} = P_u \cdot (tg \varphi - tg \varphi_k) = 1,9 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{Ар} . \quad (7.38)$$

С учетом недоиспользования банок по напряжению

$$Q_{к.б.} = Q'_{к.б.} \cdot \left( \frac{U_{к.б.}}{U_n} \right)^2 = 1,9 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{Ар} \cdot \left( \frac{1200 \text{ В}}{984 \text{ В}} \right)^2 = 2,83 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{Ар} . \quad (7.39)$$

Емкость конденсаторной батареи

$$C_{к.б.} = \frac{Q'_{к.б.}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_n^2} = \frac{2,83 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{Ар}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2400 \text{ Гц} \cdot (984 \text{ В})^2} = 186 \text{ мкФ} . \quad (7.40)$$

Число банок конденсаторов

$$N_6 = \frac{C_{к.б.}}{C_6} = \frac{186 \text{ мкФ}}{32} = 5,81 . \quad (7.41)$$

Принимаем  $N = 6$  штук .

Электрические потери в конденсаторной батарее

$$P_{эб} = Q_{к.б.} \cdot tg \delta = 2,83 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{Ар} \cdot 0,8 \cdot 10^{-2} = 22,6 \text{ кВт} , \quad (7.42)$$

где:  $tg \delta = 0,8 \cdot 10^{-2}$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

Мощность, забираемая от источника питания

$$P_f = P_n = P_{\text{зи}} + P_{\text{эб}} + P_{\text{ток}} + P_{\text{пол}} + P_{\text{ту}} = (54,4 + 22,6 + 11,375 + 125 + 26) \text{ кВт} = 239,375 \text{ кВт} = 239 \text{ кВт}, \quad (7.43)$$

где:  $P_{\text{ток}} = 0,05 \cdot P_1 = 0,05 \cdot 227,5 \text{ кВт} = 11,375 \text{ кВт}$  - мощность потерь в токопроводе.

Электрические потери в источнике питания

$$P_{\text{ип}} = P_n \cdot \left[ \left( \frac{1}{\eta_{\text{пр}}} \right) - 1 \right] = 239 \text{ кВт} \cdot \left[ \left( \frac{1}{0,92} \right) - 1 \right] = 20,78 \text{ кВт}, \quad (7.44)$$

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

Активная мощность, потребляемая установкой от сети

$$P_c = P_n + P_{\text{ип}} = 239 \text{ кВт} + 20,78 \text{ кВт} = 259,78 \text{ кВт}. \quad (7.45)$$

Общий КПД плавильной установки

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_c} = \frac{125 \text{ кВт}}{259,78 \text{ кВт}} = 0,48. \quad (7.46)$$

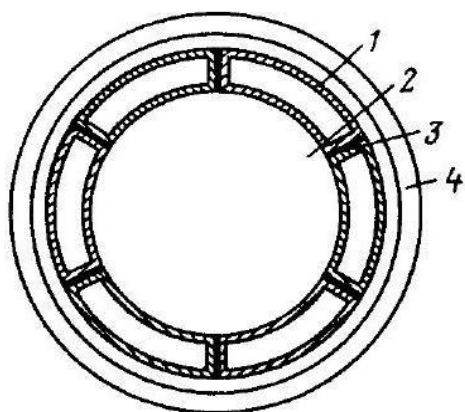
Удельный расход электроэнергии

$$q = \frac{q_k}{\eta_{\text{ц}}} = \frac{0,28 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}}{0,48} = 583 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}, \quad (7.47)$$

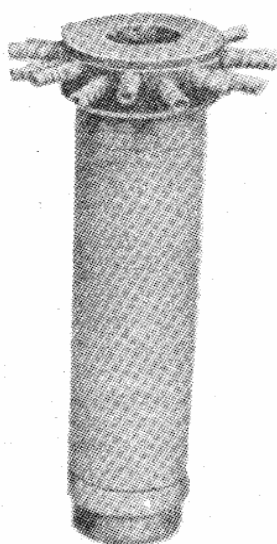
где:  $q_k = 0,28 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$  – энтальпия чугуна при конечной температуре.

## 8. Индукционная печь с «холодным» тиглем для выплавки жаропрочных сплавов.

При индукционной плавке в «холодном» тигле (рис. 8.1,а) энергия электромагнитного поля индуктора 4 передаётся расплаву 2 через медные водоохлаждаемые секции 1, электрически изолированные 3 друг от друга [10]. Отсутствие керамического тигля, как например в вакуумной индукционной печи, устраняет насыщение расплава неметаллическими включениями, а применение поля высокой напряжённости позволяет расплавлять тугоплавкие металлы и различную неэлектропроводную керамику.



(а)



(б)

Рисунок 8.1,а - схема взаимного расположения элементов ИПХТ-М; б тигель ИПХТ-М в вакуум-герметичной оболочке из стеклопластика.

Задача: рассчитать электрические параметры индукционной печи с «холодным» тиглем вместимостью 25 кг для плавки сплавов на никелевой основе в вакууме.

Эскиз плавильного узла электропечи представлен на рис. 8.2.

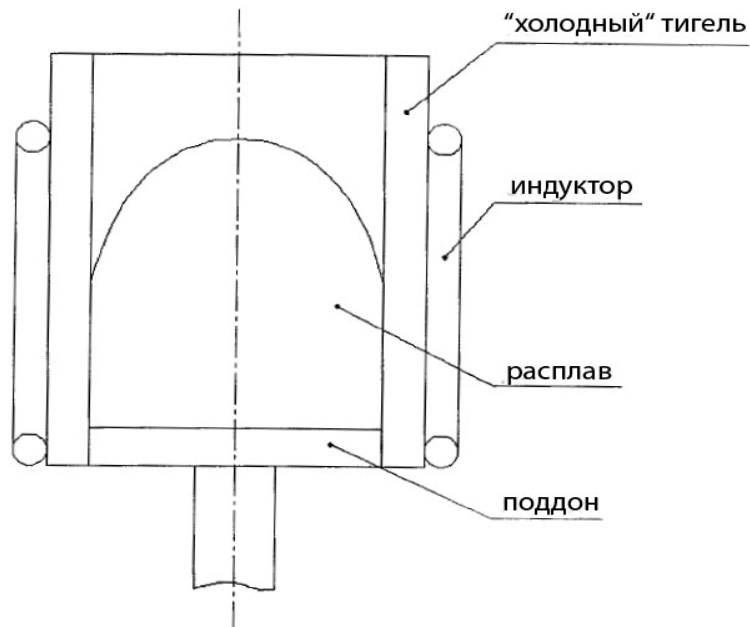


Рисунок 8.2. Эскиз плавильного узла электропечи.

Расплавляемый металл

сталь

Плотность расплава

$$\rho_p = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

Удельная электрическая проводимость расплава

$$\gamma_p = 0,91 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Внутренний диаметр индуктора

$$d_{\text{и}} = 0,23 \text{ м}$$

Диаметр расплава

$$d_p = 0,136 \text{ м}$$

Высота индуктора

$$h_{\text{и}} = 0,38 \text{ м}$$

Высота расплава

$$h_{\text{р}} = 0,22 \text{ м}$$

Удельная электрическая проводимость материала индуктора

$$\gamma_{\text{и}} = 5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Удельная электрическая проводимость материала «холодного» тигля

$$\gamma_{\text{х.т.}} = 5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Относительная магнитная проницаемость меди индуктора

$$\mu_{\text{и}} = 1$$

Относительная магнитная проницаемость меди «холодного» тигля

$$\mu_{\text{х.т.}} = 1$$

Магнитная постоянная

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

Коэффициент заполнения индуктора

$$k_{\text{з.и.}} = 0,9$$

Напряжение источника питания

$$U_{\text{ист.}} = 800 \text{ В}$$

Частота источника питания

$$f_{\text{ист.}} = 2400 \text{ Гц}$$

Мощность, выделяющаяся в расплаве с учётом отжата

$$P_{\text{р.отж.}} = 136,89 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Периметр сечения трубки «холодного» тигля

$$\Pi_{\text{х.т.}} = 0,083 \text{ м}$$

Площадь поперечного сечения трубки «холодного» тигля

$$S_{\text{х.т.}} = 3,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Принимаем число трубок «холодного» тигля

$$n_{\text{х.т.}} = 26$$

Проводим электрический расчёт электромагнитной системы печи с учётом отжата расплава от стенок тигля.

Глубина проникновения тока в индуктор

$$\Delta_{\text{и}} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \cdot \gamma_{\text{и}} \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{2}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{ГН}}{\text{М}} \cdot 5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{М}} \cdot 2400 \text{ Гц} \cdot 6,283}} = 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (8.1)$$

где:  $\omega$  - круговая частота  $= 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{ист.}}$

Активное сопротивление индуктора

$$r_{\text{и}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{и}}}{h_{\text{и}} \cdot \gamma_{\text{и}} \cdot \Delta_{\text{и}} \cdot k_{\text{з.и.}}} = \frac{3,14 \cdot 0,23 \text{ м}}{0,38 \text{ м} \cdot 5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{М}} \cdot 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 0,9} = 29,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (8.2)$$

Глубина проникновения тока в «холодный» тигель

$$\Delta_{\text{х.т.}} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \cdot \gamma_{\text{х.т.}} \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{2}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{ГН}}{\text{М}} \cdot 5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{М}} \cdot 2400 \text{ Гц} \cdot 6,283}} = 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (8.3)$$

Активное сопротивление «холодного» тигля

$$r_{\text{х.т.}} = \frac{n_{\text{х.т.}} \cdot \Pi_{\text{х.т.}}}{h_{\text{и}} \cdot \Delta_{\text{х.т.}} \cdot \gamma_{\text{х.т.}}} = \frac{26 \cdot 0,083 \text{ м}}{0,38 \text{ м} \cdot 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{М}}} = 78,61 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (8.4)$$

Глубина проникновения тока в расплав

$$\Delta_{\text{р}} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \cdot \gamma_{\text{р}} \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{2}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{ГН}}{\text{М}} \cdot 0,91 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{М}} \cdot 2400 \text{ Гц} \cdot 6,283}} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (8.5)$$

Активное сопротивление столба расплава

$$r'_{\text{р}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{р}} - 2 \cdot \Delta_{\text{р}})}{h_{\text{м}} \cdot \Delta_{\text{р}} \cdot \gamma_{\text{р}}} = \frac{3,14 \cdot (0,136 \text{ м} - 2 \cdot 11 \cdot 10^{-3} \text{ м})}{0,053 \text{ м} \cdot 11 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 0,91 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{М}}} = 694,26 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (8.6)$$

Активное сопротивление расплава в зоне контакта со стенкой тигля

$$r_p'' = \frac{\pi \cdot (d_p - \Delta_p) \cdot k}{(h_n - h_m) \cdot \Delta_p \cdot \gamma_p} = \frac{3,14 \cdot (0,136 \text{ м} - 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}) \cdot 2}{(0,38 \text{ м} - 0,053 \text{ м}) \cdot 11 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 0,91 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}} = 240,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}, \quad (8.7)$$

где:  $k = 2$  – коэффициент, учитывающий неточность методики расчёта.

Суммарное активное сопротивление расплава

$$r_p = \frac{r_p' \cdot r_p''}{(r_p' + r_p'')} = \frac{694,26 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot 240,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}}{(694,26 \text{ Ом} + 240,37 \text{ Ом}) \cdot 10^{-6}} = 178,55 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (8.8)$$

Внутренние реактивные сопротивления «холодного» тигля и расплава

$$X_{x.t.} = r_{x.t.} = 78,61 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}, \quad (8.9)$$

$$X_p = r_p = 178,55 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (8.10)$$

Вторичное реактивное сопротивление рассеяния системы для отжатой части расплава

$$X_2' = \frac{\omega \cdot \mu_0}{4 \cdot h_m} \cdot \left\{ \pi \left[ d_n^2 - (d_{p,cp} - \Delta_3)^2 \right] - n \cdot S_{x.t.} \right\} = \frac{2400 \text{ Гц} \cdot 6,283 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}}{4 \cdot 0,053 \text{ м}} \times$$

$$\times \left\{ 3,14 \cdot \left[ 0,23^2 \text{ м}^2 - (0,128 \text{ м} - 11 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2 \right] - 26 \cdot 3,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \right\} = 7,08 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (8.11)$$

Вторичное реактивное сопротивление рассеяния в зоне контакта расплава со стенкой тигля

$$X_2'' = \frac{\omega \cdot \mu_0}{4 \cdot (h_n - h_m)} \cdot \left\{ \pi \left[ d_n^2 - (d_p - \Delta_3)^2 \right] - n \cdot S_{x.t.} \right\} = \frac{2400 \text{ Гц} \cdot 6,283 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}}{4 \cdot (0,38 \text{ м} - 0,053 \text{ м})} \times$$

$$\times \left\{ 3,14 \cdot \left[ 0,23^2 \text{ м}^2 - (0,136 \text{ м} - 11 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2 \right] - 26 \cdot 3,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \right\} = 1,99 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (8.12)$$

Полное вторичное реактивное сопротивление электромагнитной системы

$$X_2 = \frac{X_2' \cdot X_2''}{(X_2' + X_2'')} = \frac{7,08 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot 1,99 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}}{(7,08 \text{ Ом} + 1,99 \text{ Ом}) \cdot 10^{-3}} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (8.13)$$

Внутреннее реактивное сопротивление индуктора при частоте 2400 Гц

$$X_1 = r_n = 29,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (8.14)$$

Сопротивление на пути замыкания магнитного потока вне расплава

$$X_0 = \frac{1,8 \cdot d_{\text{и}}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot h_{\text{и}}}{2,3 \cdot h_{\text{и}}^2 + h_{\text{и}} \cdot d_{\text{и}} - 2,3 \cdot h_{\text{и}} \cdot h_{\text{п}}} =$$

$$= \frac{1,8 \cdot 0,23^2 \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2400 \text{ Гц} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot 0,38 \text{ м}}{2,3 \cdot 0,38^2 \text{ м}^2 + 0,38 \text{ м} \cdot 0,23 \text{ м} - 2,3 \cdot 0,38 \text{ м} \cdot 0,22 \text{ м}} = 3,02 \cdot 10^3 \text{ Ом} \quad (8.15)$$

Коэффициент приведения параметров вторичной цепи к току в индукторе

$$C = \frac{X_0^2}{(r_{\text{п}} + r_{\text{х.т.}})^2 + (X_0 + X_{\text{п}} + X_{\text{х.т.}} + X_2)^2} =$$

$$= \frac{(3,02 \cdot 10^3)^2 \text{ Ом}^2}{(178,55 \cdot 10^{-6} + 78,61 \cdot 10^{-6})^2 \text{ Ом}^2 + (3,02 \cdot 10^3 + 178,55 \cdot 10^{-6} + 78,61 \cdot 10^{-6} + 1,55 \cdot 10^{-3})^2 \text{ Ом}^2} =$$

$$= 0,389 \quad (8.16)$$

Приведённое активное сопротивление электромагнитной системы

$$r' = C \cdot (r_{\text{п}} + r_{\text{х.т.}}) = 0,389 \cdot (178,55 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} + 78,61 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}) = 100,14 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (8.17)$$

Приведённое реактивное сопротивление электромагнитной системы

$$X' = C \left[ (X_{\text{п}} + X_{\text{х.т.}} + X_2) + \frac{(r_{\text{п}} + r_{\text{х.т.}})^2 + (X_{\text{п}} + X_{\text{х.т.}} + X_2)^2}{X_0} \right] = 0,389 \times$$

$$\times \left[ \frac{(178,55 \cdot 10^{-6} + 78,61 \cdot 10^{-6} + 1,55 \cdot 10^{-3}) \text{ Ом} +}{+ \frac{(178,55 \cdot 10^{-6} + 78,61 \cdot 10^{-6})^2 \text{ Ом}^2 + (178,55 \cdot 10^{-6} + 78,61 \cdot 10^{-6} + 1,55 \cdot 10^{-3})^2 \text{ Ом}^2}{3,02 \cdot 10^3 \text{ Ом}}} \right] =$$

$$= 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (8.18)$$

Эквивалентное активное сопротивление электромагнитной системы

$$r_{\text{э}} = r_{\text{и}} + r_{\text{п}}^* + r_{\text{т}}^*$$

$$r_{\text{п}}^* = C \cdot r_{\text{п}}$$

$$r_{\text{т}}^* = C \cdot r_{\text{т}}$$

$$r_{\text{э}} = 29,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} + (178,55 + 78,61) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot 0,389 = 129,24 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (8.19)$$

Эквивалентное реактивное сопротивление электромагнитной системы

$$X_{\text{э}} = X_{\text{л}} + X' = 29,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} + 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 1,169 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (8.20)$$

Полное сопротивление электромагнитной системы

$$Z = \sqrt{r_{\text{э}}^2 + X_{\text{э}}^2} = \sqrt{(129,24 \cdot 10^{-6})^2 \text{ Ом}^2 + (1,166 \cdot 10^{-3})^2 \text{ Ом}^2} = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (8.21)$$

Электрический коэффициент полезного действия

$$\eta_3 = \frac{r_p}{r_3} \cdot C = \frac{178,55 \cdot 10^{-6}}{129,24 \cdot 10^{-6}} \text{ Ом} \cdot 0,389 = 0,538. \quad (8.22)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{r_3}{Z} = \frac{129,24 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}}{1,17 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}} = 0,11. \quad (8.23)$$

Мощность, подводимая к индуктору

$$P_{\text{и}} = \frac{P_{\text{р.отж.}}}{\eta_3} = \frac{136,89 \cdot 10^3 \text{ Вт}}{0,538} = 254,46 \cdot 10^3 \text{ Вт}. \quad (8.24)$$

Число витков индуктора по расчёту

$$w = U_{\text{ист}} \cdot \sqrt{\frac{\cos \varphi}{Z \cdot P_{\text{и}}}} = 800 \text{ В} \cdot \sqrt{\frac{0,11}{1,17 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot 254,46 \cdot 10^3 \text{ Вт}}} = 15,37. \quad (8.25)$$

Исходя из опыта, принимаем:  $w' = 12$ .

Полное сопротивление электромагнитной системы

$$Z_c = Z \cdot w^2 = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot 12^2 = 168,97 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (8.26)$$

Ток в индукторе

$$I = \frac{U_{\text{и}}}{Z_c} = \frac{800 \text{ В}}{168,97 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}} = 4,74 \cdot 10^3 \text{ А}. \quad (8.27)$$

Линейная плотность тока в индукторе

$$J = \frac{I \cdot w}{h_{\text{и}}} = \frac{4,74 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot 12}{0,38 \text{ м}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ А/м}. \quad (8.28)$$

Отличие  $J$  от  $J_0$

$$\Delta J = \frac{1,31 \cdot 10^5 - 1,5 \cdot 10^5}{1,5 \cdot 10^5} \cdot 100 \% = -12,67 \%. \quad (8.29)$$

Полученное значение  $J$  отличается от принятого  $J_0$  более, чем на 10 %. Уточняем электрический расчёт.

$$\begin{aligned}
r'_p &= 535,93 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}; & r''_p &= 265,17 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}; \\
r_p &= 177,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}; & X_p &= 177,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}; \\
X'_2 &= 5,47 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; & X''_2 &= 2,19 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \\
X_2 &= 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; & C &= 0,388; \\
r'_3 &= 99,21 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}; & r_3 &= 128,31 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}; \\
X_3 &= 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; & Z &= 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \\
\eta_3 &= 0,536; & \cos \varphi &= 0,109; \\
P_{\text{и}} &= 240,4 \cdot 10^3 \text{ Вт}; & w &= 12; \\
Z_c &= 169,59 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; & I &= 4,71 \cdot 10^3 \text{ А}; \\
J &= 1,49 \cdot 10^5 \text{ А/м}; & \Delta J &= -0,37 \%.
\end{aligned}$$

Полученное значение  $J$  отличается от принятого  $J_0$  не более, чем на 10 %.

Электрические потери в индукторе

$$P_{\text{э.и.}} = I^2 \cdot r_{\text{и}} \cdot w^2 = (4,71 \cdot 10^3)^2 \text{ А}^2 \cdot 29,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot 12^2 = 93,25 \cdot 10^3 \text{ Вт}. \quad (8.30)$$

Электрические потери в «холодном» тигле

$$P_{\text{э.х.т.}} = P_{\text{и}}(1 - \eta_3) - P_{\text{э.и.}} = 240,4 \cdot 10^3 \text{ Вт}(1 - 0,536) - 93,25 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 18,35 \cdot 10^3 \text{ Вт}. \quad (8.31)$$

Электрические потери в токопроводе

$$P_{\text{т.под.}} = (0,05 \div 0,15) \cdot P_{\text{и}} = 0,15 \cdot 240,4 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 36,06 \cdot 10^3 \text{ Вт}. \quad (8.32)$$

Электрические потери в конденсаторной батарее

$$P_{\text{к.б.}} = (0,03 \div 0,05) \cdot P_{\text{и}} = 0,05 \cdot 240,4 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 12,02 \cdot 10^3 \text{ Вт}. \quad (8.33)$$

Полная мощность индуктора

$$S_{\text{п.и.}} = U_{\text{и}} \cdot I = 800 \text{ В} \cdot 4,71 \cdot 10^3 \text{ А} = 3,773 \cdot 10^6 \text{ ВА}. \quad (8.34)$$

Реактивная мощность конденсаторной батареи

$$Q = \sqrt{S_{\text{п.и.}}^2 - P_{\text{и}}^2} = \sqrt{(3,773 \cdot 10^6)^2 \text{ ВА}^2 - (240,4 \cdot 10^3)^2 \text{ Вт}^2} = 3,767 \cdot 10^6 \text{ В} \cdot \text{Ар}. \quad (8.35)$$

Мощность потерь

$$\begin{aligned}
P_{\text{п.}} &= P_{\text{э.и.}} + P_{\text{э.х.т.}} + P_{\text{т.под.}} + P_{\text{к.б.}} = (93,25 + 18,35 + 36,06 + 12,02) \cdot 10^3 \text{ Вт} = \\
&= 159,68 \cdot 10^3 \text{ Вт}
\end{aligned} \quad (8.36)$$

Мощность источника питания по расчёту

$$P_{\text{ист.}} = P_{\text{п.}} + P_{\text{и}} = (159,68 + 240,4) \cdot 10^3 \text{ Вт} = 400 \cdot 10^3 \text{ Вт}. \quad (8.37)$$

## 9. Установка для обработки металлических расплавов импульсным током.

В инженерной практике используют импульсные источники тока для проведения восстановительных процессов металлов в плазме разряда постоянного тока, создания электрогидравлических ударов для очистки поверхности отливок в воде, измельчения структуры кристаллизующегося расплава и др.[11]

Задача: рассчитать электрические параметры (выбрать основные элементы силовой цепи) установки, которые обеспечивают выходное напряжение 5 кВ, номинальную запасаемую энергию 125 Дж, номинальную выходную частоту 2 Гц, амплитудное значение высоковольтного импульса тока 10 кА при длительности первого полупериода несколько микросекунд для измельчения структуры кристаллизующейся отливки из алюминиевого сплава (рис.9.1).

От источника импульсных токов 3 один потенциал подводят через специальное устройство 2 в керамической форме 4 к кристаллизующемуся сплаву 5. В жидкую ванну 6 с помощью электрода 1 подсоединяют второй потенциал от источника 3. Подают импульсы тока, создавая магнитогидродинамическую силу, которая измельчает растущие кристаллы в двухфазной области.

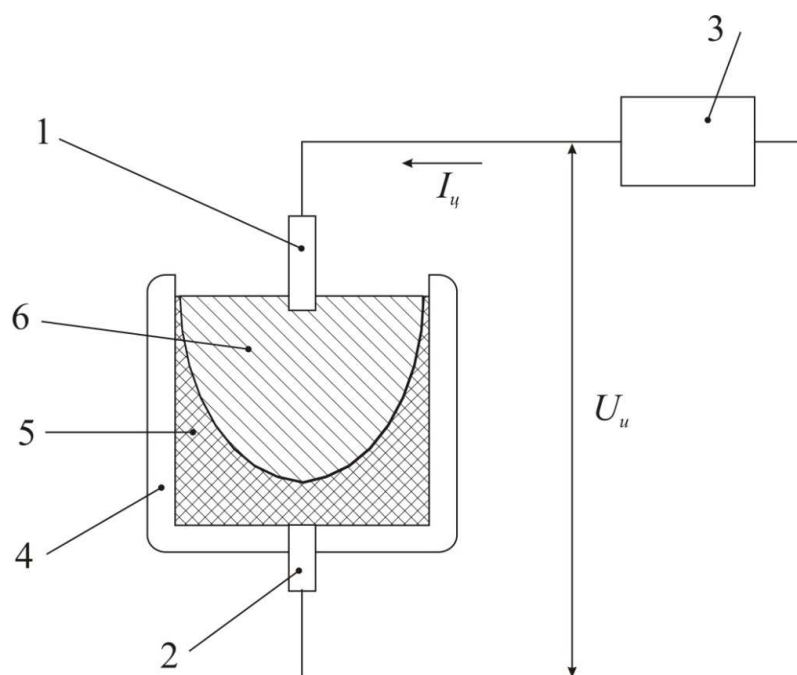


Рисунок 9.1. Схема установки для измельчения структуры кристаллизующейся отливки.

В основу работы источника импульсных токов положен принцип коммутации энергии емкостного накопителя (рис.9.2), построенного на схеме умножения напряжения (конденсаторы  $C3, C4, C5$ ; диоды  $VD3, VD5$ ). При подаче напряжения питания  $U_c$  включением выключателя  $SQ1$  и кнопкой  $SB1$  срабатывает реле  $P$  и контакты  $K1$  замыкаются. Напряжение сети через пакетный выключатель  $Q$  подается на первичную обмотку трансформатора  $Tr1$ , вторичное напряжение которого  $U_2$  может задаваться и составлять  $3,4 \div 3,8$  кВ. Умножитель напряжения повышает его до 5 кВ, при котором запускается управляемый разрядник  $P_p$ . Энергия, запасенная в конденсаторах  $C4$  и  $C5$ , передается через разрядник в нагрузку  $R_n$  (кристаллизирующаяся отливка).

Запуск разрядника осуществляют от блока поджига (конденсаторы  $C1, C2, C6$ ; диоды  $VD1, VD2$ ; тиристор  $VS4$ ; резисторы  $R1, R3$ ; трансформатор  $Tr2$ ) импульсом напряжения положительной полярности. На схеме запуск тиристора  $VS4$  не показан. Контроль питающего напряжения осуществляют вольтметром  $V$ ; наличие и относительное значение разрядного тока конденсаторов  $C4$  и  $C5$  – микроамперметром  $\mu$ . Перегрузки по напряжению и току снимаются предохранителями  $FQ1$  и  $FQ2$ . Защита вентилях  $VD3$  и  $VD5$  от чрезмерных обратных высоковольтных токов обеспечивается дросселем  $L2$ . В качестве блокирующих устройств для снятия остаточного напряжения с высоковольтных конденсаторов применены шунтирующие резисторы  $R1, R2, R3, R5, R6$ . Регулирование частоты следования импульсов осуществляют переключением пакетного переключателя  $Q$  и заданием частоты включения тиристора  $VS4$ . Дозирование энергии задается моментом включения разрядника. Отключение источника импульсных токов выполняют нажатием кнопки  $SB2$ .

При расчете источника важно определить емкость первого плеча умножителя  $C3$  и ее соотношение с выходной емкостью  $C_k$  ( $C4, C5$ ), которую мы принимаем за емкостной накопитель.

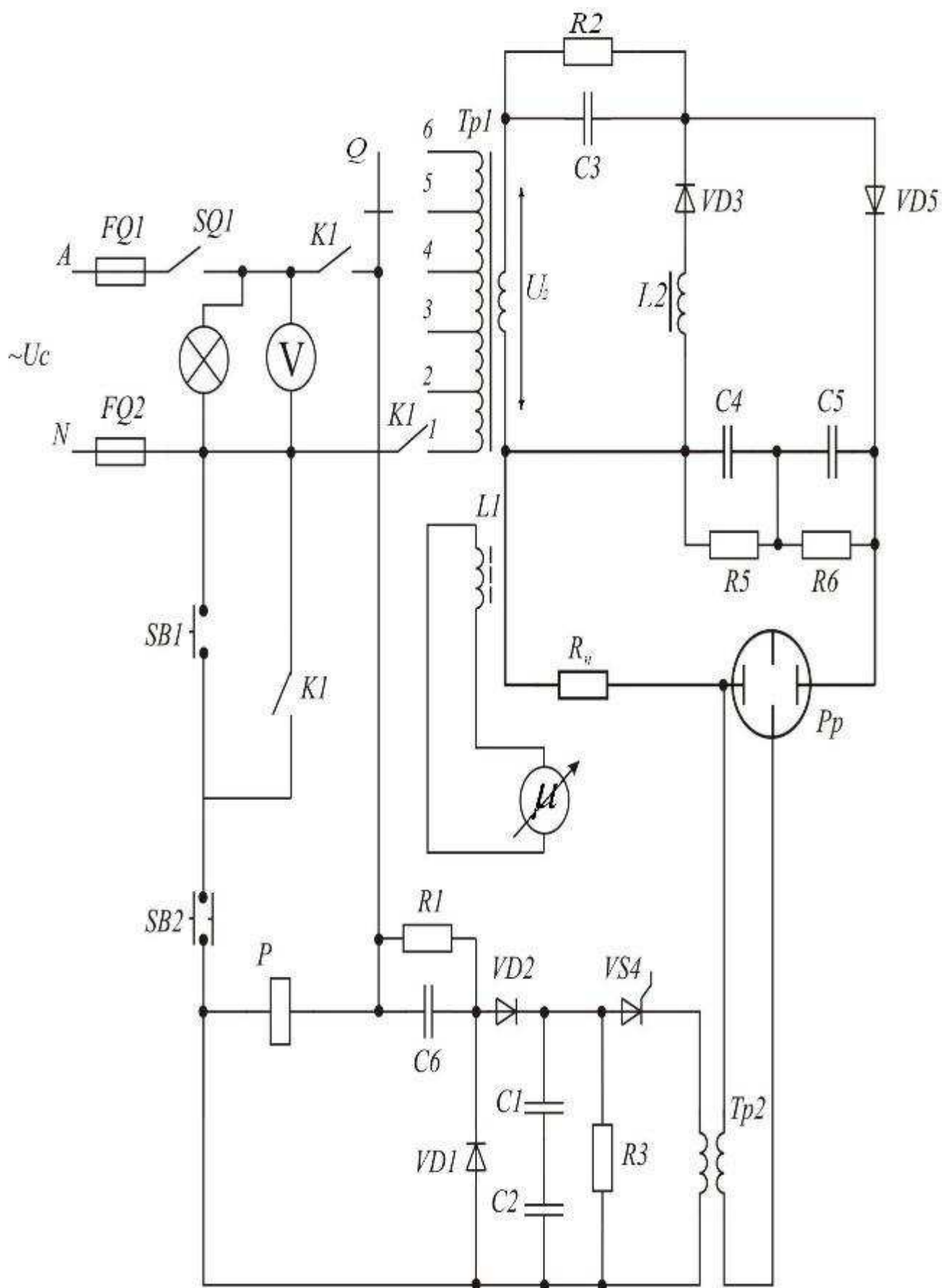


Рисунок 9.2. Схема электрическая принципиальная источника импульсных токов.

Выходная емкость умножителя напряжения

$$C_k = \frac{I_p^2 \cdot L_{p.k.}}{U_k^2} = \frac{100 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}}{25 \cdot 10^6 \text{ В}} = 8,0 \text{ мкФ} . \quad (9.1)$$

где:  $I_p = 10 \text{ кА}$  – разрядный импульсный ток;

$L_{k.p.} = 2 \text{ мкГн}$  – полная индуктивность разрядного контура;

$U_k$  – напряжение конденсатора,  $C_k = 5 \text{ кВ}$  .

Выбираем конденсатор К75-40а-5 кВ-20,0 мкФ и включаем в схему два последовательно соединенных конденсатора С4 и С5. Составленный таким образом емкостной накопитель энергии имеет емкость 10 мкФ .

Энергия, запасаемая конденсаторной батареей

$$W_k = 0,5 \cdot C_k \cdot U_k^2 = 0,5 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 25 \cdot 10^6 \text{ В} = 125 \text{ Дж} . \quad (9.2)$$

Полезная мощность источника питания

$$P_{\Pi} = W_k \cdot f_{\text{сл}} = 125 \text{ Дж} \cdot 2 \text{ Гц} = 250 \text{ Вт}, \quad (9.3)$$

где:  $f_{\text{сл}} = 2 \text{ Гц}$  – частота следования импульсов.

Зарядный ток емкостного накопителя энергии

$$I_z = C_k \cdot U_k \cdot f_{\text{сл}} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot 2 \text{ Гц} = 0,028 \text{ А}. \quad (9.4)$$

Напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = 0,7 \cdot U_k = 0,7 \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ В} = 3,5 \text{ кВ}. \quad (9.5)$$

Емкость первого плеча умножителя напряжения, обеспечивающая требуемую периодичность заряда основного накопителя энергии  $C_k$ , составит  $\sim (0,05 \div 0,08) \text{ мкФ}$ , т.к.

используется экспериментально установленное соотношение  $\frac{C_k}{C_3} = 100 \div 150$ .

## 10. Асинхронный трёхфазный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Асинхронный трёхфазный двигатель применяют в нерегулируемом и регулируемом приводе механизмов металлургических установок. Исследование работы асинхронного двигателя при вращающемся роторе может быть сведено к исследованию эквивалентного трансформатора, работающего на идеально активную нагрузку [1, 12, 13]. Поэтому схема замещения асинхронной машины с эквивалентным неподвижным ротором принципиально не отличается от схемы замещения трансформатора (рис. 10.1).

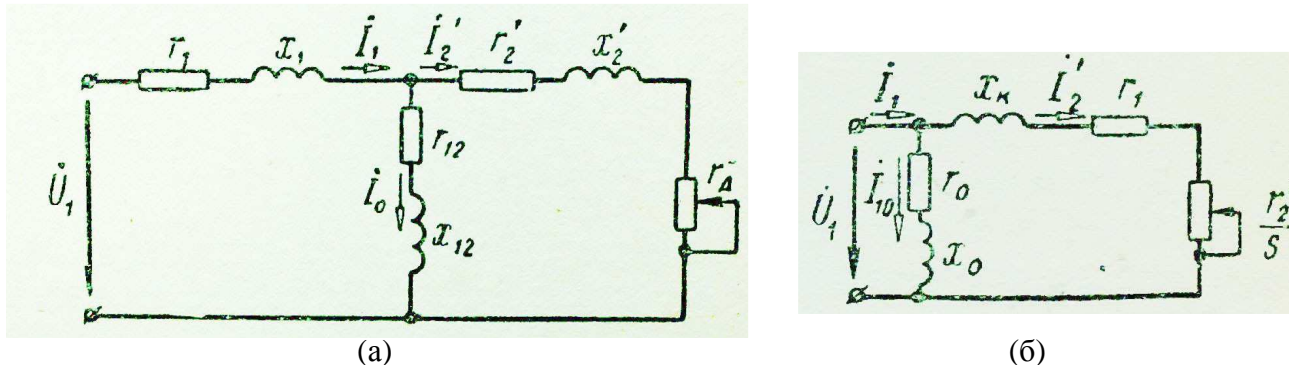


Рисунок 10.1 Схема замещения асинхронной машины.

Ветвь тока статора  $I_1$  содержит активное сопротивление статорной обмотки  $r_1$  и индуктивное сопротивление  $x_1$ , обусловленное наличием поля рассеяния статора. Активное сопротивление  $r_{12}$  в ветви намагничивания (ток  $I_0$ ) характеризует магнитные потери двигателя, а индуктивное сопротивление  $x_{12}$  этой ветви – реактивную мощность, определяемую основным вращающимся полем машины. Ветвь приведенного тока ротора  $I_2'$  состоит из активных сопротивлений  $r_2'$  (приведенное сопротивление ротора к обмотке статора) и  $r_2' \cdot \frac{1-S}{S}$  (имитирует нагрузку двигателя), а также индуктивного сопротивления  $x_2'$  (характеризует поле рассеяния ротора).

Данная Т-образная схема является довольно сложной, поэтому удобнее использовать Г-образную схему (б), в которой допускается, что ток  $I_0$  не зависит от нагрузки.

Задача: рассчитать параметры асинхронного двигателя с к.з. ротором мощностью  $P_n = 1$  кВт, если напряжение обмотки фазы статора составляет  $U_{\phi 1} = 220$  В, число пар полюсов  $p = 1$ , магнитная индукция в зазоре  $B_{\text{дн}} = 0,65$  Тл.

Полная расчетная мощность

$$S_p = \frac{P_n \cdot K_\Sigma}{\eta_n \cdot \cos \varphi_{n1}} = \frac{1 \text{ кВт} \cdot 0,95}{0,78 \cdot 0,81} = 1,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}, \quad (10.1)$$

где:  $K_\Sigma = 0,95$  – коэффициент, задаваемый в соответствии с предварительно намеченным коэффициентом насыщения зубцового слоя  $K_2$  магнитопровода статора;

$\eta_n = 0,78$  – номинальный к.п.д. двигателя;

$\cos \varphi_{n1} = 0,81$  – номинальный коэффициент мощности.

Расчетная мощность, приходящаяся на один полюс

$$S' = \frac{S_p}{2 \cdot p} = \frac{1,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}}{2 \cdot 1} = 0,75 \text{ кВ} \cdot \text{А}, \quad (10.2)$$

По таблице 16.24 из [12] при такой индукции линейная нагрузка  $A = 1,3$  А/м.

Машинная постоянная

$$C_A = \frac{2}{\pi \cdot a_6 \cdot K_b \cdot K_{w1} \cdot B_{\text{дн}} \cdot A} = \frac{2}{3,14 \cdot 0,715 \cdot 1,09 \cdot 0,92 \cdot 0,65 \text{ Тл} \cdot 1,3 \text{ А/м}} = 5,52, \quad (10.3)$$

где: коэффициенты  $a_6 = 0,715$ ,  $K_b = 1,09$ ,  $K_{w1} = 0,32$  для выбранного типа обмотки (двухслойной).

Внутренний диаметр сердечника статора

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot f_1 \cdot C_A \cdot S_p}{\omega_1^2 \cdot \lambda}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 50 \text{ Гц} \cdot 5,52 \cdot 1,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}}{(314 \frac{\text{рад}}{\text{с}})^2 \cdot 0,7}} = 0,29 \text{ м}, \quad (10.4)$$

где:  $\lambda = 0,7$  ( $\lambda = l_6 / \tau$  – полюсное деление);

$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – угловая скорость магнитного поля относительно ротора.

Расчетная длина сердечника статора

$$l_6 = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \cdot \lambda = \frac{3,14 \cdot 0,29 \text{ м}}{2 \cdot 1} \cdot 0,7 = 0,3 \text{ м.} \quad (10.5)$$

Максимальный ток на полюс-фазу

$$I_m = \frac{B_{6н} \cdot 2 \cdot \delta}{\mu_0} = \frac{0,65 \text{ Тл} \cdot 2 \cdot 0,005 \text{ м}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}} = 5 \text{ А,} \quad (10.6)$$

где:  $\delta = \frac{l_6 - D}{2} = \frac{0,3 \text{ м} - 0,29 \text{ м}}{2} = 0,005 \text{ м}$  – зазор между наружной поверхностью ротора и

внутренней поверхностью статора;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная.

Проверим значение тока фазы при фазном сетевом напряжении  $U_{\phi 1} = 220 \text{ В}$

$$I_n = \frac{S'}{U_{\phi 1}} = \frac{750 \text{ В} \cdot \text{А}}{220 \text{ В}} = 3,41 \text{ А.} \quad (10.7)$$

Тогда  $I_m = 3,41 \text{ А} \cdot \sqrt{2} = 4,8 \text{ А}$ . Значения практически совпали.

Напряженность поля в зазоре

$$H_6 = \frac{I_m}{2 \cdot \delta} = \frac{5 \text{ А}}{0,01 \text{ м}} = 500 \text{ А/м.} \quad (10.8)$$

В то же время  $H_6 = I_m \cdot w$ . Тогда число витков катушки на полюс-фазу

$$w = \frac{H_6}{I_m} = \frac{500 \text{ А/м}}{5 \text{ А}} = 100 \text{ витков.} \quad (10.9)$$

Магнитный поток полюса

$$\Phi_n = \frac{K}{\pi} \cdot \frac{w \cdot I_m}{R_3} = \frac{2}{3,14} \cdot \frac{100 \text{ витков} \cdot 5 \text{ А}}{56 \text{ Гн}^{-1}} = 5,6 \text{ Вб,} \quad (10.10)$$

где:  $K = 2$ ;

$$R_3 = \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_6} = \frac{2 \cdot 0,005 \text{ м}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,46 \text{ м} \cdot 0,3 \text{ м}} = 56 \text{ Гн}^{-1} \text{ – магнитное сопротивление потоку в}$$

зазоре ( $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 0,29 \text{ м}}{2 \cdot 1} = 0,46 \text{ м}$  – полюсное деление).

Синус угла  $\varphi$  тока холостого хода

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = \sqrt{1 - 0,118^2} = 0,99, \quad (10.11)$$

где:  $\sin \varphi_0 = 0,118$  - коэффициент мощности холостого хода (заданная величина).

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{0a} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 1 \text{ A} \cdot 0,118 = 0,118 \text{ A}, \quad (10.12)$$

где:  $I_0 = 1 \text{ A}$  - ток холостого хода (заданная величина).

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{0p} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 1 \text{ A} \cdot 0,99 = 0,99 \text{ A}. \quad (10.13)$$

Кратность реактивной составляющей тока холостого хода в долях номинального тока статора

$$K_{\text{нор}} = \frac{I_{0p}}{I_{1н}} = \frac{0,99}{3,14 \text{ A}} = 0,29. \quad (10.14)$$

Синус угла  $\varphi$  тока статора при номинальной нагрузке

$$\sin \varphi_{1н} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1н}} = \sqrt{1 - 0,81^2} = 0,58. \quad (10.15)$$

Активная составляющая номинального тока статора

$$I_{1на} = I_{1н} \cdot \cos \varphi_{1н} = 3,14 \text{ A} \cdot 0,81 = 2,76 \text{ A}. \quad (10.16)$$

Реактивная составляющая номинального тока статора

$$I_{1нр} = I_{1н} \cdot \sin \varphi_{1н} = 3,14 \text{ A} \cdot 0,58 = 1,98 \text{ A}. \quad (10.17)$$

Активная составляющая приведенного номинального тока ротора

$$I'_{2на} = I_{1на} - I_{0на} = 2,76 \text{ A} - 0,118 \text{ A} = 2,64 \text{ A}. \quad (10.18)$$

Реактивная составляющая приведенного номинального тока ротора

$$I'_{2нр} = I_{1нр} - I_{0нр} = 1,98 \text{ A} - 0,99 \text{ A} = 0,99 \text{ A}. \quad (10.19)$$

Приведенный номинальный ток ротора

$$I'_{2н} = \sqrt{(I'_{2на})^2 + (I'_{2нр})^2} = \sqrt{(2,64 \text{ A})^2 + (0,99 \text{ A})^2} = 2,82 \text{ A}. \quad (10.20)$$

Частота вращения магнитных полей статора

$$\eta_{1н} = \frac{3000}{\varepsilon \cdot \left( \frac{3000}{\eta_{2н}} \right)} = \frac{3000}{0,97 \cdot \left( \frac{3000}{975 \text{ об/мин}} \right)} = 1000 \text{ об/мин}, \quad (10.21)$$

где:  $\eta_{2н} = 975 \text{ об/мин}$  - частота вращения ротора (заданная величина);

$\varepsilon = 0,97$  - коэффициент скорости (заданная величина).

Скольжение при номинальной нагрузке

$$S = 1 - \frac{\eta_{2н}}{\eta_{1н}} = 1 - \frac{975 \text{ об/мин}}{1000 \text{ об/мин}} = 0,025. \quad (10.22)$$

Полезный момент двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{2н} = \frac{P_{н}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{2н}} = \frac{1000 \text{ Вт}}{2 \cdot 3,14 \cdot 975 \text{ об/мин}} = 0,999 \text{ кг} \cdot \text{м}. \quad (10.23)$$

Присоединенная мощность

$$P_{н} = \frac{P_{н}}{\eta_{н}} = \frac{1 \text{ кВт}}{0,78} = 1,28 \text{ кВт}. \quad (10.24)$$

Механические потери, равные  $0,7 \% P_{н}$

$$P_{мх} = 0,007 \cdot P_{н} = 0,007 \cdot 1,28 \text{ кВт} = 0,009 \text{ кВт}. \quad (10.25)$$

Добавочные потери, равные  $0,5 \% P_{н}$

$$P_{дп} = 0,005 \cdot P_{н} = 0,005 \cdot 1,28 \text{ кВт} = 0,006 \text{ кВт}. \quad (10.26)$$

Полная номинальная механическая мощность

$$P_{мхн} = P_{н} + P_{мх} + P_{дп} = 1,28 \text{ кВт} + 0,009 \text{ кВт} + 0,006 \text{ кВт} = 1,295 \text{ кВт}. \quad (10.27)$$

Номинальный электромагнитный момент

$$M_{эм.н} = \frac{P_{мхн}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{2н}} = \frac{1295 \text{ Вт}}{2 \cdot 3,14 \cdot 975 \text{ об/мин}} = 1,29 \text{ кг} \cdot \text{м}. \quad (10.28)$$

Электромагнитная мощность при номинальной нагрузке

$$P_{эм.н} = \frac{P_{мхн}}{1 - S_{н}} = \frac{1,295 \text{ кВт}}{1 - 0,025} = 1,328 \text{ кВт}. \quad (10.29)$$

Потери мощности во вторичной цепи (роторе) при номинальной загрузке

$$P_{2\text{МН}} = P_{\text{ЭМ.Н}} - P_{\text{МХН}} = 1,328 \text{ кВт} - 1,295 \text{ кВт} = 0,033 \text{ кВт} . \quad (10.30)$$

Активное сопротивление вторичной цепи (ротора)

$$r'_2 = \frac{P_{2\text{МН}}}{m_1 \cdot (I'_{2\text{Н}})^2} = \frac{33 \text{ Вт}}{3 \cdot (2,82 \text{ А})^2} = 1,38 \text{ Ом} , \quad (10.31)$$

где:  $m_1$  - число фаз.

Индуктивное сопротивление вторичной цепи

$$X'_2 = \sqrt{\frac{(r'_2 \cdot I'_2)^2}{(I'_{2\text{на}})^2} - (r'_2)^2} = \sqrt{\frac{(1,38 \text{ Ом} \cdot 2,82 \text{ А})^2}{(2,64 \text{ А})^2} - (1,38 \text{ Ом})^2} = 0,52 \text{ Ом} . \quad (10.32)$$

Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = K_p \cdot \rho_t \cdot \frac{l}{S \cdot A} = 1,03 \cdot 2,24 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \frac{220 \text{ м}}{78,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot 4} = 18 \text{ Ом} , \quad (10.33)$$

где:  $l = 2 \cdot w \cdot l_{\text{cp}} = 2 \cdot 100 \text{ витков} \cdot 1,1 \text{ м} = 220 \text{ м}$  - длина последовательно включенных проводников фазы;

$l_6 = 0,3 \text{ м}$  - длина сердечника;

$l_{\text{л}} = 1,8 \cdot \tau = 1,8 \cdot 0,46 \text{ м} = 0,8 \text{ м}$  - длина лобовой части;

$K_p = 1,03 \div 1,05$  - коэффициент увеличения сопротивления обмотки вследствие поверхностного эффекта;

$S = 78,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  - сечение эффективного проводника;

$A = 4$  - число параллельных ветвей;

$$\rho_t = \rho_{20} \cdot \left[ 1 + a \cdot (t - 20^\circ \text{C}) \right] = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \left[ 1 + 0,004 \frac{1}{^\circ \text{C}} \cdot (50^\circ \text{C} - 20^\circ \text{C}) \right] = 2,24 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} -$$

удельное сопротивление проводника при температуре  $50^\circ \text{C}$  ;

$a = 0,004 \frac{1}{^\circ \text{C}}$  - температурный коэффициент сопротивления;

$\rho_{20} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  - удельное сопротивление меди.

Полное сопротивление фазы-полюса

$$z_1 = \frac{U_{\phi 1}}{I_m} = \frac{220 \text{ В}}{5 \text{ А}} = 44 \text{ Ом} . \quad (10.34)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$X_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2} = \sqrt{(440 \text{ м})^2 - (180 \text{ м})^2} = 40 \text{ Ом} . \quad (10.35)$$

## 11. Установка с вращающимся полем для очистки стружки от масла.

Для очистки стружки от масла, а также разделения многокомпонентных порошкообразных материалов, эффективным и экономически выгодным является способ, в котором используется энергия вращающегося электромагнитного поля. В такой установке (рис. 11.1) в стальной реактор 2 помещают обрабатываемый материал с необходимыми добавками (например, вода и иголки), включают трехфазный статор 3 и в течение десятков секунд проводят процесс отделения масла от стружки в воду. Водоохлаждаемый статор герметично закрывают стальным кожухом 1.

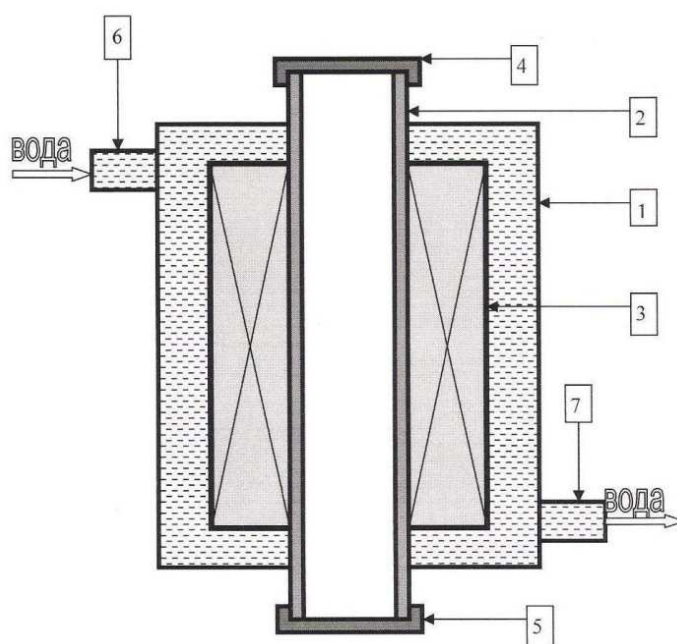


Рисунок 11.1 Конструктивная схема установки ABC: 1- стальной корпус, 2-труба, 3-индуктор, 4 и 5-крышки, 6 и 7-патрубки.

Задача: рассчитать электрические параметры установки мощностью  $11\text{кВ} \cdot \text{А}$  для очистки стружки латуни от масла.

В отличие от асинхронного двигателя такие установки не имеют ротора в классическом понимании (он имитируется рабочими телами, например стальными иголками), а также характеризуются низким коэффициентом мощности. Наибольшей опасностью для установки является постоянная перегрузка статора по току. Методика расчета таких систем, когда индукционный вращатель потребляет в основном реактивный

ток и полное сопротивление равно индуктивному, приведена в работе [14]. Однако при введении в реактор стальных иголок это допущение очень приближенное, поэтому расчёт будем вести по аналогии с расчётом асинхронного двигателя.

Наибольший вращающий момент, как установлено практикой, у двухполюсного статора, т.е.  $p = 1$ . Из опытных данных принимаем ток фазы  $I_{\phi 1} = 48 \text{ А}$ , фазное напряжение  $U_{\phi 1} = 78 \text{ В}$ , коэффициент мощности системы  $\cos \varphi_n = 0,38$ .

Полная мощность фазы

$$S_{\phi 1} = U_{\phi 1} \cdot I_{\phi 1} = 78 \text{ В} \cdot 48 \text{ А} = 3,744 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (11.1)$$

Активная мощность фазы

$$P_n = \frac{S_{\phi 1} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n}{K_E} = \frac{3,744 \text{ кВ} \cdot \text{А} \cdot 0,78 \cdot 0,3}{0,95} = 0,92 \text{ кВт}, \quad (11.2)$$

где:  $\eta_n = 0,78$  – номинальный к.п.д.;

$K_E = 0,95$  – коэффициент, зависящий от конструкции магнитопровода.

Полная мощность статора

$$S_{\text{лст}} = S_{\phi 1} \cdot 3 = 3,744 \text{ кВ} \cdot \text{А} \cdot 3 = 11,232 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (11.3)$$

Активная мощность статора

$$P_l = P_n \cdot 3 = 0,92 \text{ кВт} \cdot 3 = 2,76 \text{ кВт}. \quad (11.4)$$

Расчетная полная мощность, приходящаяся на один полюс-фазу

$$S_p = \frac{S_{\phi 1}}{2 \cdot p} = \frac{3,744 \text{ кВ} \cdot \text{А}}{2 \cdot 1} = 1,872 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (11.5)$$

Индукция, создаваемая статором в воздушном зазоре

$$B_3 = \frac{I_{\phi 1} \cdot \mu_0}{2 \cdot \delta} = \frac{48 \text{ А} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}}{2 \cdot 0,046 \text{ м}} = 0,65 \text{ Тл}, \quad (11.6)$$

где:  $\mu_0 = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная;

$\delta_1 = 0,092$  м – воздушный зазор между внутренними поверхностями сердечника, а

$$\delta = \frac{\delta_1}{2} = \frac{0,092 \text{ м}}{2} = 0,046 \text{ м}.$$

Напряженность поля в зазоре

$$H_d = \frac{I_m}{2 \cdot \delta} = \frac{48 \text{ А} \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 0,046 \text{ м}} = 787 \text{ А/м}. \quad (11.7)$$

В тоже время  $H_d = I_m \cdot w$ . Тогда число витков катушки на полюс-фазу

$$w = \frac{H_d}{I_m} = \frac{787 \text{ А/м}}{67,7 \text{ А}} = 11,6 \text{ витков}.$$

Принимаем  $w = 12$  витков.

Максимальный поток полюса

$$\Phi_n = \frac{K}{\pi} \cdot \frac{w \cdot I_m}{R_3} = \frac{2}{3,14} \cdot \frac{12 \text{ витков} \cdot 67,7 \text{ А}}{80 \text{ Ом}} = 6,5 \text{ Вб}, \quad (11.8)$$

где:  $K = 2$ ;

$R_3$  - магнитное сопротивление потоку в зазоре

$$R_3 = \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_6} = \frac{2 \cdot \delta}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,14 \text{ м} \cdot 0,6 \text{ м}} = 80 \text{ Ом};$$

$l_6$  – расчетная длина сердечника статора

$$l_6 = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \cdot \lambda = \frac{3,14 \cdot 0,092 \text{ м}}{2 \cdot 1} \cdot 4,3 = 0,6 \text{ м};$$

$$\lambda = \frac{l_6}{\tau} = \frac{0,6 \text{ м}}{0,14 \text{ м}} = 4,28;$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 0,092 \text{ м}}{2 \cdot 1} = 0,14 \text{ м} - \text{полюсное деление}.$$

Синус угла  $\varphi_0$  тока холостого хода

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = \sqrt{1 - 0,3^2} = 0,91, \quad (11.9)$$

где:  $\cos \varphi_0 = 0,3$  - коэффициент мощности холостого хода.

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{0a} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 48 \text{ A} \cdot 0,3 = 14,4 \text{ A} , \quad (11.10)$$

где:  $I_0 = 48 \text{ A}$  - ток холостого хода (эмпирическая величина).

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{0p} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 48 \text{ A} \cdot 0,91 = 43,68 \text{ A} . \quad (11.11)$$

Синус угла  $\varphi_n$  тока статора при номинальной нагрузке

$$\sin \varphi_n = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} = \sqrt{1 - 0,38^2} = 0,92 . \quad (11.12)$$

Активная составляющая номинального тока статора

$$I_{1на} = I_{1н} \cdot \cos \varphi_n = 48 \text{ A} \cdot 0,38 = 18,24 \text{ A} . \quad (11.13)$$

Реактивная составляющая номинального тока статора

$$I_{1np} = I_{1н} \cdot \sin \varphi_n = 48 \text{ A} \cdot 0,92 = 44,16 \text{ A} . \quad (11.14)$$

Активная составляющая приведенного номинального тока ротора

$$I'_{2н} = I_{1ан} - I_{0а} = 18,24 \text{ A} - 14,4 \text{ A} = 3,84 \text{ A} . \quad (11.15)$$

Реактивная составляющая приведенного номинального тока ротора

$$I'_{2np} = I_{1np} - I_{0np} = 44,16 \text{ A} - 43,68 \text{ A} = 0,48 \text{ A} . \quad (11.16)$$

Приведенный номинальный ток ротора

$$I'_{2н} = \sqrt{(I'_{2на})^2 + (I'_{2np})^2} = \sqrt{(3,84 \text{ A})^2 + (0,48 \text{ A})^2} = 3,87 \text{ A} . \quad (11.17)$$

Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$\tau_1 = k_r \cdot \rho \cdot \frac{l}{s \cdot A} = 1,05 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \frac{20,5 \text{ м}}{3,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot 10} = 0,12 \text{ Ом} , \quad (11.18)$$

где:  $l = 2 \cdot w \cdot l_{cp} = 2 \cdot 12 \text{ витков} \cdot 0,85 \text{ м} = 20,5 \text{ м}$  - длина последовательно включенных проводников фазы;

$l_{cp} = l_{\phi} + l_{л} = 0,6 \text{ м} + 0,25 \text{ м} = 0,85 \text{ м}$  - средняя длина полувитка;

$l_{л} = 1,8 \cdot \tau = 1,8 \cdot 0,14 \text{ м} = 0,252 \text{ м}$  - длина лобовой части;

$k_r = 1,03 \div 1,05$  - коэффициент увеличения сопротивления обмотки вследствие поверхностного эффекта;

$s = 340 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  - сечение эффективного проводника;

$A = 10$  - число параллельных ветвей;

$\rho = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  - удельное электросопротивление меди;

$\alpha = 0,004 \frac{1}{^\circ\text{C}}$  - температурный коэффициент сопротивления.

Допустимая плотность тока для водоохлаждаемой медной трубки  $J = 8,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ .

Тогда расчетное минимальное допустимое сечение трубки

$$S_{\text{тр}} = \frac{I_{\text{л}}}{J} = \frac{48 \text{ А}}{8,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2} = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (11.19)$$

Фактическое сечение выбранной трубки  $340 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  много больше допустимого.

Полное сопротивление фазы – полюса

$$z_1 = \frac{U_{\phi 1}}{I_{\text{н}}} = \frac{78 \text{ В}}{48 \text{ А}} = 1,6 \text{ Ом}. \quad (11.20)$$

Индуктивное сопротивление фазы

$$x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2} = \sqrt{(1,6 \text{ Ом})^2 - (0,12 \text{ Ом})^2} = 1,59 \text{ Ом}. \quad (11.21)$$

## 12. Кольцевой статор для перемешивания жидкого чугуна в ковше.

В этом случае статор 3 выполняют так, что он охватывает стенки 2 ковша по окружности и на определенную высоту (рис.12.1). Кожух ковша изготавливают из немагнитной стали. Главная задача статора – усреднить ванну жидкого металла 1 по химическому составу и температуре в процессе выполнения технологических операций, например десульфурации чугуна, выпущенного из вагранки. Металл подогревают энергией дуг, горящих с электродов 5 в крышке 6. Ковш перемещают на тележке 4.

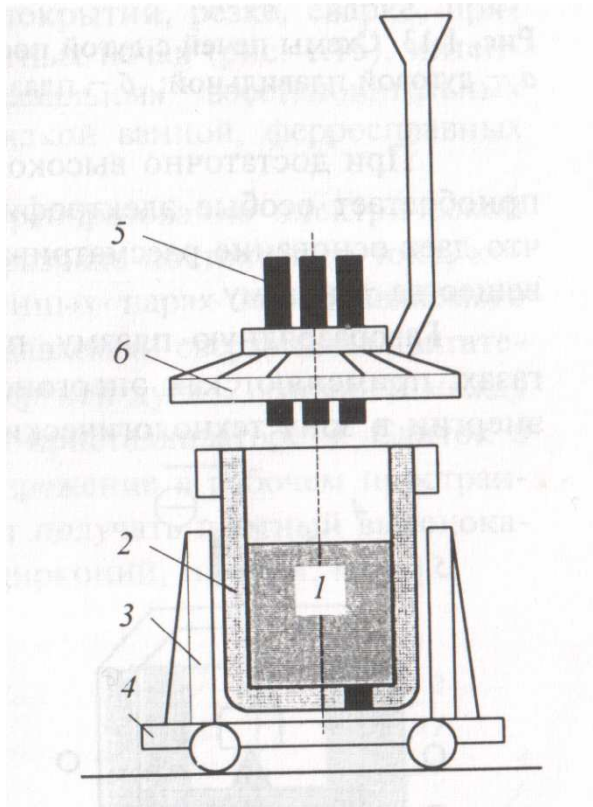


Рисунок 12.1 Схема установки печь-ковш.

Задача: рассчитать [9] параметры статора электромагнитного перемешивания жидкого чугуна в ковше вместимостью 10 т .

Средний диаметр объема жидкого металла в ковше  $D_{м.ср.} = 1,21$  м ; высота жидкого металла  $h_m = 1,2$  м .

Внутренний диаметр статора

$$D_c = 1,28 \cdot D_{м.ср.} = 1,28 \cdot 1,21 \text{ м} = 1,55 \text{ м} .$$

Принимаем из опыта  $h_c / D_c = 0,85$ , тогда

$$h_c = 0,85 \cdot 1,55 \text{ м} = 1,313 \text{ м},$$

где:  $h_c$  – высота статора.

$$\text{Отношение } \frac{h_c}{h_m} = \frac{1,313 \text{ м}}{1,2 \text{ м}} = 1,094, \text{ т.е. больше } 1.$$

Частота тока в обмотках статора

$$f = 2 \cdot \rho_m \cdot \left[ D_{\text{м.ср.}} \cdot \frac{\sqrt{2}-1}{500} \right]^{-2} = 2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \left[ 1,21 \text{ м} \cdot \frac{\sqrt{2}-1}{500} \right]^{-2} = 2 \text{ Гц.} \quad (12.1)$$

Принимаем электрическую схему включения статора ЭМП по варианту рис.12.2, - три секции (1,2,3) с соотношением числа витков  $N_1 : N_2 : N_3 = 3 : 5 : 3$ . Для создания одноконтурной циркуляции жидкого металла в тигле секции 1 и 3 включаем встречно, сдвигая магнитные потоки во времени на  $180^\circ$  с целью создания бегущего магнитного поля. Выбираем высоту сечения трубки  $D$  – образного профиля  $b = 26 \text{ мм}$ , зазор между секциями  $c = 40 \text{ мм}$ , электроизоляционный зазор между витками  $a = 1,5 \text{ мм}$ .

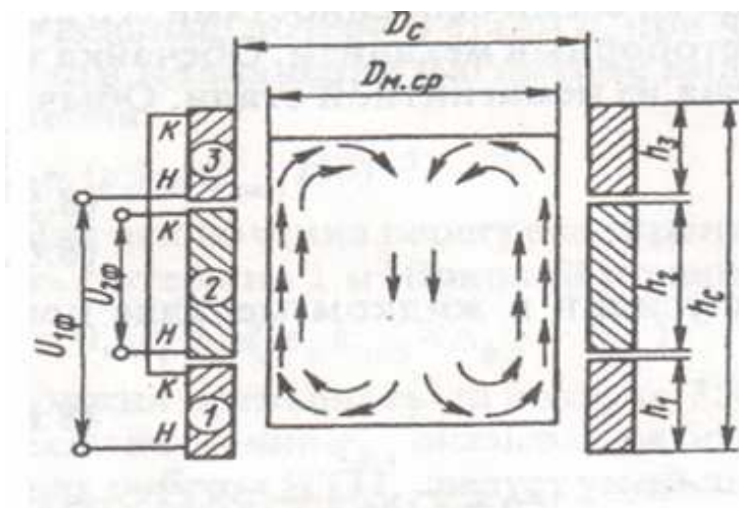


Рисунок 12.2. Электрическая схема включения секций цилиндрического статора ЭМП.

Высота секций

$$h_1 = h_3 = \frac{3 \cdot (h_c - 2 \cdot c)}{11} = \frac{3 \cdot (1,313 \text{ м} - 2 \cdot 0,04 \text{ м})}{11} = 0,34 \text{ м}. \quad (12.2)$$

$$h_2 = \frac{5 \cdot (h_c - 2 \cdot c)}{11} = \frac{5 \cdot (1,313 \text{ м} - 2 \cdot 0,04 \text{ м})}{11} = 0,56 \text{ м}. \quad (12.3)$$

Число витков секций

$$N_1 = N_3 = \frac{h_1 + a}{b + a} = \frac{340 \text{ мм} + 1,5 \text{ мм}}{26 \text{ мм} + 1,5 \text{ мм}} = 12 \text{ витков.} \quad (12.4)$$

$$N_2 = \frac{h_2 + a}{b + a} = \frac{560 \text{ мм} + 1,5 \text{ мм}}{26 \text{ мм} + 1,5 \text{ мм}} = 21 \text{ виток.} \quad (12.5)$$

Проверим фактическую высоту статора

$$\begin{aligned} h_c &= 2 \cdot [N_1 \cdot b + (N_1 - 1) \cdot a] + [N_2 \cdot b + (N_2 - 1) \cdot a] + 2 \cdot c = \\ &= 2 \cdot [12 \text{ витков} \cdot 26 \text{ мм} + (12 \text{ витков} - 1) \cdot 1,5 \text{ мм}] + [21 \text{ виток} \cdot 26 \text{ мм} + (21 \text{ виток} - 1) \cdot 1,5 \text{ мм}] + \\ &+ 2 \cdot 40 \text{ мм} = 1,313 \text{ м} \end{aligned} \quad (12.6)$$

Совпадение хорошее.

Принимаем рабочий ток статора  $I_p = 1500 \text{ А}$ . Для выбранной трубки токопроводящее сечение  $S = 260 \text{ мм}^2$ .

Плотность тока

$$J = \frac{I_p}{S} = \frac{1500 \text{ А}}{260 \text{ мм}^2} = 5,8 \text{ А/мм}^2, \quad (12.7)$$

что требует водяного охлаждения статора.

Настил тока

$$I_p \cdot \frac{N_1}{h_1} = I_p \cdot \frac{N_2}{h_2} = I_p \cdot \frac{N_3}{h_3} = 1500 \text{ А} \cdot \frac{12 \text{ витков}}{0,34 \text{ м}} = 0,5 \cdot 10^5 \text{ А/м.} \quad (12.8)$$

Амплитуда осевой напряжённости магнитного поля на цилиндрической поверхности металла в ковше

$$H_{\text{пов}} = 0,4 \cdot \frac{h_c}{h_m} \cdot I_p \cdot \frac{N_1}{h_1} = 0,4 \cdot \frac{1,313 \text{ м}}{1,2 \text{ м}} \cdot 1500 \text{ А} \cdot \frac{12 \text{ витков}}{0,34 \text{ м}} = 0,22 \cdot 10^5 \text{ А/м.} \quad (12.9)$$

Амплитуда осевой компоненты магнитной индукции на внутренней поверхности футеровки ковша

$$B_{\text{пов}} = \mu_0 \cdot H_{\text{пов}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,22 \cdot 10^5 \text{ А/м} = 0,03 \text{ Тл}, \quad (12.10)$$

где:  $\mu_0 = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная.

Эта величина соответствует применяемому на практике диапазону значений магнитной индукции.

Активное падение напряжения в крайних секциях

$$(U_R)_1 = (U_R)_3 = \frac{I_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_c \cdot N_1}{S} = \frac{1,5 \text{ кА} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \text{ мОм} \cdot \text{м} \cdot 3,14 \cdot 1,55 \text{ м} \cdot 12 \text{ витков}}{26 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2} = 8 \text{ В.} \quad (12.11)$$

Активное падение напряжения в средней секции

$$(U_R)_2 = \frac{I_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_c \cdot N_2}{S} = \frac{1,5 \text{ кА} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \text{ мОм} \cdot \text{м} \cdot 3,14 \cdot 1,55 \text{ м} \cdot 21 \text{ виток}}{26 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2} = 12 \text{ В.} \quad (12.12)$$

Собственная индуктивность крайних секций

$$L_1 = L_3 = \left( \frac{\pi \cdot D_c \cdot N_1}{h_1} \right)^2 \cdot h_1 \cdot K_1 \cdot 10^{-4} = A \cdot h_1 \cdot K_1 = 2,99 \cdot 0,34 \text{ м} \cdot 0,3 = 0,3 \text{ мГн}, \quad (12.13)$$

где:  $A = 0,001 \cdot \left( \frac{1,55 \text{ м} \cdot 12 \text{ витков}}{0,34 \text{ м}} \right)^2 = 2,99 \text{ А.}$

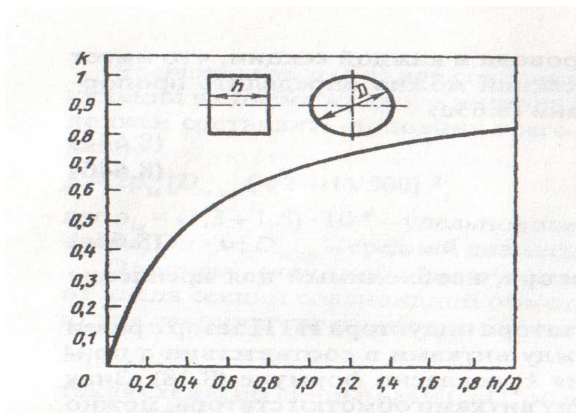


Рисунок 12.3 График для определения поправочного коэффициента при расчете собственной индуктивности соленоида.

Согласно рис.12.3 коэффициент  $K_1 = 0,3$  для  $\frac{h_1}{D_c} = \frac{h_3}{D_3} = \frac{0,34 \text{ м}}{1,55 \text{ м}} = 0,22$

Собственная индуктивность средней секции

$$L_2 = A \cdot h_2 \cdot K_2 = 2,99 \cdot 0,56 \text{ м} \cdot 0,45 = 0,75 \text{ мГн.} \quad (12.14)$$

Согласно рис.12.3 коэффициент  $K_2 = 0,45$  для  $\frac{h_2}{D_c} = \frac{0,56 \text{ м}}{1,55 \text{ м}} = 0,36.$

Индуктивное падение напряжения на крайней секции

$$(U_L)_1 = (U_L)_3 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_p \cdot L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \text{ Гц} \cdot 1,5 \text{ кА} \cdot 0,3 \text{ мГн} = 6 \text{ В}. \quad (12.15)$$

$$(U_L)_2 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_p \cdot L_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \text{ Гц} \cdot 1,5 \text{ кА} \cdot 0,75 \text{ мГн} = 14 \text{ В}. \quad (12.16)$$

Взаимную индуктивность смежных секций 1 – 2 и 2 – 3, разделённых конструктивным зазором  $c = 40 \text{ мм}$ , находим так же, как и взаимную индуктивность секций 1 – 3, разделённых зазором  $h_2 + 2 \cdot c = 560 \text{ мм} + 2 \cdot 40 \text{ мм} = 640 \text{ мм}$ , т.е. по теореме о трёх частях. Для определения  $M_{12} = M_{21} = M_{23} = M_{32}$  из рис.12.3 находим необходимые поправочные коэффициенты:

$$\text{для } \frac{c}{D_c} = \frac{0,04 \text{ м}}{1,55 \text{ м}} = 0,02 \quad K_2 = 0,031;$$

$$\text{для } \frac{h_1 + c}{D_c} = \frac{0,34 \text{ м} + 0,04 \text{ м}}{1,55 \text{ м}} = 0,25 \quad K_{12} = 0,36;$$

$$\text{для } \frac{h_2 + c}{D_c} = \frac{0,56 \text{ м} + 0,04 \text{ м}}{1,55 \text{ м}} = 0,39 \quad K_{23} = 0,47;$$

$$\text{для } \frac{h_1 + c + h_2}{D_c} = \frac{0,34 \text{ м} + 0,04 \text{ м} + 0,56 \text{ м}}{1,55 \text{ м}} = 0,61 \quad K_{123} = 0,58.$$

$$\begin{aligned} M_{12} = M_{21} = M_{23} = M_{32} &= 0,5 \cdot A \cdot [(h_1 + c + h_2) \cdot K_{123} + c \cdot K_2 - (h_1 + c) \cdot K_{12} - (c + h_2) \cdot K_{23}] = \\ &= 0,5 \cdot 2,99 \cdot \left[ (0,34 \text{ м} + 0,04 \text{ м} + 0,56 \text{ м}) \cdot 0,58 + 0,04 \text{ м} \cdot 0,031 - \right. \\ &\quad \left. - (0,34 \text{ м} + 0,04 \text{ м}) \cdot 0,36 - (0,04 \text{ м} + 0,56 \text{ м}) \cdot 0,47 \right] = 0,196 \text{ мГн} \end{aligned} \quad (12.17)$$

$$\begin{aligned} M_{13} = M_{31} &= 0,5 \cdot A \cdot [h_c \cdot K_{123} + (2 \cdot c + h_2) \cdot K_2 - 2 \cdot (h_1 + c + h_2) \cdot K_{12}] = \\ &= 0,5 \cdot 2,99 \cdot [1,313 \text{ м} \cdot 0,64 + (2 \cdot 0,04 \text{ м} + 0,56 \text{ м}) \cdot 0,48 - 2 \cdot (0,34 \text{ м} + 0,04 \text{ м} + 0,56 \text{ м}) \cdot 0,57] = \\ &= 0,124 \text{ мГн} \end{aligned} \quad (12.18)$$

$$\text{где: } K_2 = 0,48 \text{ при } \frac{2 \cdot c + h_2}{D_c} = \frac{2 \cdot 0,04 \text{ м} + 0,56 \text{ м}}{1,55 \text{ м}} = 0,41;$$

$$K_{12} = 0,57 \text{ при } \frac{h_1 + c + h_2}{D_c} = \frac{0,34 \text{ м} + 0,04 \text{ м} + 0,56 \text{ м}}{1,55 \text{ м}} = 0,6;$$

$$K_{123} = 0,64 \text{ при } \frac{h_c}{D_c} = \frac{1,313 \text{ м}}{1,55 \text{ м}} = 0,85.$$

Индуктивное падение напряжения, компенсирующее э.д.с. взаимной индукции

$$(U_m)_{12} = (U_m)_{21} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_p \cdot M_{12} = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \text{ Гц} \cdot 1,5 \text{ кА} \cdot 0,196 \text{ мГн} = 3,5 \text{ В}. \quad (12.19)$$

$$(U_m)_{13} = (U_m)_{31} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_p \cdot M_{13} = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \text{ Гц} \cdot 1,5 \text{ кА} \cdot 0,124 \text{ мГн} = 2,3 \text{ В}. \quad (12.20)$$

Согласно векторной диаграмме токов и напряжений рассчитываемого статора (рис.12.4) напряжение одной фазы двухфазного источника питания, в которую последовательно, но встречно включены секции 1 и 3, составило  $U_{\phi 1} = 18 \text{ В}$ . Напряжение другой фазы, в которую включена секция 2,  $U_{\phi 2} = 18 \text{ В}$ . Фазовый угол между векторами фазных напряжений  $\varphi_U = 65^\circ$ .

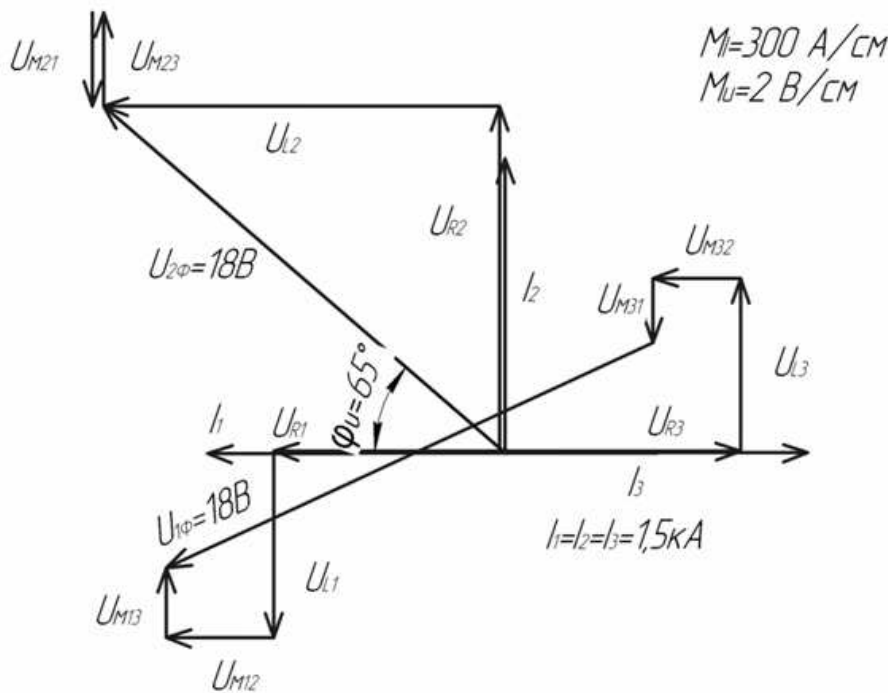


Рисунок 12.4. Векторная диаграмма напряжений и токов статора.

Полная мощность установки ЭМП

$$S = I_p \cdot (U_{\phi 1} + U_{\phi 2}) = 1,5 \text{ кА} \cdot (18 \text{ В} + 18 \text{ В}) = 54 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (12.21)$$

### 13. Плоский статор для перемешивания жидкой стали в ковше.

При применении кольцевого статора усложняются конструкция установки и технологические процессы, что можно избежать, если статор сделать «плоским» и подводить его сбоку к кожуху ковша. В этом случае статор получается вытянутым вдоль боковой поверхности ковша, кожух которого в этой зоне выполнен из немагнитного материала.

Задача: рассчитать параметры плоского статора электромагнитного перемешивания жидкой стали в ковше вместимостью 30 т.

Статор двухфазный с полюсным делением  $\tau = 900$  мм. [15] Фазы статора сдвинуты друг относительно друга на  $90^\circ$ . Первая фаза – расщепленная. Для получения равенства обеих фаз при бегущем поле число витков средней  $w_{\text{ср}}$  и крайней  $w_{\text{кр}}$  катушек находится в соотношении

$$w_{\text{ср}} = \frac{3}{2} \cdot w_{\text{кр}}. \quad (13.1)$$

Каждая крайняя катушка имеет 16 витков, а средняя – 24 витка. Общее число проводов, уложенных в катушках статора

$$N = (12 \cdot 16 \text{ витков} + 24 \text{ витка}) \cdot 2 = 112 \text{ витков}. \quad (13.2)$$

Каждая катушка разделена на две секции, соединенных последовательно. Секция крайней катушки состоит из 8 витков, секция средней – из 12 витков. Зазор между соседними шинами (проводами) в секции равен 5 мм и обеспечивается изоляционными прокладками. Зазор между секциями равен 22 мм. Шины стягиваются в пакетах шпильками, катушки изготавливают из голых алюминиевых шин сечением 6Ч10 мм.

Считая, что эффективному перемешиванию металла соответствует равенство количества стали, движущейся вверх вдоль стенки ковша (сечение  $F_1$ ), количеству стали, движущейся вниз в центре ковша (сечение  $F_2$ ), суммарная площадь перемещающейся стали

$$F = 2 \cdot F_1 = 2 \cdot 10,048 \text{ см}^2 = 20,096 \text{ см}^2, \quad (13.3)$$

где:  $F_1 = \frac{\pi \cdot D_{\kappa}^2}{8} = \frac{3,14 \cdot (160 \text{ см})^2}{8} = 10,048 \text{ см}^2$ ,  $D_{\kappa} = 1600 \text{ мм}$  – диаметр ковша.

Диаметр внутреннего сечения

$$D_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{F_1 \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{10,048 \text{ см}^2 \cdot 4}{3,14}} = 113 \text{ см}. \quad (13.4)$$

Для наилучшего использования мощности статора необходимо, чтобы глубина проникновения тока в жидкий металл  $\Delta_1$  была равна ширине кольца наружного сечения  $F_1$

$$\Delta_1 = \frac{D_{\kappa} - D_{\text{вн}}}{2} = \frac{1600 \text{ мм} - 1130 \text{ мм}}{2} = 235 \text{ мм}. \quad (13.5)$$

Оптимальная частота тока, питающего обмотки статора

$$f = \frac{5030^2 \cdot \rho}{4 \cdot \Delta_1^2} = \frac{5030^2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}}{4 \cdot (23 \text{ см})^2} = 1,67 \text{ Гц}, \quad (13.6)$$

где:  $\Delta = 2 \cdot \Delta_1$  – глубина проникновения тока в металл;

$\rho = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  – удельное электрическое сопротивление жидкой стали.

Принимаем оптимальную частоту  $f_{\text{опт}} = 1,7 \text{ Гц}$ .

Кожух ковша в зоне статора изготовлен из немагнитной стали толщиной 16 мм. При прохождении через него магнитного поля в нем будет теряться на нагрев часть мощности, создаваемой статором

$$P_{\kappa} = P_0^{-4 \cdot \pi \cdot x \cdot \sqrt{f / \rho_{\kappa}}} = 1 \text{ Вт} \cdot e^{-4 \cdot 3,14 \cdot 1,6 \text{ см} \cdot \sqrt{1,7 \text{ Гц} / 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}}} = 0,87, \quad (13.7)$$

где:  $P_0$  – мощность статора (принимаем 1 Вт);

$x = 1,6 \text{ см}$  – толщина кожуха;

$\rho_{\kappa} = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  – удельное электрическое сопротивление стали кожуха.

Тогда потери в кожухе  $1 - 0,87 = 0,13$  или 13 % , что допустимо.

Индуктивность средней катушки (фазы)

$$\begin{aligned}
 L_{cp} &= 4 \cdot K_1 \cdot w_{cp}^2 \cdot \left[ b \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2 \cdot a \cdot b}{(\alpha + \beta) \cdot (b + \sqrt{b^2 + a^2})} + a \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2 \cdot a \cdot b}{(\alpha + \beta) \cdot (a + \sqrt{a^2 + b^2})} + \right. \\
 &\quad \left. + 2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2} - \frac{a + b}{2} + 0,45 \cdot (\alpha + \beta) \right] \cdot 10^{-9} = \\
 &= 4 \cdot 1,7 \cdot 24^2 \cdot \left[ \lg \frac{2 \cdot 81,8 \text{ см} \cdot 116,2 \text{ см}}{(24,9 \text{ см} + 6 \text{ см}) \cdot (116,2 \text{ см} + \sqrt{(116,2^2 + 81,8^2) \text{ см}^2})} + 2 \cdot \sqrt{(81,8^2 + 116,2^2) \text{ см}^2} - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{81,8 \text{ см} + 116,2 \text{ см}}{2} + 0,45 \cdot (29,4 \text{ см} + 6 \text{ см}) \right] \cdot 10^{-9} \text{ Гн} = \\
 &= 0,951 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},
 \end{aligned}
 \tag{13.8}$$

где:  $a = 116,2 \text{ см}$ ;  $\alpha = 29,4 \text{ см}$ ;  $b = 116,2 \text{ см}$ ;  $\beta = 6 \text{ см}$  (рис.13.1);

$K_1 = 1,7$  – коэффициент, учитывающий влияние магнитопровода.

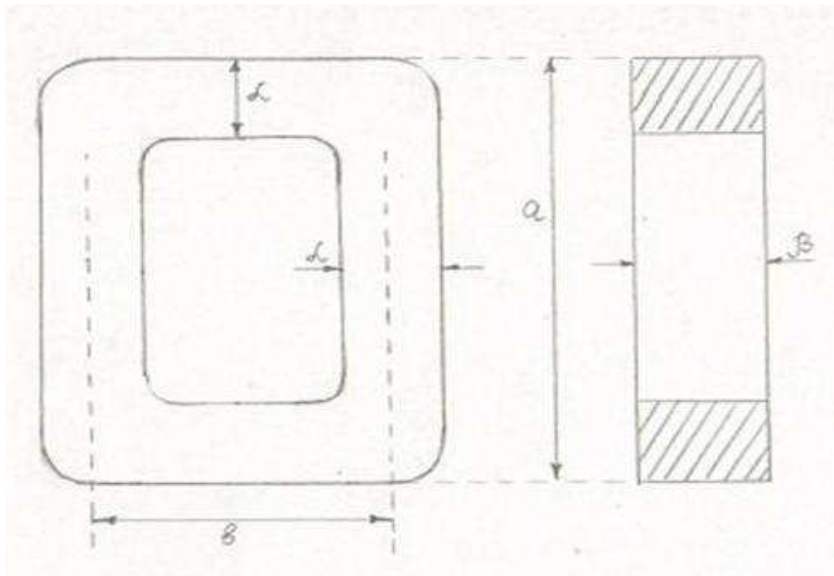


Рисунок 13.1. Размеры шины витка.

Индуктивное сопротивление средней катушки

$$X_{cp} = 2 \cdot \pi \cdot f_{опт} \cdot L_{cp} = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,7 \text{ Гц} \cdot 0,951 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} . \tag{13.9}$$

Активное сопротивление средней катушки (фазы)

$$r_{cp} = \rho_{Al} \cdot \frac{l}{S} = 0,055 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \frac{95 \text{ м}}{600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} , \tag{13.10}$$

где:  $l = 2 \cdot (a + b) \cdot w_{cp} = 2 \cdot (81,8 \text{ см} + 116,2 \text{ см}) \cdot 24 \text{ витка} = 95 \text{ м}$  – общая длина провода;

$\rho_{Al} = 0,055 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное электрические сопротивление алюминиевой шины при температуре  $250^\circ \text{C}$ ;

$S = 600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  – сечение шины.

Проверим правильность выбора сечения шины. Для этого определим глубину проникновения тока в алюминиевую шину

$$\Delta_{Al} = 5030 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Al}}{f_{\text{опт}}}} = 5030 \cdot \sqrt{\frac{5,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}}{1,7 \text{ Гц}}} = 16,3 \text{ см}. \quad (13.11)$$

Полученное значение больше высоты шины 6 см; следовательно ток течет по всему сечению и нагрева шины не будет.

Для крайней катушки имеем следующие размеры (рис.13.1)

$a = 87,7 \text{ см}$ ;  $\alpha = 21 \text{ см}$ ;  $b = 56,8 \text{ см}$ ;  $\beta = 6 \text{ см}$  и  $K_2 = 2,3$ .

Индуктивность крайней катушки

$$L_{\text{кр}} = 4 \cdot K_2 \cdot w_{\text{кр}}^2 \cdot \left[ a \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2 \cdot a \cdot b}{(\alpha + \beta) \cdot (a + \sqrt{a^2 + b^2})} - \lg \frac{2 \cdot a \cdot b}{(\alpha + \beta) \cdot (b + \sqrt{a^2 + b^2})} \cdot 2,3 \cdot b + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2} - \frac{a + b}{2} + 0,45 \cdot (\alpha + \beta) \right] \cdot 10^{-9} = \\ = 4 \cdot 2,3 \cdot 16^2 \cdot \left[ 87,8 \text{ см} \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2 \cdot 87,8 \text{ см} \cdot 56,8 \text{ см}}{(21 \text{ см} + 6 \text{ см}) \cdot (87,8 \text{ см} + \sqrt{(87,8^2 + 56,8^2) \text{ см}^2})} - \right. \\ \left. - \lg \frac{2 \cdot 87,8 \text{ см} \cdot 56,8 \text{ см}}{(21 \text{ см} + 6 \text{ см}) \cdot (56,8 \text{ см} + \sqrt{(87,8^2 + 56,8^2) \text{ см}^2})} \cdot 2,3 \cdot 56,8 \text{ см} + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sqrt{(87,8^2 + 56,8^2) \text{ см}^2} - \frac{87,8 \text{ см} + 56,8 \text{ см}}{2} + 0,45 \cdot (21 \text{ см} + 6 \text{ см}) \right] \cdot 10^{-9} = \\ = 0,47 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \quad (13.12)$$

Индуктивное сопротивление крайней катушки

$$X_{\text{кр}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{опт}} \cdot L_{\text{кр}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,7 \text{ Гц} \cdot 0,47 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (13.13)$$

Индуктивное сопротивление второй фазы

$$X_{\text{ф.кр}} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot 2 = 10,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (13.14)$$

Активное сопротивление крайней катушки

$$r_{\text{кр}} = 0,055 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \frac{46 \text{ м}}{600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad (13.15)$$

где:  $l = 2 \cdot (a + b) \cdot w_{\text{кр}} = 2 \cdot (87,8 \text{ см} + 56,8 \text{ см}) \cdot 16 \text{ витков} = 46 \text{ м}$  – общая длина провода.

Активное сопротивление крайней фазы

$$r_{\text{ф.кр}} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot 2 = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (13.16)$$

Полное сопротивление средней фазы

$$Z_{\text{ср}} = \sqrt{r_{\text{ср}}^2 + x_{\text{ср}}^2} = \sqrt{(10 \cdot 10^{-3} \text{ Ом})^2 + (8,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом})^2} = 13,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (13.17)$$

Падение напряжения на средней фазе

$$U_{\text{ф.ср}} = I \cdot Z_{\text{ср}} = 1000 \text{ А} \cdot 13,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 13,2 \text{ В}, \quad (13.18)$$

где:  $I = 1000 \text{ А}$  – заданный ток статора(при этом плотность тока в шине

$$J = \frac{I}{S} = \frac{1000 \text{ А}}{600 \text{ мм}^2} = 1,7 \text{ А/мм}^2, \text{ что допустимо при естественном воздушном охлаждении).}$$

Полная мощность средней фазы

$$S_{\text{ср}} = U_{\text{ф.ср}} \cdot I = 13,2 \text{ В} \cdot 1000 \text{ А} = 13,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (13.19)$$

Активная мощность средней фазы

$$P_{\text{ср}} = I^2 \cdot r_{\text{ср}} = (1000 \text{ А})^2 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 8,7 \text{ кВт}. \quad (13.20)$$

Полное сопротивление крайней фазы

$$Z_{\text{кр}} = \sqrt{r_{\text{ф.кр}}^2 + x_{\text{ф.кр}}^2} = \sqrt{(8,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом})^2 + (10,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом})^2} = 13,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (13.21)$$

Падение напряжения на крайней фазе

$$U_{\text{ф.кр}} = I \cdot Z_{\text{кр}} = 1000 \text{ А} \cdot 13,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 13,3 \text{ В}. \quad (13.22)$$

Полная мощность крайней фазы

$$S_{\text{кр}} = U_{\text{ф.кр}} \cdot I = 13,3 \text{ В} \cdot 1000 \text{ А} = 13,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (13.23)$$

Активная мощность крайней фазы

$$P_{\text{кр}} = I^2 \cdot r_{\text{ф.кр}} = (1000 \text{ А})^2 \cdot 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 8,4 \text{ кВт}. \quad (13.24)$$

Полная мощность статора

$$S_{\text{ст}} = S_{\text{ср}} + S_{\text{кр}} = 13,2 \text{ кВ} \cdot \text{А} + 13,3 \text{ кВ} \cdot \text{А} = 26,5 \text{ кВ} \cdot \text{А} . \quad (13.25)$$

Активная мощность статора

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ср}} + P_{\text{кр}} = 8,7 \text{ кВт} + 8,4 \text{ кВт} = 17,1 \text{ кВт} . \quad (13.26)$$

Ампер-витки статора

$$I \cdot N = 1000 \text{ А} \cdot 112 \text{ витков} = 112000 \text{ А} \cdot \text{витков} . \quad (13.27)$$

Настил тока

$$\frac{I \cdot N}{l} = \frac{112000 \text{ А} \cdot \text{витков}}{180 \text{ см}} = 6,22 \cdot 10^{-2} \text{ А/м} , \quad (13.28)$$

где:  $l = 180 \text{ см}$  – длина статора (заданная величина).

Скорость движения магнитного поля

$$v_{\text{м.п.}} = 2 \cdot \tau \cdot f_{\text{опт}} = 2 \cdot 90 \text{ см} \cdot 1,7 \text{ Гц} = 3,06 \text{ м/с} . \quad (13.29)$$

Максимальный магнитный поток статора

$$\Phi_{\text{м}} = \frac{E_{\text{р}}}{4,44 \cdot f_{\text{опт}} \cdot w_{\text{кр}}} = \frac{10 \text{ В}}{4,44 \cdot 1,7 \text{ Гц} \cdot 16 \text{ витков}} = 0,083 \text{ Вб} , \quad (13.30)$$

где:  $E_{\text{р}} = X_{\text{ф.кр}} \cdot I = 10,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot 1000 \text{ А} = 10 \text{ В}$  – реактивная составляющая напряжения крайней фазы.

Фактический поток в сердечнике

$$\Phi_{\text{ф}} = \Phi_{\text{м}} \cdot 0,7 = 0,058 \text{ Вб} . \quad (13.31)$$

Сечение сердечника

$$S_{\text{серд}} = \frac{\Phi_{\text{ф}}}{B} = \frac{0,058 \text{ Вб}}{1 \text{ Тл}} = 580 \text{ см}^2 , \quad (13.32)$$

где:  $B = 1 \text{ Тл}$  – магнитная индукция в сердечнике (заданная величина).

#### 14. Электромагнитный лоток для транспортирования и разливки жидкого алюминия.

Жидкие металлы можно транспортировать в керамическом канале и даже вверх от нижней точки плавильного агрегата. Для этих целей используют электромагнитный насос, желоб или лоток (рис. 14.1), в котором расплав из миксера 1 перемещается в керамическом канале 3 под действием бегущего электромагнитного поля, создаваемого устройством 4 (обмотки, сердечник), представляющим собой статор асинхронного двигателя, разрезанный по радиусу и вытянутый в прямую линию. Подогрев расплава в миксере проводят нагревателем 2. Применяют статор 3-х фазный или 2-х фазный с расщепленной крайней катушкой. [16,17]

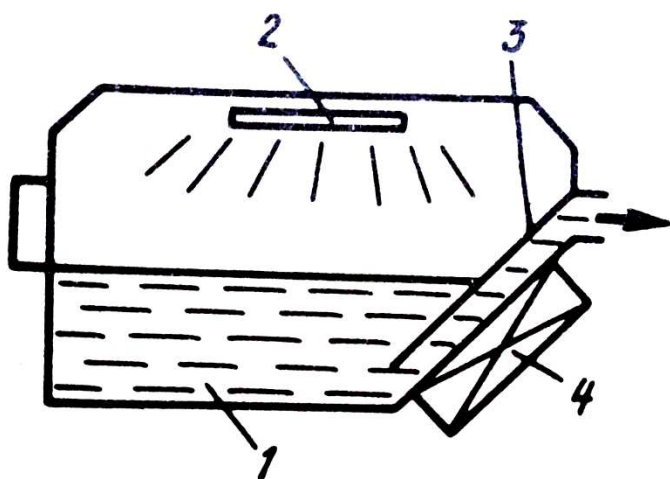


Рисунок 14.1. Схема установки электромагнитного лотка на печи.

Задача: рассчитать электрические параметры электромагнитного лотка длиной  $l_{\text{л}} = 1,5 \text{ м}$  с полюсным делением  $\tau = 0,25 \text{ м}$  для транспортировки и разливки жидкого алюминия под углом  $45^\circ$  на высоту  $h_{\text{н}} = 0,75 \text{ м}$  при расходе  $Q_{\text{Al}} = 0,011 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Выбираем внутренние размеры канала: ширина  $a_{\text{к}} = 20 \text{ см}$ , высота  $h_{\text{к}} = 3 \text{ см}$ . Тогда площадь сечения канала  $S_{\text{к}} = a_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}} = 20 \text{ см} \cdot 3 \text{ см} = 60 \text{ см}^2 = 60 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Скорость движения жидкого расплава

$$v_{\text{м}} = \frac{Q_{\text{Al}}}{S_{\text{к}}} = \frac{0,011 \text{ м}^3/\text{с}}{60 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 1,8 \text{ м/с}. \quad (14.1)$$

Производительность лотка

$$Q_{\text{л}} = Q_{\text{Al}} \cdot d = 0,011 \text{ м}^3/\text{с} \cdot 2,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 = 25 \text{ кг/с}, \quad (14.2)$$

где:  $d = 2,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность жидкого алюминия.

Считаем, что обмотки статора расположены только с одной стороны канала, а каждая катушка – двухполюсная; намотка катушек – двухслойная проводом из плоской алюминиевой шины сечением  $S_{\text{ш}} = 60 \text{ мм} \cdot 10 \text{ мм} = 600 \text{ мм}^2 = 600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

Скорость движения поля, создаваемого статором

$$v_{\text{н}} = 2 \cdot \tau \cdot f = 2 \cdot 0,25 \text{ м} \cdot 50 \text{ Гц} = 25 \text{ м/с}. \quad (14.3)$$

Скольжение

$$S = \frac{v_{\text{н}} - v_{\text{м}}}{v_{\text{н}}} = \frac{25 \text{ м/с} - 1,8 \text{ м/с}}{25 \text{ м/с}} = 0,93. \quad (14.4)$$

Ограничение  $0 < S < 1$  соблюдено. Кроме того, экспериментом установлено, что лотки работают с рациональным значением  $S = 0,9 \div 0,95$ .

Из опытов линейная токовая нагрузка для условий нашей задачи составляет  $A = 125 \text{ кА/м}$ .

Число пазов статора на полюс и фазу

$$q = \frac{\tau}{3 \cdot t} = \frac{0,25 \text{ м}}{3 \cdot 0,05 \text{ м}} = 1,66 \text{ (принимаем } q = 2), \quad (14.5)$$

где:  $t = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$  – зубцовое деление (задано для обмотки из шины).

Рациональное отношение ширины паза  $t_{\text{н}}$  к зубцовому делению  $t$  составляет  $0,5 \div 0,6$ .

Отсюда

$$t_{\text{н}} = 0,5 \cdot t = 0,5 \cdot 5 \text{ см} = 2,5 \text{ см}. \quad (14.6)$$

Ширина зубца  $t_{\text{з}} = t - t_{\text{н}} = 5 \text{ см} - 2,5 \text{ см} = 2,5 \text{ см}$ .

Для реальной обмотки токовая нагрузка

$$A_1 = \frac{A}{K} = \frac{125 \text{ кА/м}}{0,9} = 138 \text{ кА/м}, \quad (14.7)$$

где:  $K = 0,9$  – коэффициент, учитывающий уменьшение индукции реального индуктора (заданная величина).

Ток, протекающий по обмотке

$$I_1 = A_1 \cdot \frac{t}{w} = 138 \text{ кА/м} \cdot \frac{0,05 \text{ м}}{4 \text{ витка}} = 1,7 \text{ кА}, \quad (14.8)$$

где:  $w = 4$  витка – число витков двухслойной катушки, уложенное в одном пазу (заданная величина).

Проверим правильность выбора сечения шины. Для этого определим глубину проникновения тока в шину

$$\Delta_{Al} = 5030 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Al}}{f}} = 5030 \cdot \sqrt{\frac{5,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}}{50 \text{ Гц}}} = 17 \text{ мм}.$$

Полученное значение больше толщины стенки шины ( $17 \text{ мм} > 10 \text{ мм}$ ); следовательно нагрева шины полем катушки не будет.

Индуктивность проводников катушки фазы (рис. 14.2)

$$\begin{aligned} L_k &= K_1 \cdot w^2 \cdot \left[ b \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2 \cdot h \cdot b}{(h + \beta) \cdot (b + \sqrt{b^2 + h^2})} + h \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2 \cdot h \cdot b}{(h + \beta) \cdot (h + \sqrt{h^2 + b^2})} + \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot \sqrt{h^2 + b^2} - \frac{h + b}{2} + 0,45 \cdot (h + \beta) \right] \cdot 10^{-9} = \\ &= 0,68 \cdot 16^2 \cdot \left[ 25 \text{ см} \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2 \cdot 30 \text{ см} \cdot 25 \text{ см}}{(30 \text{ см} + 3 \text{ см}) \cdot (25 \text{ см} + \sqrt{(25^2 + 30^2) \text{ см}^2})} + \right. \\ &\quad \left. + 30 \text{ см} \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2 \cdot 30 \text{ см} \cdot 25 \text{ см}}{(30 \text{ см} + 3 \text{ см}) \cdot (30 \text{ см} + \sqrt{(30^2 + 25^2) \text{ см}^2})} + \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot \sqrt{(30^2 + 25^2) \text{ см}^2} - \frac{30 \text{ см} + 25 \text{ см}}{2} + 0,45 \cdot (30 \text{ см} + 3 \text{ см}) \right] \cdot 10^{-9} \text{ Гн} = \\ &= 0,0077 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \end{aligned} \quad (14.9)$$

где:  $K_1 = 0,68$  – коэффициент, учитывающий форму лобовой части витка.

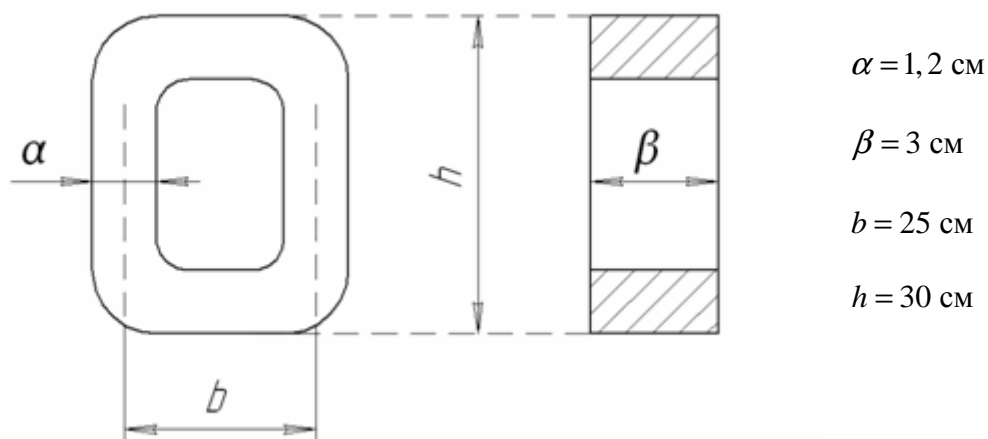


Рисунок 14.2. Размеры витка.

Индуктивное сопротивление средней катушки

$$\chi_k = 2 \cdot \pi \cdot f_k \cdot L_k = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Гц} \cdot 0,0077 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 2,42 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} . \quad (14.10)$$

Активное сопротивление катушки фазы

$$r_k = \rho_{Al} \cdot \frac{l}{S_{тр}} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см} \cdot \frac{17,6 \text{ м}}{600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 1,61 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} , \quad (14.11)$$

где:  $l = 2 \cdot (h + b) \cdot w_\phi = 2 \cdot (0,3 \text{ м} + 0,25 \text{ м}) \cdot 16 \text{ витков} = 17,6 \text{ м}$  – общая длина провода фазы.

Полное сопротивление катушки фазы

$$Z_k = \sqrt{r_k^2 + \chi_k^2} = \sqrt{(1,61 \cdot 10^{-3} \text{ Ом})^2 + (2,42 \cdot 10^{-3} \text{ Ом})^2} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} . \quad (14.12)$$

Падение напряжения на катушке (фазе)

$$U_k = I_1 \cdot Z_k = 1700 \text{ А} \cdot 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 4,9 \text{ В} . \quad (14.13)$$

Активная мощность катушки

$$P_k = I_1^2 \cdot r_k = (1700 \text{ А})^2 \cdot 1,61 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 4,7 \text{ кВт} . \quad (14.14)$$

Реактивная индуктивная мощность катушки

$$Q_{X_L} = I_1^2 \cdot X_k = (1700 \text{ А})^2 \cdot 2,42 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 6,9 \text{ кВ} \cdot \text{Ар} . \quad (14.15)$$

Полная мощность катушки

$$S_k = I_1 \cdot U_k = 1700 \text{ А} \cdot 4,9 \text{ В} = 8,3 \text{ кВ} \cdot \text{А} . \quad (14.16)$$

Рабочий магнитный поток, создаваемый обмоткой

$$\Phi_{\text{рм}} = \frac{b' \cdot B_{\text{н0}} \cdot \tau}{a} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot y}{\tau}\right) = \frac{0,3 \text{ м} \cdot 0,18 \text{ Тл} \cdot 0,25 \text{ м}}{60 \text{ эл.град.}} \cdot \left(1 - \cos \frac{3,14 \cdot 0,2 \text{ м}}{0,25 \text{ м}}\right) = , \quad (14.17)$$

$= 0,000002 \text{ макс.} = 0,2 \text{ Вб}$

где:  $b' = 0,3 \text{ м}$  – ширина индуктора (заданная величина);

$$B_{\text{н0}} = \mu_0 \cdot A_1 = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 138000 \text{ А/м} = 0,18 \text{ Тл} – \text{ амплитуда нормальной компоненты}$$

индукции магнитного поля на поверхности индуктора;

$y = 0,2 \text{ м}$  – относительный шаг обмотки (заданная величина);

$\alpha = 60 \text{ эл.град.}$  – ширина фазной зоны;

$$\mu_0 = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} – \text{ магнитная постоянная.}$$

Сечение сердечника

$$S_c = \frac{\Phi_{\text{ф}}}{B_{\text{н0}}} = \frac{\Phi_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ф}}}{B_{\text{н0}}} = \frac{0,2 \text{ Вб} \cdot 0,4}{0,18 \text{ Тл}} = 4500 \text{ см}^2, \quad (14.18)$$

где:  $K_{\text{ф}} = 0,4$  – коэффициент конструкции сердечника.

Ширина сердечника

$$b_c = \frac{S_c}{l_{\text{л}}} = \frac{4500 \text{ см}^2}{150 \text{ см}} = 30 \text{ см}. \quad (14.19)$$

Проверим правильность определенного значения мощности с учетом потерь.

Мощность активных потерь во вторичной среде (жидкой ванне канала)

$$P_2 = 2 \cdot \tau \cdot f \cdot S \cdot F_{\text{эм}} = 2 \cdot 0,25 \text{ м} \cdot 50 \text{ Гц} \cdot 0,93 \cdot 18,71 \text{ кГ} = 435 \text{ Вт} = 0,435 \text{ кВт}, \quad (14.20)$$

где:  $F_{\text{эм}} = F_{\text{h}} + F_{\text{g}} = 18,7 \text{ кГ} + 0,01 \text{ кГ} = 18,71 \text{ кГ}$  – сила электромагнитного давления на жидкий металл в канале;

$$F_{\text{h}} = F_{\text{тр}} \cdot \chi \cdot l_{\text{л}} = 29 \text{ кГ} \cdot 0,43 \text{ м} \cdot 1,5 \text{ м} = 18,7 \text{ кГ} – \text{ суммарная величина сил, действующих на}$$

участке канала длиной  $l_{\text{л}}$  между двумя сечениями;

$$\chi = 2 \cdot a_{\text{к}} + h_{\text{к}} = 0,43 \text{ м} – \text{ смоченный периметр;}$$

$$F_{\text{тр}} = \frac{1}{c^2} \cdot d_{\text{Al}} \cdot g \cdot v_{\text{м}}^2 = \frac{1}{50^2} \cdot 2,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^2 \cdot (1,8 \text{ м/с})^2 = 29 \text{ кГ} - \text{ сила трения, отнесенная}$$

к единице поверхности участка жидкости (напряжение силы сопротивления);

$$c = \frac{1}{n} \cdot \sqrt[6]{\frac{R}{2}} = \frac{1}{0,01} \cdot \sqrt[6]{\frac{0,03 \text{ м}}{2}} = 50 - \text{опытный коэффициент};$$

$n = 0,01$  – коэффициент шероховатости;

$$R = \frac{2 \cdot a_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}}}{2 \cdot a_{\text{к}} + h_{\text{к}}} = \frac{2 \cdot 60 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{2 \cdot 0,2 \text{ м} + 0,03 \text{ м}} = 0,03 \text{ м} - \text{гидравлический радиус};$$

$g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^2$  – ускорение силы тяжести.

Сила тяжести

$$F_{\text{г}} = d_{\text{Al}} \cdot g \cdot \sin 45^0 = 2,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^2 \cdot 0,707 = 15,935 \text{ кГ} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2. \quad (14.21)$$

Джоулевы потери в обмотке

$$P_{\text{м}} = I_1^2 \cdot R_{\text{к}} \cdot N = (1700 \text{ А})^2 \cdot 0,00058 \text{ Ом} \cdot 1 = 1,7 \text{ кВт}, \quad (14.22)$$

$$\text{где: } R_{\text{к}} = \rho \cdot \frac{l}{S_{\text{ш}}} = 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \frac{17,6 \text{ м}}{600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 0,00058 \text{ Ом} - \text{омическое сопротивление}$$

одной катушки;

$N = 1$  – число последовательно включенных катушек в каждой фазе (заданная величина).

Потери в стали магнитопровода

$$P_{\text{ст}} = K_{\text{да}} \cdot P_{\text{ал}} \cdot G_{\text{с}} = 1,3 \cdot 1,1 \text{ Вт/кг} \cdot 175,5 \text{ кг} = 250 \text{ Вт}, \quad (14.23)$$

где:  $K_{\text{да}} = 1,3$  – коэффициент насыщения зубцового слоя статора (заданная величина);

$P_{\text{ал}} = 1,1 \text{ Вт/кг}$  – удельные потери в статоре;

$$G_{\text{с}} = d_{\text{ст}} \cdot l_{\text{л}} \cdot b' \cdot b_1 = 7800 \text{ кг/м}^3 \cdot 1,5 \text{ м} \cdot 0,3 \text{ м} \cdot 0,05 \text{ м} = 175 \text{ кг} - \text{масса статора},$$

$b_1 = 0,05 \text{ м}$  – толщина сердечника (заданная величина).

Мощность суммарных активных потерь

$$P_{\text{пзм}} = P_2 + P_{\text{м}} + P_{\text{ст}} = 0,435 \text{ кВт} + 1,7 \text{ кВт} + 0,25 \text{ кВт} = 2,385 \text{ кВт}, \quad (14.24)$$

что превышает на  $2,385 - 1,7 = 0,685 \text{ кВт}$  активную мощность катушки.

Для компенсации этого расхождения увеличим ток катушки до  $I'_1 = 2000 \text{ A}$ . Тогда:

$$P'_m = (2000 \text{ A})^2 \cdot 1,61 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 6440 \text{ Вт} = 6,4 \text{ кВт} > P_{\text{пэм}}. \quad (14.25)$$

$$Q'_{x_L} = (2000 \text{ A})^2 \cdot 2,42 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 9680 \text{ В} \cdot \text{Ар} = 9,68 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}. \quad (14.26)$$

$$U'_k = 2000 \text{ A} \cdot 1,61 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 3,2 \text{ В}. \quad (14.27)$$

$$S'_k = 2000 \text{ A} \cdot 3,2 \text{ В} = 6400 \text{ В} \cdot \text{А} = 4,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (14.28)$$

## 15. Статор электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок.

Кристаллизатор (рис. 15.1.) машины литья заготовок представляет собой внутреннюю медную водоохлаждаемую гильзу 1, в которой из жидкого расплава 3 формируется оболочка 4 слитка 5 определённой толщины и прочности, и наружный стальной водоохлаждаемый кожух 2. [18]. В оболочке возникают такие дефекты слитка, как наружные поперечные и продольные трещины, поверхностные складки и ужимины, искажение профиля. Эффективным средством предотвращения названных дефектов является устройство ЭМП - электромагнитного перемешивателя 6 (фактически статора асинхронной машины).

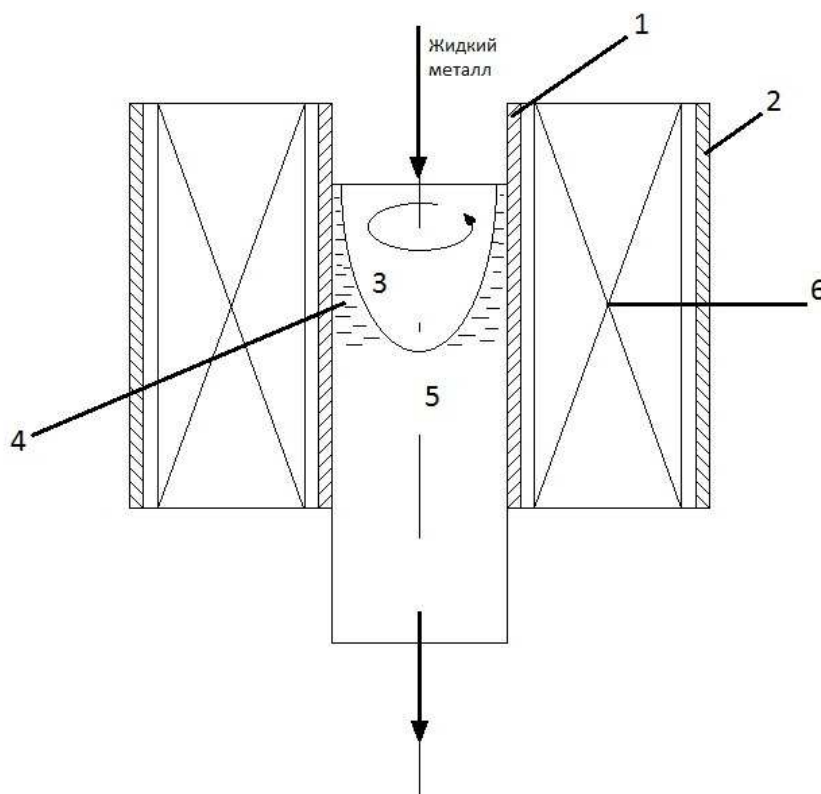


Рисунок 15.1. Схема установки статора ЭМП в кристаллизаторе.

При протекании 2- или 3-фазной системы токов по катушкам обмотки статора ЭМП в его внутреннем пространстве образуется вращающееся магнитное поле, которое индуцирует в жидком металле электрические токи. В результате взаимодействия их с магнитным полем

возникают электромагнитные усилия, под действием которых жидкий металл приходит во вращение (как ротор асинхронного двигателя).

Задача: рассчитать параметры трёхфазного статора электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторе с диаметром слитка  $D_{\text{сл}} = 100$  мм и с линейной скоростью вращения жидкого металла  $v_m = 0,5$  м/с.

Выбираем из опыта толщину твёрдой наружной оболочки слитка  $C = 5$  мм. Тогда толщина слоя жидкого вращающегося в перпендикулярной плоскости расплава

$$\Delta = \frac{(D_{\text{сл}} - 2 \cdot C)}{2} \cdot K_1 = \frac{(100 \text{ мм} - 2 \cdot 5 \text{ мм})}{2} \cdot \frac{2}{3} = 30 \text{ мм}, \quad (15.1)$$

где:  $K_1 = \frac{2}{3}$  – коэффициент, характеризующий слой вращающегося расплава.

При заданной высоте жидкой ванны в зоне кристаллизатора  $h_{\text{ж.в.}} = 5$  мм сечение движущегося слоя  $S_m = \Delta \cdot h_{\text{ж.в.}} = 30 \text{ мм} \cdot 5 \text{ мм} = 0,00015 \text{ м}^2$ . (15.2)

Механическое давление, развиваемое жидким металлом

$$P_{\text{ж.м.}} = \frac{m}{S_m} = \frac{0,022 \text{ кг}}{0,00015 \text{ м}^2} = 150 \text{ кг/м}^2, \quad (15.3)$$

где: масса движущегося металла

$$m = d_{\text{ст.}} \cdot V = 7,8 \frac{\text{Т}}{\text{М}^3} \cdot 2,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 0,022 \text{ кг}; \quad (15.4)$$

плотность стали  $d_{\text{ст.}} = 7,8 \frac{\text{Т}}{\text{М}^3}$ ;

объём слоя жидкого металла

$$V = S_k \cdot h_{\text{ж.в.}} = 565,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 0,005 \text{ м} = 2,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3; \quad (15.5)$$

площадь поверхности кольца

$$S_k = \pi(R_{\text{н}}^2 - R_{\text{вн}}^2) = 3,14(20^2 \text{ мм} - 15^2 \text{ мм}) = 565,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \quad (15.6)$$

наружный радиус кольца  $R_{\text{н}} = 20$  мм;

внутренний радиус кольца  $R_{\text{вн}} = 15$  мм.

Электромагнитная сила, развиваемая статором

$$F_{\text{эм.м.}} = \frac{p_{\text{ж.м.}}}{v_{\text{м}}} = \frac{150 \text{ кг/м}^2}{0,5 \text{ м/с}} = 293 \text{ кг/м}^2. \quad (15.7)$$

Индукция первичного поля в середине слоя жидкого металла

$$B_{\Delta} = \mu_0 \cdot \frac{F_{\text{эм.м.}}}{\delta'} = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot \frac{293 \text{ кг/м}^2}{0,015 \text{ м}} = 0,025 \text{ Тл}, \quad (15.8)$$

где: магнитная постоянная

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}; \quad (15.9)$$

зазор между внутренней поверхностью сердечника статора и наружной поверхностью  
слитка

$$\delta' = \frac{(D_{\text{ст}} - D_{\text{сл}})}{2} = \frac{(130 \text{ мм} - 100 \text{ мм})}{2} = 15 \text{ мм}. \quad (15.10)$$

Ток фазы статора

$$I_{\phi} = \frac{B \cdot \delta'}{\mu_0} = \frac{0,025 \text{ Тл} \cdot 0,015 \text{ м}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}} = 298 \text{ А}. \quad (15.11)$$

Напряжённость поля в зазоре

$$H_{\phi} = \frac{I_{\tau}}{2 \cdot \delta'} = \frac{298 \text{ А} \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 0,015 \text{ м}} = 14000 \text{ А/м}. \quad (15.12)$$

Считая, что  $H_{\phi} = I_{\text{м}} \cdot w$ , определим число витков катушки на полюс – фазу

$$w = \frac{H_{\phi}}{I_{\text{м}}} = \frac{14000 \text{ А/м}}{420 \text{ А}} = 33 \text{ витка}. \quad (15.13)$$

Максимальный поток полюса

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{K}{\pi} \cdot \frac{w \cdot I_{\text{м}}}{R_3} = \frac{2}{3,14} \cdot \frac{33 \text{ витка} \cdot 420 \text{ А}}{853040} = 0,01 \text{ Вб}, \quad (15.14)$$

где:  $K = 2$ ;

магнитное сопротивление потока в зазоре

$$R_3 = \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\phi}} = \frac{2 \cdot 0,015 \text{ м}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,2 \text{ м} \cdot 0,14 \text{ м}} = 853040; \quad (15.15)$$

полюсное деление статора

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{\text{ст}}}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 130 \text{ мм}}{2 \cdot 1} = 0,2 \text{ м} ; \quad (15.16)$$

число пар полюсов обмотки статора  $p = 1$ ;

расчётная длина сердечника статора

$$l_6 = \frac{\pi \cdot D_{\text{ст}}}{2 \cdot p} \cdot \lambda = \tau \cdot \lambda = 0,2 \text{ м} \cdot 0,7 = 0,14 \text{ м}. \quad (15.17)$$

Синус угла  $\varphi_0$  тока холостого хода

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = \sqrt{1 - 0,2^2} = 0,97 , \quad (15.18)$$

где: коэффициент мощности статора на холостом ходу  $\cos \varphi_0 = 0,2$  (заданная величина).

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{a0} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 99 \text{ А} \cdot 0,2 = 20 \text{ А} , \quad (15.19)$$

где: ток холостого хода  $I_0 = 99 \text{ А}$  (заданная величина).

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{p0} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 99 \text{ А} \cdot 0,97 = 96 \text{ А} . \quad (15.20)$$

Синус угла  $\varphi_n$  тока статора при номинальной нагрузке

$$\sin \varphi_n = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} = \sqrt{1 - 0,36^2} = 0,93 , \quad (15.21)$$

где: коэффициент мощности при номинальной нагрузке  $\cos \varphi_n = 0,36$  (заданная величина).

Активная составляющая номинального тока статора

$$I_{\text{на1}} = I_{\phi} \cdot \cos \varphi_n = 298 \text{ А} \cdot 0,36 = 107 \text{ А} . \quad (15.22)$$

Реактивная составляющая номинального тока статора

$$I_{\text{нр1}} = I_{\phi} \cdot \sin \varphi_n = 298 \text{ А} \cdot 0,93 = 277 \text{ А} . \quad (15.23)$$

Активная составляющая приведенного номинального тока ротора (слитка)

$$I'_{2\text{на}} = I_{\text{на1}} - I_{a0} = 107 \text{ А} - 20 \text{ А} = 87 \text{ А} . \quad (15.24)$$

Реактивная составляющая приведённого номинального тока ротора

$$I'_{2np} = I_{np1} - I_{p0} = 277 \text{ A} - 96 \text{ A} = 181 \text{ A} . \quad (15.25)$$

Приведённый номинальный ток ротора

$$I'_{2н} = \sqrt{(I'_{2на})^2 + (I'_{2np})^2} = \sqrt{(87 \text{ A})^2 + (181 \text{ A})^2} = 200 \text{ A} . \quad (15.26)$$

Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = K_r \cdot \rho \cdot \frac{l}{S \cdot A} = \frac{1,05 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 33 \text{ м}}{3,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot 33} = 0,62 \text{ Ом} , \quad (15.27)$$

где: длина последовательно включённых проводников фазы

$$l = 2 \cdot w \cdot l_{cp} = 2 \cdot 33 \text{ витка} \cdot 0,4 \text{ м} = 33 \text{ м} ; \quad (15.28)$$

средняя длина полувитка

$$l_{cp} = l_6 + l_{л} = 0,14 \text{ м} + 0,36 \text{ м} = 0,5 \text{ м} ; \quad (15.29)$$

длина лобовой части

$$l_{л} = 1,8 \cdot \tau = 1,8 \cdot 0,2 \text{ м} = 0,36 \text{ м} ; \quad (15.30)$$

коэффициент увеличения сопротивления обмотки вследствие поверхностного эффекта

$$K_r = 1,03 \div 1,05 ;$$

число параллельных ветвей  $A = 33$  ;

удельное электросопротивление меди  $\rho = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  ;

сечение медной трубки наружным диаметром 14 мм, внутренним—6мм  $S = 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  .

Допустимая плотность тока для водоохлаждаемой трубки  $J = 8,5 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2$  . Тогда

$$\text{расчётное минимальное допустимое сечение трубки } S_{тр} \geq \frac{I_{\phi}}{J} = \frac{298 \text{ A}}{8,5 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2} = 35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$(0,35 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 - \text{меньше выбранного } 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2)$  .

Полное сопротивление полюс – фазы

$$z_1 = \frac{U_{\phi 1}}{I_{\phi}} = \frac{380 \text{ В}}{298 \text{ А}} = 1,28 \text{ Ом} , \quad (15.31)$$

где: напряжение полюс – фазы  $U_{\phi 1} = 380 \text{ В}$  (заданная величина).

Индуктивное сопротивление фазы

$$x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2} = \sqrt{(1,28 \text{ А})^2 - (0,62 \text{ А})^2} = 1,12 \text{ Ом} . \quad (15.32)$$

Полная мощность фазы

$$S_{\phi} = U_{\phi 1} \cdot I_{\phi} = 380 \text{ В} \cdot 298 \text{ А} = 116,8 \text{ кВ} \cdot \text{А} . \quad (15.33)$$

Активная мощность фазы

$$P_{\phi} = S_{\phi} \cdot \cos \varphi_n = 116,8 \text{ кВ} \cdot \text{А} \cdot 0,36 = 60 \text{ кВт} . \quad (15.34)$$

## 16. Печь сопротивления.

В металлургии применяют нагрев методом сопротивления для плавления и рафинирования металлов и сплавов. [19]

Задача 1: рассчитать параметры нагревателей из нихрома и карбида кремния мощностью 33 кВт, размещенных внутри футеровки боковых стенок камеры плавления алюминиевого сплава. Камера плавления является входным устройством раздаточной печи при литье под давлением (рис 16.1).

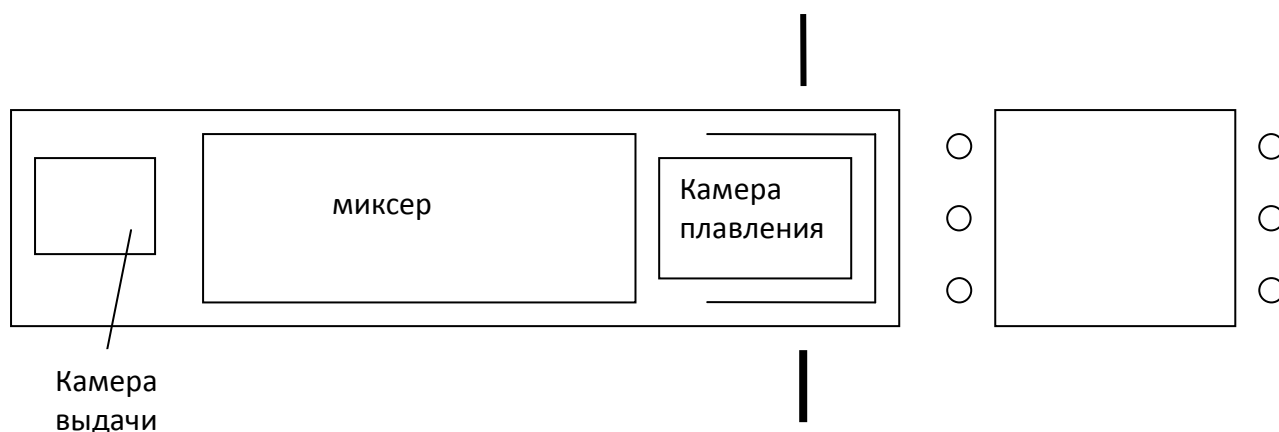


Рисунок 16.1. Нагреватель для плавления и рафинирования металлов и сплавов.

Расчет для нихромового нагревателя.

Задаем мощность нагревателей, включенных по трехфазной схеме «звезда-звезда»:

$$P_n = 33 \text{ кВт}$$

Отсюда найдем мощность, приходящуюся на 1 фазу

$$P_\phi = \frac{P_n}{3} = \frac{33 \text{ кВт}}{3} = \frac{33000 \text{ Вт}}{3} = 11000 \text{ Вт} = 11 \text{ кВт}. \quad (16.1)$$

Напряжение одной фазы

$$U_\phi = 220 \text{ В}$$

Найдем силу тока из соотношения

$$I_\phi = \frac{P_\phi}{U_\phi} = \frac{11 \text{ кВт}}{220 \text{ В}} = \frac{11000 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} = 50 \text{ А}. \quad (16.2)$$

Вычислим сопротивление нагревателя по закону Ома

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{ф}}}{I_{\text{ф}}} = \frac{220 \text{ В}}{50 \text{ А}} = 4,4 \text{ Ом} . \quad (16.3)$$

Также сопротивление можно найти по формуле

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} , \quad (16.4)$$

где:  $\rho$  – удельное сопротивление материала, из которого изготовлен нагреватель;

$l$  – длина нагревателя;

$S$  – площадь поперечного сечения нагревателя.

Из формулы (16.4) можно выразить формулу для нахождения длины нагревателя

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} . \quad (16.5)$$

Диаметр нагревателя выбираем по справочнику:  $d = 3,2 \text{ мм}$  .

Тогда площадь поперечного сечения равна

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (3,2 \text{ мм})^2}{4} = 8,0384 \text{ мм}^2 . \quad (16.6)$$

Удельное сопротивление нихрома (справочные материалы)

$$\rho_{\text{нихрома}} = 1,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$$

Используя эти данные находим необходимую длину нагревателя

$$l_1 = \frac{4,4 \text{ Ом} \cdot 8,0384 \text{ мм}^2}{1,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}} = 32,1536 \text{ м}$$

Диаметр витка, расстояние между витками и длину крышки выбираем по справочнику

$$d_{\text{витка}} = 3 \text{ см} = 0,03 \text{ м} ;$$

$$l_{\text{между.витками}} = 3,8 \text{ мм} = 0,0038 \text{ м} ;$$

$$l_{\text{крышки}} = 1000 \text{ мм} = 1 \text{ м} .$$

Найдем длину витка, используя формулу

$$l_{\text{витка}} = 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{витка}} = \pi \cdot d_{\text{витка}} . \quad (16.7)$$

Учитывая отступ от каждого края ( $l_{\text{отступ}} = 100 \text{ мм}$ ), найдем длину намотки и количество витков:

$$l_{\text{намотки}} = l_{\text{крышки}} - 2 \cdot l_{\text{отступ}} = 1000 \text{ мм} - 2 \cdot 100 \text{ мм} = 800 \text{ мм} = 0,8 \text{ м} . \quad (16.8)$$

$$n_{\text{витков}} = \frac{l_{\text{намотки}}}{d + l_{\text{между витками}}} = \frac{0,8 \text{ м}}{0,0032 \text{ м} + 0,0038 \text{ м}} = 114 \text{ витков} . \quad (16.9)$$

В одной ленте уместится

$$l_2 = n_{\text{витков}} \cdot l_{\text{витка}} = 114 \cdot 0,0942 \text{ м} = 10,7388 \text{ м} . \quad (16.10)$$

Рассчитаем количество лент в одной фазе

$$W_{\text{лент}} = \frac{l_1}{l_2} = \frac{32,1536 \text{ м}}{10,7388 \text{ м}} = 3 . \quad (16.11)$$

Расчет для нагревателя из карбид-кремния крышки-миксера.

Задаем размеры прямоугольного сечения:  $a = 30 \text{ мм} = 0,03 \text{ м}$ ,  $b = 20 \text{ мм} = 0,02 \text{ м}$ , а также мощность нагревателя однофазной схемы и силу тока для этой фазы:  $P_{\text{н}} = 5 \text{ кВт}$ ,  $I_{\text{ф}} = 40 \text{ А}$ .

Зная размеры поперечного сечения, найдем его площадь по формуле

$$S_{\text{сеч}} = a \cdot b = 30 \text{ мм} \cdot 20 \text{ мм} = 600 \text{ мм}^2 . \quad (16.12)$$

Найдем напряжение фазы, используя формулу

$$U_{\text{ф}} = \frac{P_{\text{н}}}{I_{\text{ф}}} = \frac{5 \text{ кВт}}{40 \text{ А}} = \frac{5000 \text{ Вт}}{40 \text{ А}} = 125 \text{ В} . \quad (16.13)$$

Используя формулу (16.3) рассчитаем сопротивление

$$R = \frac{125 \text{ В}}{40 \text{ А}} = 3,125 \text{ Ом} .$$

Зная удельное сопротивление карбид-кремния ( $\rho_{\text{SiC}} = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ) по формуле (16.5) находим длину нагревателя

$$l = \frac{3,125 \text{ Ом} \cdot 600 \text{ мм}^2}{1000 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}} = 1,875 \text{ м} .$$

Рассчитаем количество тепла карбид-кремниевых нагревателей от  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $T_2 = 800^\circ\text{C}$ , необходимого для нагрева футеровки

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (16.14)$$

где:  $\Delta T = T_2 - T_1$ ;

$c_{\text{SiC}} = 1100 \text{ Дж} \cdot \text{кг}/\text{К}$  – удельная теплоёмкость вещества;

$\rho_{\text{SiC}} = 2100 \text{ кг}/\text{м}^3$  – плотность материала.

Найдем массу тигля

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot S_{\text{сеч}} \cdot l = 2100 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 0,03 \text{ м} \cdot 0,02 \text{ м} \cdot 1,875 \text{ м} = 2,3625 \text{ кг}. \quad (16.15)$$

$$Q = 1100 \text{ Дж} \cdot \text{кг}/\text{К} \cdot 2,3625 \cdot (800 - 20)^\circ\text{C} = 2027025 \text{ Дж}.$$

Определим мощность, которую нужно подвести по формуле

$$P = \frac{Q}{\tau} = \frac{2027025 \text{ Дж}}{3600 \text{ с}} = 563 \text{ Вт}. \quad (16.16)$$

Задача 2: рассчитать параметры нагревателей каждой из трёх зон конвейерной термической печи. Ток переменный трехфазный, напряжение питающей сети 380 В, материал нагревателей Х23Ю5Т, мощность зон 1 – 10 кВт; 2 – 3 – 7 кВт.

Мощность одного нагревателя зоны составляет

$$P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{з}}}{3}, \quad (16.17)$$

где:  $P_{\text{з}}$  – мощность зоны, кВт.

Соединение нагревателей - «звезда».

Напряжение на нагревателе

$$U_{\text{н}} = 220 \text{ В}. \quad (16.18)$$

Ток в нагревателе, А

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 1000}{U_{\text{н}}}. \quad (16.19)$$

Принимается тип нагревателя – проволочный зигзаг.

Площадь поперечного сечения нагревателя, мм<sup>2</sup>

$$S = \frac{d^2}{4}, \quad (16.20)$$

где:  $d$  - диаметр нагревателя, мм.

Площадь поверхности одного погонного метра нагревателя, м<sup>2</sup>

$$f = \frac{\pi \cdot d}{1000}. \quad (16.21)$$

По ГОСТ 12766.1-90 определяется  $\rho_x = 0,96 \cdot \rho_n$  - значение удельного сопротивления нагревателя, а также коэффициент увеличения сопротивления нагревателя в горячем состоянии.

Сопротивление одного погонного метра нагревателя в горячем состоянии

$$r_r = \frac{\rho_r}{S}, \quad (16.22)$$

где:  $r_r$  – сопротивление одного погонного метра нагревателя в горячем состоянии, Ом/м ;

$\rho_r$  - удельное сопротивление нагревателя в горячем состоянии, Ом/м .

Сопротивление нагревателя в горячем состоянии, Ом

$$R_n = \frac{U_n}{P_n - 1000}. \quad (16.23)$$

Развернутая длина нагревателя, м

$$L_n = \frac{R_n}{\rho_r}. \quad (16.24)$$

Площадь поверхности нагревателя, м<sup>2</sup>

$$F_n = f \cdot L_n. \quad (16.25)$$

Удельная поверхностная мощность нагревателя, кВт/м<sup>2</sup>

$$W_n = \frac{P_n}{F_n}. \quad (16.26)$$

Удельная поверхностная мощность идеального нагревателя, кВт/м<sup>2</sup>

$$W_{\text{ид}} = \frac{W}{A_{\Gamma} \cdot A_{\text{эф}} \cdot A_{\text{с}}}, \quad (16.27)$$

где:  $A_{\text{эф}} = 0,68$  – коэффициент эффективности излучения нагревателя;

$A_{\Gamma}$  - коэффициент шага;

$A_{\text{с}}$  - коэффициент, учитывающий влияние степени черноты изделия.

Коэффициент шага определяется по графику  $A_{\Gamma} = f \cdot \frac{e}{d}$ . [19]

Температура нагревателя

$$t_{\text{Н}} = 100 \cdot \left( \frac{W_{\text{из}} \cdot 1000}{3,8} + \left( \frac{t_{\text{т.п.}} + 273}{100} \right)^4 - 273 \right)^{0,25}, \quad (16.28)$$

где:  $t_{\text{Н}}$  - температура нагревателя, °С;

$t_{\text{т.п.}}$  - температура тепловоспринимающей поверхности, °С.

Допустимая толщина окисленного слоя в конце срока службы нагревателя, мм

$$x = 0,5 \cdot d \cdot (1 - (1 - n)^{0,5}), \quad (16.28)$$

где:  $n = 0,2$  - окисленная доля сечения нагревателя.

Срок службы нагревателя, ч

$$T = \frac{10000 \cdot x}{K}, \quad (16.29)$$

где:  $K$  - скорость окисления нагревателя, мм/10000 ч.

Рекомендуемый срок службы нагревателей не менее 10000 часов.

Данные расчета проволочных нагревателей сведены в таблицы 16.1÷16.4

Таблица 16.1- Общие данные электропечи.

Наименование	Обозначение и формула	Величина
Конструкция печи	-	Конвейерная
Номинальная температура, °С	$t_p$	950
Установленная мощность нагревателей, кВт	$P_{уст}$	24
Напряжение питающей сети, В	$U$	380
Число фаз	-	3
Соединение нагревателей	-	Звезда
Номинальный линейный ток, А	$I = \frac{1000 \cdot P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot f}$	35,88
Максимальная холодная мощность, кВт	$P_x = \sum P_{xz}$	28,44
Максимальный холодный линейный ток, А	$I_x = \sum I_{xz}$	42,53
Число зон	-	3
Материал нагревателей	-	X23Ю5Т

Таблица 16.2- Данные зон.

Показатель	Обозначение или формула	зоны	
		1	2-3
Мощность, кВт	$P_3$	10	7
Напряжение, В	$U_3$	380	380
Число фаз	-	3	3
Номинальный линейный ток, А	$I_3 = \frac{1000 \cdot P}{\sqrt{3} \cdot U_3}$	14,95	10,47
Соединение нагревателей	-	Звезда	Звезда
Максимальная “холодная” мощность, кВт	$P_{xz} = 1,1 \cdot P_3 \cdot K$	11,84	8,3
Максимальный “холодный” линейный ток, А	$I_{3x} = 1,1 \cdot I_3 \cdot K$	17,69	12,43
Количество нагревателей	N	3	3

Таблица 16.3 – Данные материала.

Показатель	Обозначение или формула	Зоны	
		1	2-3
Наименование (марка)	-	X23IO5T	X23IO5T
Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·мм <sup>2</sup> /м: 1) в состоянии поставки 2) в холодном состоянии	1) * $\rho_n$ 2) * $\rho_x = 0,96 \cdot \rho_n$	1,395	1,395
Температура нагревателя, °С	$t_H$	1025	1090
Коэффициент увеличения сопротивления	$K$	1,076	1,078
Удельное электрическое сопротивление в горячем состоянии, Ом·мм <sup>2</sup> /м	$P_3 = P_x K$	1,442	1,444
Плотность, г/см <sup>3</sup>		7,21	7,21
*значение удельного электрического сопротивления сплава взято в соответствии с ГОСТ 12766.1-77			

Таблица 16.4 – Сводные данные по печи.

Показатель	Обозначение или формула	Зоны	
		1	2-3
Количество нагревателей, шт	$N$	3	3
Мощность, кВт	$P_H$	3,33	2,33
Напряжение, В	$U_H$	220,0	220,0
Ток нагревателей, А	$I = 1000 \cdot \frac{P}{U}$	15,15	10,61
Материал нагревателей	-	-	-
Размер сечения (диаметр), мм	$d$	8,5	8,5
Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	$S = \frac{3,14 \cdot d^2}{4}$	56,75	56,75
Площадь поверхности одного погонного метра, м <sup>2</sup>	$f = \frac{3,14 \cdot d}{1000}$	0,027	0,027
Соппротивление одного погонного метра, Ом/м	$r_n = \rho_n / S$ $r_x = \rho_x / S$ $r_z = \rho_z / S$	0,025	0,025
- в состоянии поставки		0,024	0,024
- в холодном состоянии		0,025	0,025
- в горячем состоянии			
Масса одного погонного метра, кг	$g = \frac{j \cdot S}{1000}$	0,409	0,409
Соппротивление нагревателя, Ом	$R_{xII} = R_x / 0,96$ $R_x = R_{ном} / K$ $R_{ном} = U_H / (1000 \cdot P_H)$		
- в состоянии поставки			
- в холодном состоянии			
- в горячем состоянии			
Развернутая длина нагревателя, м	$L_H = R_{ном} / r_r$	2,64	3,76
Площадь поверхности, м <sup>2</sup>	$F_H = f \cdot L_H$	0,071	0,102
Удельная поверхностная мощность, кВт/ м <sup>2</sup>	$W = P / F_H$	46,95	22,87
Система нагревателя		Проволочный зигзаг	Проволочный зигзаг
Коэффициент эффективности	$A_{эф}$	0,68	0,68

излучения			
Шаг нагревателя, мм	2e	58	58
Коэффициент шага	$A_{\text{эф}} = f \cdot (e / d)$	1,04	1,04
Коэффициент, учитывающий влияние степени черноты изделия	$A_c$	1	1
Удельная поверхностная мощность идеального нагревателя, кВт/м <sup>2</sup>	$W_c = W / (A_r \cdot A_{\text{эф}} \cdot A_c)$	66,39	32,34
Температура тепловоспринимающей поверхности, °С	$t_{\text{тп}}$	740	950
Температура нагревателя при номинальной температуре на изделии, °С	$*t_H$	1020,6	1052,65
Масса нагревателя, кг	$G_H = g \cdot L_H$	1,08	1,54
Общая длина, м	$L_0 = \sum L_H \cdot n_3$	7,92	22,56
Общая масса, кг	$G_0 = \sum G_H \cdot n_3$	3,24	9,24
Скорость окисления, мм/10000 ч	$W$	0,08	0,10
Толщина окисленного слоя, мм	$x$	0,45	0,45
Срок службы нагревателя, ч	$T = 10000 \cdot x / W$	56250	45000
$*t_H = 100 \cdot \left( \frac{W_{\text{ид}} - 1000}{3,8} + \left( \frac{t_{\text{Т.П.}} + 273}{100} \right)^4 - 273 \right)^{1/4}$			

**17. Моделирование методики расчёта параметров статора электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (п.15) в пакете SIMULINK программы MatLab.**

Для анализа влияния отдельных параметров на изменение результатов расчета и выбора рациональных режимов работы электроустановки математическая модель (методика расчета) может быть представлена в виде пакета SIMULINK программы MatLab. [20] На рисунках 17.1-17.2 приведена модель расчета параметров статора электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок в пакете SIMULINK программы MatLab. На рисунках 17.3-17.5 – графики результатов моделирования. [20]

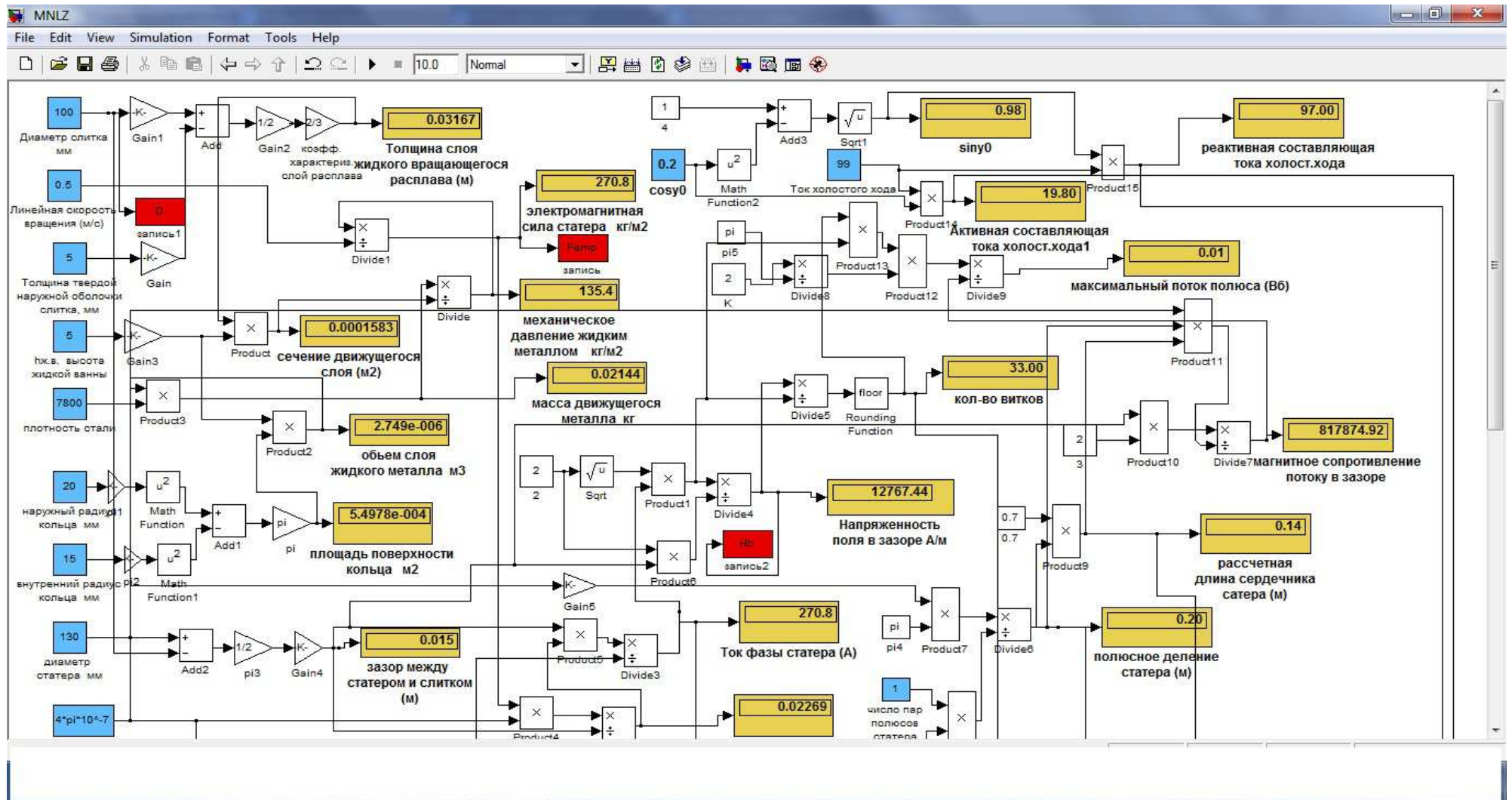


Рисунок 17.1. Модель расчета параметров статора электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе МНЛЗ в пакете Simulink .

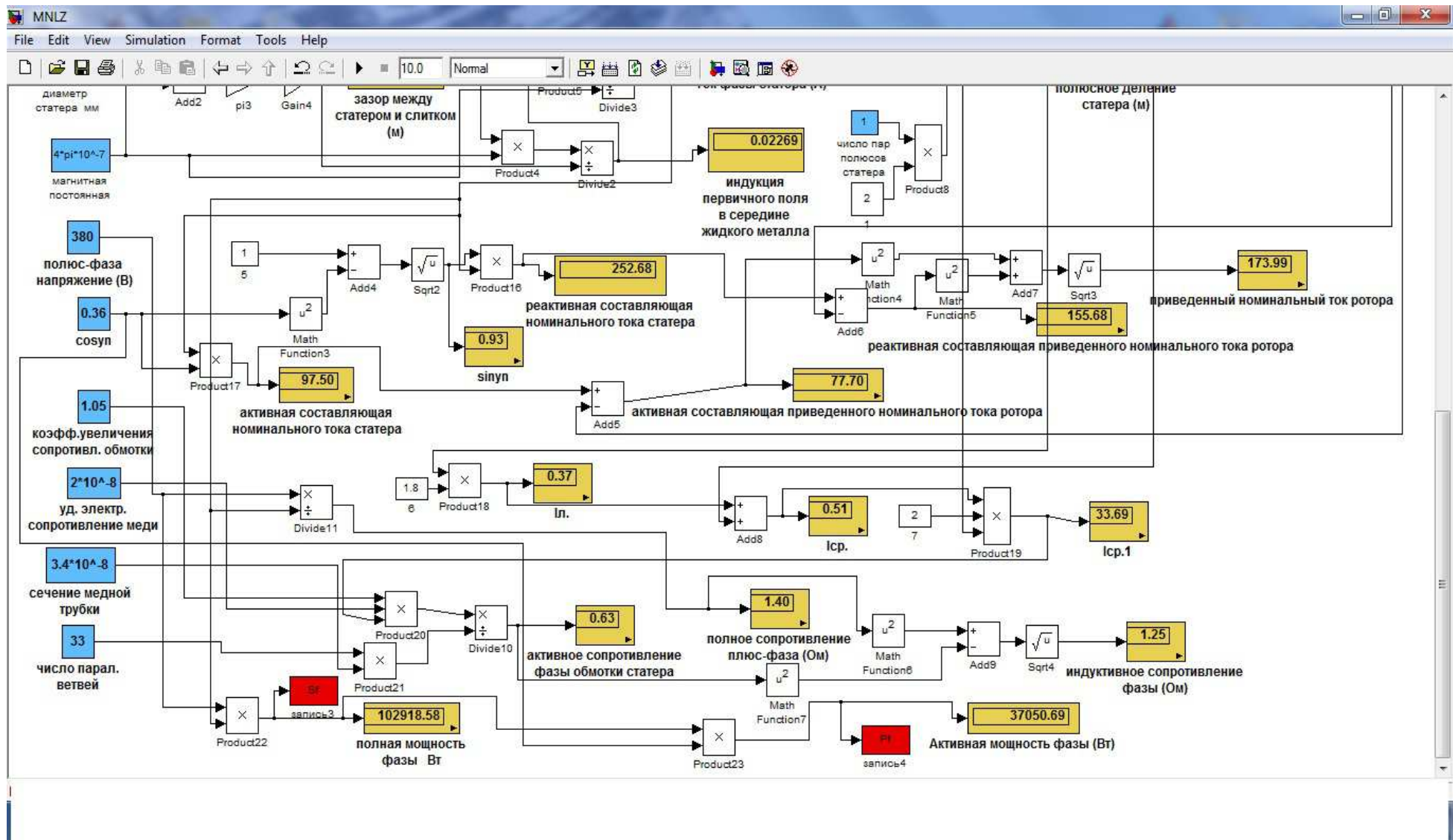


Рисунок 17.2. Модель расчета параметров статора электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе МНЛЗ в пакете Simulink.

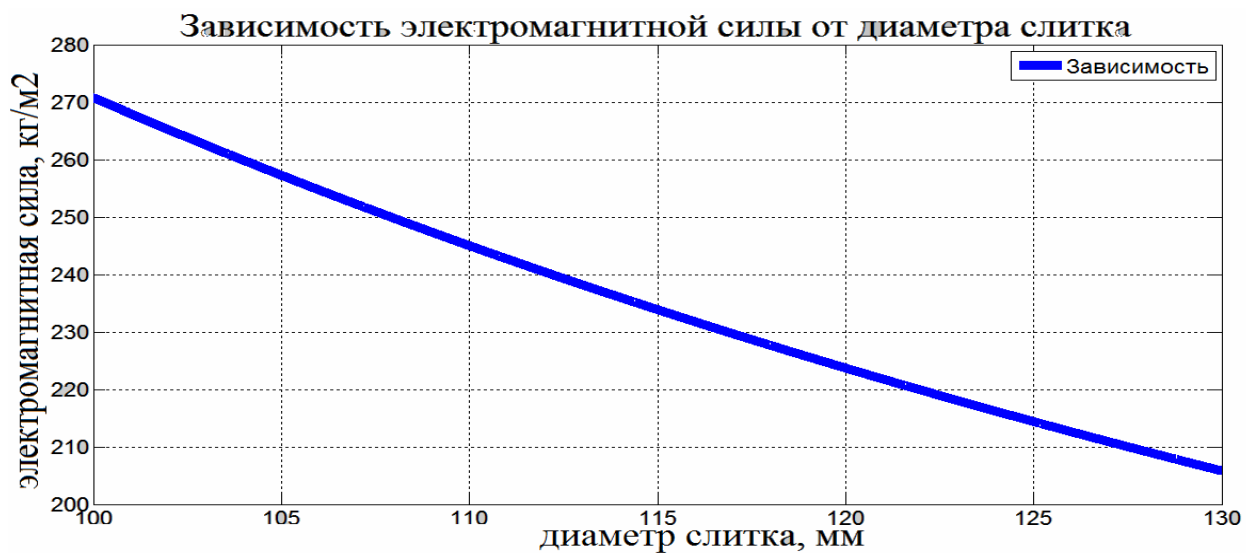


Рисунок 17.3. Зависимость электромагнитной силы от диаметра слитка.

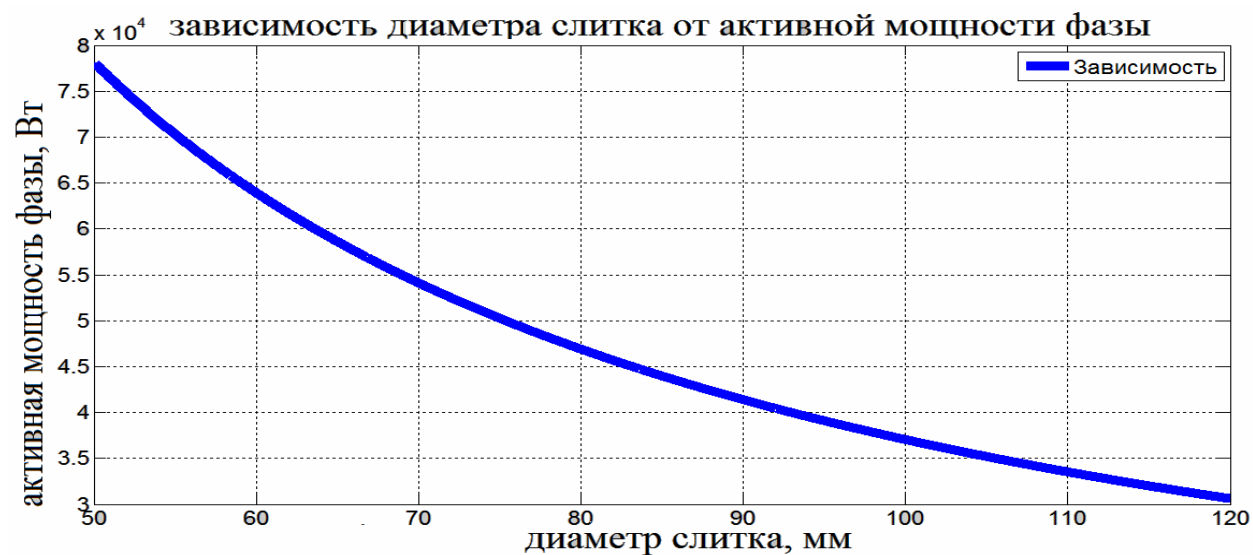


Рисунок 17.4. Зависимость диаметра слитка от активной мощности фазы.

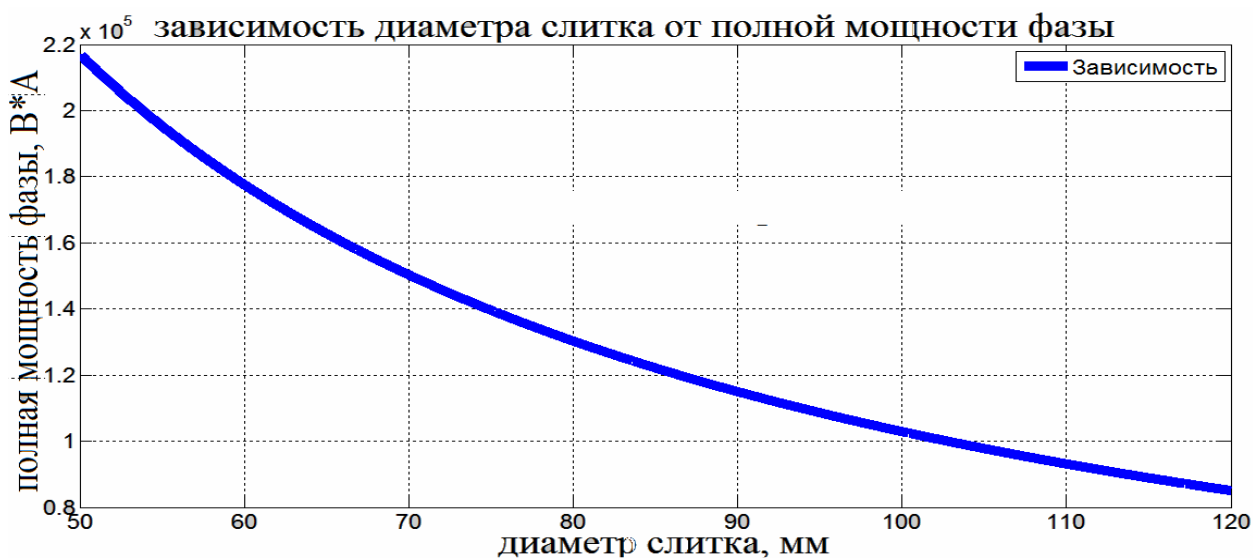


Рисунок 17.5. Зависимость диаметра слитка от полной мощности фазы.

## **18. Моделирование методики расчета параметров индукционной канальной печи для плавки медных сплавов (п.3) в пакете SIMULINK программы MatLab.**

Для анализа влияния отдельных параметров на изменение результатов расчета и выбора рациональных режимов работы электроустановки математическая модель (методика расчета) может быть представлена в виде пакета SIMULINK программы MatLab. На рисунках 18.1-18.3 приведена модель расчета параметров индукционной канальной печи для плавки медных сплавов в пакете SIMULINK программы MatLab. На рисунках 18.4-18.6 – графики результатов моделирования.

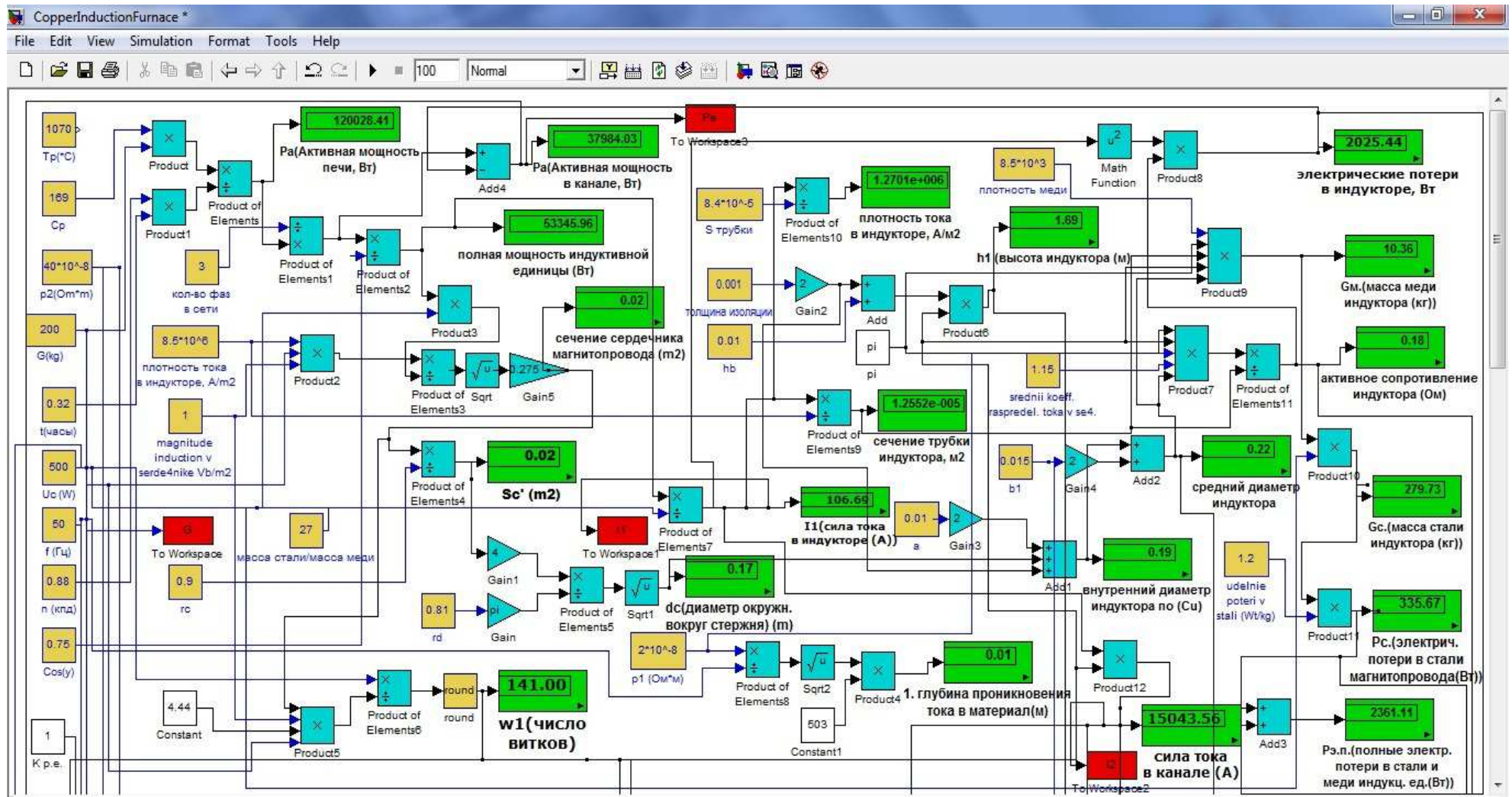


Рисунок 18.1. Модель расчета параметров индукционной каналной печи для плавки медных сплавов в пакете Simulink.

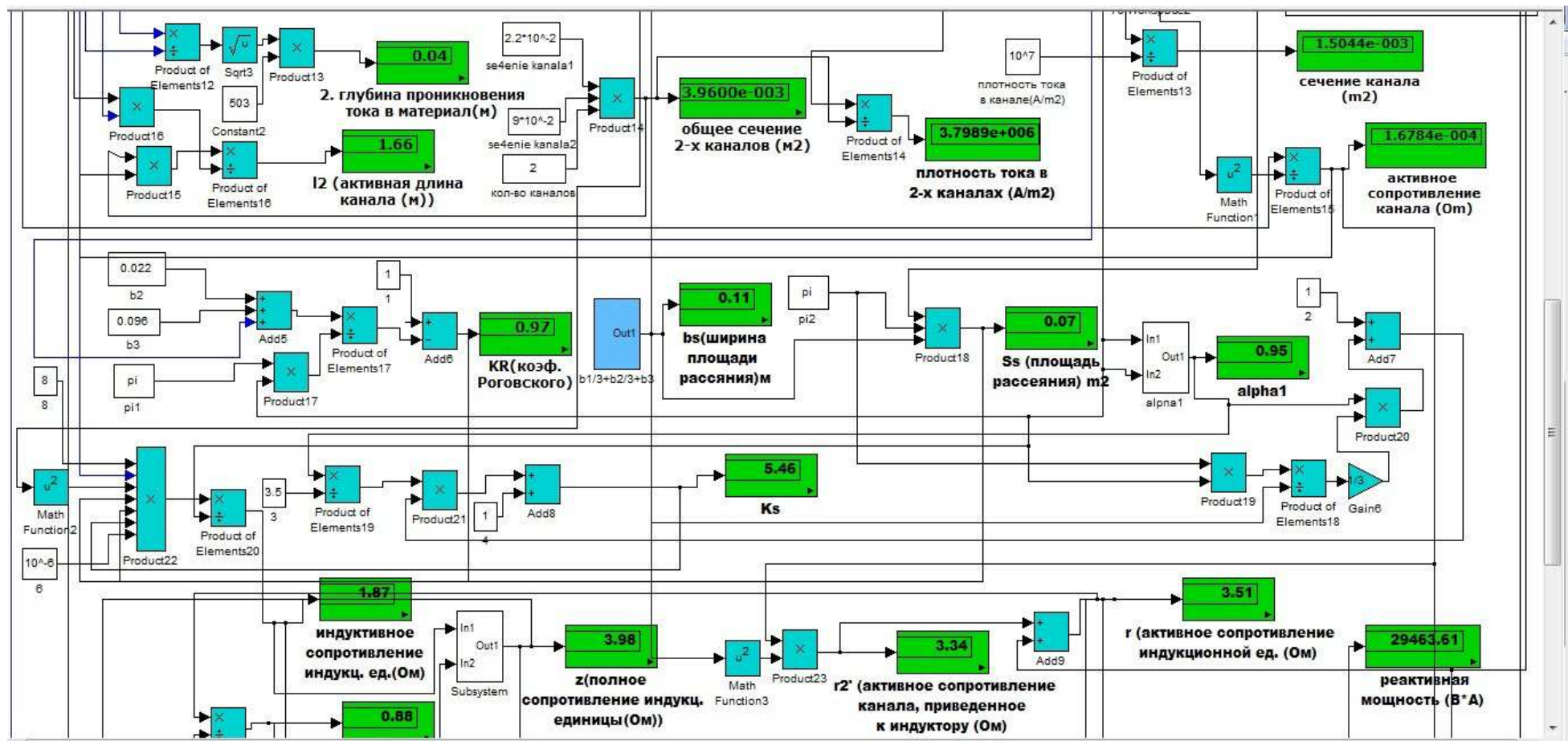


Рисунок 18. 2. Модель расчета параметров индукционной каналной печи для плавки медных сплавов в пакете Simulink.

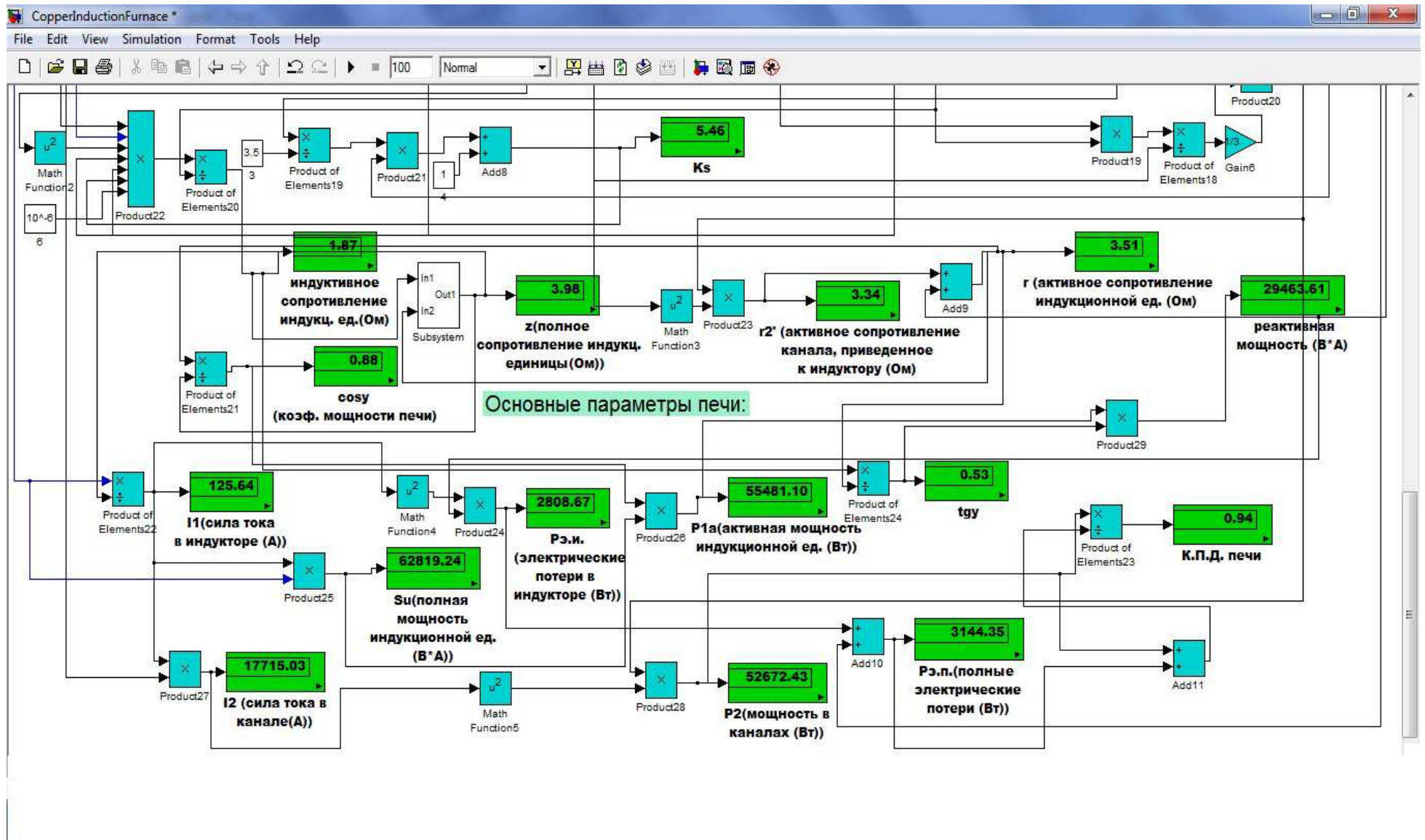


Рисунок 18.3. Модель расчета параметров индукционной каналной печи для плавки медных сплавов в пакете Simulink.

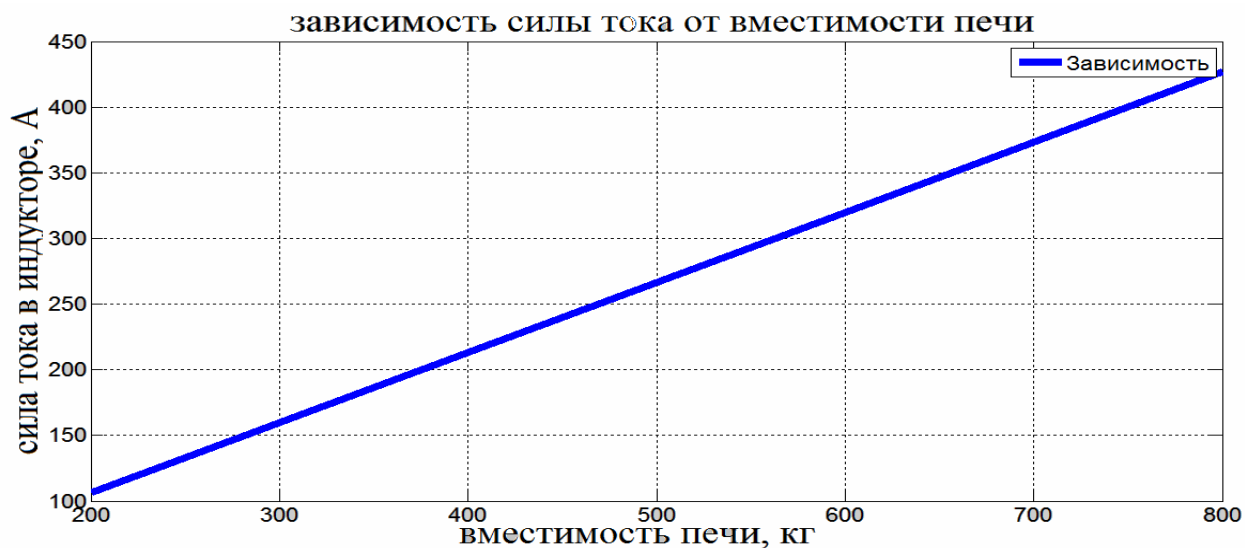


Рисунок 18.4 Зависимость силы тока в индукторе от вместимости печи.

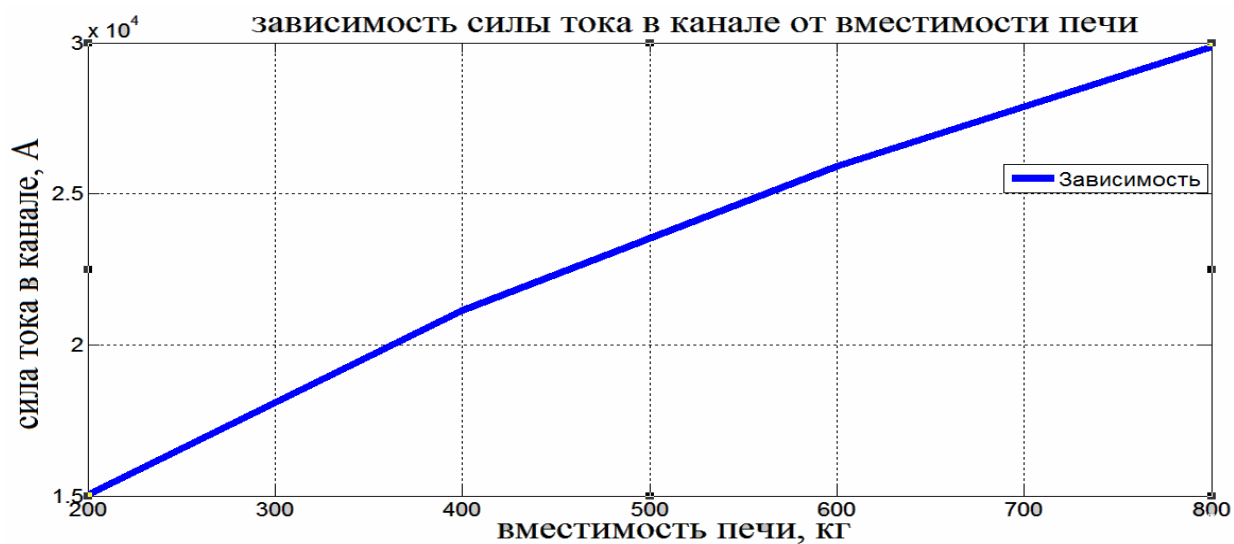


Рисунок 18.5 Зависимость силы тока в канале от вместимости печи.

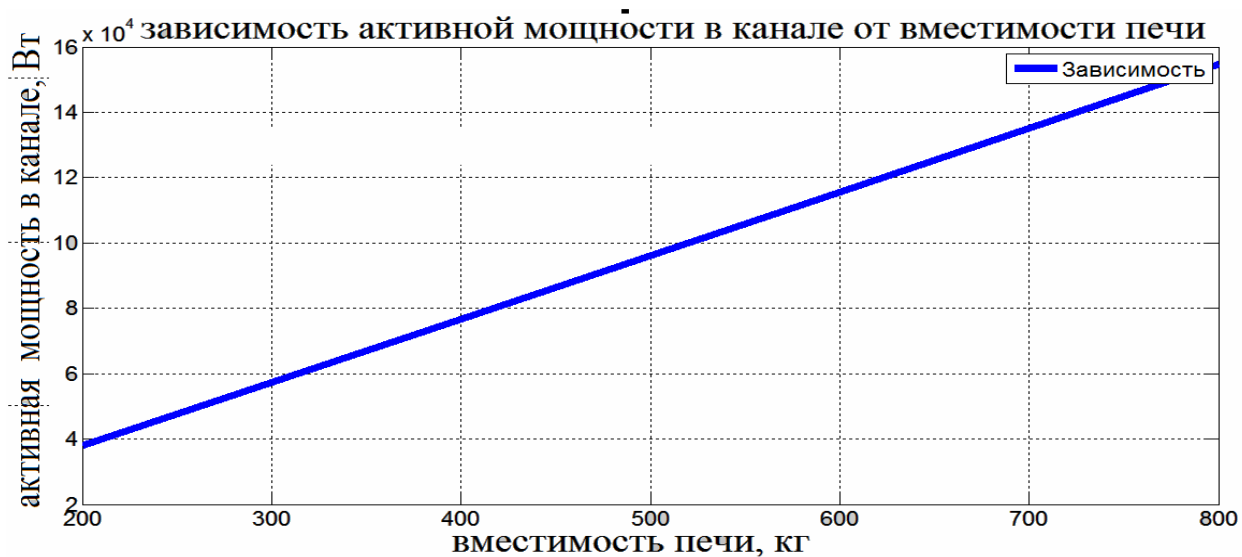


Рисунок 18.6 Заивисимость активной мощности в канале от вместимости печи.

## **19. Моделирование методики расчета параметров индукционной тигельной печи (п.7) в пакете SIMULINK программы MatLab.**

Для анализа влияния отдельных параметров на изменение результатов расчета и выбора рациональных режимов работы электроустановки математическая модель (методика расчета) может быть представлена в виде пакета SIMULINK программы MatLab. На рисунках 19.1-19.3 приведена модель расчета параметров индукционной тигельной печи (п.7) в пакете SIMULINK программы MatLab. На рисунках 19.4-19.5 – графики результатов моделирования.

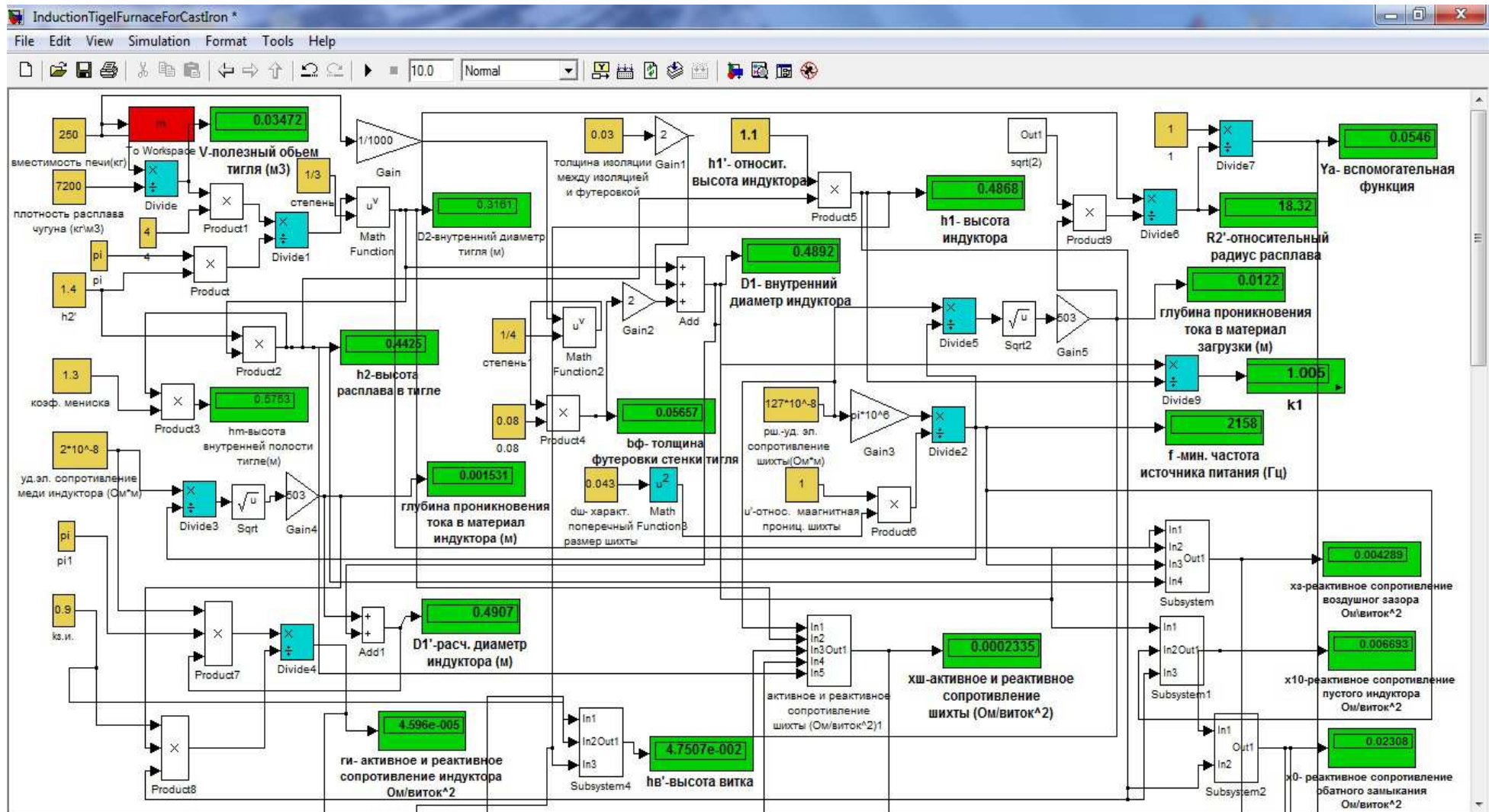


Рисунок 19. 1. Модель расчета параметров индукционной тигельной печи для выплавки синтетического чугуна в пакете Simulink.

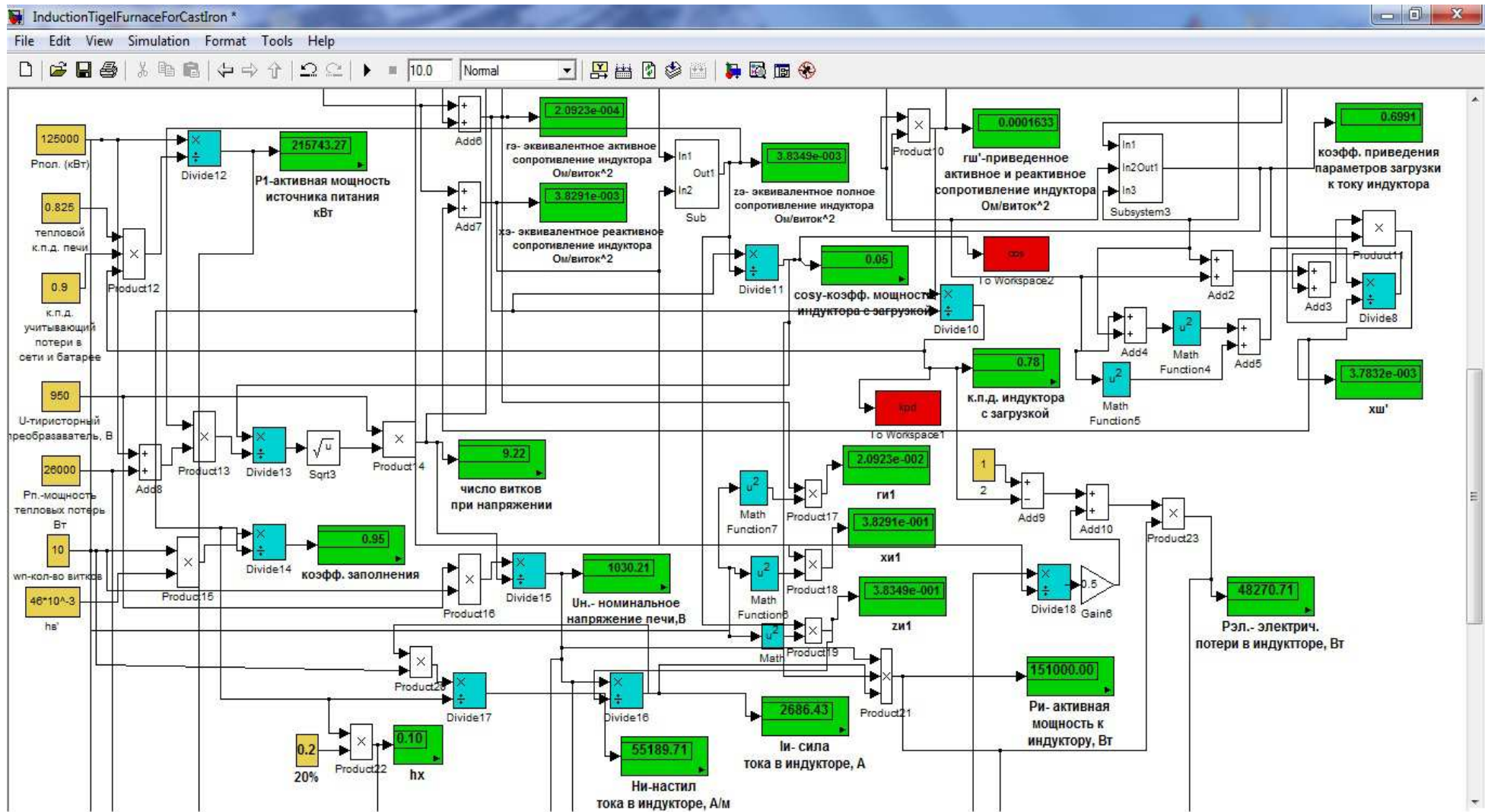


Рисунок 19.2. Модель расчета параметров индукционной тигельной печи для выплавки синтетического чугуна в пакете Simulink.

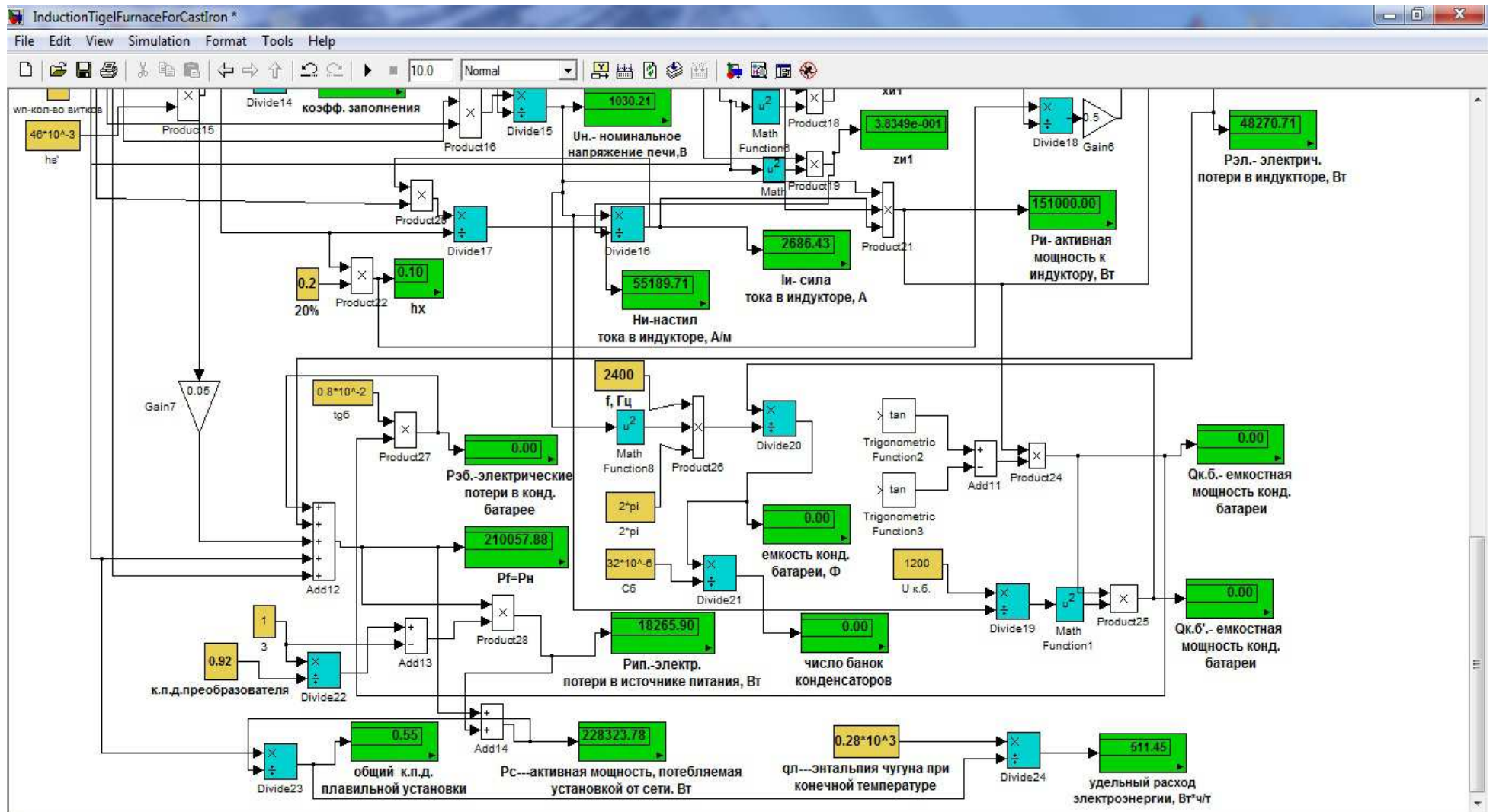


Рисунок 19.3. Модель расчета параметров индукционной тигельной печи для выплавки синтетического чугуна в пакете Simulink.

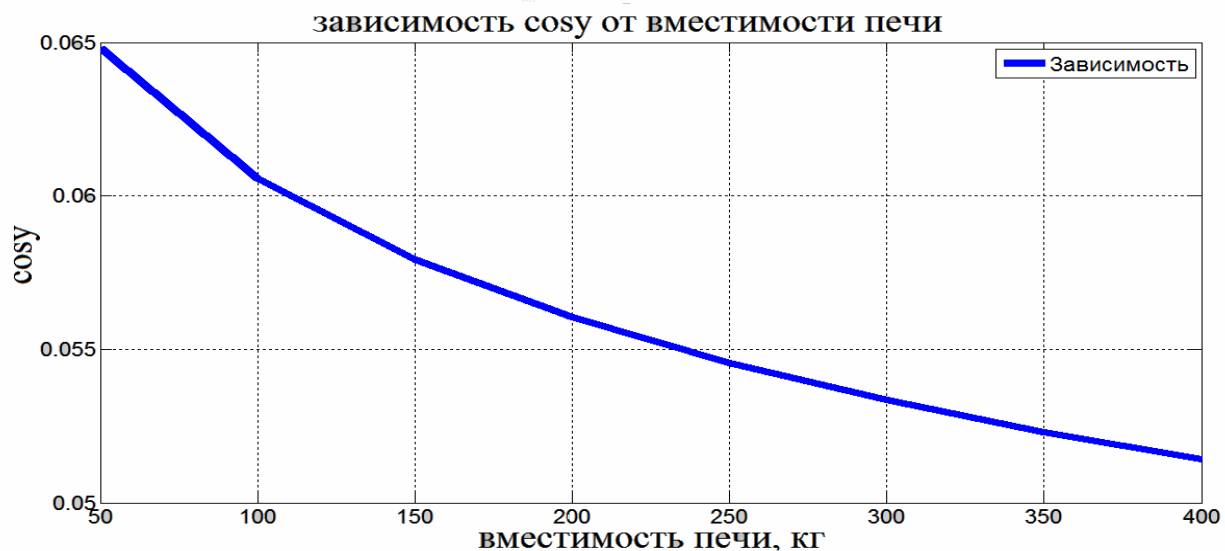


Рисунок 19.4 Зависимость  $\cos \varphi$  от вместимости печи.

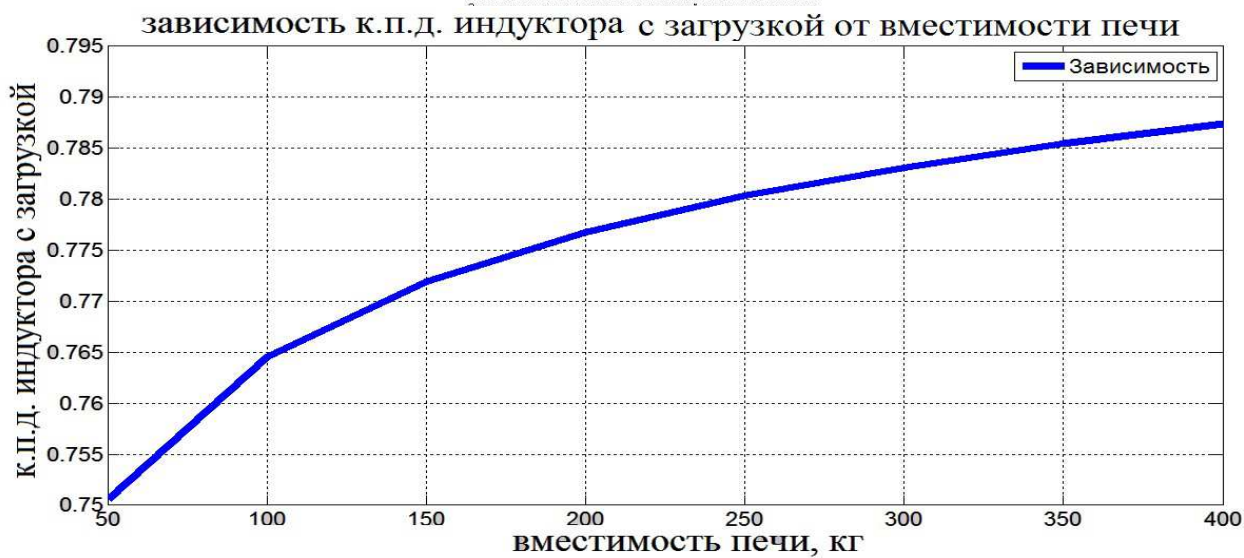


Рисунок 19.5 Зависимость к.п.д. индуктора с загрузкой от вместимости печи.

## 20. Литература.

1. Общая электротехника. Под ред. В. С. Пантюшина. – М. Высшая школа, 1970.– 568 с.
2. Фарнасов Г. А. Электротехника, электроника, электрооборудование. – М. Интернет Инжиниринг, 2000. – 389с.
3. Гецелев З. Н., Балахонцев Г. А., Квасов Ф. И., Черепок Г. В., Варга И. И., Мартынов Г. И. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. – М. Metallurgy, 1983. Под. ред. Добаткина В. И.
4. Фомин Н. И., Затуловский Л. М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М. Metallurgy, 1979. –247 с.
5. Полищук В. П. и др. Магнитодинамические насосы для жидких металлов. Киев, Наукова Думка, 1989. – 254 с.
6. Немков В. С., Слухоцкий А. Е. Расчет параметров коротких индукторов с помощью схем замещения. Трубы ВНИИТВЧ, – Л. Машиностроение, 1970, Вып. 11, с. 26÷35.
7. Шамов А. Н., Бодажков В. А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. – Л. Машиностроение, 1974. – 278 с.
8. Рыкалин Н. Н., Сорокин Л. М. Metallургические ВЧ – плазматроны. – М. Наука, 1987, 112 с.
9. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей. –М. МИСиС, 2000. –271 с.
10. Тир Л. Л., Губченко А. П. Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. –М. Энергоатомиздат, 1988. –120 с.
11. Импульсные источники энергии. Системы, устройства и элементы мощной импульсной энергетики. Каталог разработок для Юй Всесоюзной выставки-ярмарки. Л. 1989.– М., НТЦ МЭФ, 80 с.
12. Электротехнический справочник. Том I, книга первая. – М. Энергия, 1971. – 527с.
13. Постников И. М. Проектирование электрических машин. Киев, Гостехиздат, УССР, 1961. -276 с.

14. Воскресенский А.П. Некоторые вопросы проектирования индукционных вращателей.  
В сб. Труды Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики.  
Том 36 М. 1971
15. Огороков Н. В. Электромагнитное перемешивание металла в дуговых  
сталеплавильных печах. – М. Metallurgy, 1961. -176 с.
16. Мищенко В. Д., Микельсон А. З., Круминь Ю. К. Технология электромагнитного  
транспортирования легких сплавов. – М. Metallurgy, 1980, -128 с.
17. Вольдек А. И. Индукционные магнитодинамические машины с жидкометаллическим  
рабочим телом. – Л. Энергия, 1970. -183 с.
18. Айзатулов Р. С., Кузьменко А. Г., Грачев В. Г, Солодовник Ф. С., Ермоленко А. Ф.  
Электромагнитное перемешивание жидкой стали в металлургии. –М. Metallurgy,  
1996. -284 с.
19. Электротермическое оборудование. Справочник. Под ред. А. П. Альтгаузена. – М.  
Энергия, 1980. -416 с.
20. Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В. MATLAB7. – Москва, NT Press, 2006. – 451 с.

**Таблица 3.1. Параметры расплавляемых металлов и характеристики канальных электропечей.**

Расплавляемый металл	Температура плавления металла, °С	Температура разливки металла, °С	Плотность расплава, г/см <sup>3</sup>	Удельное электросопротивление расплава, мкОм·см	Плотность тока в плавильном канале, А/мм <sup>2</sup>	Удельная мощность, выделяемая в канале, кВт/дм <sup>3</sup>	Естественный коэффициент сжатия печи	Общий коэффициент полезного действия печи	Удельный расход энергии, кВт·ч/т	Угар металла, %
Медь	1083	1160 – 1250	8,3	21	15	40 – 60	0,4 – 0,5	0,60 – 0,72	270 – 330	0,5 – 0,7
Томпаак (90%Cu + 10%Zn)	1045	1160 – 1250	8,2	28		40 – 60	0,4 – 0,5	0,75 – 0,85	230 - 270	0,5 – 0,7
Латунь (67,5%Cu + 32,5 %Zn)	920	1035 – 1140	8,0	40	10	40 – 60	0,60 – 0,75	0,75 – 0,90	190 – 240	0,5 – 0,7
Бронза (93%Cu + 3%Zn + 4%Sn)	1060	1280 – 1295	8,0	35		40 – 60	0,60 – 0,75	0,7 – 0,8	280 – 330	0,5 – 0,7
Алюминий	658	700 – 750	2,4	24	4/10	8/15	0,30/0,25	0,6 – 0,85	350 – 500	0,5 – 0,8
Цинк	419	500	6,5	35	10	60 – 80	0,4 – 0,5	0,8-0,9	90 – 120	2 – 3
Чугун	1100 - 1200	1350 - 1550	6,7	127	3,5/8,0	70 - 90	0,50 – 0,65	0,8-0,66	(30-35)/(400-600)	1,5 – 7,0