

©Романов С.В., Коваленко И.В.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННО-НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

1. Постановка проблемы

При ремонте гражданской и военной техники и снаряжения, в ряде технологических процессах необходимо осуществлять выплавку легкоплавких наполнителей (баббит, церезит и др.) из полужакрытых тонкостенных ферромагнитных емкостей. Использование легкоуправляемого индукционного нагрева токами промышленной частоты обеспечивает энергосбережение в технологиях выплавки без ущерба экологии и безопасности. Его особенность состоит в том, что выполняется глубинный прогрев металла генерированием в нем тепла. Особенно высокие электрические и тепловые характеристики достигаются с помощью конструктивно простых соленоидных индукторов, которые охватывают нагреваемый объект или его часть.

2. Анализ последних исследований

Выплавку наполнителя из полужакрытых ферромагнитных емкостей цилиндрической формы (в дальнейшем - цилиндра) можно разделить на два этапа: 1) нагрев материала цилиндра до температуры плавления наполнителя; 2) плавление наполнителя за счет теплопередачи от стенок цилиндра.

Поскольку для второго этапа требуется гораздо меньшее количество тепла, чем для первого. Это связано с тем, что на данном этапе необходимо лишь поддерживать температуру цилиндра в определенных границах. То есть изменение температуры незначительно (10-20 °С).

На первом же этапе необходимо изменить температуру цилиндра от температуры окружающей среды (15-20 °С) до температуры плавления наполнителя (90-180 °С) за короткий промежуток времени (0,5-1 мин.). Такой режим продиктован особенностями технологического процесса выплавки вещества из цилиндра. В связи с этим расчет параметров индукционного нагревателя целесообразно вести по наиболее нагруженному с точки зрения мгновенной мощности режиму – первоначальный нагрев цилиндра до температуры плавления наполнителя.

3. Основная часть

Расчет нагревателя сводится к определению необходимого теплового режима и на его основе электрических и геометрических характеристик индукционных катушек. При этом необходимо учитывать конструктивные и технологические данные цилиндров, подлежащих индукционному нагреву. Нагреватель должен удовлетворять следующим требованиям: 1) обеспечивать нагрев цилиндра до заданной температуры с необходимой скоростью; 2) не изменять физико-химические свойства извлекаемого вещества; 3) быть безопасным, надежным и экономичным в эксплуатации, удобным при обслуживании и ремонте.

Как известно, основой индукционного нагрева деталей является поверхностный эффект, состоящий в том, что почти вся тепловая энергия выделяется в поверхностном слое металла толщиной Δ , равной глубине проникновения тока в материал. Зависимость удельной мощности $P_{y\partial}$, приходящейся на единицу поверхности нагреваемого слоя детали, от магнитных свойств стали, определяется выражением [1]:

$$H_e^2 \sqrt{\mu_e} = \frac{P_{y\partial} 367}{\sqrt{\rho f}}, \quad (1)$$

где H_e – напряженность магнитного поля на поверхности нагреваемого слоя, А/м;
 μ_e – относительная магнитная проницаемость этого слоя; $P_{y\partial}$ – удельная мощность, Вт/м²;

ρ – удельное сопротивление стали, Ом·м;

f – частота тока, Гц.

Удельное сопротивление материала зависит от его температуры τ и определяется как $\rho = \rho_{20} [1 + \alpha (\tau - 20)]$. Здесь ρ_{20} – удельное сопротивление материала при 20°C, α – температурный коэффициент сопротивления.

При нагреве цилиндров, нагреваемый слой будет расположен как на его наружной поверхности, так и на внутренней. Поэтому удельная мощность определяется по формуле:

$$P_{уд} = \frac{P_t + P_{вв} + \Delta P}{\pi(D_n a_2 + D_{вн} a_2)}, \quad (2)$$

где $P_m = Q_m/t_n$ – мощность, необходимая для разогрева металла цилиндра, Вт;

$P_{вв} = Q_{вв}/t_n$ – мощность, необходимая для плавления вещества, Вт;

$\Delta P = \Delta Q/t_n$ – мощность тепловых потерь, Вт;

$D_n, D_{вн}$ – соответственно наружный и внутренний диаметры нагреваемой детали, м; a_2 – длина нагреваемого участка цилиндра, м.

Для всех слагаемых мощности справедливо выражение $P = Q/t_n$, в котором Q – количество теплоты, а t_n – время нагрева.

Зачастую, геометрическая форма цилиндра такова, что для одновременного и равномерного прогрева необходимо несколько источников тепловой энергии, расположенных вдоль оси цилиндра (наружный диаметр и толщина стенок сильно отличаются в различных осевых сечениях). То есть, вдоль оси цилиндра располагают несколько параллельно или последовательно соединенных индукционных катушек. Поэтому расчет параметров индукционного нагревателя состоит из нескольких частей – по числу индукционных катушек. Но ввиду нестационарности процесса нагрева расчет достаточного количества тепла в различных сечениях цилиндра, а значит и мощности секций индукционного нагревателя следует проводить с учетом теплопередачи между участками цилиндра и теплоотдачи их в окружающую среду. Данная задача решается с помощью цепочечной многокомпонентной модели матричным способом [3].

Таким образом, определив мощность источников тепловой энергии, по формуле (2) рассчитываем удельную мощность, по выражению (1) вычисляется критерий $H_e^2 \sqrt{\mu_e}$. Этот критерий необходим для определения магнитной проницаемости материала цилиндра. Для определения μ_e необходимо также иметь кривую намагничивания стали $B=f(H)$. По данным этой кривой строится зависимость $H_e^2 \sqrt{\mu_e} = f(H)$. Зная значение $H_e^2 \sqrt{\mu_e}$ можно определить μ_e . После того, как μ_e определен, вычисляется глубина проникновения тока в материал цилиндра:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_e f}}. \quad (3)$$

Для расчета электрических характеристик индуктора необходимо составить его эквивалентную электрическую схему замещения, представляющую совокупность активных и реактивных сопротивлений индукционной системы. В соответствии с [2] короткий индуктор можно представить в виде трансформатора с большим рассеянием электромагнитного поля и с относительно большим током холостого хода. Цилиндр является

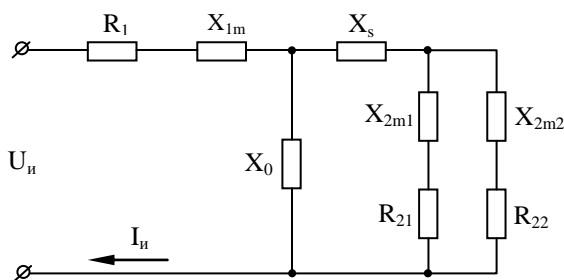


Рис. 1 – Эквивалентная электрическая схема замещения индуктора с цилиндром

одновременно и нагрузкой этого трансформатора и частью его магнитной системы. Схема замещения индуктора с находящимся в нем цилиндром показана на рис. 1. Здесь U_u – напряжение на индукторе; I_u – ток катушки индуктора; R_1 – активное сопротивление

индуктирующего провода; X_{1m} – реактивное сопротивление индуктирующего провода; X_0 – реактивное сопротивление обратного замыкания магнитного потока катушки; X_s – реактивность рассеяния; X_{2m1} – реактивное сопротивление нагреваемого слоя наружной поверхности цилиндра; X_{2m2} – реактивное сопротивление нагреваемого слоя внутренней поверхности цилиндра; R_{21} –

активное сопротивление нагреваемого слоя наружной поверхности цилиндра;
 R_{22} – активное сопротивление нагреваемого слоя внутренней поверхности цилиндра;

Активное и внутреннее реактивное сопротивление цилиндра будут соответственно равны:

$$R_2 = R_{21} R_{22} / (R_{21} + R_{22}), \quad (4)$$

$$X_{2m} = X_{2m1} X_{2m2} / (X_{2m1} + X_{2m2}). \quad (5)$$

Напряжение на зажимах индуктора:

$$\dot{U}_u = \dot{U}_{1m} + \dot{U}_\epsilon + \dot{U}_{2m}, \quad (6)$$

где U_{1m} – составляющая напряжения, уравнивающая э.д.с. наведенную магнитным потоком, проходящим через поперечное сечение обмотки индуктора, В;

U_ϵ – составляющая напряжения, уравнивающая э.д.с. наведенную магнитным потоком, проходящим через воздушный зазор, В;

U_{2m} – составляющая напряжения, уравнивающая э.д.с. наведенную магнитным потоком, проходящим через сечение цилиндра, В.

Составляющая \dot{U}_{1m} определяется:

$$\dot{U}_{1m} = I_u (R_1 + X_{1m}). \quad (7)$$

Для того, чтобы найти активное и реактивное сопротивления индуктирующего провода, необходимо определить активное сопротивление проводника, которым намотана катушка:

$$R_{1n} = \frac{\rho \pi \left(D_k + \frac{nd}{2} \right)}{a_1 d_1 g} \quad (8)$$

где D_k – внутренний диаметр индукционной катушки, м; n – число слоев проводника; d – ширина проводника, м; d_1 – толщина намотки катушки, м; a_1 – длина катушки; g – коэффициент заполнения.

Составляющие сопротивления индуктирующего провода представляют собой произведения:

$$R_1 = R_{1n} K_r, \quad (9)$$

$$X_{1m} = R_{1n} K_x. \quad (10)$$

где K_r – коэффициент увеличения активного сопротивления;

K_x – коэффициент изменения внутреннего реактивного сопротивления.

Значения K_r и K_x определяются как функция от d_1/Δ по формулам:

$$K_r = \frac{d_1}{\Delta} \frac{\operatorname{sh}(2d_1/\Delta) + \sin(2d_1/\Delta)}{\operatorname{ch}(2d_1/\Delta) - \cos(2d_1/\Delta)}; \quad (11)$$

$$K_x = \frac{d_1}{\Delta} \frac{\operatorname{sh}(2d_1/\Delta) + \sin(2d_1/\Delta)}{\operatorname{ch}(2d_1/\Delta) - \cos(2d_1/\Delta)}. \quad (12)$$

Составляющая напряжения \dot{U}_e записывается как:

$$\dot{U}_e = I_u \cdot jX_e, \quad (13)$$

где X_e – реактивное сопротивление, обусловленное магнитным потоком в воздушном зазоре, Ом.

Для того чтобы определить составляющую \dot{U}_{2m} необходимо активное и реактивное сопротивления цилиндра привести к току индуктора.

$$\dot{U}_{2m} = I_u (R'_2 + jX'_{2m}). \quad (14)$$

Здесь R'_2 и X'_{2m} – активное и реактивное сопротивление цилиндра, приведенные к току индуктора, которые в свою очередь можно представить:

$$R'_2 = C R_2; \quad (15)$$

$$X'_{2m} = C(X_s + X_{2m} + ((X_{2m} + X_s)^2 + R_2^2)/X_0), \quad (16)$$

где $C = 1/((R_2/X_0)^2 + (1 + (X_s + X_{2m})/X_0)^2)$ – коэффициент приведения активного сопротивления цилиндра.

Для определения сопротивлений R_2 и X_{2m} (4, 5) необходимо найти активное и реактивное сопротивление наружной и внутренней поверхности цилиндра:

$$R_{21} = \pi \rho M^2_1 A_{ny1} / a_2; \quad (17)$$

$$R_{22} = \pi \rho M^2_2 A_{ny2} / a_2; \quad (18)$$

$$X_{2m1} = \pi \rho M^2_1 B_{ny1} / a_2; \quad (19)$$

$$X_{2m2} = \pi \rho M^2_2 B_{ny2} / a_2. \quad (20)$$

В формулах (17–20) $M_1 = D_{вн}/1,414$ – внутренний диаметр цилиндра в относительных единицах;

$M_2 = D_{н}/1,414$ – наружный диаметр цилиндра в относительных единицах.

Коэффициенты $A_{нц}$ и $B_{нц}$ являются справочными данными, и их можно определить по формулам:

$$A_{нц} = 0,925/M^{0,8611}; \quad (21)$$

$$B_{нц} = 1,4388/M^{1,0025}. \quad (22)$$

Подставив (17–20) в (4, 5) получим выражения для расчета активного и реактивного сопротивления, нагреваемого слоя цилиндра:

$$R_2 = \frac{\pi \rho M_1^2 A_{нц1} M_2^2 A_{нц2}}{1,05 a_2 (M_1^2 A_{нц1} + M_2^2 A_{нц2})}; \quad (23)$$

$$X_{2m} = \frac{\pi \rho M_1^2 B_{нц1} M_2^2 B_{нц2}}{a_2 (M_1^2 B_{нц1} + M_2^2 B_{нц2})}. \quad (24)$$

Теперь, выразив $X_s = X_g + X_{Im}$ и сгруппировав слагаемые напряжения на индукторе можно записать:

$$\dot{U}_u = I_u [R_1 + R'_2 + j(X_s + X'_{2m})]. \quad (25)$$

Реактивное сопротивление X_0 (рисунок 1) определяет составляющую магнитодвижущей силы, необходимой для преодоления магнитным потоком пространства вне индуктора и рассчитывается по формуле:

$$X_0 = X_{I0} \kappa_1 a_1 / (a_1 - a_2 \kappa_1), \quad (26)$$

где $X_{I0} = 2\pi f S_1 \mu_0 / a_1$ – реактивное сопротивление отрезка a_1 пустого индуктора бесконечной длины, площадь окна которого S_1 , Ом;

κ_1 – поправочный коэффициент Нагаока [1]. Он учитывает магнитное сопротивление обратного замыкания и зависит от отношения диаметра индуктора к его длине.

Для определения полного эквивалентного сопротивления индуктора $Z^2_3 = R^2_3 + X^2_3$, необходимо найти эквивалентное активное и реактивное сопротивление индуктора:

$$R_3 = R_1 + R'_2; \quad (27)$$

$$X_3 = X_{Im} + X'_2. \quad (28)$$

Следующий этап расчета индукционной катушки заключается в определении основных электрических параметров индуктора: электрический КПД индуктора: 1) $\eta_u = R'_2/R_3$; 2) коэффициент мощности индуктора: $\cos \varphi_u = R_3/Z_3$; 3) ток в одновитковом индукторе: $I'_u = I_u = \sqrt{\frac{(P_M + P_{BB} + \Delta P)1000}{R'_2}}$; 4) напряжение на одновитковом индукторе: $U'_{инд} = I'_u Z_3$; 5) число витков индуктора: $W = U_{сет}/U'_{инд}$; 6) ток катушки: $I_{кат} = I'_u/W$; 7) плотность тока в катушке: $J_{кат} = I_{кат}/S_{пров}$.

Список использованных источников:

1. Слухоцкий А. Е. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
2. Немков В. С. Расчет параметров коротких индукторов с помощью схем замещения / В. С. Немков, А. Е. Слухоцкий // Труды ВНИИТВЧ. – Л.: Машиностроение, 1970. – Вып. 11. – С. 26–36.
3. Романов С. В. Тепловая модель разделения многокомпонентных систем / С. В. Романов // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. / ХГПУ. – Харьков, 1999. – Вып. 53. – С. 150–152.

Романов С.В., Коваленко И.В. «Расчет параметров индукционно-нагревательного оборудования, применяемого для критических технологий».

В статье предложена методика расчёта электрических параметров индукционно-нагревательного устройства, которая сводится к определению необходимого теплового режима и на его основе электрических и геометрических характеристик индукционных катушек.

Ключевые слова: схема замещения, индуктор, индукционный нагрев, технология.

Романов С.В., Коваленко І.В. «Розрахунок параметрів індукційно-нагрівального устаткування, що використовується для критичних технологій».

У статті запропонована методика розрахунку електричних параметрів індукційно-нагрівального пристрою, яка зводиться до визначення необхідного теплового режиму і на його основі електричних і геометричних характеристик індукційних котушок.

Ключові слова: схема заміщення, індуктор, індукційний нагрів, технологія.

Romanov S.V., Kovalenko I.V. “Calculation of parameters of induction-heater equipment applied for critical technologies”.

The method of calculation of electric parameters of induction-heater device is offered in the article, which is taken to determination of the necessary thermal mode and on his basis of electric and geometrical descriptions of induction-coils.

Key words: chart of substitution, inductor, induction heating, technology.

Стаття надійшла до редакції 1 листопада 2012 р.