

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

**Габдрасул Илияс Дүсенұлы**

gabdrasul@mail.ru

Магистрант ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

Научные руководители - К.М. Дюсенов, Б.А. Жакишев

Индукционные устройства промышленной частоты, для нагрева магнитной стали, являются одной из развивающихся областей индукционного нагрева. Теоретические вопросы индукционного нагрева непрерывно разрабатываются, главным образом, в направлении автоматизации регулирования процессов нагрева, расчета определения источников тепла, применения тиристорных элементов и т.п.

Проектируемый индукционный нагреватель должен обеспечить одностадийный нагрев продольном магнитном поле загрузки круглого или квадратного сечения. Для нагрева должен быть использован секционный индуктор, питающийся от сети с номинальным напряжением  $U_{ном}$  равным 220 В и промышленной частотой  $f$  равной 50 Гц.

Расчет проводится для двух режимов, горячего и холодного, с целью учета изменения энергетических параметров в течение нагрева.

Устройства для нагрева магнитной стали, отличаются хорошими энергетическими параметрами, высокой производительностью, простотой конструкции и некоторыми эксплуатационными преимуществами.

Метод индукционного нагрева основан на двух известных физических законах: законе электромагнитной индукции и законе выделения тепла в проводнике, при протекании по нему электрического тока.

Протекание переменного тока сопровождается неравномерным распределением плотности тока по сечению проводника и, следовательно, неравномерным выделением мощности. Наибольшее значение плотности тока достигается на поверхности проводника, наименьшее – в центре. Это явление названо поверхностным эффектом. Значительная часть энергии (87%) выделяется в слое, называемом глубиной проникновения электромагнитной волны в данный проводник.

Выделяющаяся в проводнике мощность зависит от конфигурации проводника и его электрофизических свойств  $\rho$  и  $\mu$ , а также от конфигурации,  $f$  и  $H$  электромагнитного поля, где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление; Ом·м;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость;

$f$  - промышленная частота, Гц,

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м.

Энергетические характеристики индукционных нагревательных установок зависят от конфигурации, геометрических размеров и электрофизических параметров нагреваемого проводника и индуктора, а также от вышеназванных параметров электромагнитного поля.

Расчеты индукторов производятся аналитическим методом, основанном на решении дифференциальных уравнений Максвелла.

А.Н.Шамов и В.А.Бадажков предлагают следующую схему расчета, основанную на методе расчета по магнитному потоку.

Определяем глубину проникновения тока  $\Delta$  в индуктор и сталь, м

$$\Delta = 503 \cdot \sqrt{\rho / (\mu \cdot f)} \quad (1)$$

Под глубиной проникновения подразумевается такая глубина, на которой напряженности электрического и магнитного полей уменьшается до  $1/e = 0,368 (e = 2,71)$

величины напряженности на поверхности тела. Формально считается, что ток проходит лишь в слое с равномерной плотностью, равной  $1/\sqrt{2}$  (1 м – максимальная плотность тока, А), а за его пределами отсутствует. При этом активное сопротивление вычисляется также, как сопротивление пластины толщиной при постоянном токе, распределенном по всему сечению равномерно. Электрические свойства стали определяются удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  и относительной магнитной проницаемостью  $\mu$  или кривой намагничивания  $B = f(H)$ . Значения  $\rho$  зависят от содержания углерода в стали и от температуры, а также от предыдущей и механической обработки, что приводит к некоторому разбросу  $\rho$ . Однако при определении характеристик индукционных устройств в формулы входит  $\sqrt{\rho}$ , что снижает погрешность примерно в два раза. Ниже в табл. 1 приведены зависимости  $\rho$  от температуры для нескольких марок сталей.

Таблица 1.

Зависимости  $\rho$  от температуры для нескольких марок сталей

Материал		$\rho \times 10^{-8}, \text{ Ом} \cdot \text{ м при } t, \text{ }^\circ\text{C}$						
		20	100	200	300	400	500	600
Сталь	1,5	18,9	23,8	31,2	39,9	50,4	56,3	62,6
X18H	10T	71,0	74,0	85,0	91,0	97,0	102	107
X13	-	50,0	58,0	68,0	77,0	85,0	94,0	102

Магнитная проницаемость  $\mu$  до  $600 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$  слабо зависит от температуры, а при температуре  $T$  кюри резко уменьшается до единицы. Так как в данной задаче имеет место низкотемпературный нагрев, то принимаем  $\mu$  независимым от температуры, а зависимым только от  $H$  – напряженности магнитного поля и  $x$  – глубины, на которой определяется  $\mu$ .

Относительную магнитную проницаемость  $\mu$ , легко определить зная кривую намагничивания, из выражения для магнитной индукции

$B = \mu_0 \cdot \mu H$  ( $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ ), но для каждой марки стали кривая намагничивания различна. Возникает необходимость допустить некоторую погрешность в расчете и применить некоторую усредненную кривую намагничивания  $B = f(H)$ .

Поверхностному эффекту в ферромагнитной среде посвящено много работ, но наиболее точно отражает физическое содержание процесса работа Л.Р.Неймана, в которой предлагается основную кривую намагничивания аппроксимировать отрезками парабол:  $B = H^{1/d}$ , где  $d$  – выбирается в зависимости от материала и степени магнитного насыщения.

Для различных материалов  $4 \leq d \leq 20$ ; при таких значениях вычисленная зависимость  $B = f(H)$  близка к действительной.

Рассмотрим цилиндрический индуктор, охватывающий внешнюю поверхность нагреваемой детали. Очевидно, что наибольшая напряженность магнитного поля будет наблюдаться внутри индуктора, и в особенности у внутренней стороны поверхности провода, а наименьшая – с внешней его стороны. Явление концентрации тока на внутренней поверхности провода индуктора носит название кольцевого эффекта, который проявляется тем сильнее, чем выше частота и меньше диаметр контура. При внесении внутрь индуктора, нагреваемого объекта, концентрация тока усиливается за счет эффекта близости, поскольку индуцированный в объекте ток находится в противофазе с током в индукторе. Все это приводит к необходимости применения поправочных коэффициентов  $K_r$  и  $K_x$  – коэффициента увеличения активного сопротивления коэффициента изменения внутреннего реактивного сопротивления соответственно. Эти коэффициенты приведены в зависимости от отношения  $2 \cdot d_1 / \Delta$ .

При  $0 < d_1 / \Delta < 1$  можно принять  $K_r$  равным 1;

$$K_x = 2/3 \cdot (d_1 / \Delta)^2. \quad (2)$$

где  $d_1$  - диаметр провода.

Тогда формулы сопротивления индуктора будут иметь вид

$$X_1 = \rho_1 \pi D_1 K_x / (a d_1 g), \quad (3)$$

$$r_1 = \rho_1 \pi D_1 K_r / (a d_1 g), \quad (4)$$

где  $g$  – коэффициент заполнения;

$D_1$  -  $\Phi$  индуктора;

$a$  – длина индуктора.

Определяем активное и реактивное сопротивление загрузки (заготовки, магнитопровода).

Для определения электрофизических свойств магнитопровода, как было указано выше, в первую очередь необходимо знать кривую намагничивания, т.е. аппроксимирующую ее функцию  $B = H^{1/2}$ . Но все дело в том, что кривые  $B(t)$  и  $H(t)$  не являются синусоидальными. Поэтому в ряде работ, авторы идут на некоторые допущения и учитывают только лишь первые гармоники  $B_{m1}$  и  $H_{m1}$ , вводя предварительно коэффициенты формы  $K_B$  и  $K_H$  соответственно. Тогда  $B_{m1} = K_B \cdot B_m$ ;  $H_{m1} = K_H \cdot H_m$ . Выберем два вида кривых, разложенных в ряде Фурье, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Два вида кривых, разложенных в ряде Фурье

Математическое выражение	Характер кривой
$f(\omega t) = \frac{4am}{\pi}(\sin \omega t + 1/3 \sin 3\omega t + 1/5 \sin 5\omega t + \dots)$	
$f(\omega t) = \frac{8am}{\pi^2}(\sin \omega t + 1/9 \sin 3\omega t + 1/25 \sin 5\omega t + \dots)$	

Практика показывает, что наиболее близкими к истинным значениям являются коэффициенты  $K_H = 8/\pi^2$ , так как в цепях с насыщенной сталью кривые  $i(t)$  и  $H(t)$  всегда имеют заостренную форму, а коэффициент  $K_B$  изменяется в узких пределах и довольно близок к  $4/\pi$ .

Для вычисления сопротивления  $r_2$  и  $X_2$  необходимо знать значение  $\mu$  с учетом коэффициентов формы кривых  $H$  и  $B$ , а также поверхностного эффекта. Как правило, из тепловых расчетов мы имеем только лишь удельную мощность  $P_o$ . В предложен метод определения  $\mu_e$  и  $H_{me}$  по известному  $P_o$ , графическим путем. С помощью формулы

$$H_{me}^2 \cdot \sqrt{\mu_e} = \frac{1,01 \cdot 10^3 \cdot P_o}{\sqrt{\rho_2 f} \cdot \sqrt{K_H^3 \cdot K_B \cdot f_1(d)}}, \quad (5)$$

и задаваясь различными значениями  $P_o$  строим зависимость  $\mu$

$$H_{me}^2 \sqrt{\mu_e} = f(P_o). \text{ Имея такой график можно легко определить } \mu_e \text{ и } H_{me}.$$

Как было отмечено выше, мощность, выделяемая в загрузке, а следовательно и ее сопротивление, зависят от конфигурации загрузки. Исследования и вывод зависимостей для различных систем, индуктор-загрузка рассмотрены в работе А.М.Вайнберга. Для интересующего нас случая – полный цилиндр внутри индуктора, вычислены выражения функций Бесселя  $F_{цил}$ ,  $G_{цил}$  для различных аргументов  $r_H \cdot \sqrt{2}/\Delta$  и  $r_B \cdot \sqrt{2}/\Delta$  изменяющихся в пределах от 0,2 до 7,0, которые представлены в виде таблиц.

С учетом всего вышесказанного, активное и внутреннее реактивное сопротивление определяются по следующим формулам:

$$r_2 = \pi \cdot D_2 \cdot \rho_2 \cdot F_{\text{нуп}} \cdot f_1(d) / (\Delta_2 \cdot \alpha_2), \quad (6)$$

$$x_2 = \pi \cdot D_2 \cdot \rho_2 \cdot G_{\text{нуп}} \cdot f_2(d) / (\Delta_2 \cdot \alpha_2), \quad (7)$$

Определяем индуктивное сопротивление в зазоре  $X_S$  и обратного замыкания магнитного потока  $X_e$ .

Внутри индуктора длиной  $a_1$  находится нагреваемый объект длиной  $a_2$ , также приведены магнитная и электрическая схема замещения. Полное приведенное сопротивление нагреваемого тела:

$$Z_2 = \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_u} = \frac{jX_e [r_2 + j(X_S + X_2)]}{r_2 + j(X_e + X_S + X_2)} = r_2' + jX_2. \quad (8)$$

Разделяя мнимую и действительную части, находим

$$r_2' = r_2 \cdot C, \quad (9)$$

$$X_2' = C \cdot [X_S + X_e + \frac{(X_S + X_2)^2 + r_2^2}{X_e}], \quad (10)$$

$$C = \frac{1}{(r_2/X_e)^2 + [1 + (X_S + X_2)/X_e]^2}, \quad (11)$$

где  $C$  – коэффициент проведения активного сопротивления

Индуктивное сопротивление рассеяния  $X_S$  рассчитывается для равномерного поля на участке  $a_2$

$$X_S = \omega \mu_0 S / a_2 = 2\pi f \mu_0 \pi (D_1^2 - D_2^2) / 4a_2. \quad (12)$$

Магнитное сопротивление пути обратного замыкания  $R_{me}$  складывается из  $R_{m1}$  – магнитного сопротивления участка обратного замыкания вне индуктора.

$$\text{Конечная формула} \quad X_e = \frac{X_{10} \cdot K_n}{1 - K_n}, \quad (13)$$

где  $X_{10}$  – реактивное сопротивление пустого индуктора длиной

$$K_n \text{ – коэффициент Нагаока. } X_{10} = \omega \mu_0 S_1 / a_1 = 2\pi f \mu_0 \cdot \pi D_1^2 / 4a_1, \quad (14)$$

$$\text{где } S_1 \text{ – площадь окна индуктора } K_n = \frac{2,3}{2,3 + D_2/a_2} \text{ при } D_2/a_2 < 5, \quad (15)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота. Сопротивление нагруженного индуктора

$$\left. \begin{aligned} r_u &= r_1 + r_2 \\ x_u &= x_1 + x_2 \\ z_u &= \sqrt{X_u^2 + r_u^2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\text{Электрический к.п.д. индуктора} \quad \eta = r_2' / r_u. \quad (17)$$

$$\text{Коэффициент мощности индуктора} \quad \cos \varphi = r_u / z_u. \quad (18)$$

$$\text{Мощность, передаваемая в нагреваемую деталь} \quad P_2 = \pi D_2 a_2 p_0. \quad (19)$$

$$\text{Ток в индукторе} \quad I'_u = I_u \cdot W = \sqrt{P_2 / r'_2}. \quad (20)$$

$$\text{Напряжение на индукторе} \quad U'_u = U_{u/w} = I'_u \cdot Z_u. \quad (21)$$

$$\text{Мощность, подводимая к индуктору} \quad P_u = P_2 / \eta. \quad (22)$$

Испытания показали, что расчетные данные совпадают с практическими результатами, что сокращает время на разработку и создание оптимальной нагревательной установки.

Расчетно-аналитически определен расчет электрофизических параметров индукционной единицы печи, разработаны закономерности индукционного нагрева и проведен анализ и оценка энергоэффективности индукционного нагрева.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке установок индукционного нагрева, для спекания изоляции с различными физическими свойствами, с учетом особенностей требований к их нагреву.

#### Список использованных источников

1. К.М. Дюсенов, С.Ю. Кравчук, Р.А. Тухфатуллин, Повышение эффективности работы теплотехнологического оборудования для термообработки длинномерных полимерных покрытий электрических кабелей, Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении» т. 1, Иваново, 1989, с. 47 – 48.
2. К.М. Дюсенов, А.П. Кислов, В.П. Кислова, Р.А. Тухфатуллин, Электрохимическая нагревательная установка, Тезисы докладов III Всесоюзной научной конференции «Электрохимическая энергетика», Москва, 1989, с. 33-34.
3. В.А. Григорьев, В.М. Зорин, Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник, т.2 – М.: Энергоатомиздат, 1988, с. 560.
4. А.Е. Слухоцкий, Установки индукционного нагрева. Л.: Энергоиздат, 1981, - с. 326.
5. А.Б. Кувалдин, Индукционный нагрев ферромагнитной стали. М.: Энергоатомиздат, 1988, с. 198.
6. А.Н. Вайнберг, Индукционные плавильные печи, М.: Государственное энергетическое издательство, 1960, 340 с.
7. В.С. Немков, В.Б. Демидович, Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоиздат, 1988, 280 с.
8. А.П. Кислов, Моделирование электромагнитной системы «Индуктор – загрузка – магнитопровод». Труды 5-ой Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение», Алушта, 2003, с. 475-478.
9. А.А. Адомавичюс, В.П. Белоглазов, К.М. Дюсенов, Расчет элементов оборудования термической обработки полимерных покрытий длинномерных материалов, Механика XX, Материалы конференции «Интенсификация производства создания новых технологий, изделий и материалов», Каунас, 1989, с. 25-27.