

УДК 621.537.85

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНДУКТИВНО-КОНДУКТИВНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

А.И. Елшин¹, В.В. Кожухов², П.А. Елшин³

¹Арктический государственный агротехнологический университет, г. Якутск

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

³ООО «Сибполимерстрой», г. Новосибирск

В статье представлены конструктивные особенности индуктивно-кондуктивных нагревателей, определены взаимосвязи между электромагнитными нагрузками, свойствами материала и размерами теплообменника, приведены результаты составления универсальной зависимости основных параметров индуктивно-кондуктивных нагревателей в функции теплопроизводительности, частоты и величины напряжения. В качестве констант проектирования приняты величины, определяемые свойствами и стоимостью материалов, условиями нагревостойкости и электробезопасности, технологическими возможностями производства и условиями эксплуатации. Эти величины выбираются в начале проектирования и сохраняются постоянными до получения результатов расчета приемлемых основных размеров устройства. Получены номограммы зависимости толщины стенки камеры нагрева от величины плотности тока и теплового потока. Выбор оптимального результата проектирования осуществляется путем экономической оценки исследуемых вариантов с точки зрения минимизации затрат на производство и потерь электроэнергии при эксплуатации электронагревателя. Приведен алгоритм проектирования главных размеров однофазных и трехфазных индуктивно-кондуктивных нагревателей мощностью от 1 до 250 кВт в единице изделия на напряжение 0,4 кВ и частотой 50 Гц и представлены результаты расчета основных массо-стоимостных показателей. Анализ расчетных данных свидетельствует о предпочтительности электронагревателей с большей теплопроизводительностью с точки зрения удельной стоимости и удельной массы. В то же время относительные капитальные затраты средств на единицу массы изделия остаются практически постоянными.

Ключевые слова: индуктивно-кондуктивный нагреватель, алгоритм расчета, оптимальные параметры, массо-стоимостные показатели.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-37-51

Введение

Индуктивно-кондуктивный нагреватель проектируется в соответствии с требованиями ГОСТ [1–4] и должен обладать высокими энергетическими характеристиками, приемлемыми массогабаритными показателями, быть удобным в эксплуатации, простым и дешевым в производстве. Достижение определенных качеств индуктивно-кондуктивного нагревателя обусловливается рациональным выбором основных размеров, а также соответствующих удельных нагрузок активных материалов – плотности тока в первичной обмотке и теплообменнике и индукции в сердечнике.

Важное значение имеет культура производства, технологический процесс изготовления индуктивно-кондуктивного нагревателя и квалификация производственного персонала, способного корректно изменять соотношения основных геометрических параметров устройства с учетом свойств используемых материалов.

1. Описание объекта

Новая конструктивная схема индуктивно-кондуктивного нагревателя (рис. 1), используемая в качестве основной, содержит магнитопровод 1 с первичными обмотками 2, теплообменник 3 в виде камеры нагрева из двух concentric cylinders, образующих щелевой канал для теплоносителя, а также присоединительные патрубки 4, электромагнитный пускатель 5, блок-терморегулятор 6.

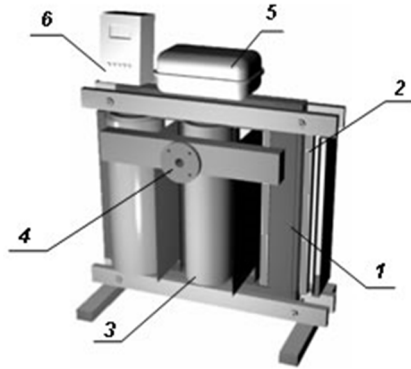


Рис. 1 – Общий вид индуктивно-кондуктивного нагревателя

Fig. 1 – General view of a three-phase inductive-conductive heater

Камера расположена соосно первичной обмотке 2 и отделена от нее воздушным промежутком, величина которого связана как уровнем электробезопасности обслуживания, так и тепловым режимом функционирования обмотки.

При подключении обмоток к первичной сети промышленной частоты в магнитопроводе создается магнитный поток, который *индуктивным* путем наводит во вторичной обмотке – камере нагрева токи порядка нескольких килоампер при низком напряжении, не превышающем 2 В. Под

действием джоулевых потерь в камере нагрева выделяется тепло, нагревающее *кондуктивным* способом любой теплоноситель – твердый, жидкий или газообразный.

При проектировании определяются главные размеры индуктивно-кондуктивного нагревателя для ряда мощностей на стержень магнитопровода.

В данной работе рассматриваются вопросы создания алгоритма поискового расчета основных геометрических размеров:

- внутреннего диаметра обмотки D ,
- высоты обмотки h ,
- радиального размера первичной обмотки b ,
- толщины стенки теплообменника a .

В качестве исходных данных для проектирования приняты следующие.

- 1) теплопроизводительность нагревателя Q , Вт;
- 2) число фаз m ;
- 3) частота f , Гц;
- 4) номинальное первичное напряжение U , В.

В качестве констант проектирования приняты величины, определяемые свойствами и стоимостью материалов, условиями нагревостойкости и электробезопасности, технологическими возможностями производства и условиями эксплуатации.

К ним относятся:

- 1) максимальная индукция в стержне B_m , температура T и коэффициент заполнения сталью k_c ;
- 2) плотность тока в первичной обмотке Δ , А/м²;
- 3) средняя плотность тока в стенках теплообменника Δ_t , А/м² или средняя плотность теплового потока от стенок теплообменника к теплоносителю q_s , Вт/м².

Эти величины выбираются в начале проектирования и сохраняются постоянными до получения результатов расчета приемлемых основных размеров устройства.

Для всей серии сохраняются активные материалы: первичная обмотка из алюминиевого провода марки АПСД с прямоугольным сечением провода и двухслойной изоляцией из стекловолна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком с допустимым температурным диапазоном от -60 до $+155$ °С, материал теплообменника – нержавеющая немагнитная сталь марки 12Х18Н10Т толщиной 1...10 мм, сердечник магнитопровода из холоднокатаной анизотропной электротехнической стали марки 3405–3413 (ГОСТ 21427.1–83) с толщиной листов 0,35 мм. Удельные потери в стали при индукции 1,5 Т составляют 1,3...1,5 Вт/кг.

Выбор оптимального результата проектирования осуществляется путем экономической оценки исследуемых вариантов с точки зрения минимизации затрат на производство и потерь электроэнергии при эксплуатации электронагревателя.

2. Определение взаимосвязи между электромагнитными нагрузками, свойствами материала и размерами теплообменника

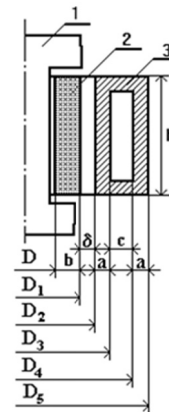
Основные геометрические размеры, расчет которых необходимо произвести, приведены на рис. 2.

Рис. 2 – Размеры индуктивно-кондуктивного нагревателя:

1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – теплообменник

Fig. 2 – Dimensions of inductive-conductive heater:

1 – magnetic circuit; 2 – winding; 3 – heat exchanger



На первом этапе проектирования определяются пределы изменения толщины стенки теплообменника a при заданных свойствах материала ρ_t , Ом · м, и величины теплового потока q_s , Вт/м², с поверхности камеры нагрева.

Для этого получим соотношение между этими величинами при условии теплообмена только с внутренней поверхности теплообменника, обращенной к теплоносителю. Теплоотдачей от верхней и нижней торцевых крышек теплообменника пренебрегаем ввиду малости поверхности.

Плотность теплового потока q_s можно рассчитать как отношение теплового потока к общей площади поверхности теплообменника, обращенной к теплоносителю:

$$q_s = \frac{Q}{\pi(D_3 + D_4)h}. \quad (1)$$

Активная мощность по закону Джоуля–Ленца, выделенная в двух стенках при протекании тока,

$$Q = \Delta_t^2 \cdot h \cdot a \cdot \rho_t \cdot \pi(D_3 + D_4). \quad (2)$$

Объединяя выражения (1) и (2), устанавливаем связь между плотностью теплового потока, плотностью тока, удельной электропроводностью и толщиной стенки теплообменника:

$$q_s = \Delta_t^2 \cdot a \cdot \rho_t. \quad (3)$$

Этот вывод примечателен тем, что величина удельного теплового потока не зависит от высоты теплообменника h и диаметра цилиндрической поверхности D , а определяется только толщиной стенки a и величиной плотности тока Δ_t .

Для использования в последующих расчетах построим спектр значений толщин стенки a теплообменника из нержавеющей стали при различных q_s и вариациях плотности тока в стенке камеры нагрева Δ_t (рис. 3).

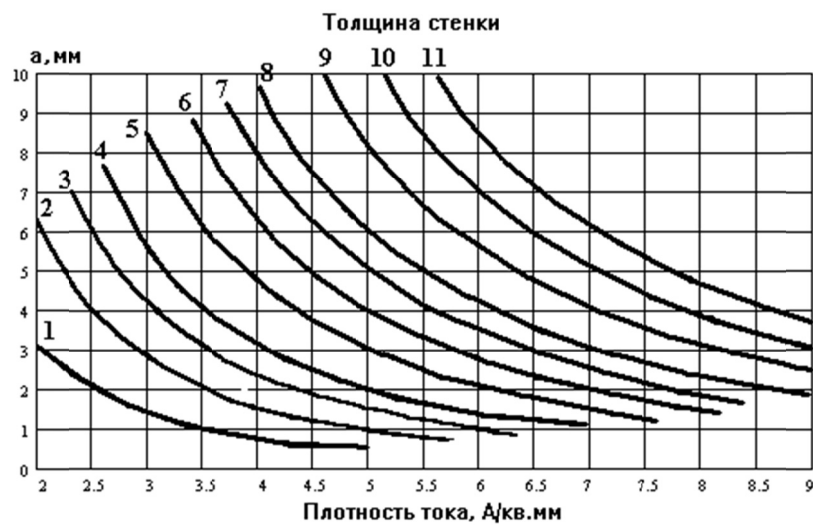


Рис. 3 – Номограмма области толщины стенки теплообменника

Fig. 3 – Nomogram of the heat exchanger wall thickness region

Линии 1–4 соответствуют плотности теплового потока 1, 2, 3, 4 Вт/см², 5–8 – построены при плотности потока 6, 8, 10, 12 Вт/см², 9–11 – по плотности 16, 20, 24 Вт/см². Область значений толщин a лежит в интервале 1...10 мм, что вполне приемлемо при реализации устройств мощностью 1...250 кВт и давлении 1...4 МПа.

Выбор расчетной точки определяется требуемым значением теплового потока по условию оптимальной теплоотдачи и уровнем перегрева теплообменника по отношению к теплоносителю, а толщина стенки – условиями технологии производства и эксплуатации.

Теплообменник, выполненный из другого металла, имеет иное соотношение плотности потока и плотности тока и требует корректировки толщины стенок. Однако и в этом случае выбор требуемого параметра a не вызывает затруднений с использованием выражения (3).

3. Расчет внутреннего диаметра первичной обмотки

Теплопроизводительность индуктивно-кондуктивного нагревателя и потребляемая мощность связаны между собой коэффициентом полезного действия η и

коэффициентом мощности. Считая коэффициент мощности близким к единице, что соответствует действительности, из выражения для q_s получим

$$q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{h \cdot \pi (D_3 + D_4)}. \quad (4)$$

Приложенное к первичной обмотке напряжение связано с ЭДС выражением

$$U = 4.44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_c \cdot W,$$

где W – число витков обмотки; $S_c = k_c \frac{\pi d^2}{4}$ – активное сечение стержня; d – расчетный диаметр стержня магнитопровода; $k_c = k_z \cdot k_{fe}$ – коэффициент заполнения площади круга; k_z – коэффициент заполнения площади круга ступенчатой фигурой; k_{fe} – коэффициент заполнения площади ступенчатой фигуры сталью.

Ток запишем как произведение плотности тока в первичной обмотке на сечение проводника:

$$I = D \cdot s_{\text{пр}}.$$

С учетом того, что общая площадь сечения проводников обмотки равна

$$s_{\text{пр}} \cdot W = h \cdot b \cdot k_3, \quad (5)$$

где k_3 – коэффициент заполнения сечения обмотки алюминием, находим

$$q_s = \frac{KD^2 \Delta b k_3 \eta}{D_3 + D_4}, \quad (6)$$

где коэффициент

$$K = 1.11 f B_m k_c.$$

Заменим толщину стенок теплообменника a в выражении (3), отмечая, что ток теплообменника равен IW и плотность тока в теплообменнике равна Δ_t , откуда с учетом (5)

$$a = \frac{\Delta \cdot b \cdot k_3}{2 \Delta_t}. \quad (7)$$

Подставим в левую часть выражения (6) вместо q_s соотношение (3) с учетом (7) и, выделяя параметры геометрии индуктивно-кондуктивного нагревателя, получим

$$\frac{D^2}{D_3 + D_4} = \frac{\Delta_t \rho_t}{2 K \eta}. \quad (8)$$

Для главных размеров индуктивно-кондуктивного нагревателя введем следующие соотношения:

$k_b = b / D$ – отношение радиального размера к внутреннему диаметру обмотки;

$k_\delta = \delta / D$ – отношение зазора между обмоткой к внутреннему диаметру обмотки;

$k_k = c / D$ – отношение ширины кольцевого канала теплообменника к внутреннему диаметру обмотки.

Диаметральная размерная цепь индуктивно-кондуктивного нагревателя в соответствии с рис. 2 представлена следующим образом:

$$D_4 = D_3 + 2c = D + 2b + 2\delta + 2a + 2c, \quad (9)$$

что позволяет произвести замену в выражении (8) и получить обобщенную формулу к расчету внутреннего диаметра первичной обмотки.

$$D = \frac{\Delta_t \rho_t}{K \eta} \left[1 + \left(2 + \frac{\Delta}{\Delta_t} k_3 \right) k_b + 2k_\delta + k_k \right]. \quad (10)$$

Эта основная функциональная зависимость позволяет далее по известному значению D найти радиальный размер магнитопровода d , толщину обмотки b , зазор между обмоткой и теплообменником δ , толщину стенки a и ширину кольцевого канала с теплообменника, число витков первичной обмотки W , высоту h и активное сечение S_c стержня магнитопровода. Нетрудно рассчитать массу стержня и ярем магнитопровода G_c и массу обмотки G_o , а также стоимость активных материалов, используемых для изготовления электронагревателя индуктивно-кондуктивного типа, и произвести массогабаритный и стоимостной анализ.

4. Расчет главных размеров однофазных нагревателей

Главные размеры однофазных нагревателей будем отыскивать для конструктивной схемы, представленной на рис. 4 с сердечником стержневого типа, на котором размещены две одинаковые обмотки, подключаемые последовательно к напряжению сети. Такое конструктивное построение позволяет снизить удельные массовые характеристики без изменения энергетических показателей.

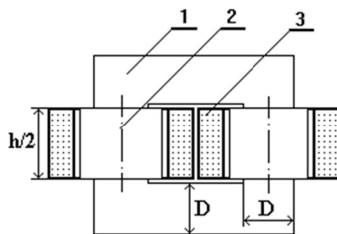


Рис. 4 – Конструктивная схема однофазного нагревателя со стержневым сердечником:

1 – сердечник; 2 – обмотка; 3 – теплообменник

Fig. 4 – Structural diagram of a single-phase heater with a rod core;

1 – core; 2 – winding; 3 – heat exchanger

Исходные данные для расчета однофазных индуктивно-кондуктивных нагревателей:

- 1) напряжение фазное – 230 В;
- 2) частота – 50 Гц;
- 3) электрический КПД – 0,97;
- 4) максимальная индукция в стержне – 1,5 Т;
- 5) коэффициент заполнения сечения стержня сталью – 0,96;
- 6) удельное электрическое сопротивление материала теплообменника – 0,8 Ом · мм²/м.

Предварительный выбор основных постоянных величин для проектирования определен существующей практикой трансформаторостроения, а также практикой и опытом конструирования, производства и эксплуатации электронагревателей индуктивно-кондуктивного типа, осуществленных в течение тридцати лет группой авторов [5–11].

В частности, значение коэффициента заполнения обмотки проводниковым материалом обусловлено использованием провода АПСД с прямоугольным сечением провода и двусторонней изоляцией 0,3...0,35 мм и межслоевой изоляцией на основе стеклотенты толщиной 0,15...0,2 мм. Значение средней плотности тока в теплообменнике принято по условию допустимого перегрева стенок по отношению к теплоносителю и уровню теплового потока от стенок.

Коэффициенты, связывающие между собой главные размеры, определены по экономической оценке и уровню электробезопасности, которая требует введения зазора между первичной обмоткой и теплообменником не менее 3 мм. При устройстве дополнительной теплоизоляции теплообменника эта величина может быть изменена в большую сторону, что необходимо учесть при проектировании высокотемпературных нагревателей.

Алгоритм расчета главных размеров следующий.

На первом этапе выбирается плотность тока в первичной обмотке 2,2...2,0 А/мм². Выбор средней плотности тока в первичной обмотке определяет как массу и объем обмотки, так и величину электрических потерь в ней. На этом этапе расчета главных размеров эта величина задается ориентировочно, основываясь на рекомендациях [10] и опыта эксплуатации подобных устройств [11]. Действительное значение плотности тока в первичной обмотке будет получено впоследствии по уточненному расчету электронагревателя по известным основным размерам.

Далее по выбранному значению температуры перегрева стенки камеры нагрева по отношению к теплоносителю и коэффициента теплоотдачи определяется плотность теплового потока

$$q_s = \Delta T_c \cdot \alpha, \quad (11)$$

где ΔT_c может быть выбрано в пределах 30...40 К; $\alpha = 500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности теплообменника.

По величине плотности теплового потока и номограмме (рис. 3) выбирается плотность тока в стенке теплообменника Δ_t . По формуле (10) рассчитываются главные размеры индуктивно-кондуктивного нагревателя. Здесь для мощностей от 1 до 4 кВт коэффициенты находятся в следующих пределах:

$$k_b - 0,15...0,2;$$

$$k_\delta - 0,08...0,1;$$

$$k_k - 0,08...0,1;$$

$$k_3 - 0,6...0,7.$$

По формуле (3) рассчитывается толщина стенки теплообменника

$$a = \frac{q_s}{\Delta_t^2 \cdot \rho_t}.$$

Формируется конфигурация активной части электронагревателя: магнитопровода и обмотки. Диаметр активного сечения стержня магнитопровода для проведения магнитного потока рассчитывается с учетом изоляционного промежутка ε между магнитопроводом и обмоткой (обычно $\varepsilon = 3 \text{ мм}$):

$$d = D - 2\varepsilon.$$

Опыт показывает, что, для однофазных электронагревателей мощностью 1...4 кВт, исходя из условий затрат на технологическую оснастку и трудоемкость сборочного производства магнитопровода, можно рекомендовать число ступеней

в сечении стержня магнитопровода, равное 1...2 (рис. 5). Коэффициент заполнения площади круга ступенчатой фигурой $k_z = 0,637; 0,785$.

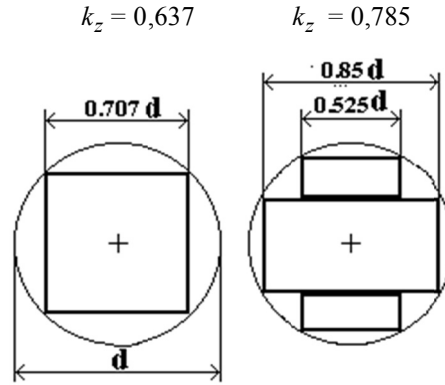


Рис. 5 – Одно- и двухступенчатый сердечники

Fig. 5 – One- and two-stage cores

Толщина обмотки

$$b = k_b \cdot D.$$

Зазор между обмоткой и теплообменником

$$\delta = k_\delta \cdot D.$$

Ширина канала камеры нагрева

$$c = k_k \cdot D.$$

Радиальные размеры обмотки и теплообменника:

$$D_1 = D + 2b; \quad D_2 = D_1 + 2\delta; \quad D_3 = D_2 + 2a;$$

$$D_4 = D_3 + 2c; \quad D_5 = D_4 + 2a.$$

Площадь сечения стержня

$$S_c = k_c \frac{\pi d^2}{4}.$$

Число витков обмотки

$$W = \frac{U \cdot k_c}{4K \cdot S_c}.$$

Высота обмотки определится по формуле

$$h = \frac{P}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_c \cdot \Delta \cdot b \cdot k_3}.$$

Предварительная оценка температуры перегрева обмотки

Плотность теплового потока с поверхности обмотки

$$q_0 = \frac{1}{2} \Delta^2 \cdot b \cdot \rho_0 \cdot k_3,$$

где $\rho_0 = 0,027 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – удельное сопротивление алюминиевого материала обмотки.

Температура перегрева обмотки по отношению к окружающей среде

$$\Delta T_0 = \frac{q_0}{\alpha_0},$$

где $\alpha_0 = 5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки.

Массу активных материалов определим по конструктивной схеме (рис. 5).

Масса стержня

$$G_c = h \cdot S_c \cdot \gamma_{FE},$$

где $\gamma_{FE} = 7,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – удельная плотность электротехнической стали.

Масса двух ярем

$$G_a = 2S_c \cdot \gamma_{FE} (D + D_5).$$

Стоимость электротехнической стали

$$C_{FE} = (G_c + G_a) c_f,$$

где c_f , руб/кг, – цена электротехнической стали.

Масса обмоточного провода

$$G_0 = h \cdot b \cdot \gamma_0 \cdot k_3 \cdot \pi \frac{D + D_1}{2},$$

где $\gamma_0 = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – удельная плотность обмоточного провода.

Стоимость обмоточного провода

$$C_0 = G_0 \cdot c_0,$$

где c_0 , руб/кг, – цена обмоточного провода АПСД.

Масса теплообменника

$$G_t = h \cdot a \cdot \gamma_{FE} \cdot \pi \frac{D_2 + D_3 + D_4 + D_5}{2}.$$

Стоимость материала теплообменника

$$C_t = G_t \cdot c_t,$$

где c_t , руб/кг, – цена материала теплообменника.

Масса активных материалов

$$G = G_c + G_a + G_0 + G_t.$$

Стоимость активных материалов

$$C = C_c + C_a + C_0 + C_t.$$

Пример расчета минимизации массы и существующей стоимости активных материалов индуктивно-кондуктивного нагревателя с одно- и двухступенчатым магнитопроводом мощностью 1 кВт при вариации плотности тока в теплообменнике от 1,75 до 3,0 А/мм² выявил следующие массо-стоимостные характеристики (рис. 6, а, б).

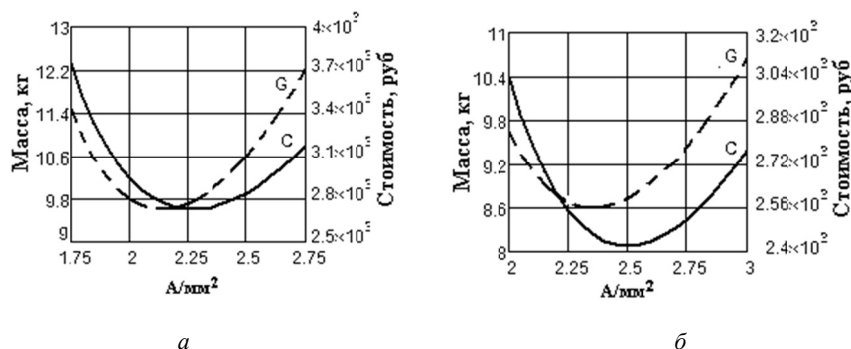


Рис. 6 – Масса и стоимость активных материалов индуктивно-кондуктивного нагревателя мощностью 1 кВт:

а – с одноступенчатым магнитопроводом; б – с двухступенчатым магнитопроводом

Fig. 6 – Weight and cost of active materials of an inductive-conductive heater with a power of 1 kW:

a – with a single-stage magnetic circuit; b – with a two-stage magnetic circuit

Анализ показывает, что увеличение числа ступеней приводит к снижению общей массы и стоимости изделия. Выбор оптимальной плотности тока в теплообменнике (ТО) с одноступенчатым магнитопроводом может быть принят для последующих уточненных расчетов в пределах 2,2...2,25 А/мм², с двухступенчатым – 2,35...2,45 А/мм².

В табл. 1 приведены оптимальные параметры индуктивно-кондуктивного нагревателя мощностью 1 кВт с одно- и двухступенчатым магнитопроводом. Коэффициенты: $k_b = 0,2$; $k_\delta = 0,08$; $k_k = 0,08$; $k_z = 0,6$.

Таблица 1 / Table 1

Оптимальные параметры индуктивно-кондуктивного нагревателя мощностью 1 кВт
Optimal parameters of an inductive-conductive heater with a power of 1 kW

Наименование	Ед. изм.	Величина	
Количество ступеней магнитопровода		1	2
Плотность тока теплообменника	А/мм ²	2,22	2,45
Внутренний диаметр обмотки D	мм	63	56
Толщина стенки ТО a	мм	4,44	3,65
Толщина обмотки b	мм	13	11
Внешний диаметр обмотки D_1	мм	89	79
Зазор обмотка-магнитопровод δ	мм	5,0	4,5
Радиальные размеры ТО	мм		
D_2		99	88
D_3		108	95
D_4		118	104
D_5		127	111
Ширина канала для теплоносителя c	мм	5,1	4,5

Окончание табл. 1

The end Table 1

Наименование	Ед. изм.	Величина	
Диаметр стержня d	мм	57	50
Сечение стержня S_c	мм ²	1922	1875
Число витков W		359	368
Высота обмотки h	мм	94	108
Перегрев обмотки ΔT_o	К	99	88
Масса стержней магнитопровода G_c	кг	1,376	1,546
Масса ярем магнитопровода G_a	кг	5,582	4,812
Масса магнитопровода G_{FE}	кг	6,957	6,358
Масса обмотки G_o	кг	0,457	0,417
Масса ТО G_t	кг	2,248	1,88
Масса активных материалов G	кг	9,663	8,655
Удельная масса g	кг/кВт	9,663	8,655
Стоимость электротехнической стали C_{FE}	руб.	1739	1589
Стоимость обмоточного провода C_o	руб.	92	84
Стоимость материала ТО C_t	руб.	899	752
Стоимость активных материалов C	руб.	2730	2425
Удельная стоимость материалов c_p	руб/кВт	2730	2425

5. Расчет главных размеров трехфазных нагревателей

Основные параметры трехфазных трансформаторов-нагревателей находим для конструктивной схемы броневго трансформатора (рис. 7), у которого исходными данными для расчета являются:

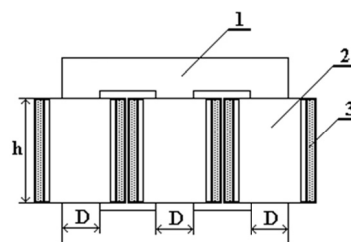
- 1) напряжение – 230/400 В;
- 2) частота – 50 Гц;
- 3) диапазоны мощности: 5,0...20,0 кВт; 50,0...100,0 кВт; 150,0...250,0 кВт.

Рис. 7 – Трехфазный электронагреватель с броневым сердечником:

1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – теплообменник

Fig. 7 – Three-phase electric heater with an armored core;

1 – magnetic core; 2 – winding; 3 – heat exchanger



В качестве независимой переменной принята средняя плотность тока (поверхностная плотность теплового потока) в теплообменнике.

Обмотка выполняется цилиндрической многослойной, намотанная одним или несколькими параллельными проводами прямоугольного сечения марки АПСД.

Для трехфазных электронагревателей можно рекомендовать число ступеней в сечении стержня магнитопровода, равное 3, 4, 5 в зависимости от мощности что соответствует коэффициенту заполнения круга ступенчатой фигурой 0,851, 0,886, 0,908 (рис. 8).

При расчете главных размеров оптимального варианта трехфазного индуктивно-кондуктивного нагревателя использованы вышеприведенные аналитические зависимости и получены массо-стоимостные характеристики (табл. 2).

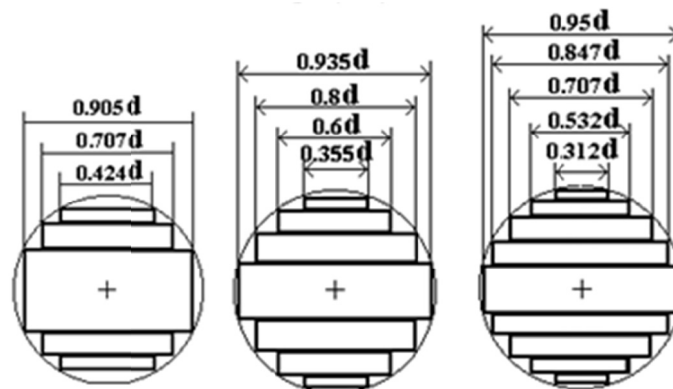


Рис. 8 – Трех-, четырех- и пятиступенчатый сердечники

Fig. 8 – Three-, four- and five-stage cores

Таблица 2 / Table 2

**Основные характеристики ряда
трехфазных индуктивно-кондуктивных нагревателей**

Параметр	Мощность, кВт			
	10.0	50.0	100.0	250,0
Число ступеней стержня магнитопровода	2	3	3	5
Плотность тока обмотки Δ , А/мм ²	2.0	2.0	2.0	1.0
Плотность тока теплообменника Δ_t , А/мм ²	3.4	3.5	3.65	6,55
Перегрев обмотки ΔT_0 , К	79	77	77	76
Масса активных материалов G , кг	46.7	170	275	432
Стоимость активных материалов C , тыс. руб.	12,7	45,3	72,9	153
Удельная масса g , кг/кВт	4.67	3,38	2.75	2.33
Удельная стоимость c_p , руб/кВт	1270	906	729	612

Заключение

В работе проведен синтез обобщенного выражения для поиска внутреннего диаметра обмоточных структур индуктивно-кондуктивных нагревателей на основе укрупненных исходных данных. Это позволило осуществить конструктивное проектирование ряда однофазных и трехфазных нагревателей на мощности от 1 до 250 кВт, отвечающих критерию нагревостойкости.

Анализ расчетных данных свидетельствует о предпочтительности с точки зрения удельной стоимости и удельной массы электронагревателей с большей теплопроизводительностью. В то же время относительные капитальные затраты средств на единицу массы изделия остаются практически постоянными, в пределах 35...39 руб/кг.

Полученные массо-стоимостные показатели могут быть использованы для дальнейших поверочных расчетов с целью создания нормативно-технологической базы конструкторской документации для организации промышленного производства индуктивно-кондуктивных нагревателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.1.019–79. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты: дата введения 1980–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 6 с.
2. ГОСТ 12.1.038–82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений и токов: дата введения 1983–07–01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 7 с.
3. ГОСТ 12.1.002–84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах: дата введения 1986–01–01. – М.: Стандартиформ, 2009. – 8 с.
4. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2006. – 67 с.
5. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
6. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. – Л.: Энергия, 1974. – 504 с.
7. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
8. Трансформаторы силовые общего назначения до 35 кВ включительно. Технический справочник. – М.: Стандартэлектро, 1993.
9. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергия, 1968. – 456 с.
10. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
11. Елшин А.И. Конструкции и расчет трансформаторных устройств низкотемпературного нагрева для жизнеобеспечения человека. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 140 с.

FUNDAMENTALS OF DESIGNING INDUCTIVE-CONDUCTIVE HEATERS

Elshin A.I.¹, Kozhukhov V.V.², Elshin P.A.³¹Arctic State Agrotechnology University, Yakutsk, Russia²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia³SibPolymerStroy LLC, Novosibirsk, Russia

The article presents the design features of inductive-conductive heaters, determines the relationship between electromagnetic loads, material properties and dimensions of the heat exchanger, presents the results of compiling a universal dependence of the main parameters of inductive-conductive heaters as a function of heat output, frequency and voltage value. Values determined by the properties and cost of materials, conditions of heat resistance and electrical safety, technological capabilities of production and operating conditions are taken as design constants. These values are selected at the beginning of the design and remain constant until the results of the calculation of the acceptable basic dimensions of the device are obtained. Nomograms of the dependence of the wall thickness of the heating chamber on the value of the current density and heat flux were obtained. The choice of the optimal design result is carried out by means of an economic assessment of the investigated options from the point of view of minimizing the cost of production and losses of electricity during the operation of the electric heater. An algorithm for designing the main dimensions of single-phase and three-phase inductive-conductive heaters with a capacity of 1 to 250 kW per unit of a product for a voltage of 0.4 kV and a frequency of 50 Hz is given and the results of calculating the main mass-cost indicators are presented. The analysis of the calculated data indicates the preference of electric heaters with a higher heat output in terms of specific cost and specific weight. At the same time, the relative capital costs of funds per unit mass of the product remain practically constant.

Keywords: inductive-conductive heater, calculation algorithm, optimal parameters, weight and cost indicators.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-37-51

REFERENCES

1. GOST 12.1.019–79. *Elektrobezopasnost'. Obshchie trebovaniya i nomenklatura vidov zashchity* [State Standard 12.1.019–79. Occupational safety standards system. Electric safety. General requirements and nomenclature of kinds of protection]. Moscow, Standards Publ., 2001. 6 p.
2. GOST 12.1.038–82. *Elektrobezopasnost'. Predel'no dopustimye znacheniya napryazhenii i tokov* [State Standard 12.1.038–82. Occupational safety standards system. Electric safety. Maximum permissible values of pick-up voltages and currents]. Moscow, Standards Publ., 2001. 8 p.
3. GOST 12.1.002–84. *Elektricheskie polya promyshlennoi chastoty. Dopustimye urovni napryazhennosti i trebovaniya k provedeniyu kontrolya na rabochikh mestakh* [State Standard 12.1.002–84. Occupational safety standards system. Power frequency electric fields. Permissible levels of field strength and requirements for control at work-places]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 7 p.
4. GOST 12.1.004–91. *Pozharnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya* [State Standard 12.1.004–91. Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 67 p.
5. Leites L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow, Energiya Publ., 1981. 392 p.
6. Dombrovskii V.V., Khutoretskii G.M. *Osnovy proektirovaniya elektricheskikh mashin peremennogo toka* [The basics of designing electric AC machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 504 p.
7. Sergeev P.S., Vinogradov N.V., Goryainov F.A. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Designing electric machines]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 632 p.
8. *Transformatory silovye obshchego naznacheniya do 35 kV vklyuchitel'no. Tekhnicheskii spravochnik* [Power transformers of general purpose up to 35 kV inclusive. Technical handbook]. Moscow, Standartelectro Publ., 1993.
9. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* [Transformers calculating]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 456 p.
10. Turovskii Ya. *Elektromagnitnye raschety elementov elektricheskikh mashin* [Electromagnetic calculations of elements of electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 200 p.
11. Elshin A.I. *Konstruktsii i raschet transformatornykh ustroystv nizkotemperaturnogo nagreva dlya zhizneobespecheniya cheloveka* [Designs and calculation of transformer low-temperature heating devices for human life support]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 140 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Елишин Анатолий Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение в АПК» ФГБОУ ВО Арктический ГИТУ. Опубликовано более 140 работ в области электромеханики и электротехнологии. (Адрес: 677007, Россия, г. Якутск, Сергеляхское шоссе, 3 км, д. 3. E-mail: elhin46@mail.ru).

Elshin Anatoly Ivanovich – Doctor of Sciences (Eng.), professor of the Department of Power Supply in the Agro-Industrial Complex of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Arctic GATU. More than 140 scientific papers have been published. (Address: Sergelyakhskoe highway, 3 km, building 3, 353907, Russia, Yakutsk. E-mail: elshin46@mail.ru).



Кожухов Вячеслав Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники НГТУ. Опубликовано более 30 работ в области силовой электроники и электротехнологии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kozhukhov@corp.nstu.ru).

Kozhukhov Vyacheslav Victorovich – Candidate Sciences (Eng.), Associate Professor of the Department of Electronics and Electrical Engineering, NSTU. More than 30 papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., 630073, Russia, Novosibirsk. E-mail: kozhukhov@corp.nstu.ru).



Елшин Петр Анатольевич – инженер по производству ООО «СибПолимерСтрой». Опубликовано 8 работ в области электротехнологии. (Адрес: 630096, Россия, г. Новосибирск, ул. Станционная, 38, к. 28а. E-mail: elshin@ngs.ru).

Elshin Petr Anatolievich – Production engineer at SibPolymerStroy LLC. 8 scientific papers have been published. (Address: St. Station, 38, k. 28a, Novosibirsk, Russia, 630096. E-mail: elshin@ngs.ru).

*Статья поступила 11 мая 2020 г.
Received may 11, 2020*

To references:

Elshin A.I., Kozhukhov V.V., Elshin P.A. Osnovy proektirovaniya induktivno-konduktivnykh nagrevatelei [Fundamentals of designing inductive-conductive heaters]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 3 (48), pp. 37-51. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3- 37-51.