

Другим неустановившимся представлением о характере физических процессов при ИН является учет зависимости магнитной проницаемости электромагнитного поля в ферромагнетиках от напряженности магнитного поля. Это касается определения глубины проникновения поля в металл, величины потерь на гистерезис и вихревые токи, а также активного и реактивного сопротивлений нагреваемой детали рабочему току в предположении симметрии переменного электромагнитного поля и постоянства магнитной проницаемости нагреваемой среды для данной амплитуды магнитной катушки.

Целью настоящей статьи является разработка общего подхода к процессам ИН деталей симметричными и асимметричными электромагнитными полями при синтезе индукторов.

Основная часть. Рассмотрим индукционный нагрев охватывающей детали соединения, выполненного из однородного материала, имеющего магнитную проницаемость μ и удельное электросопротивление ρ . Волна электромагнитной энергии от индуктора распространяется через диэлектрик (воздух) и подходит по нормали (ось z) к поверхности, ограничивающей проводящую среду нагреваемой детали (металл). Величину, характеризующую зависимость эквивалентной магнитной проницаемости μ от изменения напряженности H магнитного поля можно получить непосредственно из второго уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\partial B}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial t},$$

где B – вектор магнитной индукции; t – время.

Но поскольку $\mu(H) = \frac{B}{H}$, ее получают по основной статической кривой намагничивания материала, то

$$\frac{\partial B}{\partial H} = \frac{\partial \mu(H)}{\partial H} H + \mu(H).$$

Тогда

$$\operatorname{rot} E = -\left(\frac{\partial \mu(H)}{\partial H} H + \mu(H)\right) \frac{\partial H}{\partial t} = -\mu_3 \frac{\partial H}{\partial t},$$

где $\left(\frac{\partial \mu(H)}{\partial H} H + \mu(H)\right) = \mu_3$.

Здесь μ_3 – эквивалентная магнитная проницаемость.

При этом для определения потерь на вихревые токи следует брать значения μ в поворотных точках петли гистерезиса [5].

Нахождение μ_3 в функции напряженности магнитного поля непосредственно по определяющему его уравнению не представляет для современных компьютеров значительных затруднений. Для этого следует значения B , H пронормировать к

середине диапазона изменения H .

На рис.1 показан пример нахождения μ_3 и μ для конструкционной стали, их различие, а, следовательно, и влияние на параметры энергопреобразования в ферромагнитных деталях, при этом в качестве нормирующих величин приняты $B = 1,18$ Тл, $H = 1000$ А/м. Можно заметить также, что при известной аппроксимации в виде степенного ряда

$$B = (a_0 + a_1 * H + a_2 * H^2 + a_3 * H^3 + \dots + a_n * H^n), \mu_3 = \sum_1^n n * a_n * H^{n-1}.$$

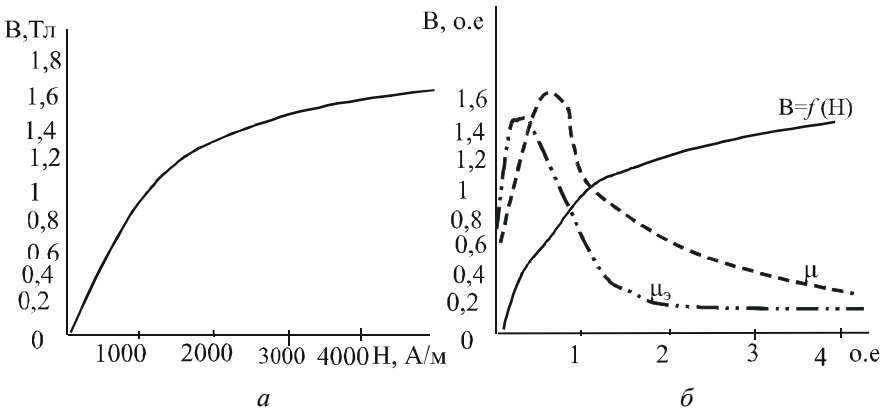


Рис.1. Определение эквивалентной магнитной проницаемости:

a – зависимости $B=f(H)$ в абсолютных;

$б$ – $\mu=f(H)$, $\mu_3=f(H)$ в относительных единицах

Переходя от уравнений Максвелла в векторной форме к уравнениям для отдельных составляющих (H_x , H_y , H_z) и применяя метод Фурье разделения переменных аналогично уравнениям теплопроводности, можно получить в комплексной форме значения напряженности магнитного H и электрического полей E для электромагнитной волны в осесимметричных деталях. В качестве оси z принято направление от внешней поверхности детали к внутренней в правосторонней системе координат. Тогда:

$$\mathbf{H}_m = \mathbf{H}_{ms} e^{-kz} \cdot e^{jkz}; \quad \mathbf{E}_m = \alpha \rho \mathbf{H}_{ms} e^{jkz}, \quad (1)$$

где $\alpha = \sqrt{j \frac{\omega \mu_0}{\rho}} = (1 + j)k$; $\omega = 2 \pi f$; $k = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\rho}}$ – коэффициент затухания

электромагнитной волны; $j^2 = -1$; H_{ms} – максимальное значение напряженности

магнитного поля на поверхности; ρ – удельное электрическое сопротивление; f – частота электромагнитного потока.

Величина, обратная коэффициенту затухания

$$\Delta = \frac{1}{k} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_{\text{э}}}}, \quad (2)$$

является условной глубиной проникновения электромагнитного поля в материал нагреваемой детали.

Мгновенные значения H и E из (1) с учетом (2) примут вид:

$$H_t = H_{ms} e^{-\frac{z}{\Delta}} \cos(\omega t + \psi_s - \frac{z}{\Delta});$$

$$E_t = \sqrt{\omega\mu_{\text{э}}\rho} H_{ms} e^{-\frac{z}{\Delta}} \cos(\omega t + \psi_s - \frac{z}{\Delta} + \frac{\pi}{4}), \quad (3)$$

где ψ_s – фазовый сдвиг.

Из уравнения (3) следует, что при $z = \Delta$ электромагнитное поле затухает в $1/e = 0,368$ раз. Практически полностью оно затухает на глубине, равной длине волны $\lambda = 2\pi\Delta$, и составляет там величину 0,185% от значения ее на поверхности.

С длиной волны тесно связана скорость v ее распространения в глубину материала нагреваемой детали

$$v = \lambda f = 2\pi\Delta \cdot \frac{\omega}{2\pi} = \sqrt{\frac{2\rho\omega}{\mu_{\text{э}}}}. \quad (4)$$

Для конструкционной стали, характеризующейся параметрами $\rho = 0,14 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и $\mu_{\text{э}} = \mu_0 \cdot \mu_r = 4\pi \cdot 10^7 \cdot 1000$ при $f = 50$ Гц, $v = 0,265$ м/с. Это означает, что время t_{Δ} прохождения электромагнитной волной расстояния Δ составляет:

$$t_{\Delta} = \frac{\Delta}{v} = \frac{1}{2\pi f}. \quad (5)$$

Здесь μ_r – относительная нелинейная магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Из (5) следует, что t_{Δ} не зависит от характеристик материала, а определяется только частотой тока. Для $f = 50$ Гц соответственно $t_{\Delta} = 0,0032$ с.

Чтобы определить число витков катушки индукционного нагревателя, которая в системе индуктор – деталь является первичным проводником, необходимо знать активное и индуктивное сопротивление нагреваемой детали -

короткозамкнутого вторичного проводника. С этой целью экспоненциальное распределение плотности тока j_m в материале детали по оси z проинтегрируем по глубине

$$j_m = \frac{1}{\rho} E_{ms} = j_{ms} \cdot e^{-\alpha z} \quad (6)$$

В полосе металла шириной b по сечению детали и с длиной контура рабочего тока по детали l среднее значение тока I_m :

$$I_m = j_{ms} \cdot b \int_0^{\infty} e^{\alpha z} dz = \frac{j_{ms} \cdot b e^{-j\pi/4}}{\sqrt{2k}} \quad (7)$$

где j_{ms} – амплитуда плотности тока на поверхности.

То есть действующее (греющее) значение тока равно

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{j_{ms} \cdot \Delta \cdot b}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

Из (8) следует, что глубина проникновения Δ определяет толщину эквивалентного слоя с равномерным распределением плотности греющего тока

$$j_{\text{равн}} = \frac{j_{ms}}{\sqrt{2}}$$

Слой толщиной Δ имеет такое же сопротивление, что и массивная деталь с неравномерным распределением тока. Иллюстрируя такой важный параметр нагреваемых электромагнитным полем деталей как глубина проникновения, приведем зависимость Δ от частоты для различных материалов [4].

Из табл.1 видно, что часто используемая в работах по ИН характеристика электромагнитного поля для стали (7-10 мм) является не глубиной проникновения Δ , а длина волны λ проникающего поля. Физическое различие данных критериев заключается в том, что длина волны определяет толщину слоя, в котором электромагнитная волна затухает до 0,00185 своего значения на поверхности. Глубина Δ определяет толщину эквивалентного слоя с равномерной плотностью тока, равного по сопротивлению слою с экспоненциально распределенной плотностью тока.

Поскольку сопротивление массивных нагреваемых деталей равно волновому сопротивлению среды

$$Z_c = R + jX = \frac{(1+j)\rho}{\Delta}, \quad (9)$$

где R и X – активная и реактивная составляющая сопротивления Z_c , то активное и реактивное сопротивления оказываются при $\mu_0 = \text{const}$ одинаковыми, и по величине равными сопротивлению проводника сечением $b\Delta$ постоянному току

$$R = X = \frac{\rho \cdot l}{b\Delta}. \quad (10)$$

Таблица 1

Характеристики материала и глубина проникновения тока Δ
для различных материалов

Материал	Сталь ненасыщенная	Сталь насыщенная	Сталь при 800°C	Медь
ρ [Ом·м]	$0,125 \cdot 10^{-6}$	$0,125 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	$(1/58) \cdot 10^{-6}$
μ_0	1000	300	1	1
f [Гц]	Δ [мм]			
5	2,84	5,17	22,7	29,8
50	0,89	1,62	7,16	9,4
500	0,284	0,517	2,27	2,98
5000	0,089	0,162	0,716	0,94

Более подробные исследования (10) с учетом переменной магнитной проницаемости показывают, что сопротивления (R , X) стали [2] необходимо скорректировать:

$$R_{cm} \approx 1,4 \frac{l}{b} \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \rho}{2}}; \quad X_{cm} = 0,85 \frac{l}{b} \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \rho}{2}}. \quad (11)$$

Тогда для стали $\frac{X_{cm}}{R_{cm}} = 0,6$. Это совпадает с результатами, полученными

Л.Р. Нейманом в его классической работе “Поверхностный эффект в ферромагнитных телах”.

Рассмотренные электромагнитные явления при ИН и полученные результаты относительно определения μ_0 , Δ , R_{cm} и X_{cm} являются основополагающими как для определения параметров цепочной структуры схемы замещения индукционного нагревателя, необходимой как для его синтеза, так и для уточненных расчетов нелинейных полей методами конечных элементов.

Индукционный нагрев вихревыми токами проявляется как дополнительный от поверхностного эффекта и эффект близости при использовании

концентраторов магнитного потока или конфигурирующих обмоток. То есть, если поднести контур (многовитковую катушку) близко к поверхности проводящего тела, то в нем вблизи его поверхности возникнут индуцированные вихревые токи. Параметры контура вихревых токов (Δ , $R_{\text{вх}}$, $X_{\text{вх}}$) можно определять по ранее полученным выражениям, внося в них корректировку геометрии контура, то есть

$$R_{\text{вх}} = 1,4 \frac{l_{\text{вх}}}{u} \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \rho}{2}}; X_{\text{вх}} = 0,6 R_{\text{вх}}, \quad (12)$$

где $l_{\text{вх}}$ – длина контура вихревых токов; u – периметр сечения контура вихревых токов.

Выводы. Наиболее важными полученные результаты оказываются при ИН асимметричным магнитным полем, которое можно создать путем питания обмотки индуктора от источника с широтно-импульсной модуляцией. Поскольку постоянная составляющая намагничивающего тока ограничивается лишь омическим сопротивлением обмотки, то незначительная амплитудная асимметрия напряжения вызывает перемещение центра частичной петли гистерезиса в область нисходящих значений эквивалентной магнитной проницаемости. Тем самым увеличивается глубина проникновения тока в нагреваемой детали и повышается, следовательно, эффективность ее нагрева. Следует отметить, что эффект управления интенсивностью ИН за счет асимметрии магнитного поля ограничен областью температур ниже точки Кюри для ферромагнетиков.

Определены параметры как основного рабочего процесса индукционного нагрева, так и нагрева от дополнительных воздействий вихревых токов.

Предложен метод определения эквивалентной магнитной проницаемости материала нагреваемой детали с учетом асимметрии электромагнитного поля.

Список литературы: 1. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – М. – Л.: Энергия, 1965. – С.552. 2. Болотов А.В., Шепель Т.А. Электродинамические установки. – М.: Высшая школа, 1988. – С.336. 3. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. – С.264. 4. Туровский Я. Техническая электродинамика, пер. с польск. – М.: Высшая школа, 1974. – С. 488. 5. Дука А.К., Евзикова Э.Г. Потери от вихревых токов в шихтованном сердечнике под действием переменного поля. // Тр. НИИ з-да “Электротяжмаш”, Харьков. – 1970. – №1. – С.25-31.

Поступила в редакцию 20.04.06

В.В.КОВАЛЕНКО, Ю.М.ДОБРОВЕНСКИЙ,

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

УСТАНОВКА ДЛЯ РАЗБОРКИ И СБОРКИ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ

У статті описана індукційно-нагрівальна установка для складання та розбирання виробів та рекомендації по областях використання. Показаний режим нагріву колеса ротора насоса під розбирання.

The installation for the induction heating by assembling and disassembling of products with the recommendations about fields of use is described in the article. The heating regims of rotor wheel of pump under disassembling are given here.

При ремонте центробежных питательных насосов для тепловых электрических станций необходимо разбирать и собирать роторы, состоящие из валов с насаженными на них по посадке с натягом со шпонкой рабочими колёсами [1]. Колёса, которых на роторе бывает 6 или 7 (в зависимости от его типа), торцами своих ступиц плотно прилегают друг к другу, и поэтому они как бы нанизаны на ступенчатый вал. Это создаёт большие сложности при разборке.

Разобрать и собрать такие соединения без повреждения посадочных поверхностей можно только при использовании предварительного термовоздействия на охватывающие детали – колёса. Снимать и насаживать их на валы можно, при этом поочередно.

Колесо состоит из массивной части – рабочих лопастей и сравнительно тонкостенной ступицы. Поэтому нагрев колёс при разборке должен быть быстрым с определённым распределением мощности в пространстве и во времени. Такой вид управляемого нагрева может быть только индукционным. До настоящего времени подобный нагрев для операций разборки не использовался.

Целью работы является создание индукционно – нагревательной установки, обеспечивающей разъединение соединений колесо – вал роторов питательных насосов типов ПН 1135-340, ОСПТ 1150-340, ПН 1500-340 и нагрев под сборку колёс.

При создании нагревателя необходимо было решить несколько технических задач. Первая, основная, связанная с процессом разборки, состояла в том, что создаваемое индуктором электромагнитное поле должно генерировать в металле колеса теплоту со скоростью большей, чем она будет отводиться в вал за счёт контактного теплообмена и в окружающую среду за счёт конвекции. Это обеспечит тепловое расширение посадочной поверхности колеса с образованием демонтажного разборочного зазора между ним и валом. То есть индуктор должен быть достаточно мощным. Однако, в условиях ремонтных производств большое одномоментное потребление мощности из

силовой сети нежелательно, поэтому мощность индуктора должна быть минимально возможной. Кроме того, нагрев должен быть сохранным, то есть не создавать недопустимых температурных напряжений в металле колеса, которые приведут к его деформированию, и недопустимых температур, при которых изменятся физико-механические свойства металла.

Сохранность обеспечивается равномерностью нагрева с перепадом температур не более 120°C и с ограничением по максимальной предельной температуре – 300°C .

Особая трудность при решении этих задач состояла в том, что эти требования предъявлялись к нагревателю, который должен был выполнять нагрев колёс не одного, а нескольких типоразмеров роторов.

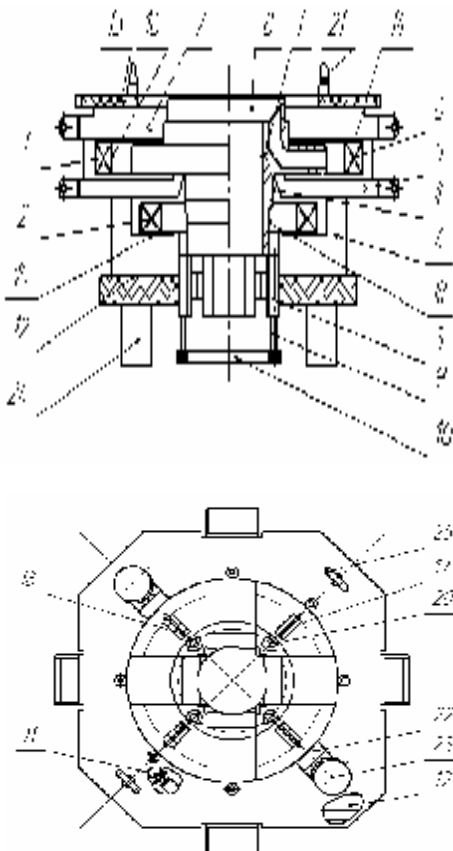


Рис. 1. Индукционный нагреватель с установленным в нём рабочим колесом

Используя методику расчёта индукторов, изложенную в [2] как базовую, были определены мощность индуктора и необходимая длительность её воздействия на поверхности колеса. На основании этих расчётов в Украинской инженерно-педагогической академии (г. Харьков) был разработан и изготовлен индукционный нагреватель, работающий на токе промышленной частоты, и удовлетворяющий указанным требованиям. Он предназначен для нагрева рабочих колёс под разборку и сборку. Напряжение питания индуктора – 380 В , максимальная активная мощность – $35,8\text{ Вт}$, при максимальном токе в сети 105 А , в верхнем индукторе – 205 а , в нижнем – 240 А . На рис.1 показан нагреватель с колесом без вала, т.е. для операции нагрева под сборку.

Нагреватель состоит из 2-х индукционных катушек – верхней 1 и нижней 2 и магнитопроводящей системы, образованной четырьмя ветвями магнитопроводов.

Каждая ветвь магнитопроводов включает пять магнитопроводников: вертикальный подвижный 3, нижний 4, средний подвижный 5, вертикальный 6 и верхний подвижный 7. Катушки опираются каждая на четыре текстолитовые подставки 14, 15 и прижимаются к ним соответственно хомутами 16 или стяжками 17 через подкладки 18. Чтобы избежать передачи тепла от нагреваемого колеса, внутренняя поверхность верхней катушки закрыта экраном из асбополотна.

Выводы катушек через клеммник 19, расположенный между основанием 12 и плитой 13, присоединяются к гибким кабелям, которыми нагреватель подключается к пульту управления. Все четыре подвижных магнитопроводника соединены между собою и перемещаются вдоль продольной оси нагревателя в зависимости от длины ступичной части нагреваемого колеса 8. Подвижные магнитопроводники опираются на четыре штыря 9, закреплённые на подпружинной рамке 10. Четыре пружины растяжения прикреплены одним концом к рамке, а другим к опорам 11, расположенным на текстолитовом основании 12. Нижние магнитопроводники 4 закреплены неподвижно на основании 12. Средние 5 перемещаются в радиальном направлении по направляющим, расположенным в верхней части нижних 4. На основании 12 размещены четыре стойки (на рисунке не показаны), к верхним частям которых прикреплена текстолитовая плита 13. На этой плите неподвижно закреплены вертикальные магнитопроводники 6 и направляющие, по которым в радиальном направлении перемещаются верхние магнитопроводники 7. Здесь же закреплены четыре регулируемых стержня 20, на которые опирается торцевой поверхностью диск нагреваемого колеса 8. Высота стержней устанавливается такой, чтобы все средние магнитопроводники 5 легко перемещались, и одновременно между ними и торцевой поверхностью диска колеса 8 был минимально возможный зазор. На плите 13 вокруг центрального отверстия, расположены восемь направляющих (шесть 21 и две 22). В резьбовые отверстия направляющих 22 ввинчиваются упоры 23, фиксирующие индукционный нагреватель относительно колеса. В рабочем положении упоры 23 стопорятся контргайками. Расположенные на плите 13 рым-болты 25 предназначены для подвешивания индукционного нагревателя на грузоподъёмном устройстве. В нерабочем состоянии индукционный нагреватель опирается на четыре резиновые прокладки 24, закреплённые на основании 12.

Такая конструкция нагревателя позволяет осуществить независимый и последовательный нагрев в начале массивной части колеса катушкой 1 с магнитной цепью из магнитопроводников 5, 6 и 7, а затем тонкостенной ступицы – катушкой 2 с магнитной цепью из магнитопроводников 3, 4 и 5.

Нагреватель работает следующим образом. Средние 5 и верхние 7 магнитопроводы разводятся от центра до упора (исходное положение). Из

направляющих 22 удаляются упоры 23. В нагреватель устанавливается рабочее колесо 8 так, чтобы торцевой поверхностью диска оно стало на стержни 20. Упоры 23 ввинчиваются в направляющие 22 до соприкосновения с диском колеса и стопорятся контргайками. Средние 5 и верхние 7 магнитопроводники перемещаются к центру до упора в колесо (рабочее положение), после чего нагреватель включается.

Нагрев колеса, как для сборки, так и для разборки осуществляется в автоматическом режиме последовательным включением в начале верхней, а затем нижней катушек. При разборке это время составляет соответственно 3,5 и 1-1,5 минуты в зависимости от типа ротора. При сборке – 3 и 1 минуты соответственно. После окончания нагрева колеса под разборку нагреватель с расположенным в нем колесом под действием собственного веса смещается вниз, в результате чего осуществляется съем колеса с оси. Затем вывинчиваются из направляющих 22 упоры 23, магнитопроводы 5 и 7 перемещаются в исходное положение, колесо удаляется из нагревателя и передаётся на позицию сборки с валом или для остывания после разборки.

На рис.2 представлены изменения мощности нагрева поочередно включаемых верхней и нижней катушек. Как видно из графика, теоретически рассчитанная мощность хорошо совпадает с экспериментальными данными. Падение мощности в процессе нагрева закономерно, оно происходит вследствие изменения магнитных свойств металла и изменения его температуры.

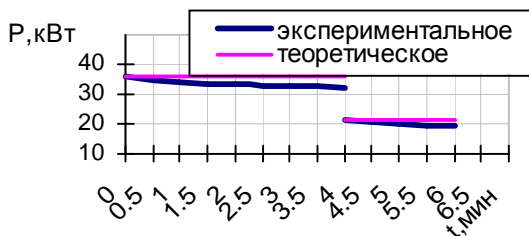


Рис.2. График изменения мощности при съеме рабочего колеса с вала ротора питательного насоса

Для определения температур при нагревании колеса насоса типа ПН 1500-340 на нём были закреплены хромель-копелевые термопары. Расположение термопар показано на рис.1 римскими цифрами. Термопара “I” установлена на посадочной поверхности массивной части колеса, термопары “II” и “III” – на наружных поверхностях различных по толщине стенки участках ступицы.

На рис.3 показано изменение температуры при нагреве под разборку колеса с валом при натяге 0,15 мм (0,0009 посадочного диаметра). Как видно из графиков, посадочная поверхность массивной части колеса при работе верхней катушки интенсивно разогревается в течение первых 3,5 минут, а затем её прогрев продолжается за счёт передачи тепла от периферийных, более горячих участков колеса.

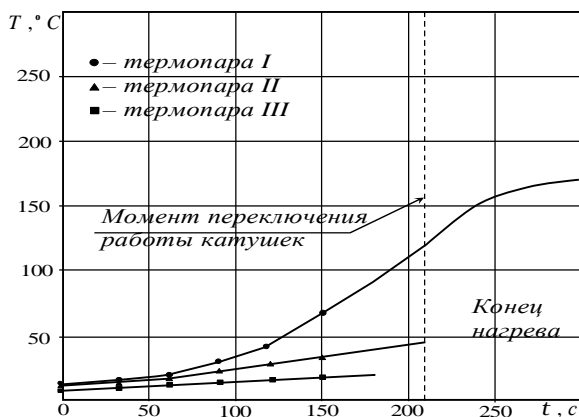


Рис.3. Изменение температуры колеса при нагревании ротора насоса ПН 1500-340

При этом тонкая часть ступицы колеса остаётся сравнительно холодной. Её температура быстро возрастает лишь после включения нижней катушки. Такое распределение температур во времени и по величине создаёт условия гарантированной разборки соединения и нагрева для сборки, позволяя сделать эти процессы высокопроизводительными и бездефектными.

Созданная нагревательная установка может явиться прототипом универсального оборудования для нагрева под сборку и разборку сложнопрофильных деталей двух- и многоэлементных соединений.

Список литературы: 1. Рихтер Л.А., Елизаров Д.П., Лавыгин В.М. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 215 с.
2. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

Поступила в редколлегию 20.04.06.

А.Н. МАРКИН, Украинская инженерно-педагогическая академия,
г. Харьков

КАЧЕСТВО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Вирішена задача оцінки якості роботи індуктора по параметру температури нагріву виробу, яка не повинна виходити за задані верхню та нижню границі. По невеликому числу експериментальних даних можна визначити вірогідність виходу температури за границі.

The task of evaluating the quality work of inductor on the parameter of temperature of heating of good, which must not go beyond set high and low bounds, is decided. On the small number of experimental data it is possible to define probability of output of temperature for scopes.

Прогнозирование качества функционирования технологических систем представляет собой проблему сегодняшнего дня, актуальность которой продолжает возрастать в связи с повышением требований к работе любых систем. Качество работы широко распространенных индукционно-нагревательных систем определяется стабильностью температурного режима нагрева изделий по заданным пределам во время эксплуатации. Выход за пределы заданных максимальной и минимальной температур отрицательно влияет на качество изделия, а в некоторых случаях от этого зависит безопасность производства. Поэтому задача безотказности работы индукционных нагревателей по температурному параметру является особенно важной для технологических процессов, связанных со взрыво- и пожароопасностью.

До настоящего времени исследований в этой и смежных областях выполнялось мало. Можно указать работы [1-3], в которых в основном определялся ресурс индукционного нагревателя.

Целью данного исследования является нахождения вероятности безотказной работы индукционно-нагревательной установки по температурному параметру T для любого момента нагрева k -ого изделия.

В процессе циклической работы индукционно-нагревательной установки ее выходной параметр T непрерывно изменяется со временем – $T(\tau)$. Установка работает качественно и работоспособна по температурному параметру, если $T(\tau)$ находится в пределах установленного поля температурного допуска, т. е. выполняется условие $\alpha \leq T(\tau) \leq \beta$, где α и β – заданные температурные пределы. Будем считать, что если температура T вышла за эти пределы, то произошел отказ установки по температурному параметру. Предполагаем, что $T(\tau)$ – случайная функция.

Если процесс нагрева изделия циклически непрерывен и в течение достаточно большого количества циклов (времени) практически сильно не меняется, то функция $T(\tau)$ является стационарной и дифференцируемой. Это