

СТОХАСТИЧЕСКАЯ УПРАВЛЯЕМАЯ СИСТЕМА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА БЫСТРОДВИЖУЩИХСЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

Лузгин В.И., Петров А.Ю., Куляшов В.Х., Лопатин И.Е.

Выполнен статистический и спектральный анализ продольного распределения температуры нагрева трубных заготовок, образующегося в процессе прокатки. Получены передаточные функции канала электронагрева индукционной проходной печи. Разработана математическая модель в среде Simulink и выполнен анализ процессов нагрева трубных заготовок в индукционной проходной печи при случайном продольном распределении входной температуры.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, статистический анализ, стальные трубные заготовки, математическое моделирование*

Statistical and spectral analyses of temperature axial distribution of pipe shell reheat temperature rising in the process of rolling was carried out. Transfer function of electric heating channel of induction pusher type furnace were received. Mathematical model of Simulink environment was developed and analysis of pipe shell heating in the induction pusher-type furnace with random temperature axial distribution was carried out.

Key words: *induction heating, statistical analysis, steel tube rounds, mathematical modelling*

Одним из наиболее эффективных методов подогрева и выравнивания температуры трубных заготовок перед прокаткой в редуцированном стане при производстве бесшовных труб является индукционный нагрев в проходных печах (ИПП) [1]. Точный нагрев трубных заготовок и минимальный разброс температуры по их длине является необходимым условием достижения требуемого качества продукции. В технологическом процессе производства бесшовных труб после нагрева трубных заготовок в газовых печах на этапах механического передела происходит охлаждение и существенное перераспределение температуры по их длине. При высокой производительности прокатных станов требуемая скорость движения трубных заготовок в ИПП достигает 4 м/с, при этом для решения задачи повышения точности нагрева и выравнивания температуры система управления индукционным нагревом должна иметь достаточную мощность, необходимое быстроедействие и высокую динамическую устойчивость. Наиболее полно указанным требованиям соответствуют системы управления нагревом по математическим моделям. Поскольку в продольных распределениях температуры (ПРТ) нагрева трубных заготовок наблюдаются значительные отклонения температуры от средних значений и большой разброс этих распределений для разных заготовок целесообразно воспользоваться статистическими и спектральными методами оценки точности нагрева.

Статистический и спектральный анализ ПРТ.

В трубопрокатных агрегатах ТПА-80 производится прокатка трубных заготовок диаметром 92 мм, длиной не более 17,5 м и толщиной стенки 2,5-9,0 мм при температуре подогрева $(850-1050) \pm 5^\circ\text{C}$.

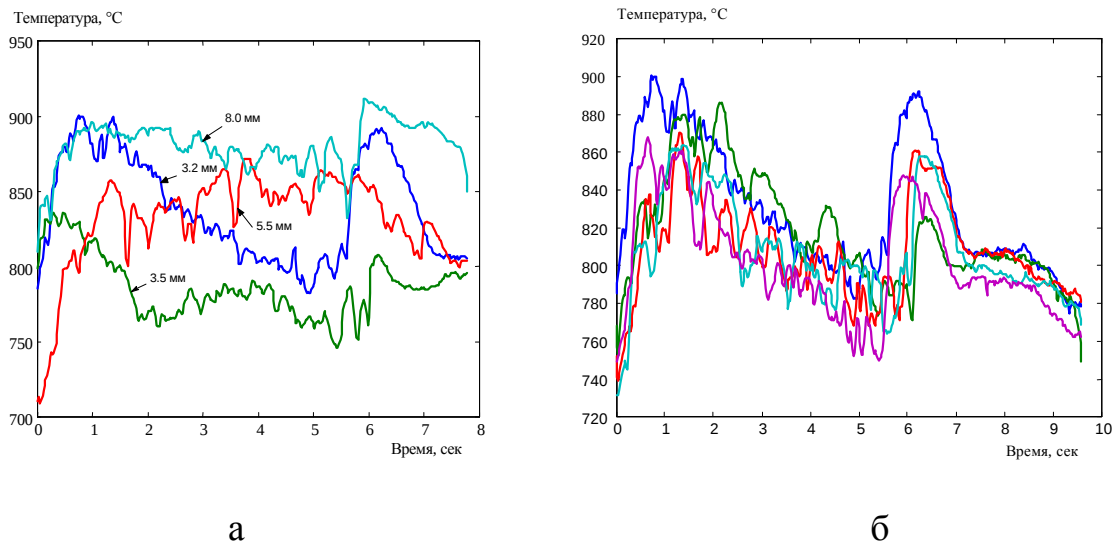


Рис. 1. Графики продольного распределения температуры нагрева трубных заготовок с разной толщиной стенки при наблюдении на входе шестого блока ИПП

В действующих ИПП, состоящих из шести блоков индукторов (по два или одному индуктору в блоке), питание которых осуществляется от электромашинных генераторов (ЭМГ), или тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ), реальное распределение температуры для пяти трубных заготовок показано на рис. 1, а. Диаграммы ПРТ представлены как функции времени, полученные в результате пирометрического сканирования движущихся со скоростью 2,5 м/с трубных заготовок в точке наблюдения при входе в шестой блок индукторов. Эти диаграммы можно рассматривать как полигармонические функции, спектры гармоник и средние значения которых существенно отличаются для трубных заготовок с разной толщиной стенки. Кроме этого, для трубных заготовок с одной толщиной стенки в функциях распределения температуры наблюдается значительный разброс, следовательно, они имеют случайный характер, что видно из диаграмм распределения температуры трубных заготовок с толщиной стенки 3,2 мм, приведенных на рис. 1, б для пяти реализаций. Оценочными характеристиками случайного процесса является дисперсия D и среднеквадратичное отклонение σ [2]:

$$D = \frac{1}{t_T} \int_0^{t_T} (T(t) - \bar{T})^2 dt; \quad s = \sqrt{D}, \quad (1)$$

где $T(t)$ - текущее значение температуры трубы в точке наблюдения,

$\bar{T}$ - среднее значение температуры трубы,

$t_T = \frac{L_T}{u}$ - время прохождения трубы в точке наблюдения,

L_T - длина трубы,

u - скорость движения трубы.

Спектральный состав $T(j\omega)$ и спектральная плотность $S(\omega)$ функций распределения температуры могут быть получены в результате прямого преобразования Фурье [3]:

$$T(j\omega) = \int_0^{\infty} T(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad S(\omega) = \frac{1}{t_T} |T(j\omega)|^2. \quad (2)$$

Сравнительный анализ графиков распределения спектральной плотности случайных функций с разной дисперсией возможен только в нормализованном виде. Нормализованная спектральная плотность случайной функции определяется отношением:

$$S_n(\omega) = \frac{S(\omega)}{D}. \quad (3)$$

На рис. 2, а приведены графики распределения нормированной спектральной плотности температуры нагрева трубных заготовок с различной толщиной стенки, которые показывают, что наибольшее значение спектральной плотности для всех труб наблюдается в узком диапазоне частот (0÷0,5 Гц), а на частоте примерно 0,15 Гц достигается их максимальное значение.

Концентрация спектральной плотности в узком частотном диапазоне сильно искажает выборочные спектральные оценки в тех частотных диапазонах, где спектральная плотность невелика. Поэтому для улучшения выборочных оценок на этих частотах целесообразной оказывается фильтрация данных высокочастотным фильтром, которая позволяет получить достоверные оценки в области высоких частот, так как отклонения температуры нагрева трубной заготовки в этой области могут превысить допустимый уровень. Графики нормированной спектральной плотности высокочастотной части спектра распределения температуры трубных заготовок с разной толщиной стенки $S_{\text{нф}}$ приведены на рис. 2, б.

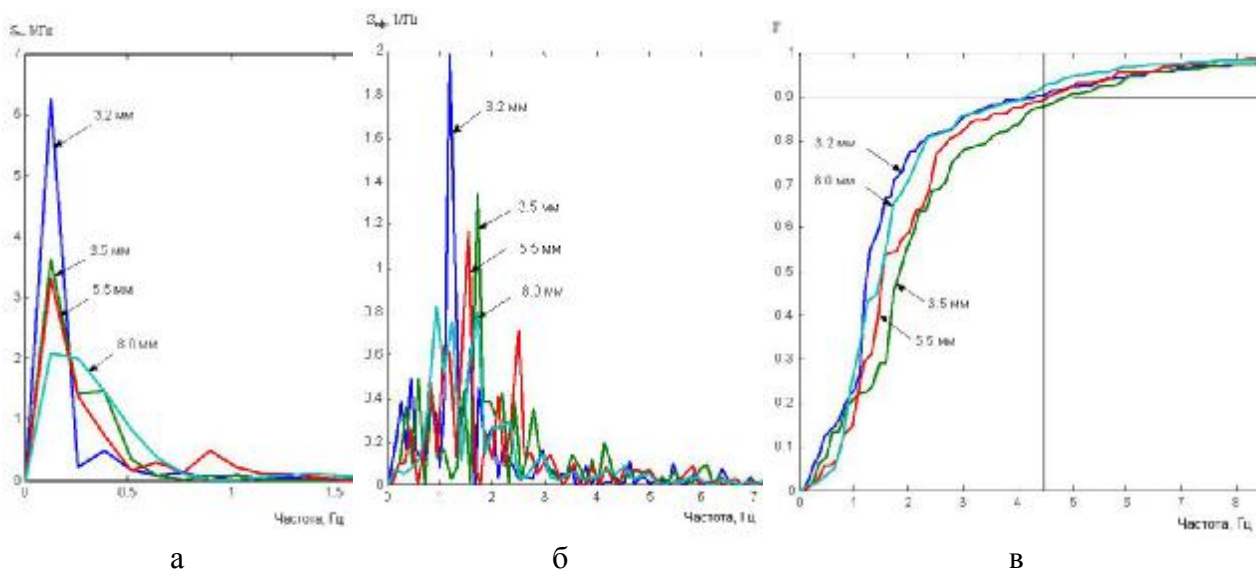


Рис. 2. Графики распределения нормированной спектральной плотности температуры нагрева трубных заготовок с разной толщиной стенки

Более наглядно частотный диапазон распределения спектральной плотности температуры нагрева трубных заготовок может быть оценен с помощью спектральной функции:

$$F(w) = \int_0^{\infty} S_{np}(w) dw. \quad (4)$$

На рис. 2, в приведены графики спектральной функции для труб с различной толщиной стенки, которые показывают, что основная часть распределения спектральной плотности ПРТ находится в частотном диапазоне 0-4,5 Гц, а в области более высоких частот $F(\omega)$ асимптотически стремится к единице, где спектральная плотность близка к нулю и определяется ошибками измерения температуры трубы.

Таким образом, статистический и спектральный анализ ПРТ показывает, что в процессе прокатки труб формируется существенная продольная неравномерность нагрева труб, характеризующаяся большими среднеквадратичными отклонениями, а наибольшая спектральная плотность ПРТ находится в частотном диапазоне 0-0,5 Гц, однако для выравнивания температуры нагрева трубы с заданной точностью ($\pm 5^\circ\text{C}$) необходимо активное управление нагревом с полосой пропускания канала электронагрева не ниже 4,5 Гц при скорости движения трубы 2,5 м/с.

Передающая функция канала электронагрева трубных заготовок.

Канал передачи энергии в трубную заготовку и превращения ее в тепловую энергию, определяющую температуру нагрева трубы, может быть представлен передаточными функциями системы "генератор – нагрузочный колебательный контур – индуктор – быстродвижущаяся труба". Структурная схема канала электронагрева (КЭН) приведена на рис. 3, в которой осуществляется связь тока управления генератора I_y , как задающего воздействия, и температуры трубной заготовки T , являющейся управляемым параметром.

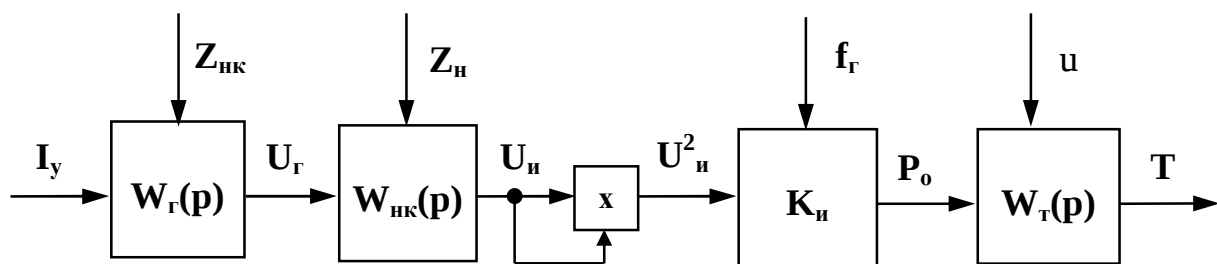


Рис. 3. Структурная схема энергетического канала ИПП

Первым звеном в структурной схеме представлен генератор (ЭМГ или ТПЧ), который может быть замещен аperiодическим звеном, связывающим ток управления и напряжение на выходе U_r :

$$W_r(p) = \frac{K_r}{1 + t_r p}, \quad (5)$$

где τ_r — постоянная времени генератора по цепи управления,

$K_r = U_r/I_y$ – коэффициент связи выходного напряжения и тока управления.

Вторым звеном в структурной схеме канала электронагрева представлен нагрузочный колебательный контур, состоящий из индуктора, компенсирующего и проходного конденсаторов. При определенном сопротивлении индуктора Z_n коэффициент связи напряжения генератора и напряжения параллельного нагрузочного контура и последовательно с ним включенного проходного конденсатора. При изменении сопротивления индуктора с трубной заготовкой изменяется и соотношение U_r/U_n , поэтому Z_n следует считать возмущающим параметром. Инерционность этого звена минимальна, а длительность переходного процесса не превышает нескольких периодов частоты генератора. Поэтому передаточная функция данного звена может быть представлена коэффициентом усиления безинерционного звена:

$$W_{нк}(p) = \frac{U_r(p)}{U_n(p)} = K_{нк}. \quad (6)$$

Последние два звена в структурной схеме энергетического канала замещают индуктор, причем первое из них отражает электромагнитный процесс преобразования напряжения на индукторе в удельную мощность на поверхности трубы P_o [4]. Эту связь можно выразить равенством:

$$P_o = K_u U_u^2, \quad (7)$$

где K_u – коэффициент связи, определенный из электрического расчета индуктора. Данное звено нелинейное и практически безинерционное.

Величина удельной мощности на поверхности трубы зависит от частоты напряжения на индукторе, так как при изменении последней изменяется глубина проникновения тока. В связи с этим целесообразно для рассматриваемого звена частоту напряжения на индукторе рассматривать как возмущающее воздействие.

Второе звено, замещающее индуктор, отражает преобразование мощности в температуру быстродвижущейся трубы. Быстрым движением трубы будем считать такую ее скорость перемещения относительно индуктора, когда передача энергии вдоль оси движения за счет теплопроводности пренебрежимо мала по сравнению с передачей энергии путем массопереноса.

Передаточная функция этого звена $W_T(p)$ линейная при постоянных теплофизических свойствах нагреваемой трубы, а процесс преобразования мощности в температуру обладает определенной инерционностью. При этом на величину температуры движущейся трубы существенное влияние оказывает скорость ее перемещения, которую следует рассматривать как возмущающий параметр. Трубная заготовка может рассматриваться как теплотехнически тонкое тело при правильном выборе частоты тока индуктора. Полагая, что удельная мощность P_o на поверхности трубы равномерно распределена по длине индуктора, для любого сечения движущейся трубы температура нагрева может быть записана как:

$$T(t) = K_T P_o t, \quad \text{при } 0 < t \leq t_n, \quad (8)$$

где K_T – коэффициент теплового преобразования (постоянная величина при постоянных теплофизических свойствах трубы);

$t_n = \frac{L_u}{u}$ – время нагрева сечения трубы, движущейся со скоростью u в индукторе длиной L_u .

При выходе сечения трубы из индуктора, если считать, что теплоотдача с поверхности пренебрежимо мала, температура остается неизменной и равной:

$$T(t) = K_T P_o t_n, \text{ при } t > t_n. \quad (9)$$

Процесс нагрева трубной заготовки во времени при прохождении индуктора конечной длины может быть представлен как нагрев в двух полубесконечных индукторах: в первом – с положительным значением P_o , а во втором, начало которого смещено на L_u – с отрицательным значением P_o .

Операторное выражение температуры нагрева сечения трубных заготовок в индукторе конечной длины за время $t_n = \frac{L_u}{u}$ может быть найдено как сумма операторных выражений температуры нагрева сечения трубы в двух полубесконечных индукторах:

$$L[T(t)] = K_T P_o \frac{1 - e^{-t_n p}}{p^2}. \quad (10)$$

Операторное выражение задающего воздействия для рассматриваемого звена как постоянной во времени величины может быть определено выражением:

$$L[P_o] = \frac{P_o}{p}. \quad (11)$$

В результате, передаточная функция индуктора с быстродвижущейся трубой может быть представлена отношениями (10) и (11):

$$W_T(p) = \frac{L[T(t)]}{L[p_o]} = K_T \left(\frac{1 - e^{-t_n p}}{p} \right) \quad (12)$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) проходного индуктора имеет вид:

$$W_T(jw_\epsilon) = -jK_T \left(\frac{1 - e^{-jw_\epsilon t_n}}{w_\epsilon} \right), \quad (13)$$

где $w_\epsilon = 2p f_\epsilon$ – частота колебаний входного воздействия.

Более общий вид АФЧХ проходного индуктора будет иметь, если ввести нормированную частоту входного воздействия:

$$n = t_n f_\epsilon = \frac{t_n w_\epsilon}{2p}. \quad (14)$$

Тогда:

$$W_T(jn) = jK_T t_n \frac{e^{-j2pn} - 1}{2pn}. \quad (15)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) индуктора определяется выражением:

$$W_T(n) = K_T t_n \left| \frac{\sin pn}{pn} \right|. \quad (16)$$

Нормированная АЧХ индуктора может быть получена в результате преобразования:

$$W_{Tn}(n) = \frac{W_T(n)}{K_T t_n} = \left| \frac{\sin pn}{pn} \right|. \quad (17)$$

Амплитудно-частотная характеристика индуктора зависит от его длины и скорости движения трубы.

Передаточная функция всего канала передачи энергии и преобразования ее в температуру нагрева трубной заготовки может быть определена как произведение передаточных функций всех звеньев в структурной схеме, приведенной на рис. 3:

$$W(p) = K_u V_u^2 W_r(p) \cdot W_{нк}(p) W_T(p). \quad (18)$$

АЧХ канала электронагрева в нормированном виде с учетом (5, 6, 17) может быть представлена как:

$$W(n) = \frac{1}{\sqrt{(t_{rn})^2 + 1}} \cdot \left| \frac{\sin pn}{pn} \right|. \quad (19)$$

Таким образом, амплитудно-частотная характеристика КЭН определена произведением АЧХ генератора и индуктора.

Анализ АЧХ канала электронагрева, образованных генераторами различного типа (ЭМГ или ТПЧ) с индукторами различной длины, позволяет определить полосу пропускания регулирующих воздействий и установить ее соответствие полосе спектральной плотности ПРТ [5]. Для КЭН, образованных ЭМГ с $\tau_r = 1$ с и индуктором длиной 1,5 м не превышает 0,2 Гц. Если в состав КЭН входит ТПЧ с $\tau_r = 0,02$ с и индуктор длиной 0,75 м, то полоса пропускания будет значительно шире, чем в предыдущем случае с границей примерно 1,4 Гц. При этом и в том, и в другом случае нет соответствия полосы пропускания КЭН и полосы спектральной плотности ПРТ, граница которой достигает 4,5 Гц. Для обеспечения этого соответствия необходимо применение еще более коротких индукторов в ИПП. Так, например, для КЭН, образованного ТПЧ с $\tau_r = 0,02$ с и индуктором 0,25 м, полоса пропускания достигает 4,3 Гц и примерно соответствует полосе спектральной плотности ПРТ.

Таким образом, для решения задачи подогрева трубы до заданного среднего значения температуры и выравнивания ПРТ с требуемой точностью в состав ИПП должны входить мощные КЭН с малой полосой пропускания, обеспечивающие значительный подъем средней температуры на каждой ступени и уменьшение отклонений температуры в низкочастотной части спектра ПРТ, а также быстродействующие КЭН с полосой пропускания, позволяющие осуществить регулирование температуры в высокочастотной части спектра ПРТ.

Передаточная функция системы управления индукционным нагревом трубных заготовок.

Зная передаточную функцию КЭН и его АФЧХ, можно оценить, с какой погрешностью будет происходить выравнивание продольного распределения температуры нагрева трубной заготовки. Если осуществить управление нагревом трубы с помощью КЭН с заданной АЧХ по разностному сигналу между установленным и текущим значением температуры $[T_y - T_{\text{вх}}(t)]$, то можно оценить отклонение температуры нагрева трубы от установленного значения $\Delta T = T_y - T_{\text{вых}}(t)$ или ошибку регулирования. Структурная схема, реализующая это преобразование, изображена на рис.4.

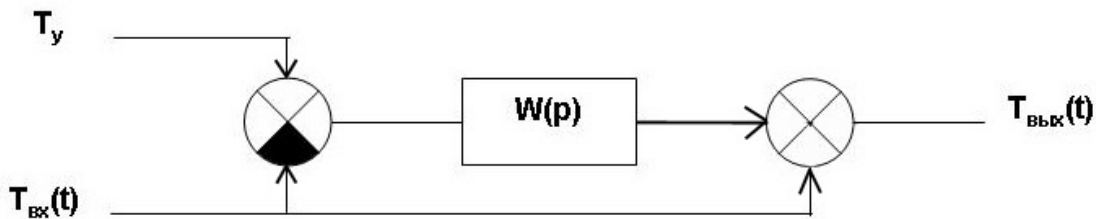


Рис.4. Структурная схема системы управления нагревом трубных заготовок

Температура нагрева трубы определяется как:

$$T_{\text{вых.}} = T_{\text{вх.}} + W(p)(T_y - T_{\text{вх.}}). \quad (20)$$

Здесь $W(p)$ – передаточная функция энергоканала ИПП согласно (19).

Абсолютное отклонение выходной температуры от заданного значения, исходя из (20), определяется выражением:

$$\Delta T = T_y \cdot [W(p) - 1] - T_{\text{вх.}} \cdot [W(p) - 1], \quad (21)$$

из которого видно, что минимальным ΔT будет в том случае, когда $W(p)$ стремится к единице в полосе частот, где наблюдаются существенные составляющие в спектре сигнала $T_{\text{вх.}}(t)$. Поскольку $T_{\text{вх.}}(t)$ является случайной функцией, то и выходное распределение температуры нагрева трубных заготовок будет также случайным процессом, который можно оценить величиной среднеквадратичного отклонения от заданной температуры. В таблице 1 приведены значения $\sigma_{\text{ош.}}$, полученные для 10 трубных заготовок и каждого из индукторов длиной 0,25; 0,75; 1,5 м с использованием соотношения:

$$S_{\text{вых.}} = |W(jn) - 1|^2 \cdot S_{\text{вх.}}, \quad (22)$$

где $S_{\text{вх.}}$ – спектральная плотность процесса $T_{\text{вх.}}$ на входе звена с АФЧХ $[W(jn) - 1]$;

$S_{\text{вых.}}$ – спектральная плотность ошибки регулирования ΔT на выходе звена $[W(jn)-1]$.

Тогда среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\text{ош.}}$ рассчитаем по формуле:

$$s_{\text{ош.}} = \frac{1}{p} \sqrt{\int_0^{\infty} S_{\text{ош.}}(n) \cdot dn} . \quad (23)$$

По данным этой таблицы можно судить о величине ожидаемого отклонения выходной температуры $T_{\text{вых}}$ от установленного значения T_y . Для того, чтобы эти отклонения не превысили допустимые значения $\pm 5^\circ\text{C}$ с вероятностью 0,95, величина среднеквадратичного отклонения должна быть не более $2,5^\circ\text{C}$ ($\sigma_{\text{ош.}} \leq 2,5^\circ\text{C}$).

Таблица 1

НОМЕР РЕАЛИЗАЦИИ	$\sigma_{\text{ош.}}, ^\circ\text{C}$		
	$L_{\text{и}} = 0,25 \text{ м}$	$L_{\text{и}} = 0,75 \text{ м}$	$L_{\text{и}} = 1,5 \text{ м}$
1	1,8	3,8	6,6
2	1,6	3,1	4,9
3	2,1	4,6	7,0
4	2,2	4,5	7,1
5	1,8	4,1	7,3
6	2,5	4,6	7,6
7	2,4	5,8	9,5
8	2,6	6,1	7,7
9	2,1	4,6	7,2
10	2,3	5,1	8,5

Следовательно, для подавления отклонений температуры нагрева трубных заготовок в высокочастотном спектре необходимо применение быстродействующих энергетических каналов управления нагревом с длиной индуктора не более 0,25 м. Если в ИПП будут энергоканалы только с индукторами длиной 0,75 или 1,5 м, заданная точность продольного распределения температуры нагрева трубы $\pm 5^\circ\text{C}$ не может быть достигнута. Очевидно, что при построении системы электропитания ИПП для нагрева трубных заготовок необходимо оптимальное сочетание энергетических каналов с короткими, высокочастотными и длинными низкочастотными индукторами, которые могли бы обеспечить нагрев и выравнивание температуры вдоль трубных заготовок во всем спектре частот с требуемой точностью и с учетом технической реализуемости самих индукторов и элементов системы энергопитания. Для решения этой задачи целесообразно в шестом блоке ИПП установить два энергоканала с однослойным индуктором длиной 0,75 м и двухслойным индуктором длиной 0,25 м [5]. При этом индукторы должны развивать мощность до 1000 кВт на частоте 2,4 кГц,

электропитание которых осуществляется от быстродействующих ТПЧ, что обеспечит необходимый подъем среднего значения температуры трубных заготовок и выравнивание ПРТ с заданной точностью. Однако с уменьшением длины индуктора допустимая мощность уменьшается по условию предельной плотности тока в обмотке индуктора.

Процесс нагрева трубных заготовок в ИПП с установленными в шестом блоке быстродействующими КЭН был рассчитан с помощью математической модели стохастической управляемой системы индукционного нагрева трубных заготовок, разработанной в среде Simulink [6]. На рис. 5 представлены диаграммы ПРТ на входе шестого блока ИПП (диаграмма 1), на выходе индуктора длиной 0,75 м (диаграмма 2) и индуктора длиной 0,25 м (диаграмма 3).

Эти диаграммы показывают, что ПРТ, имевшее на входе отклонения температуры до 100 С, уже после индуктора длиной 0,75 м существенно сглажена, а разброс температуры достигает 35°С. После прохода трубы через индуктор длиной 0,25 м отклонение температуры в ПРТ практически подавлены и не превышают 5°С.

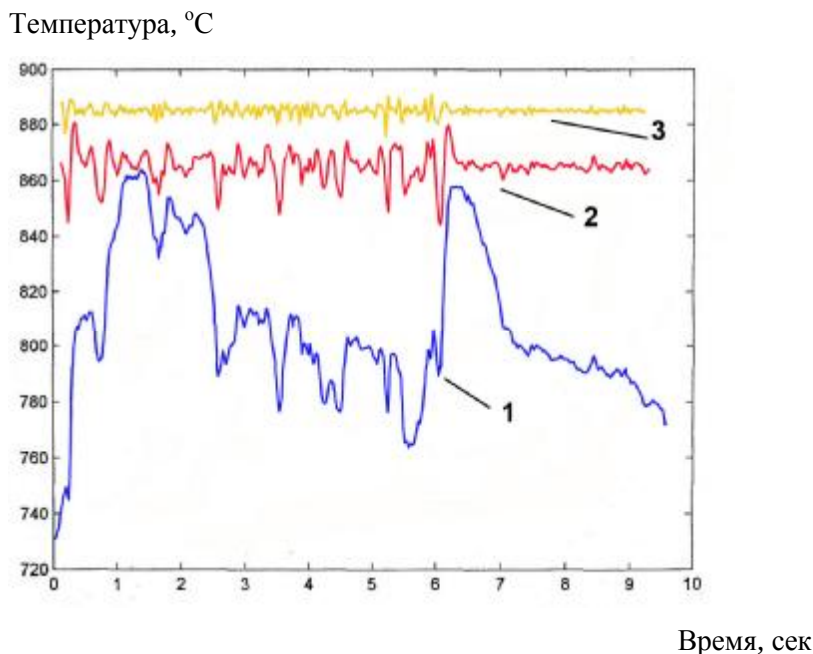


Рис.5 Диаграммы продольного распределения температуры трубы с толщиной стенки 3,2 мм при скорости ее движения 2,5 м/с:

1 — на входе в шестой блок ИПП; 2 — на выходе из индуктора длиной 0,75 м; 3 — на выходе из индуктора длиной 0,25 м.

Таким образом, модернизация действующих ИПП путем установки быстродействующих КЭН в шестом блоке позволяет повысить точность нагрева трубных заготовок как по среднему значению температуры, так и по продольному распределению температуры. Стохастическая управляемая система индукционного нагрева трубных заготовок была реализована в установке индукционного нагрева ИНЗ-9000-2,4 трубопрокатного стана Синарского трубного завода, что позволило повысить качество выпускаемой продукции.

Литература

1. Шамов А.Н., Бодажков В.А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. Л.: Машиностроение, 1974, 220 с.
2. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика. 1976, 597 с.
3. Дженкис Г., Ваттс Я. Спектральный анализ и его приложение. М.: Мир. Т.2, 1971, 316 с.
4. Кручинин А.М., Махмудов К.М., Миронов Ю.М., Рубцов В.П., Свенчанский А.Я. Автоматическое управление электротермическими установками, М.: Энергоатомиздат, 1990, 416 с.
5. Петров А.Ю. Система индукционного нагрева трубных заготовок и формирование эффективных режимов ее работы. Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – Екатеринбург, 2007 – 203 с.
6. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Куляшов В.Х. Моделирование системы «тиристорный преобразователь частоты – индуктор – быстродвижущаяся труба» в среде Simulink. //Индукционный нагрев. 2007. № 1. С-34-36.

Куляшов Виктор Харлампиевич – ведущий инженер ЗАО НПП «УПИ-Резонанс». Окончил физикотехнический факультет Томского государственного университета в 1969 г.

Лопатин Иван Евгеньевич – аспирант кафедры «Техника высоких напряжений» Уральского ГТУ-УПИ. Окончил Электротехнический факультет по специальности «Электрические и электронные аппараты» в 2005г. УГТУ-УПИ.