

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ БЫСТРОДВИЖУЩИХСЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК В ИНДУКЦИОННЫХ ПРОХОДНЫХ ПЕЧАХ

Одним из наиболее эффективных методов подогрева и выравнивания температуры трубных заготовок перед прокаткой в редуционном 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 быстродействие 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  $(850-1050) \pm 5^\circ\text{C}$ .

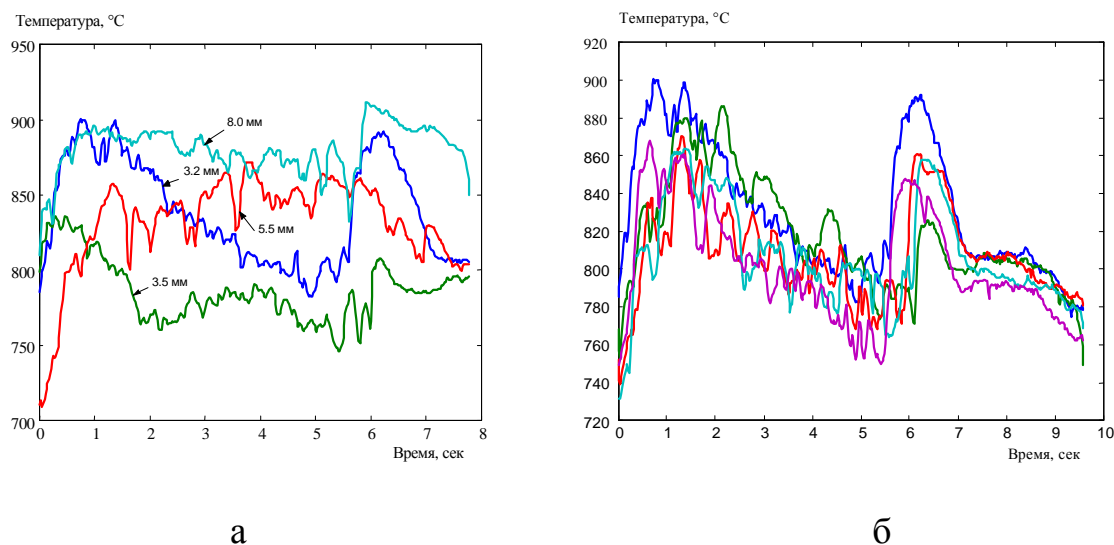


Рис. 1. Графики продольного распределения температуры нагрева трубных заготовок с разной толщиной стенки при наблюдении на входе шестого блока ИПП

В действующих ИПП, состоящих из шести блоков индукторов (по два или одному индуктору в блоке), питание которых осуществляется от электромашиных генераторов (ЭМГ), или тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ), реальное распределение температуры для пяти трубных заготовок показано на рис. 1, *a*.

Диаграммы продольного распределения температуры 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  $\sigma$  [2]:

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

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, *a* 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 приведены на рис. 2, б.

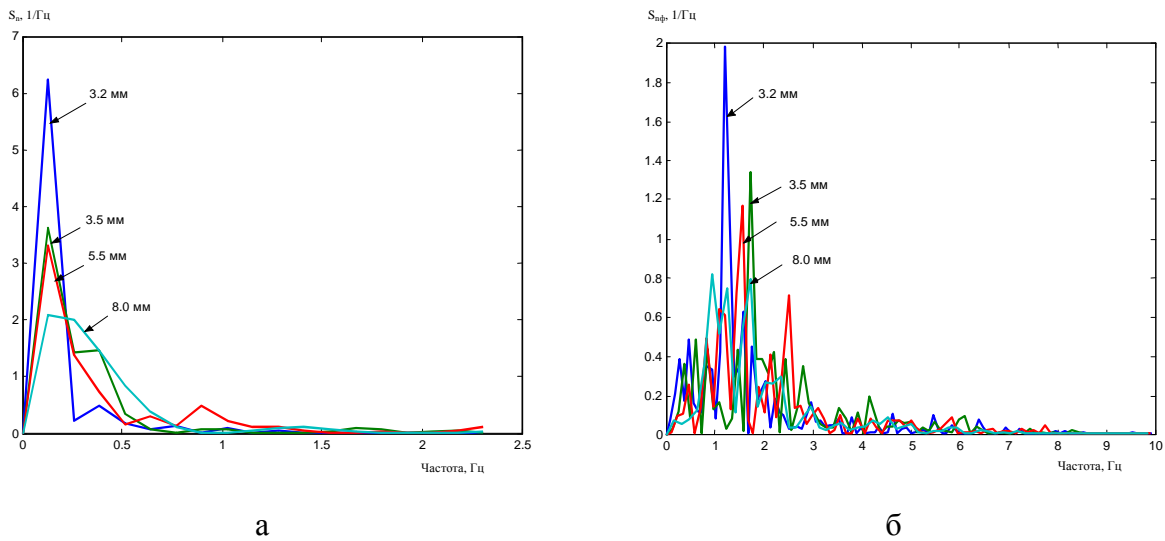


Рис. 2. Графики распределения нормированной спектральной плотности температуры нагрева трубных заготовок с разной толщиной стенки

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

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

На рис. 3 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.

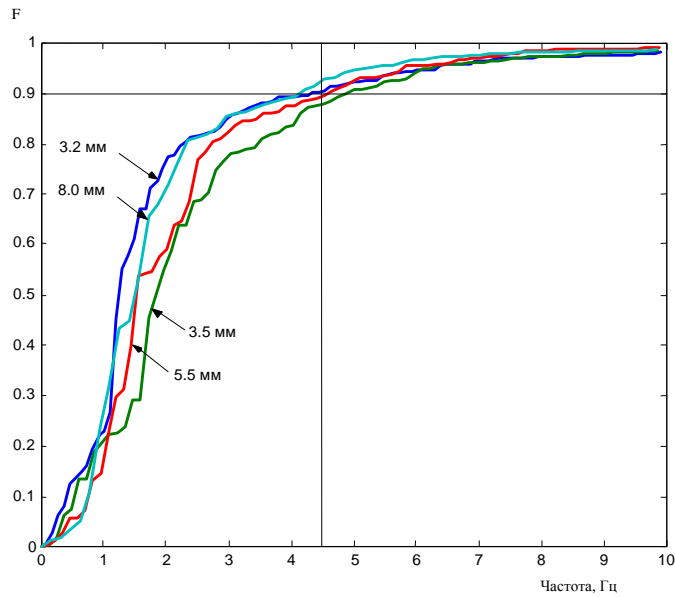


Рис. 3. Графики спектральной функции высокочастотного спектра температуры нагрева трубных заготовок с разной толщиной стенки

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.

*Передаточная 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. 4, в которой осуществляется связь тока управления генератора  $I_y$ , как задающего воздействия и температуры трубной заготовки  $T$ , являющейся управляемым параметром.

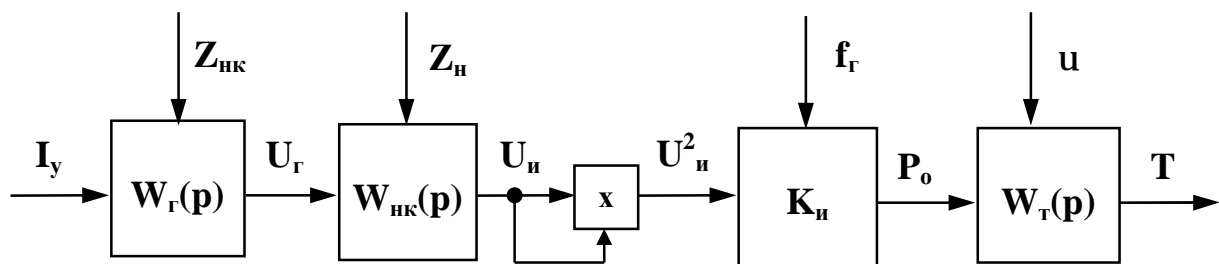


Рис. 4. Структурная схема энергетического канала ИПП

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

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

где  $\tau_r$  – 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 сопротивления 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:

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

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 па-

раметр. 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:

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

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 АФХЧ проходного индуктора будет иметь, если ввести нормированную частоту входного воздействия:

$$n = t_n f_s = \frac{t_n W_s}{2p}. \quad (14)$$

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.

Графики нормированных АЧХ индукторов длиной 0,75; 0,35; 0,25 м при скорости движения трубы 2,5 м/с приведены на рис.5, а, по которым может быть определена частотная полоса пропускания регулирующих воздействий. Соответственно для индукторов указанной длины она ограничена частотами 1,8; 3,3; 5 Гц.

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. 4:

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

АЧХ канала электронагрева в нормированном виде с учетом (1, 2, 14) может быть представлена как:

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

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

На рис.5, б приведена АЧХ индуктора длиной 1,5 м, электромашинного генератора с постоянной времени по цепи возбуждения  $\tau_r = 1$  с и всего КЭН ИПП. Указанные параметры КЭН соответствуют варианту исполнения схемы энергоканала ИПП, приведенной на рис. 1. В этой схеме по одному каналу управления для трех параллельно работающих ЭМГ осуществляется управление мощностью на двух последовательно установленных в линии нагрева трубы индукторов длиной 0,75 м, т.е. общая длина индуктора в одном канале регулирования составляет 1,5 м. Приведенные на рис.5, б характеристики показы-

вают, что полоса пропускания индуктора ограничена частотой 0,75 Гц, а полоса пропускания всего КЭН не превышает 0,2 Гц. Однако полоса пропускания КЭН значительно меньше полосы частот, в которой концентрируется спектральная плотность ПРТ, которая ограничена частотой 4,5 Гц. Поэтому для решения задачи выравнивания температуры по длине трубы необходимо использовать генераторы с малой постоянной времени в канале управления мощностью и уменьшать длину индуктора.

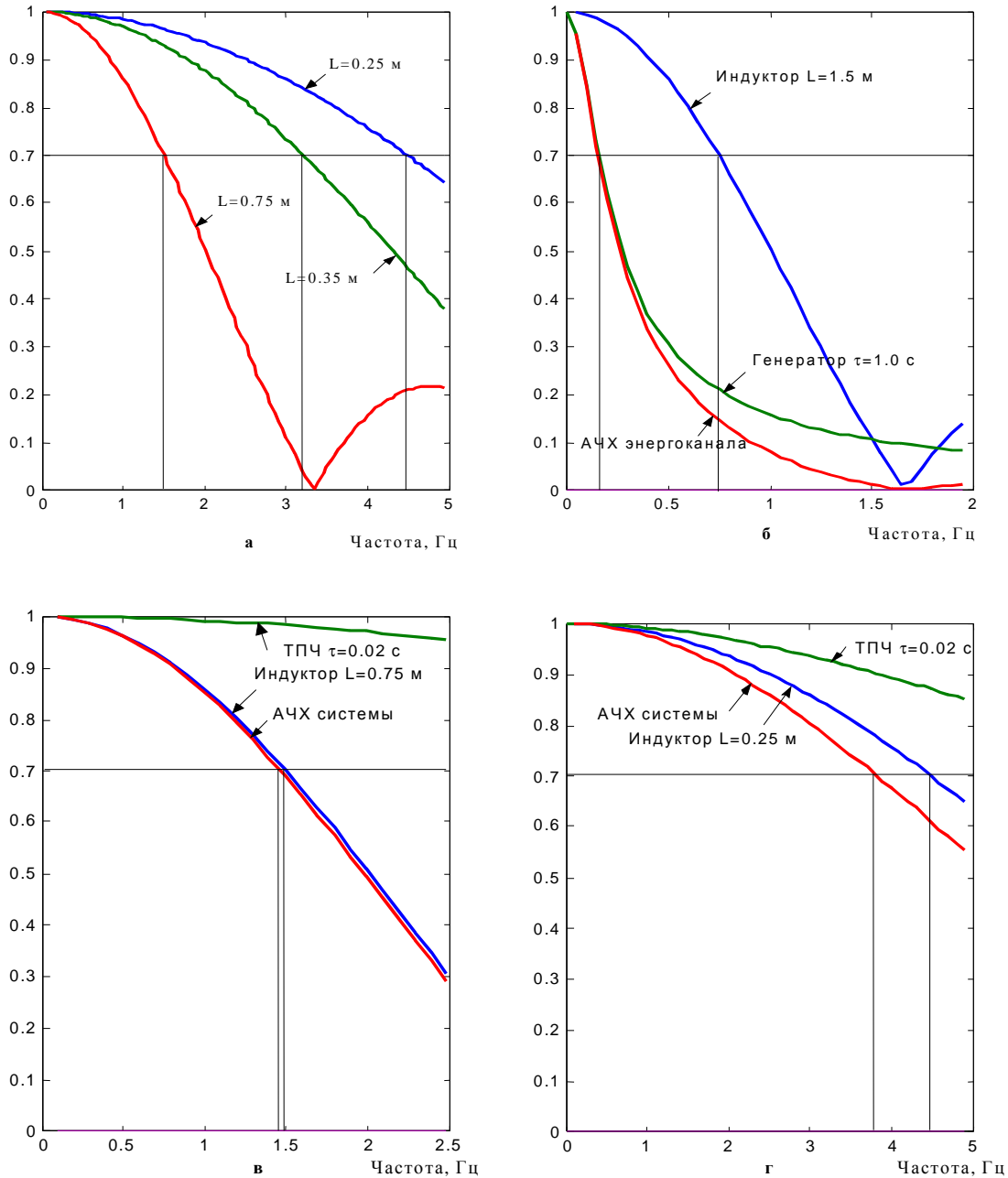


Рис.5. АЧХ канала электронагрева ИПП:

- а) АЧХ индукторов различной длины;
- б) АЧХ индуктора длиной 1,5 м, ЭМГ и КЭН;
- в) АЧХ индуктора длиной 0,75 м, ТПЧ и КЭН;
- г) АЧХ индуктора длиной 0,25 м, ТПЧ и КЭН



Если заменить ЭМГ тиристорными преобразователями частоты (ТПЧ), а КЭН сформировать для каждого индуктора с автономным управлением, то будет значительно уменьшена постоянная времени  $\tau_r = 0,02$  с, которая определена с учетом постоянной времени измерения температуры пирометром, и вдвое расширена полоса пропускания индуктора. На рис.5, в приведены АЧХ такого КЭН с индуктором длиной 0,75 м, при этом граничная частота полосы пропускания ТПЧ будет более 10 Гц, а полоса пропускания индуктора ограничена частотой 1,5 Гц. При этом полоса пропускания КЭН не превысит 1,4 Гц, следовательно, и в этом случае нет соответствия полосы пропускания КЭН и полосы спектральной плотности ПРТ.

Для достижения этого соответствия необходимо применение еще более коротких индукторов в ИПП. На рис.5, г приведены АЧХ индуктора длиной 0,25 м, ТПЧ с  $\tau_r = 0,02$  с и всего КЭН, полоса пропускания которого ограничена частотой 3,8 Гц.

*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  $[T_y - T_{\text{вых}}(t)]$ , 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.6.

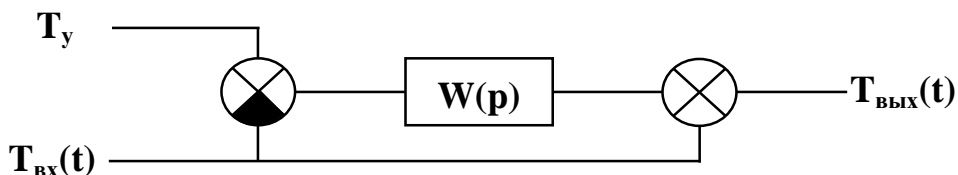


Рис.6. Структурная схема системы управления нагревом трубных заготовок

Температура нагрева трубы определяется как:

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

Здесь  $W(p)$  – передаточная функция энергоканала ИПП согласно (18).

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

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

из которого видно, что минимальным  $\Delta T$  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  $\Delta T$  на выходе звена  $[W(jn) - 1]$ .

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

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

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  $\pm 5$  °С с вероятностью 0,95, величина среднеквадратичного отклонения должна быть не более 2,5 °С ( $\sigma_{\text{ош.}} \leq 2,5$  °С).

Таблица 1

НОМЕР РЕАЛИЗАЦИИ	$\sigma_{\text{ош.}}$ , °С		
	$L_u = 0.25$ м	$L_u = 0.75$ м	$L_u = 1,5$ 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  $\pm 5 \text{ C}^\circ$  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 электропитания. 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 [4]. 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. Следовательно, применение многослойных коротких индукторов с магнитоприводами обратного замыкания поля становится необходимым условием для достижения требуемой мощности подогрева трубы с заданной точностью выравнивания ПРТ [4.5].

*Математическая модель управления нагревом трубных заготовок.*

В индукторах относительно небольшой длины распределение удельной мощности характеризуется существенной неравномерностью, а нагрев сечения трубы в краевых зонах за пределами индуктора составляет значительную долю в общем нагреве при его проходе через индуктор. Принятое в уравнении (8) равномерное распределение удельной мощности  $P_0$  справедливо для относительно длинных индукторов 0,75-1,5 м (краевой эффект незначителен) и может быть использовано для приближенной оценки передаточной функции индуктора при управлении нагревом быстро движущейся трубы. В результате точного электромагнитного расчета для короткого индуктора длиной  $L_{и} = 0,25$  м с трубами различного размера, проведенными в [7], получены графики распределения удельной мощности  $P_0(x)$  как в самом индукторе, так и в его краевых зонах. На рис. 7 приведен график распределения удельной мощности индуктора длиной 0,25 м, в котором перемещается труба диаметром 92 мм и толщиной стенки 3,2 мм.

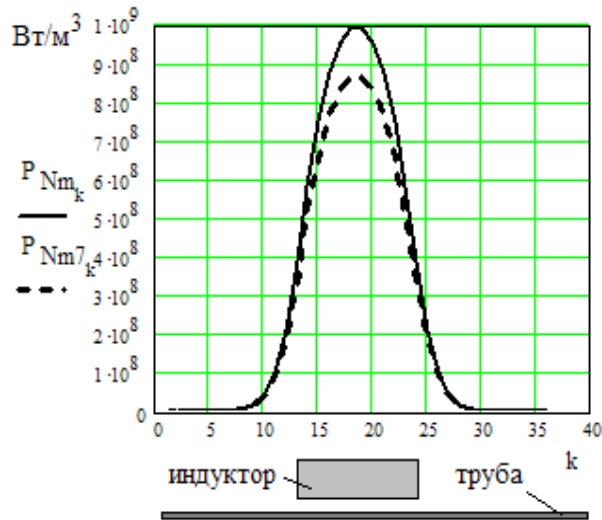


Рис. 7. график распределения удельной мощности индуктора длиной 0,25 м

Наибольшие значения  $P_{om}$  соответствуют центру зоны индуктора длиной  $L_{ин}$ , но нагрев трубы будет происходить и в краевых зонах на общей длине  $L_{\Phi} = 2L_{ин}$ . Фактическая длина нагрева определяется пределами зоны распределения  $P_o(x)$ , где значения удельной мощности становятся пренебрежительно малыми. Данная зависимость  $P_o(x)$  достаточно точно аппроксимируется функцией вида

$$(24)$$

где  $x$  – расстояние от центра индуктора;

$a = L_{\Phi}/5$  – параметр, определяющий ширину зоны распределения при аппроксимации.

При постоянной скорости движения трубы ее сечение проходит зону нагрева за время  $t_{нф} = L_{\Phi}/v$ . А уравнение электротеплового преобразования может быть представлено как:

$$(25)$$

где  $\Delta T$  – приращение температуры сечения трубы при проходе через индуктор;

$P_{om}(t)$  – удельная мощность в центре индуктора;

$q$  – количество тепловой энергии, необходимой для нагрева сечения трубы на один градус.

Используя данное уравнение, может быть реализован алгоритм управления нагревом

## 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. Богданов В.Н., Рыскин С.Е. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности. М.-Л.: Машиностроение, 1965 – 96 с.
6. Демидович В.Б. Теория, исследование и разработка индукционных нагревателей для металлургической промышленности. Дис. ... докт. техн. наук: 05.09.10 - СПб, 2002 – 316 с.
7. 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.