

## Исследование динамических характеристик системы автоматического управления температурным режимом в нагревательной печи

Скоробогатова И.В.

Научный руководитель – Гавриленко Б.В.

*г. Донецк, Донецкий национальный технический университет, Украина*

Для нагрева заготовок перед прокаткой на листовых прокатных станах применяют методические нагревательные печи (МНП). Непрерывный характер работы печи и наличие зон нагрева позволяют получить гибкое изменение температурного режима нагрева металла.

Одним из требований, предъявляемых к нагреву металла, является равномерность распределения температуры по сечению заготовки. Равномерность нагрева обеспечивают выдержкой металла в печи в томильной зоне МНП. Длительная выдержка при температуре металла более  $800^{\circ}$  ведет к образованию окалины, обезуглероживанию. Таким образом, поддержание заданного диапазона температуры в томильной зоне МНП, и соответственно температуры подогрева воздуха в рекуператоре обеспечивает равномерное распределение тепла по сечению заготовки металла [1].

Сложность проведения экспериментов для измерения теплового потока, распределения температуры по сечению металла, а также определения температуры факела и кладки приводит к недостаточному изучению вариантов изменения режимных параметров МНП. Таким образом, математическое моделирование процессов установления заданного температурного режима в МНП является составной частью общей задачи построения автоматизированной системы управления нагревом металла.

В работе [2] произведен анализ структуры двумерного объекта «печь – рекуператор», последовательно соединенные в технологической цепочке. В установившемся режиме необходимо поддерживать равенство нулю суммы тепловых напоров потоков, поступающих в нагревательную печь и рекуператор, и покидающих их.

$$\begin{cases} Q_n^r + \alpha \cdot V_{\alpha} \cdot (c \cdot t_V'' - c \cdot t_V') = M \cdot c \cdot \frac{dt_s}{d\tau} + (V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{O_2} \cdot c_{O_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{N_2} \cdot c_{N_2}) \cdot t_d'' - \alpha \cdot V_{\alpha} \cdot c \cdot t_V' \\ V_{\alpha} \cdot (c \cdot t_V'' - c \cdot t_V') = (V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{O_2} \cdot c_{O_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{N_2} \cdot c_{N_2}) \cdot (t_d' - t_d'') \cdot \eta_V \end{cases}$$

где  $Q_n^r$  – теплота сгорания топлива,  $\text{кДж/м}^3$ ;  $Q_f^v$  – физическое тепло воздуха,  $\text{кДж/м}^3$ ;  $Q_d$  – количество тепла, уходящее с дымовыми газами,  $\text{кДж/м}^3$ ;  $m$  – масса заготовки, кг;  $i$  – энтальпия  $\text{кДж/кг}$ ;  $c$  – теплоемкость,  $\text{кДж/(кг}^{\circ}\text{C)}$ ;  $t_s$  – температура сляба,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $V$  – объемный расход каждого компонента соответственно.

В томильной зоне МНП основным критерием регулирования температуры является высокая точность при отсутствии переходного процесса с перерегулированием, в зоне этого типа необходимо применять ПИД – регуляторы [2]. На рисунке 1 представлена структурная схема моделирования системы автоматического управления в томильной зоне МНП в среде MATLAB с использованием ПИД – регулятора с передаточной функцией вида:

$$W(p) = K_p + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p$$

Постановка задачи в данном случае предполагает поиск коэффициентов и значений  $K_p$ ,  $T_i$  и  $T_d$  регулятора при заданной структуре объекта управления. Неправильная установка одного из параметров ПИД-закона, и изменение любого из них ведет за собой изменение всех остальных. Последовательный подбор каждого параметра в отдельности и проверка системы на разных режимах работы приведет к стабилизации температурного режима в зоне выдержки нагревательной печи. На рисунке 2 представлен переходный процесс по установлению температуры рабочего пространства в томильной зоне МНП при изменении коэффициента передачи регулятора  $K_p = \text{var}$  (таблица 1).

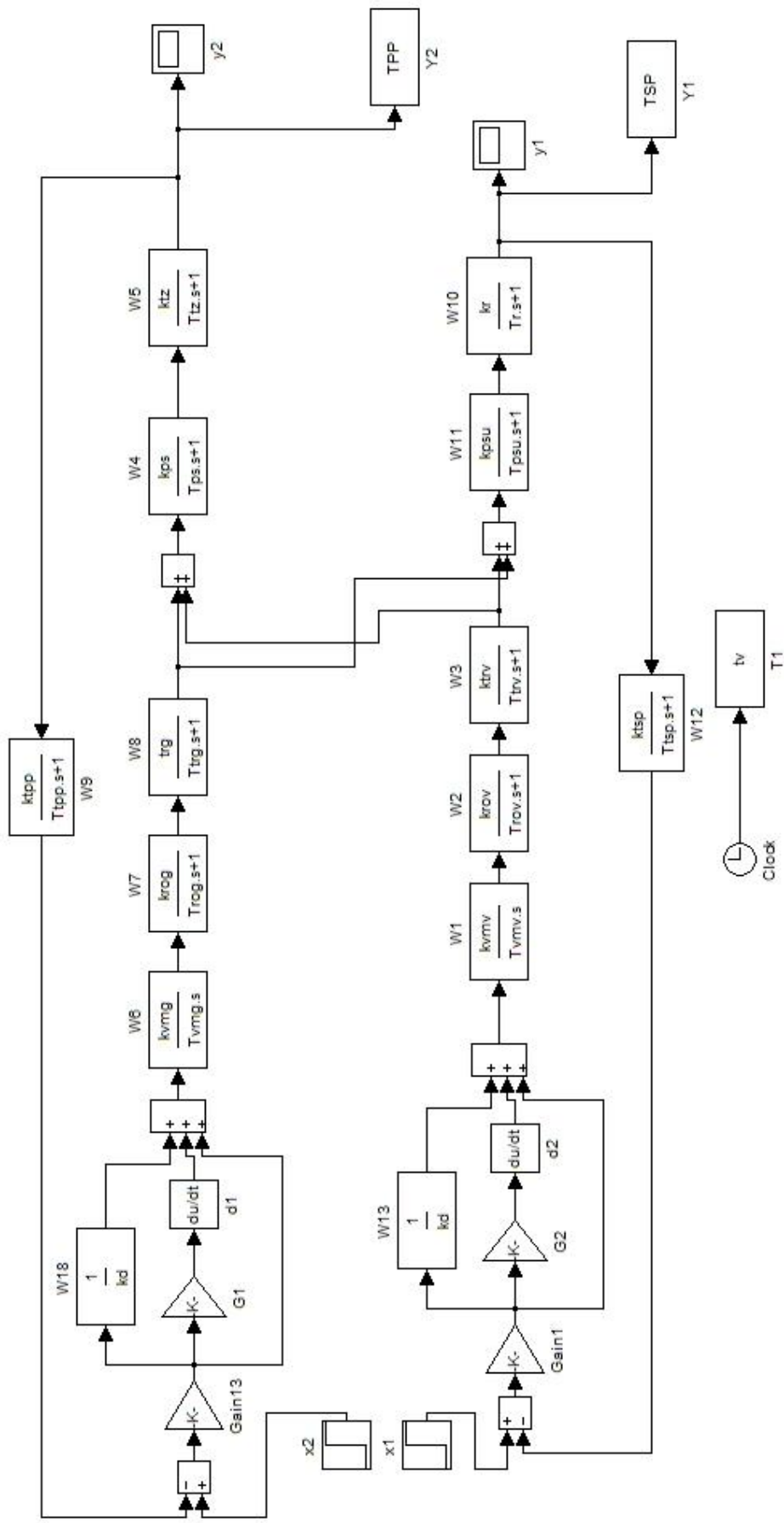


Рисунок 1 – Структурная схема моделирования системы автоматического управления в томительной зоне МНП в среде MATLAB



Рисунок 2– Переходный процесс по установлению температуры рабочего пространства в томильной зоне МНП ( $K_p = \text{var}$ )

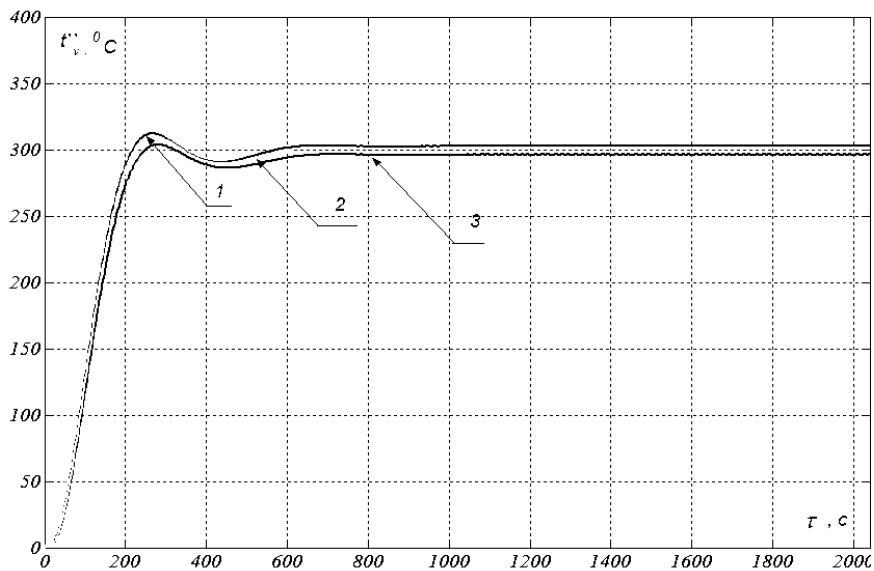


Рисунок 3 – Переходный процесс по установлению температуры нагрева воздуха в рекуператоре МНП ( $K_p = \text{var}$ )

В таблице 1 приняты следующие условные обозначения:  $Y_{yst}^{tz}$  - установление температуры рабочего пространства в томильной зоне МНП;  $Y_{yst}^r$  - установление температуры нагрева воздуха;  $\psi$  - степень затухания;  $t_{\max}$  - время достижения первого максимума;  $t_p$  - время регулирования;  $y$  - перерегулирование.

Таблица 1 – Показатели качества (рис.2, 3)

№ характеристики	$K_p$	$Tu$	$Td$	$Y_{yst}^{tz}, ^\circ C$	$Y_{yst}^r, ^\circ C$	$\psi$	$t_{\max}, c$	$t_p, c$	$y$
1	4,05	80	135	1290	310	0,925	275	610	0,03
2	3,96	80	135	1285	300	0,97	275	600	0,027
3	3,7	80	135	1265	295	1	280	590	0,024

Анализ характеристик № 1-3 подтверждает зависимость температуры рабочего пространства в зоне выдержки (рис. 2) и температуры нагрева воздуха в рекуператоре МНП (рис. 3) от коэффициента передачи  $K_p$ . При  $K_p = 3,7$  (хар-ка №2) температура в рабочем пространстве томильной зоны печи устанавливается на уровне  $1265\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это является причиной недостаточного внутреннего теплообмена и приводит к снижению механических свойств металла, и браку при нагреве металла. При последующем увеличении  $K_p = 4,05$  - температура в томильной зоне устанавливается до  $1290\text{ }^{\circ}\text{C}$  (хар-ка №1). Повышение температуры нагрева металла ведет к уменьшению деформирующего усилия при прокатке, так как при дальнейшей обработке стали с температурой нагрева  $T_{nagrev}^S > 0,8 \cdot T_{plavl}^S$  характерно искажение кристаллической решетки, присутствие остаточных напряжений, повышение пластичности. При температуре нагрева  $T_{nagrev}^S = T_{plavl}^S$  происходит быстрый рост зерен, что приводит к снижению пластичности и разрушению металла при небольших деформациях. При повышении температуры нагрева стали  $T_{nagrev}^S \gg T_{plavl}^S$  и росте окислительного потенциала атмосферы в печи, происходит окисление границ зерен (пережог), пластичность межзеренного вещества снижается, и как следствие, происходит последующее разрушение металла при прокатке [1].

На рисунке 4 и 5 приведены графики переходных процессов по установлению температуры в томильной зоне печи и температуры нагрева воздуха в рекуператоре в зависимости от изменения  $K_p = var$  и постоянной времени изодрома  $Tu = var$  (таблица 2). Рациональным параметром настройки является  $Tu = 180\text{ c}$  (хар-ка 2).

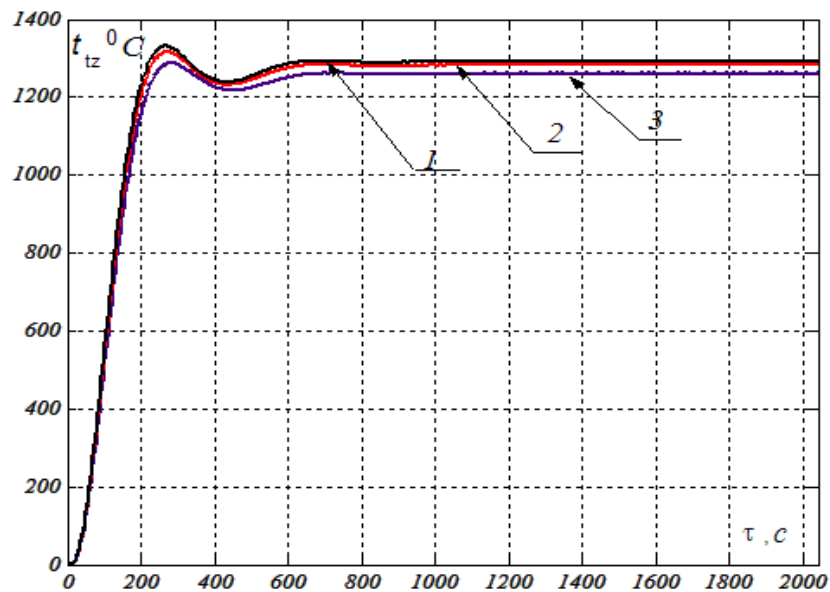


Рисунок 4 – Переходный процесс по установлению температуры рабочего пространства в томильной зоне МНП ( $K_p = var$ ,  $Tu = var$ )

Таблица 2 – Показатели качества (рис.4, 5)

№ характеристики	$K_p$	$Tu$	$Td$	$Y_{yst}^{tz},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$Y_{yst}^r,\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\psi$	$t_{max},\text{ c}$	$t_p,\text{ c}$	$y$
1	4,05	80	135	1290	310	0,925	275	610	0,03
2	3,96	180	135	1285	300	0,97	280	620	0,027
3	3,7	280	135	1265	295	1	295	625	0,024

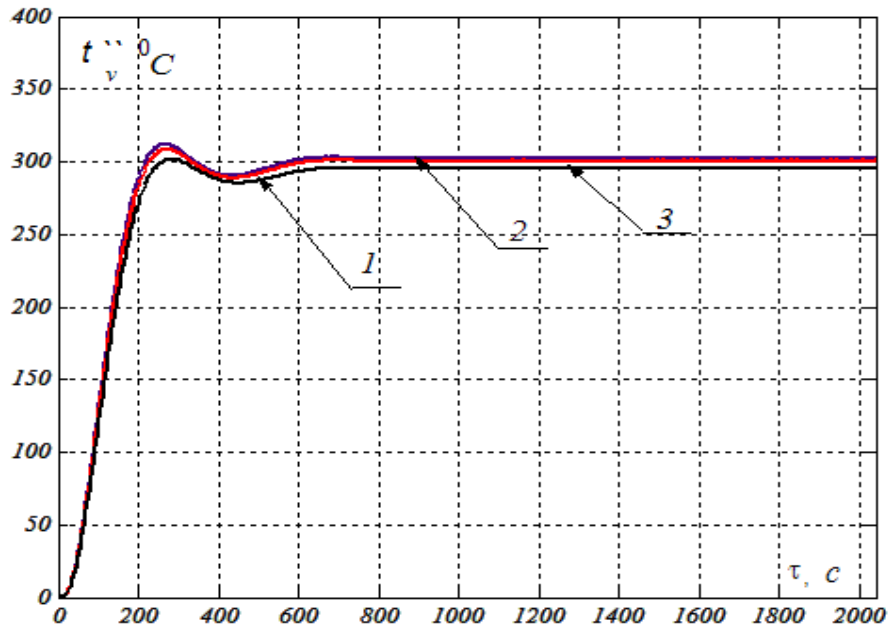


Рисунок 5 – Переходный процесс по установлению температуры нагрева воздуха в рекуператоре МНП ( $Kp = var$ ,  $Tu = var$ )

Получены графики переходных процессов по установлению температуры рабочего пространства в томительной зоне (рис. 6) и температуры нагрева воздуха в рекуператоре МНП (рис. 7) при изменении в диапазоне коэффициента передачи регулятора  $Kp = var$ , постоянной времени издрома  $Tu = var$  и постоянной времени дифференцирования  $Td = var$  (таблица 3). Рациональным считается время дифференцирования  $Td$  в диапазоне от 30-50 сек. до 180-200 сек [3], так как  $Td$  должно быть в пределах периода колебаний температуры в режиме незатухающих колебаний. от 1/8 до 1/3 периода колебаний температуры в режиме незатухающих колебаний.

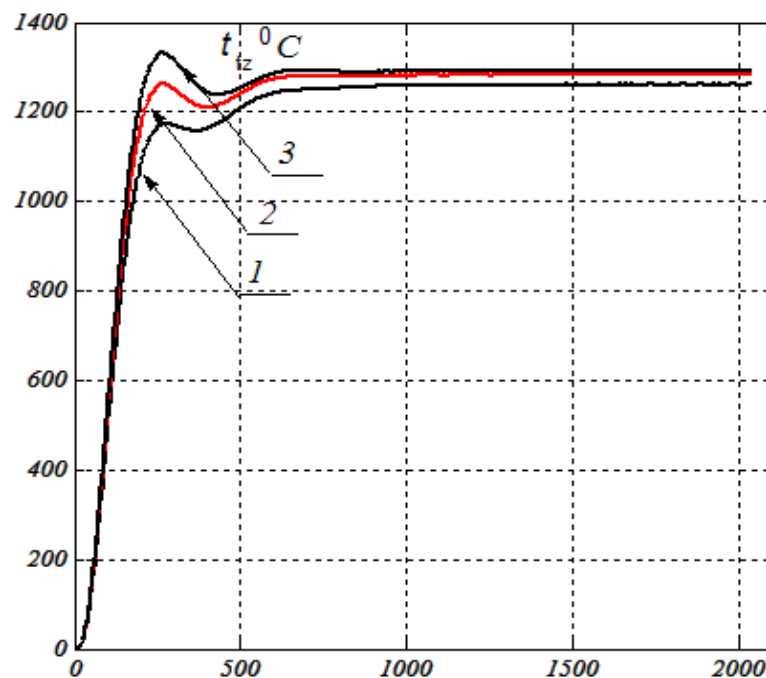


Рисунок 6 – Переходный процесс по установлению температуры рабочего пространства в томительной зоне МНП ( $Kp = var$ ,  $Tu = var$ ,  $Td = var$ )

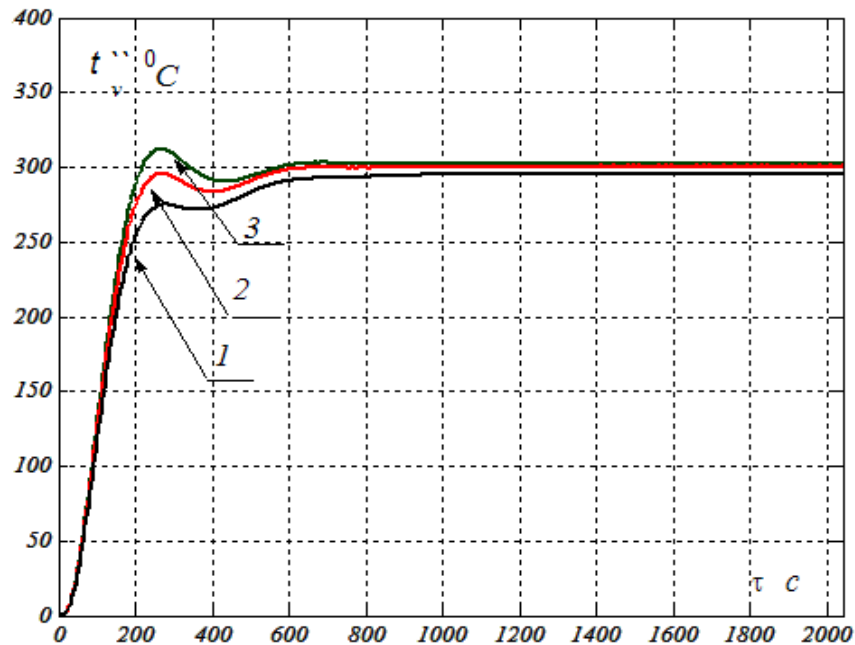


Рисунок 7 – Переходный процесс по установлению температуры нагрева воздуха в рекуператоре МНП ( $Kp = var, Tu = var, Td = var$ )

Таблица 3 – Показатели качества (рис. 6, 7)

№ характеристики	$Kp$	$Tu$	$Td$	$Y_{yst}^{tz}, ^\circ C$	$Y_{yst}^r, ^\circ C$	$\psi$	$t_{max}, c$	$t_p, c$	$y$
1	4,05	80	135	1290	320	0	275	610	0
2	3,96	180	150	1285	310	0,9	275	590	0,0077
3	3,7	280	170	1265	300	0,95	280	580	0,04

При увеличении значения  $Td$  температура в рабочем пространстве МНП и температура подогрева воздуха в рекуператоре снижается до  $1265 ^\circ C$  и  $300 ^\circ C$  соответственно. В результате анализа установлены рациональные параметры настройки регулятора для томильной зоны МНП (хар-ка 2, рис. 6, 7).

Проведен анализ влияния параметров ПИД – регулятора на стабилизацию температурного режима в зоне нагревательной печи. Полученные графики переходных процессов подтверждают поведение системы автоматического управления нагревом металла на установление заданного температурного режима в МНП и определяются путем регулирования соотношений газ – воздух. Корректная установка параметров ПИД - регулятора обеспечивает равномерное распределение тепла по сечению металла, а, следовательно, исключает выход бракованной продукции при обработке давлением.

#### Библиографический список

1. Линчевский Б.В. Металлургия черных металлов/ Линчевский Б.В., Соболевский А. Л., Кальменев А.А. М.: Metallurgy, 1986. – 360 с.
2. Скоробогатова И.В., Неежмаков С.В. Вопросы автоматической стабилизации температурного режима в томильной зоне методической нагревательной печи.// Материалы XI международной молодежной научной конференции, 17-19 марта 2010 г. – Ухта: УГТУ «Севергеозкотех-2010» – 400 с.
3. Бессекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. / Бессекерский В.А., Попов Е. П. – М.: Наука, 1975. – 768 с.