

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАСЛОНОК ВЫГРУЗКИ МЕТАЛЛА В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ В ПРОСТРАНСТВЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

**А.В. Фомин**

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС»*  
Россия, 309516, Старый Оскол, Макаренко мкр., 42  
E-mail: verner444@yandex.ru

**Ключевые слова:** ПИД-регулятор; нагревательная печь; регрессионный анализ, многомерный объект, межконтурное взаимодействие.

**Аннотация:** Статья посвящена задаче проектирования инверсного регулятора для регулирования давления в печи нагрева металла перед прокаткой. На основе реальных технологических данных построена регрессионная модель с элементами дифференциальных уравнений, описывающих с высокой точностью давление внутри пространства печи с учетом различных технологических факторов (положения шибера, общего расхода газа в печь, работы заслонок выгрузки металла). На основании полученной модели и особенностей работы контуров давления, разработан и промоделирован новый метод непрерывно-дискретного инверсного управления давлением, учитывающего работу машин выгрузки.

## 1. Введение

Металлургический комплекс является энергоемким производством, потребляя значительное количество ресурсов и топлива. Одним из неотъемлемых этапов в производстве металлопродукции, эффективность которого напрямую определяет стоимость готового продукта, является обработка металла в нагревательных печах. В частности, они являются одними из основных потребителей энергии в составе цеха проката металла. Поэтому решение задачи энергосбережения при нагреве металла перед прокаткой является перспективной и актуальной проблемой.

Современные исследования по повышению энергоэффективности печей нагрева металла можно условно разделить на несколько направлений:

1. Построение математических моделей тепловых процессов [1-5], происходящих внутри печей нагрева, и получение на основании них кривых нагрева металла. Однако, несмотря на постоянное совершенствование и усложнение получаемых моделей, ключевым недостатком математического подхода является значительная сложность многозонных печей нагрева и, как результат, трудность формализации процессов, которые протекают внутри нее.

2. Исследования влияния различных конструкций горелочных устройств, тепловых режимов, рекуперации энергии: применение скоростных, рекуперативных горелок, переход на импульсный режим отопления [6-9]. Однако, подобные решения сопряжены

с технической модернизацией печей, значительными изменениями режимов и технологии нагрева.

3. Методы адаптивного управления на базе ПИД-регуляторов [10] и интеллектуальных методов управления [11] с целью минимизации перерегулирований по температуре и повышения точности поддержания технологических параметров. Основным недостатком данных методов является относительно малое количество переходных процессов по температуре относительно всего времени работы печей, чтобы эффект от их применения стал достаточно заметен.

Управление печами на производстве ведется на основе стандартной схемы с обратной связью по выходу объекта управления. При этом локальные контура оказывают друг на друга значительное влияние в виде возмущающих воздействий, которые никак не учитываются локальными регуляторами [12]. Отсутствие учёта данных связей приводит к снижению эффективности как регулирования, так и работы печи в целом.

При этом, большая часть исследования в рамках математического моделирования, посвящена управлению именно тепловым режимом в печи, а конкретно подачей газа для сгорания в задаче регулирования температуры в зонах печи. Однако, на процесс нагрева в газовых нагревательных печах (в том числе на качество рекуперации энергии), значительно влияет такой параметр как внутripечное давление. Исследованиям влияния давления на работу печи уделяется немного внимания [13, 14], несмотря на то, что это критически влияющий параметр. При этом, на давление в печи значительно влияют другие технологические процессы, а именно выгрузка металла из печи, при которой происходит открытие окон выгрузки, что приводит к падению давления. Текущие алгоритмы не учитывают данный процесс, и регулирование давления при выгрузке ведется по обратной связи по факту падения давления.

В данной работе проведено исследование по разработке нового непрерывно-дискретного инверсного регулятора в задаче регулирования давления во время процессов выгрузки металла из печи. Инверсный регулятор [15-16], построенный на основании математической модели зависимости давления в печи, позволит рассчитывать необходимое управляющее воздействие предиктивно, то есть до или в начале действия возмущающего воздействия, вызванного открытием заслонок, что позволит значительно выиграть по быстродействию и качеству компенсации возмущения

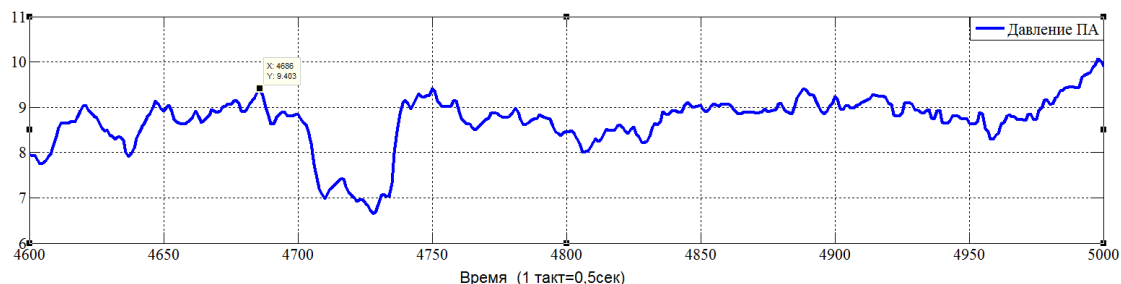
## 2. Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования в работе выступает печь нагрева металла перед прокатом сортовых заготовок. Пространство проходных нагревательных печей разделено на зоны (рис. 1): подогрева (состоит из расположенных одна над другой зон № 1 и № 2), зона нагрева (зоны № 3 и № 4) и выравнивания (зоны № 5 и № 6) с разными по видам и мощности горелками. Основные технологические требования по качеству управления сводятся к поддержанию температур в зонах печи в заданном по технологической карте нагрева диапазоне.

Контур регулирования давления представляет собой классический контур ПИД-регулирования с обратной связью. Стоит отдельно отметить, что печной шибер как исполнительный механизм является инерционным ввиду своих размеров. В проведенном ранее исследовании [17], получена регрессионная модель зависимости давления от расхода газа и открытия шиберной заслонки. Наличие регрессионной модели позволяет построить инверсный регулятор, что даст возможность предиктивно учитывать моменты открытия и закрытия заслонки, рассчитывая компенсирующее

управляющее воздействие (еще до того, как давление в печи начнет падать) с момента действия возмущения, а не по факту падения давления как при действующем ПИД-алгоритме.

Текущая схема управления не учитывает влияние открытия и закрытия заслонок выгрузки металла. Открытие заслонки приводит к существенному изменению давления внутри печи, тепловым потерям в зонах выгрузки.



**Рис. 1.** Падение давления при открытии заслонки на выгрузке при статичном положении шиберы (участок 4680-4750).

## 2.1. Разработка модели регулирования давления с помощью инверсного регулятора

Согласно проведенного ранее исследования [19], получена следующая регрессионная зависимость:

$$P = 7.73 + 0.0017 \cdot F - 0.182 \cdot U + \varepsilon$$

где  $P$  – давление в печи,  $F$  – суммарный расход газа на печь,  $U$  – процент открытия шиберы. Коэффициент регрессии  $R^2$  составил 0,81. Построение регрессионной модели на основании физических законов, а именно на основании уравнения Менделеева-Клайперона, позволяет утверждать об универсальности вида полученной зависимости для подобных тепловых объектов управления.

Однако, регрессионный анализ проводился на усредненных методом скользящего среднего данных с печи, необходимость в котором была вызвана низким качеством регрессии на первичных данных (коэффициент регрессии без фильтрации составил 0,47). При этом усреднение сглаживает работу машин выгрузки, усредняя, по сути, два различных состояния печи (статично-герметичное и работу в процессе выгрузки).

Для повышения качества модели и отказа от усреднения данных, первичные данные были отфильтрованы по факту работы машин выгрузки, благодаря чему в регрессионном анализе участвовали только данные со статично-герметичного состояния.

В результате регрессионного анализа отфильтрованных от процессов выгрузки данных (без усреднения), получена следующая регрессионная зависимость:

$$P = 10,915 + 0.0037 \cdot F - 0.2837 \cdot U + \varepsilon$$

где  $P$  – давление в печи,  $F$  суммарный расход газа на печь,  $U$  – процент открытия шиберы. Коэффициент регрессии  $R^2$  составил 0,83.

Следующей задачей стала необходимость в получении математического описания влияния на давление в печи работы машин выгрузки. Было необходимо связать дискретный параметр (наличие процесса выгрузки) с непрерывными параметрами давления, положения шиберы и расхода газа.

Была выдвинута гипотеза, что влияние падения давления от работы машин выгрузки, представляет собой аperiodическое звено первого порядка.

Пусть имеется аperiodическое звено первого порядка (1), при помощи которого аппроксимируется изменение внутрипечного давления от дискретного сигнала выгрузки.

$$W(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1}$$

Входом звена является дискретный сигнал выгрузки (0 – выгрузки нет, 1 – выгрузка есть), выходом является изменение давления ( $\Delta P$ ). Данное звено аппроксимирует дифференциальное уравнение следующего вида:

$$T \frac{\partial \Delta P(t)}{\partial t} + \Delta P(t) = k \cdot x_{\text{вх}}(t).$$

В условиях непрерывного процесса регрессионная модель на  $t + \Delta t$  временном шаге будет прогнозировать давления в виде следующей функции:

$$P(t + \Delta t) = x_1 \cdot F(t + \Delta t) - x_2 \cdot U(t + \Delta t) + x_0$$

где,  $x_0$  – свободный член модели;  $x_1$  и  $x_2$  – подобранные по МНК параметры регрессии;  $F(t + \Delta t)$  – расход газа в момент времени  $t + 1$ ;  $U(t + \Delta t)$  – положение шибер в момент времени  $t + \Delta t$ . Предиктивный характер модели гарантируется наличием информации, которая позволяет явно оценить  $U(\bullet)$  и  $F(\bullet)$  на участке  $t + \Delta t$  (информация с датчиков, параметры наблюдаемы)

Однако, изменения давления при выгрузке является расчетным параметром, и он не известен в момент  $t + \Delta t$ , но может быть восстановлен по функции вида (4). Известно, что при открытии заслонки выгрузки давление внутри печи падает, поэтому мы можем учесть его в уравнении, как величину, корректирующую на  $\Delta P(t + \Delta t)$  выход модели.

Тогда итоговая модель предиктивной оценки внутрипечного давления от расхода газа, положения шибер работы выгрузки будет иметь вид:

$$P(t + \Delta t) = x_1 \cdot F(t + \Delta t) - x_2 \cdot U(t + \Delta t) + x_0 - \Delta P(t + \Delta t) \Rightarrow$$

$$P(t + \Delta t) = x_0 - 2 \cdot \Delta P(t) - \Delta P(t - \Delta t) + x_1 \cdot F(t + \Delta t) - x_2 \cdot U(t + \Delta t) - \frac{\Delta t \cdot \Delta P}{T} + \frac{k \cdot \Delta t \cdot x_{\text{вх}}(t)}{T}$$

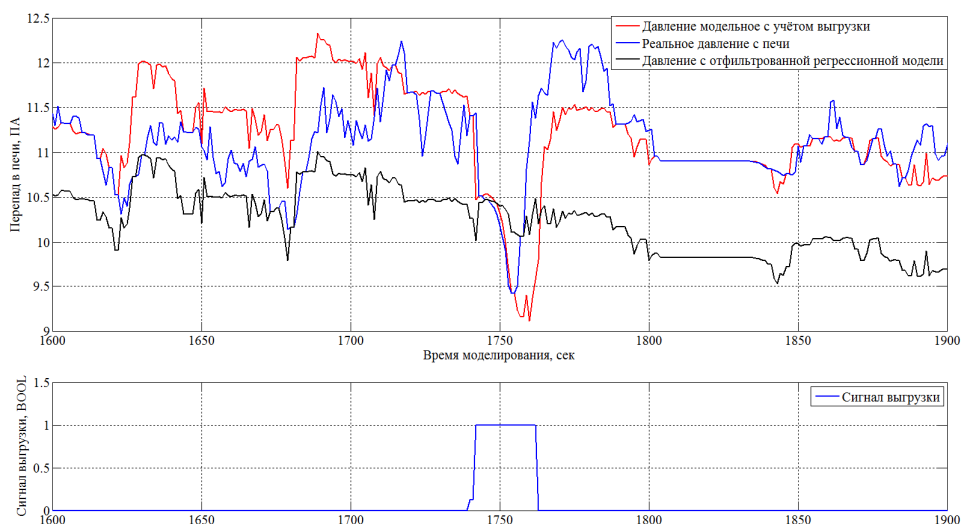


Рис. 2. Сравнительные графики.

Как видно по графикам, модель, учитывающая моменты выгрузки, с достаточной точностью описывает давление внутри печи. Ошибка составляет в среднем 0,9 единиц по MAE. Усредненная регрессионная модель значительно проигрывает как в точности в статичном режиме, так и в режиме выгрузки.

Наличие математической модели позволит в дальнейшем отказаться от непрерывного регулирования по ПИД-закону управления, перейдя к дискретно-непрерывному инверсному управлению, в котором процент открытия шибер при

цикле загрузки/выгрузки будет рассчитываться инверсным регулятором, а не формироваться ПИД-регулятором.

## Список литературы

1. Гинкул С.И., Бирюков А.Б., Иванова А.А., Гнителиев П.А. Прогнозная математическая модель процесса нагрева металла в печах с шагающими балками // *Металлург*. 2018. № 1. С. 24-28.
2. Бирюков А.Б., Иванова А.А. Диагностика температурного состояния металла при его тепловой обработке в печах непрерывного действия // *Металлург*. 2018. № 4. С. 33-37.
3. Андреев С. М. Прогнозирование времени нагрева заготовок в условиях нестационарного режима работы методических печей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 3 (36). С. 35-40.
4. Жуков П. И., Глущенко А. И., Фомин А. В. Модель для прогнозирования температуры заготовки по ретроспекции ее нагрева на основе бустинга структуры «случайный лес» // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. 2020. Т. 18, № 4. С. 11–27.
5. Бирюков А. Б., Иванова А. А. Управление процессом тепловой обработки металла в печи с помощью системы диагностики теплосодержания садки // *Металлург*. 2019. № 8. С. 54-58.
6. Вохмяков А. М., Казяев М. Д., Казяев Д. М. Исследование конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными горелками // *Цветные металлы*. 2011. № 12. С. 89-93.
7. Бирюков А. Б. Анализ мероприятий по повышению значения коэффициента использования топлива при нагреве металла в печах // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2013. № 10 (116). С. 31-37.
8. Бирюков А. Б. Исследование зависимости конструктивных параметров теплообменных насадок регенеративных горелок от теплотехнических условий протекания процесса // *Сталь*. 2021. № 4. С. 65-69.
9. Парсункин Б. Н., Самарина И. Г. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 55-60.
10. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И. О применении нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления нагревательными печами в различных режимах работы // *Управление большими системами*. 2015. № 56. С. 143-175.
11. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Семибратченко А.В. Регулирование расхода с помощью нечеткого регулятора с двойной базой правил // *Нефтегазовое дело*. 2017. Т. 15, № 1. С. 210-215..
12. Фомин А.В. Математическая модель зависимости расхода газа в зонах печи от производительности прокатного стана // *Металлург*. 2023. № 2. С. 111-116.
13. Парсункин Б.Н., Самарина И.Г. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 55-60.
14. Парсункин Б.Н., Васильев М.И., Сибилева Н.С. Энергосберегающее автоматическое нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2. С. 63-69.
15. Widrow B. Adaptive inverse control // *Adaptive Systems in Control and Signal Processing* 1986. Pergamon, 1987. P. 1-5.
16. Plett G.L. Adaptive inverse control of linear and nonlinear systems using dynamic neural networks // *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2003. Vol. NN-14, No. 2. P. 360-376
17. Фомин А.В., Жуков П.И. Построение математической модели давления в рабочем пространстве многозонной печи // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2022. № 1. С. 19-25. DOI 10.25791/asu.1.2022.1339