

УДК 621.78-98

Сухоносова Т.Г., Яруллин А.Р., Новак В.С.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАРАМЕТРА ДАВЛЕНИЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Аннотация. В статье рассмотрены основные этапы идентификации статических и динамических свойств параметра процесса автоматического регулирования давления в рабочем пространстве методической печи. Сложность определения значений параметров управляемого процесса вызвана несколькими факторами: непрерывностью работы печей; невозможностью проведения активных экспериментов для определения действительных характеристик: на давление в печи влияет открытие заслонок для загрузки и выгрузки металла. Проведен анализ экспериментальных данных, получена аналитическая статическая характеристика зависимости давления в печи от положения шиберов в дымоходе. Предложено три варианта моделирования динамики процесса. Параметры моделей определялись графическим способом, методом Орманса и методом оптимизации с помощью надстройки MS Excel «поиск решения». Проведен сравнительный анализ точности моделирования динамических свойств управляемого параметра с использованием интегрального квадратичного критерия. Представлены результаты расчетов параметров типового контура регулирования давления в печи. Полученная модель позволяет проводить компьютерные эксперименты по исследованию поведения систем автоматического регулирования давления в рабочем пространстве печи для разных начальных условий, выбирать в соответствии с поставленной задачей оптимальные способы и законы регулирования.

Ключевые слова: методическая печь, давление в печи, идентификация, математическая модель, динамические параметры объекта, регулирование давления в печи, метод Орманса

Введение

Для эффективного автоматического управления технологическим процессом необходимо иметь не только точную и достоверную информацию о текущем состоянии технологического объекта, но и математическое описание, иначе говоря, модель объекта управления. Одна из основных задач автоматического управления заключается в подборе параметров настройки регулятора под конкретный технологический объект с заданными ограничениями и известными режимами работы [1]. Для облегчения расчета настроек регулятора в настоящее время используется математическое моделирование, а для создания математической модели необходимо определить динамические параметры объекта.

Сложность создания математической модели непрерывного технологического процесса, которым является нагрев металла перед прокаткой в методических печах, обуславливается тем, что по технологии нет возможности подавать тестирующие воздействия для снятия экспериментальных статических характеристик или кривых разгона [2]. В работе рассмотрена идентификация параметров объекта системы автоматического управления давлением в рабочем пространстве методической печи стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК» в ситуации отсутствия возможности проведения активных экспериментов.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные по изменению давления в рабочем пространстве нагревательной печи и положения шиберов в дымоходе

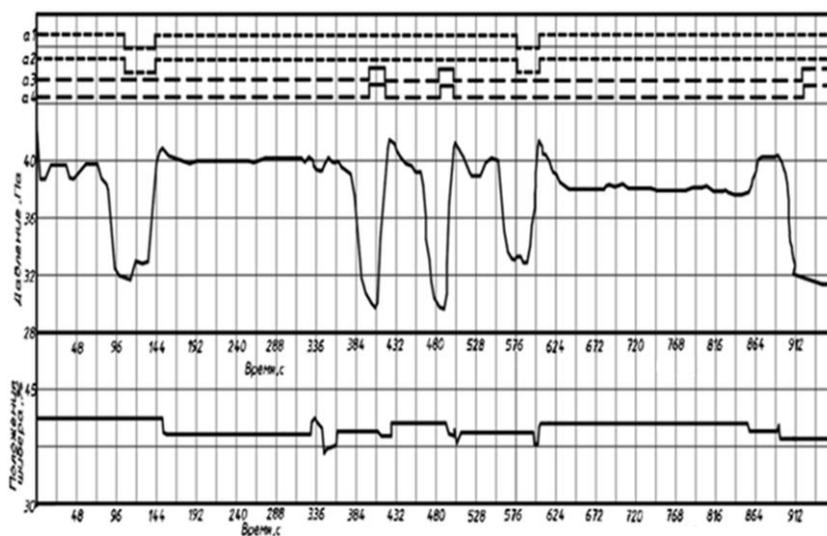


Рис. 1. Экспериментальные графики изменения параметров газодинамического режима методической печи стана 2000 ПАО «ММК»

© Сухоносова Т.Г., Яруллин А.Р., Новак В.С., 2023

для стана 2000 ПАО «ММК». На указанном рисунке сигналы a1 и a2 – это левая и правая заслонки со стороны загрузки печи. Высокому уровню сигналов a1, a2 соответствуют закрытые заслонки со стороны загрузки, а низкому уровню сигналов a1, a2 – открытие заслонок для загрузки металла в печь. Сигналы a3 и a4 – это левая и правая заслонки со стороны выгрузки. Высокому уровню сигналов a3, a4 соответствуют открытые заслонки для выгрузки металла, а низкому уровню – закрытые заслонки.

По рис. 1 очевидно, что основным возмущающим фактором, влияющим на давление в рабочем пространстве печи, является открытие заслонок на загрузке и выгрузке. Причем открытие окон со стороны выгрузки приводит к большему падению давления. Это вызвано тем, что датчики давления находятся в последней по ходу металла зоне печи.

При закрытых заслонках контур регулирования давления находится в автоматическом режиме работы. На время открытия заслонок автоматический режим работы регулятора блокируется, и расчет управляющего воздействия и изменение положения вала исполнительного механизма на шибере в дымовом тракте приостанавливаются и остаются такими же, какими были до открытия заслонок. Через 5–10 с после закрытия заслонок вновь включается автоматический режим работы контура.

Математическое моделирование статических и динамических свойств объекта управления

Для определения динамических параметров объекта управления был выделен участок на предпоследней минуте наблюдений (см. рис. 1). На указанном участке не было влияния возмущающих факторов, и управляющее воздействие X изменилось практически ступенчато и оставалось постоянным на всем протяжении роста управляемой величины Z . Поэтому переходный процесс на указанном участке аналогичен кривой разгона, а значит, можно выполнить графические построения для определения динамических параметров объекта (рис. 2).

Динамические параметры объекта, определенные графически: время запаздывания $\tau_3 = 2,5$ с, постоянная времени $T_0 = 6$ с, коэффициент передачи объекта $K_{об} = 2,98/(-1,16) = -2,57 \text{ \%}/\text{Па}$ [3].

Для моделирования переходных процессов в контуре автоматического управления необходимо задать статическую характеристику объекта, отражающую зависимость между входной управляющей и выходной управляемой величиной в установившемся режиме работы [3].

Для получения соответствующих экспериментальных данных необходимо переходить на дистанционный режим работы и задавать различные по величине тестовые воздействия, что невозможно при принятом режиме работы на непрерывном агрегате, коим является методическая нагревательная печь. Множество экспериментальных точек для расчета

статической характеристики находятся в небольшой окрестности точки, соответствующей номинальному, принятому на производстве режиму работы (см. рис. 1). Поэтому статическую характеристику рассчитали аналитическим путем, что для задач моделирования работы контура управления и расчета настроек регулятора будет вполне достаточно.

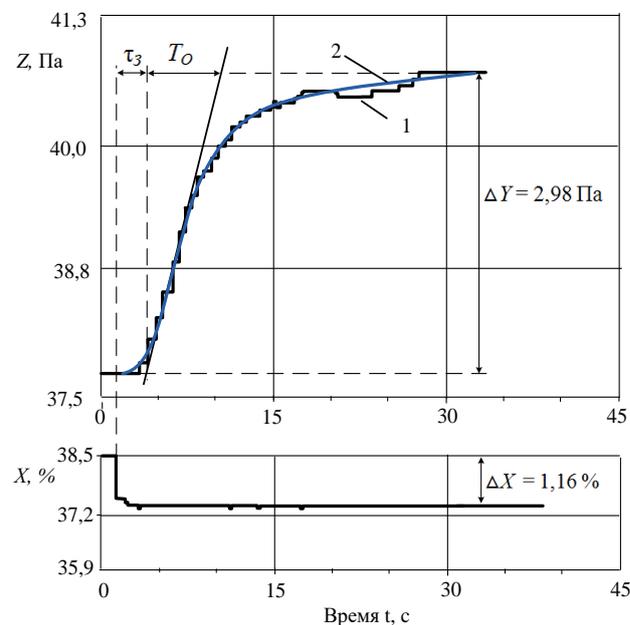


Рис. 2. Экспериментальная кривая разгона: 1 – экспериментальные данные; 2 – сглаженная кривая

Известно, что при открытии шибера дымохода давление в рабочем пространстве печи уменьшается нелинейно и может быть описано полиномом третьей степени, о чем свидетельствуют работы [2, 4–9]. Максимальное избыточное давление не превышает значения 100–120 Па, а в нормальном режиме работы держится на уровне 25–45 Па для данной методической печи. В работе была принята статическая характеристика следующего вида:

$$Y(X) = -0,00029X^3 + 0,0606X^2 - 4,584X + 140,42.$$

Динамические свойства смоделируем последовательным соединением инерционного звена с постоянной времени T_M и звеном запаздывания с временем τ_M . Переходная функция модели первого порядка $h_1(t)$ с запаздыванием примет следующий вид:

$$h_1(t) = \begin{cases} Z(0) + K_{об} \cdot \Delta X \left(1 - e^{-(t-\tau_M)/T_M} \right), & \text{при } t \geq \tau_M \\ Z(0), & \text{при } t < \tau_M, \end{cases} \quad (1)$$

где ΔX – приращение входной величины; $Z(0)$ – значение выходной величины в момент подачи управляющего воздействия (см. рис. 2).

Параметры модели определим из двух условий [3]:
 – в точке перегиба переходной характеристики значения выходного сигнала модели и объекта должны совпадать: $h_1(t_k) = Z(t_k)$, где k – точка перегиба;

– в точке k скорость изменения выходного сигнала модели и объекта должны совпадать и быть максимальными для данного процесса: $dZ(t_k)/dt = dh_1(t_k)/dt$.

Для получения второго уравнения из (1) определим скорость изменения выходного сигнала модели при $t \geq \tau_M$:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{K_{об} \Delta X}{T_M} e^{-(t-\tau_M)/T_M}. \quad (2)$$

Введем дополнительный коэффициент d как отношение двух отрезков:

$$d = \frac{Z(t_k) - Z(0)}{Z(t_s) - Z(0)}, \quad (3)$$

где t_s – установившиеся значения выходной величины.

Постоянная времени модели T_M определится

$$T_M = T_{об} (1-d), \quad (4)$$

а время запаздывания τ_M :

$$\tau_M = t_k + T_M \ln(1-d). \quad (5)$$

Максимальная скорость изменения выходной величины в момент времени $t_k = 6,5$ с равна $dZ(t_k)/dt = 0,399$ Па/с, промежуточный параметр $d = 0,47$ и параметры модели $\tau_M = 4,47$ с и $T_M = 3,15$ с. Если максимальная скорость $dZ(t)/dt$ сохраняется на значительном промежутке времени, то точку k следует выбрать в начале данного промежутка.

Представим динамические свойства объекта последовательным соединением двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени T_1 и T_2 . Переходная функция модели $h_2(t)$ в этом случае при $t > 0$ примет вид

$$h_2(t) = Z(0) + K_{об} \cdot \Delta X (1 + C_1 e^{-t/T_1} + C_2 e^{-t/T_2}), \quad (6)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты, определяются как

$$C_1(t) = \frac{T_1}{T_2 - T_1}, \quad C_2(t) = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (7)$$

Для определения параметров T_1 и T_2 воспользуемся методом Орманса [10, 11]. По экспериментальной переходной характеристике определили точку N , соответствующую 70%-му диапазону изменения выходного сигнала: $t_N = 9$ с и $Z_N = 39,8$ Па. Значению по номограмме Орманса $Y_n = 0,23$ соответствует величина $Z^* = 0,35$. Параметры модели второго порядка равны $T_1 = 5,06$ с и $T_2 = 2,44$ с. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

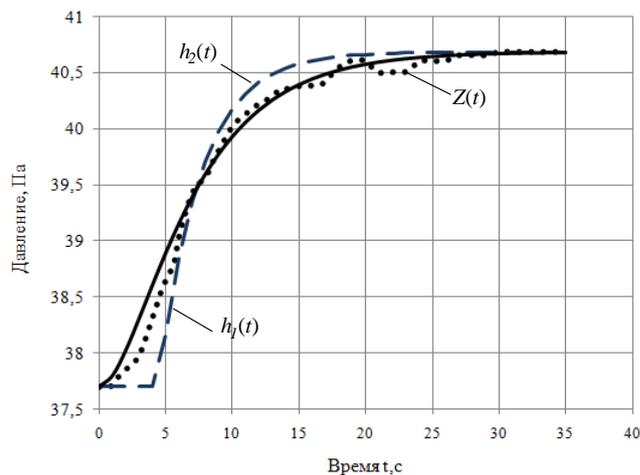


Рис. 3. Сравнительный анализ моделей $h_1(t)$ и $h_2(t)$ с экспериментальными данными $Z(t)$

Обе полученные модели недостаточно точно аппроксимируют экспериментальные данные. Подберем T_1 и T_2 , используя надстройку MS Excel «поиск решения». Целевую функцию при поиске решения определим по интегральному квадратичному критерию I :

$$I = \frac{1}{n-1} \sum_i [Z(t_i) - h_j(t_i)]^2, \quad (8)$$

где j – номер математической модели; $Z(t_i)$ – экспериментальные значения в моменты времени t_i ; $h_j(t_i)$ – расчетные значения для j -модели; i выбираем от 0 до n таким образом, чтобы t_n было больше или равно времени окончания переходного процесса.

Для модели первого порядка с запаздыванием $h_3(t)$ получили $\tau_M = 5,41$ с и $T_M = 2,76$ с. Для модели второго порядка $h_4(t)$ $T_1 = T_2 = 3,97$ с. Полученные графики представлены на рис. 4 и ближе подходят к экспериментальным данным, чем на рис. 3.

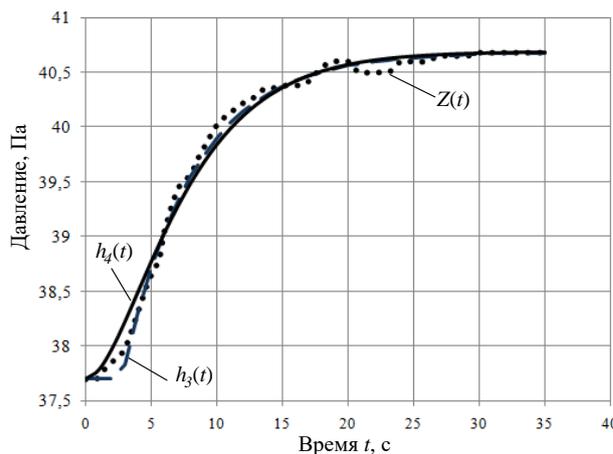


Рис. 4. Сравнительный анализ моделей $h_3(t)$ и $h_4(t)$ с экспериментальными данными $Z(t)$

Для получения точной модели объекта совсем не обязательно пользоваться машинными методами под-

бора подходящих параметров объекта. На рис. 5 приводятся графики, полученные при использовании модели второго порядка $h_5(t)$ с параметрами, определенными графически по рис. 2 и модели $h_6(t)$.

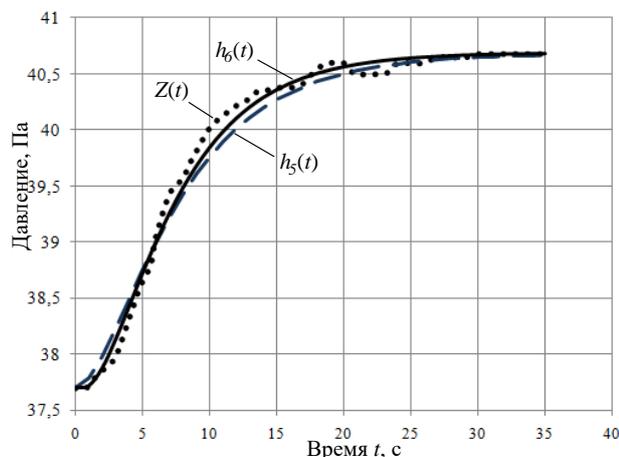


Рис. 5. Сравнительный анализ моделей $h_5(t)$ и $h_6(t)$ с экспериментальными данными $Z(t)$

Модель $h_6(t)$ – это модель второго порядка $h_2(t)$ с добавлением звена транспортного запаздывания:

$$h_6(t) = Z(0) + K_{об} \cdot \Delta X \left(1 + C_1 e^{-\frac{t-\tau_ч}{T_1}} + C_2 e^{-\frac{t-\tau_ч}{T_2}} \right), \quad (9)$$

где коэффициенты C_1 и C_2 определяются по (7), время транспортного запаздывания $\tau_ч = 0,62$ с определено подбором.

Результаты исследования

Результаты расчета интегральной квадратичной ошибки по формуле (8) для всех рассмотренных в работе моделей представлены в табл. 1 для $n = 35$ с шагом $\Delta t = 1$ с.

Таблица 1

Анализ точности моделей давления в рабочем пространстве печи

| Номер модели | Параметры модели | I по формуле (8) |
|--------------|---|------------------|
| $h_1(t)$ | По точке перегиба: $T_1 = 3,15$ с; $\tau_3 = 4,47$ с | 0,104 |
| $h_2(t)$ | Метод Орманса: $T_1 = 5,06$ с; $T_2 = 2,44$ | 0,085 |
| $h_3(t)$ | Поиск решения: $T_1 = 5,41$ с; $\tau_3 = 2,76$ с | 0,053 |
| $h_4(t)$ | Поиск решения: $T_1 = T_2 = 3,97$ с | 0,080 |
| $h_5(t)$ | Графический метод: $T_1 = 6$ с; $T_2 = 2,5$ с | 0,040 |
| $h_6(t)$ | Три звена: $T_1 = 5,06$ с; $T_2 = 2,44$ с; $\tau_ч = 0,62$ с | 0,047 |

Как видим, для рассмотренной кривой разгона наилучшее приближение дает модель второго порядка с графически определенными параметрами $h_5(t)$ и модель с параметрами, рассчитанными по методу Орманса, с добавлением звена транспортного запаздывания $h_6(t)$.

Рассчитанные статические и динамические параметры использовали для моделирования существующей на производстве САУ давлением в рабочем пространстве печи. Моделирование типового контура с пропорционально-интегральным регулятором и исполнительным механизмом постоянной скорости проводилось по методикам, описанным в [11] для начальных значений X и Z , как и на рис. 2. В результате были подобраны следующие параметры настройки: коэффициент передачи регулятора 0,47 %/Па, время издрорма 5,7 с, скорость исполнительного механизма 1,67 %/с, зона нечувствительности 0,8 %. Оптимальный переходный процесс протекает без перерегулирования и занимает 28 с.

Модель объекта управления давлением в рабочем пространстве нагревательной печи позволяет проводить компьютерные эксперименты по исследованию поведения САУ для разных начальных условий, выбирать в соответствии с поставленной задачей оптимальные способы и законы регулирования. Возможно проводить исследования переходных процессов как для стандартных регуляторов, так и для нетипичных способов управления, например с применением нечеткой логики [9, 12].

Заключение

При анализе полученных математических моделей переходного процесса и экспериментальных данных в САУ давлением в рабочем пространстве нагревательной печи можно сделать вывод, что динамические параметры объекта подобраны достаточно точно. Усложнение способов расчета параметров модели не приводит к повышению точности моделирования поведения объекта и системы автоматического регулирования.

Для моделирования работы контура автоматического управления в области номинальных режимов достаточно иметь аналитическую статическую характеристику. Полученная модель объекта управления давлением в рабочем пространстве нагревательной печи может быть использована для синтеза и расчета оптимальных настроек регуляторов разных типов.

Список литературы

1. 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(39). С. 63–69.
2. 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.
3. Сеславин А.И. Теория автоматического управления. Линейные, непрерывные системы. М.: ИНФРА-М, 2022. 314 с.
 4. Свитек А.С. Разработка алгоритма идентификации параметров моделей объектов на примере системы управления температурой // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8(80). С. 140–150.
 5. Безяев В. С., Макарычев П.П. Идентификация параметров моделей объектов методом регрессионного анализа // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 1(53). С. 19–27.
 6. Идентификация параметров динамических моделей апериодических объектов / А.М. Шубладзе, А.Д. Модяев, С.В. Федоров, С.И. Кузнецов // Проблемы управления. 2011. № 6. С. 14–20.
 7. Фомин А.В. Жуков П.И. Построение математической модели давления в рабочем пространстве многозонной печи // Промышленные АСУ и контроллеры. 2022. № 1. С. 19–25.
 8. Самарина И.Г., Мухина Е.Ю., Бондарева А.Р. Статистическая модель газодинамического режима методической печи // Современные проблемы науки и пути их решения: сборник научных статей. Вып. 28. В 3 ч. Ч.3. Уфа, 2016. С. 56–59.
 9. Моделирование управления давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечёткой логики / М.И. Васильев, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.У. Ахметов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 2(5). С. 35–45.
 10. Дубровский И.И., Лукьянов В.Л. Алгоритм реализации метода Орманса для описания объектов управления // Научное обеспечение инноваций: сб. докладов. Т. 6. Белгород, 2014. С. 173–176.
 11. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов. М.: Издательский центр «Академия», 2016. 272 с.
 12. Управление давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечеткой логики / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухоносова, М.И. Васильев // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 1(7). С. 29–34.

Сведения об авторах

Сухоносова Татьяна Геннадьевна – старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: tgobuhova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1024-1612>

Яруллин Арслан Рамилович – студент кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: arslanarullin12@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2049-3434>

Новак Владимир Сергеевич – студент кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: vladimir.novak.02@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

IDENTIFICATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF THE PRESSURE PARAMETER IN THE WORKING SPACE OF A HEATING FURNACE

Sukhonosova Tatiana G. – Assistant Professor (Eng.), Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tgobuhova@gmail.com

Yarullin Arslan R. – bachelor degree student of Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: arslanarullin12@gmail.com

Novak Vladimir S. - bachelor degree student of Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vladimir.novak.02@mail.ru

Abstract. The article considers the main stages of identification of static and dynamic properties of the parameter of the process of automatic pressure control in the working space of a heating furnace. The difficulty of determining the values of the parameters of the controlled process is caused several factors: by the continuity of the furnaces, the impossibility of conducting active experiments to determine the actual characteristics of the object, the furnace pressure is affected by the opening of flue dampers for loading and unloading metal. The analysis of experimental data is carried out, the analytical static characteristic of the object is dependence of the pressure in the furnace on the station of chimney slide valve. Three variants of modeling the dynamics of the controlled process are proposed: first-order inertia with delay, second-order inertia with delay and without delay. The parameters of the models were determined graphically, by the Ormans method and by the optimization method using the MS Excel add-in "solution search". A comparative analysis of the accuracy of modeling the dynamic properties of the controlled parameter using the integral quadratic criterion was carried out. The results of calculations of parameters of a typical pressure control circuit in a heating furnace are presented. The resulting model makes it possible to conduct computer experiments to study the behavior of automatic pressure control systems in the working space of the furnace for different initial conditions, to choose optimal methods and laws of regulation in accordance with the task.

Keywords: methodical furnace, furnace pressure, identification, mathematical model, dynamic objects parameters, furnace pressure control, Ormans method

Ссылка на статью:

Сухонослова Т.Г., Яруллин А.Р., Новак В.С. Идентификация динамических свойств параметра давления в рабочем пространстве методической печи // Теория и технология металлургического производства. 2023. №1(44). С. 39-44.
Sukhonosova T.G., Yarullin A.R., Novak V.S. Identification of dynamic properties of the pressure parameter in the working space of a heating furnace. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 44, no. 1, pp. 39-44.