

О. Г. Шутинський, к. техн. н., доцент, Д. В. Снурніков, аспірант

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОПРОВОДУ СИСТЕМИ ГАЗООЧИЩЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: математична модель, перехідна характеристика, крива розгону, апроксимація.

Система газоочищення (СГ) – технологічний комплекс котел-утилізатор – газоочищення – димосос, що складається з ряду взаємопов'язаних підсистем, які містять численні елементи управління. Очищення димових газів перед викидом їх димососом в атмосферу є складними технологічним процесом [1].

Відділення тепла в системах газоочищення є основною задачею. У зв'язку з цим до її роботи пред'являються жорсткі вимоги, що визначаються якістю газу, що очищується і продуктивністю відділення. Завдання цеху очищення газу – витягувати з забрудненого газу пил при стабільній роботі устаткування. Від стабільної роботи всієї системи залежить якість газу, що очищується, економічна ефективність встановленого устаткування, витрати на ремонт і обслуговування, та витрати за викид в атмосферу. Для оптимального режиму роботи системи необхідно забезпечити плавність управління технологічним процесом.

Газопровід відноситься до одно ємкісних об'єктів і його передавальна функція має вигляд [2]:

$$W_0(p) = \frac{k_0 \cdot e^{-p\tau}}{T_1 p + 1}, \quad (1)$$

де $k_0 = \frac{\Delta(B_{\text{вих}})}{\Delta(B_{\text{вх}})} \cdot \frac{x_{\text{вх}}^H}{x_{\text{вих}}^H}$ коефіцієнт посилення об'єкту в безрозмірному вигляді; T_1 – постійна часу [3].

У результаті проведення експерименту по зняттю тимчасової характеристики в газопроводі було нанесено збурюючу дію – ступінчаста зміна витрати оборотної води щодо номінального на 8 %, з 170 м³/год. до 185 м³/год. Для визначення цих величин була отримана експериментальна крива розгону об'єкту по каналу «витрата оборотної води – температура забрудненого газу на вході до труб Вентурі», яка представлена в таблиці 1.1

При дослідженні промислових об'єктів не вдається повністю виключити випадкові збурення. У результаті проведення експерименту реєструють деяку функцію $Z(t)$, що складається з корисного сигналу $h(t)$ і випадкового сигналу $f(t)$:

$$Z(t) = h(t) + f(t). \quad (2)$$

Для виділення дійсної перехідної характеристики застосовують різні методи згладжування. Для згладжування значень у даному випадку застосовується метод ковзаючого усереднювання, суть якого полягає в наступному: на деякому інтервалі $L \Delta t$, де L – будь-яке ціле число, здійснюється послідовне визначення ординат Z_i (де $i=0,1,2,..,n$) по

формулі[4]:

$$h_{i+L/2}^* = \frac{1}{L+1} \sum_{\beta=0}^L z_{i+\beta} \cdot \quad (3)$$

Таблиця 1.1 – Експериментальні данні

Час t , сек.	Температура T , °C	Час t , сек.	Температура T , °C
0	135	26	126,8
2	135	28	126,3
4	135	30	126
6	133,2	32	125,8
8	132,5	34	125,5
10	131	36	125,3
12	130,5	38	125,1
14	129,7	40	125
16	129	42	125
18	128,2	44	125
20	127,8	46	125
22	127,2	48	125
24	127		

Візуально оцінивши перехідну характеристику $h^*(t)$ при $l=2$ і $l=4$, вибираємо лінійне згладжування по 3-х точках ($l=2$) [3,4].

$$\begin{aligned} h_0^* &= (5Z_0 + 2Z_1 - Z_2)/6 \\ h_i^* &= (Z_{i-1} + Z_i + Z_{i+1})/3; 1 = i = N - 1. \\ h_N^* &= (5Z_N + 2Z_{N-1} - Z_{N-2})/6 \end{aligned} \quad (4)$$

Отримані дані згладжені по методу «трьох точок» і результати згладжування перехідної характеристики приведені в таблиці 1.2, графік перехідної характеристики представлено на рисунку 1.1

Таблиця 1.2 – Лінійне згладжування по трьох точках

Час t , сек.	Температура T , °C	Час t , сек.	Температура T , °C
0	135	26	126,7
2	135	28	126,37
4	134,4	30	126,03
6	133,567	32	125,77
8	132,233	34	125,53
10	131,333	36	125,3
12	130,4	38	125,13
14	129,733	40	125,03
16	128,967	42	125
18	128,333	44	125
20	127,73	46	125
22	127,33	48	125
24	127	50	125

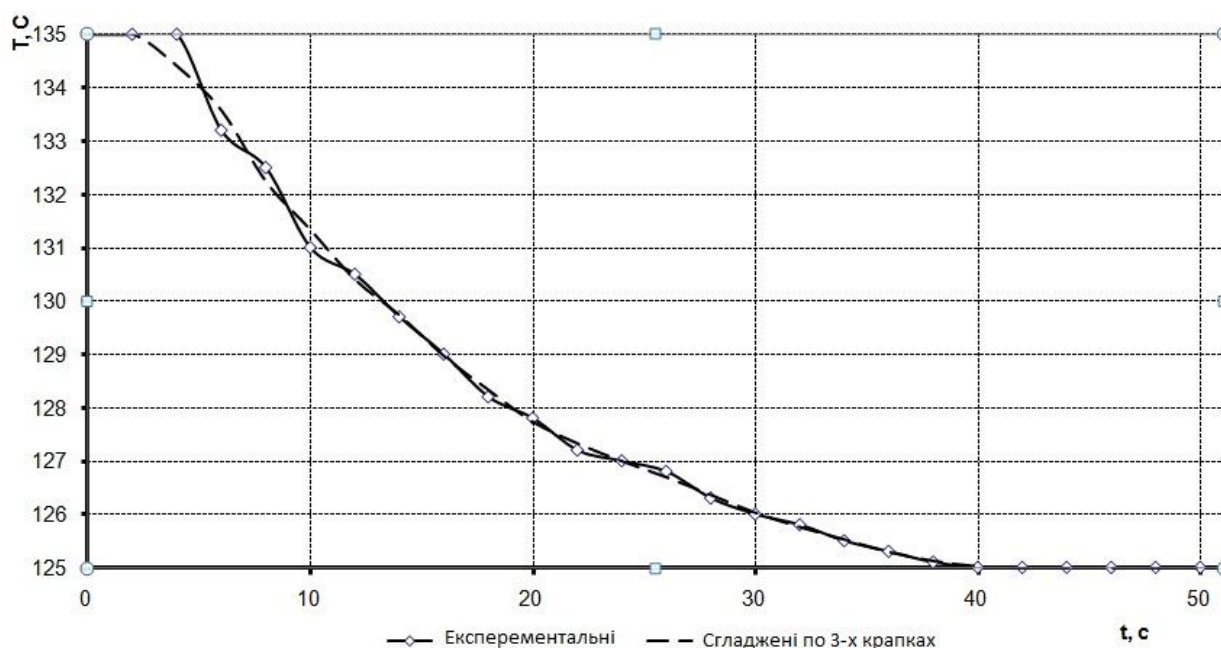


Рисунок 1.1 – Перехідна характеристика згладжена по 3-м точкам

Згладжені дані необхідно:

- привести до одного знаку;
- нормувати;
- усереднити;
- апроксимувати.

Нормування перехідної характеристики, тобто уявлення в безрозмірному вигляді необхідно проводити по формулі:

$$h(t) = \frac{\Delta Y_{вих}(t)}{\Delta Y_{вих}(\infty)}. \quad (5)$$

У незалежності від методу апроксимації, визначення коефіцієнтів починають з розрахунку коефіцієнта передачі об'єкта. Коефіцієнт передачі погоджує розмірність вихідної і вхідної величин об'єкта і розраховується по формулі:

$$K = \frac{\Delta Y(\infty)}{\Delta X(\infty)}, \quad (6)$$

де $\Delta Y(\infty)$, $\Delta X(\infty)$ – максимальне відхилення вихідної і вхідної величини об'єкту [3,5].

Значення коефіцієнта K можна визначити з графіка перехідної характеристики об'єкту з самовирівнюванням. За визначенням коефіцієнт передачі K є розмірною величиною. Це не дає можливості порівнювати коефіцієнти передачі по різних каналах збурення. Тому цей коефіцієнт часто приводять до безрозмірного вигляду. Для цього значення максимальних відхилень величини ділять на їх номінальні значення [6].

$$K = \frac{Y(\infty) - Y(0)}{Y(0)} \cdot \frac{X(0)}{X(\infty) - X(0)}; \quad (7)$$

$$K = \frac{125 - 135}{135} \cdot \frac{100}{8} = 0,93.$$

Апроксимація – заміна графіка математичними виразами. Динамічні властивості об'єкту регулювання характеризуються диференціальними виразами, перехідними і передавальними функціями, частотними характеристиками, між якими існує однозначна залежність. При розрахунку автоматичних систем регулювання, математичну модель зручно представити у вигляді передавальної характеристики. Отримати її можна в результаті апроксимації тимчасової характеристики. Розроблена велика кількість методів аналізу перехідної характеристики з метою отримання передавальної функції лінійного об'єкту регулювання [5].

Суть методів полягає у визначенні коефіцієнтів передавальної функції, заздалегідь вибраного методу, підстановка яких зводиться до отримання розрахункової характеристики найкращим чином співпадаючою з експериментальною.

Існує декілька методів апроксимації: графічно-логарифмічний, метод площ, метод вирішення диференціальних рівнянь, і ін.

Розрахунок здійснюється за допомогою ЕОМ. Початковими даними для розрахунку є експериментальна перехідна характеристика об'єкту, задана у вигляді рівновіддалених за годину ординат і величина вхідного сигналу.

Для апроксимації перехідної характеристики даного об'єкту використовуємо метод Сімою.

Метод Сімою є універсальним методом апроксимації, що дозволяє отримати апроксимуючі вирази будь-якого порядку. Цей метод дуже зручний для обробки на ЕОМ, він легко алгоритмізується та відрізняється великою точністю[1].

Апроксимуючою залежністю є дрібно-раціональна передаточна функція виду:

$$W(P) = \frac{b_m P^m + b_{m-1} P^{m-1} + \dots + b_1 P + 1}{a_n P^n + a_{n-1} P^{n-1} + \dots + a_1 P + 1}. \quad (8)$$

Невідомі коефіцієнти a_i і b_i визначають з наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} a_1 = F_1 + b_1 \\ a_2 = F_2 + b_2 + F_1 b_1 \\ \dots \\ a_i = F_i + b_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_j F_{i-j} \end{cases}. \quad (9)$$

Коефіцієнти F_i в системі рівнянь (9) розраховуються по формулах:

$$\left\{ \begin{aligned} F_1 &= \int_0^{\infty} (1-h) dt \\ F_2 &= F_1^2 \int_0^{\infty} (1-h)(1-\theta) d\theta \\ F_3 &= F_1^3 \int_0^{\infty} (1-h) \left[1 - 2\theta + \frac{\theta^2}{2!} \right] d\theta \\ &\dots \\ F_i &= F_1^i \int_0^{\infty} (1-h) \left[\frac{(-\theta)^{i-1}}{(i-1)!} + \frac{(-\theta)^{i-2}}{(i-2)!} + \sum_{j=0}^{i-3} \frac{F_{i-j-1}(-\theta)^j}{F_1^{i-j-1}} \right] d\theta \\ \theta &= \frac{t}{F_1} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Коефіцієнт F_i пов'язаний з перехідною характеристикою інтегральними залежностями (див. рис. 1.2) [3,2].

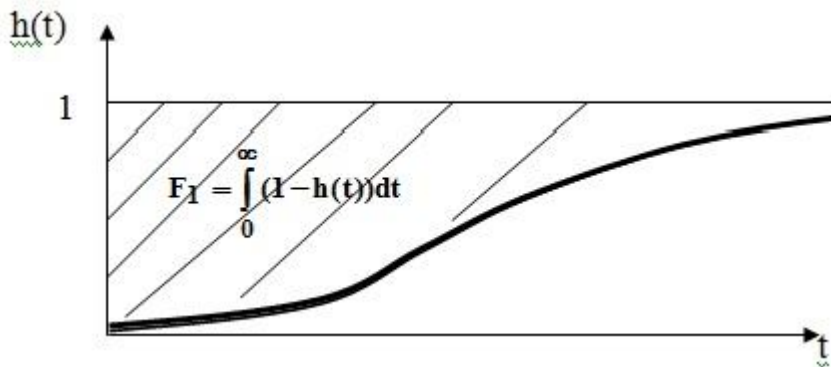


Рисунок 1.2 – Зв'язок коефіцієнта з перехідною характеристикою

У результаті проведення апроксимації отримана передавальна функція об'єкту, тобто математична модель:

$$W_0 p = \frac{-0.93e^{-2p}}{13.4p + 1}.$$

Коефіцієнти передавальної функції $T_l = 13,4$ сек.; $k=0,93$. З графіка визначаємо час запізнювання, яке дорівнює $\tau = 2$ сек., $\delta_{max} = 8,7$ %.

Література

1. Бойченко Б.М., Охотський В. Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Під-к.- Дніпро: РВА «Дніпро-Вал».– 2004. 454 с.
2. Александров Є.Є., Голуб О.П., Костенко Ю.Т., Кузнецов Б.І., Соляник В.П. Теорія автоматичного управління. – Харків, НТУ "ХПІ", 2001. 460 с.
3. Математичне моделювання об'єктів керування хімічних і фармацевтичних виробництв: навч. посібник / Красніков І.Л., Бабіченко А.К., Вельма В.І., Подустов М.О., Зайцев О.І., Бабіченко Ю.А.; за ред. А.К. Бабіченко Харків.: Вид-во ТОВ "С.А.М.", 2015

р. 224 с.

4. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Математичні методи оптимізації" [Електронний ресурс] : для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно інтегровані технології та робототехніка" / уклад.: І.Л. Красніков [та ін.]; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Електрон. текст. дані. – Харків, 2023. – 38 с.

5. Глушик М. М., Копич І. М., Сороковський В.М. Математичне програмування: підручник. ISBN 978-966-418- 103-4 - Львів: Новий Світ, 2014. 280 с.

6. Ладанюк, А. П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами : навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. 274 с.

7. Мовчан В.П., Бережной М.М. Основи металургії: Монографія. – Дніпропетровськ: Пороги, 2001. 335 с.

8. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування. – К.: Задрука, 2002р. – 424 с.

9. Гоголюк П.Ф., Гречин Т.М. Теорія автоматичного керування: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 280 с.

10. Нестеров А. Л. Проектування АСУТП. Книга 1. Методичний посібник. – Видавництво: ДЕАН, 2006 р.

11. MATLAB Global Optimization Toolbox User's Guide R2020a. The MathWorks, Inc., 2020. 878 p.

12. Жученко А. І, Ладієва Л. Р., Дубік Р. М. Динамічна оптимізація з використанням MATLAB та SIMULINK. Монографія. – Київ: НТУУ "КПІ", 2010. – 209 с.

Bibliography (transliterated)

1. Boichenko V.M., Okhotskyi V. B., Kharlashyn P.S. Konverterne vyrobnytstvo stali: teoriia, tekhnolohiia, yakist stali, konstruktsii ahrehativ, retsyrkuliatsiia materialiv i ekolohiia: Pid-k.- Dnipro: RVA «Dnipro-Val». – 2004. 454 p.

2. Aleksandrov Ye.Ye., Holub O.P., Kostenko Yu.T., Kuznetsov B.I., Solianyk V.P. Teoriia avtomatychnoho upravlinnia. – Kharkiv, NTU "KhPI", 2001. 460 p.

3. Matematychnе modeliuвання ob'ektiv keruvannya khimichnykh i farmatsevychnykh vy-robnytstv: navch. posibnyk / Krasnikov I.L., Babichenko A.K., Velma V.I., Podustov M.O., Zaitsev O.I., Babichenko Yu.A.; za red. A.K. Babichenko Kharkiv.: Vydvo TOB "S.A.M.", 2015 r. 224 p.

4. Metodychni vказivky do vykonannya laboratornykh robit z dystsypliny "Matematychni metody optyimizatsii" [Elektronnyi resurs] : dlia studentiv spets. 174 "Avtomatyzatsiia, kompiuternointehrovani tekhnolohii ta robototekhnika" / uklad.: I. L. Krasnikov [ta in.] ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Elektron. tekst. dani. – Kharkiv, 2023. 38 p.

5. Hlushyk M. M., Kopych I. M., Sorokovskyi V.M. Matematychnе prohramuvannya: pidruchnyk. ISBN 978-966-418- 103-4 – Lviv: Novyi Svit, 2014. 280 p.

6. Ladaniuk, A. P. Teoriia avtomatychnoho keruvannya tekhnolohichnymy ob'ektamy : navch. posib. / A.P. Ladaniuk, K.S. Arkhanhelska , L.O. Vlasenko – K.: NUKhT, 2014. 274 p.

7. Movchan V.P., Berezhnoi M.M. Osnovy metalurhii: Monohrafiia. – Dnipropetrovsk: Porohy, 2001. – 335 p.

8. Ostapenko Yu.O. Identyfikatsiia ta modeliuvannia tekhnolohichnykh ob'iektiv keruvannia. – K.: Zadruka, 2002r. 424 p.

9. Hoholiuk P.F., Hrechyn T.M. Teoriia avtomatychnoho keruvannia: Navch. posibnyk.– Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho univer sytetu «Lvivska politekhnika», 2009. 280 p.

10. Nesterov A.L. Proektuvannia ASUTP. Knyha 1. Methodychnyi posibnyk Vydavnytstvo: DEAN, 2006 r.

11. MATLAB GlobalOptimizationToolboxUsersGuide R2020a. TheMathWorks, Inc., 2020. 878 p.

12. Zhuchenko A.I, Ladiieva L.R., Dubik R.M. Dynamichna optymizatsiia z vykorystanniam MATLAB ta SIMULINK. Monohrafiia. – Kyiv: NTUU “KPI”, 2010. 209 p.

УДК 681.5

О. Г. Шутинський, к. техн. н., доцент, Д. В. Снурніков, аспірант

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОПРОВОДУ СИСТЕМИ ГАЗООЧИЩЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ

Система газоочищення (СГ) – технологічний комплекс котел-утилізатор – газоочищення – димосос, що складається з ряду взаємопов'язаних підсистем, які містять численні елементи управління. Очищення димових газів перед викидом їх димососом в атмосферу є складними технологічним процесом [1].

Відділення тепла в системах газоочищення є основною задачею. У зв'язку з цим до її роботи пред'являються жорсткі вимоги, що визначаються якістю газу, що очищується і продуктивністю відділення. Завдання цеху очищення газу – витягувати з забрудненого газу пил при стабільній роботі устаткування. Від стабільної роботи всієї системи залежить якість газу, що очищується, економічна ефективність встановленого устаткування, витрати на ремонт і обслуговування, та витрати за викид в атмосферу [7].

. Для оптимального режиму роботи системи необхідно забезпечити плавність управління технологічним процесом.

У результаті проведення експерименту по зняттю тимчасової характеристики в газопроводі було нанесено збурюючу дію – ступінчаста зміна витрати оборотної води щодо номінального на 8 %, з 170 м³/год. до 185 м³/год. Для визначення цих величин була отримана експериментальна крива розгону об'єкту по каналу «витрата оборотної води – температура забрудненого газу на вході до труб Вентурі».

Для виділення дійсної перехідної характеристики застосовують різні методи згладжування. Для згладжування значень у даному випадку застосовується метод ковзаючого усереднювання [8].

Апроксимація – заміна графіка математичними виразами. Динамічні властивості об'єкту регулювання характеризуються диференціальними виразами, перехідними і передавальними функціями, частотними характеристиками, між якими існує однозначна залежність. При розрахунку автоматичних систем регулювання, математичну модель

зручно представити у вигляді передавальної характеристики. Отримати її можна в результаті апроксимації тимчасової характеристики. Розроблена велика кількість методів аналізу перехідної характеристики з метою отримання передавальної функції лінійного об'єкту регулювання [3].

Суть методів полягає у визначенні коефіцієнтів передавальної функції, заздалегідь вибраного методу, підстановка яких зводиться до отримання розрахункової характеристики найкращим чином співпадаючою з експериментальною.

Існує декілька методів апроксимації: графічно-логарифмічний, метод площ, метод вирішення диференціальних рівнянь, і ін.

Розрахунок здійснюється за допомогою ЕОМ. Початковими даними для розрахунку є експериментальна перехідна характеристика об'єкту, задана у вигляді рівновідданих за годиную ординат і величина вхідного сигналу.

Для апроксимації перехідної характеристики даного об'єкту використовуємо метод Сімою [6,9].

Метод Сімою є універсальним методом апроксимації, що дозволяє отримати апроксимуючі вирази будь-якого порядку. Цей метод дуже зручний для обробки на ЕОМ, він легко алгоритмізується та відрізняється великою точністю.

У результаті проведення апроксимації отримана передавальна функція об'єкту, тобто його математична модель.

Ключові слова: математична модель, перехідна характеристика, крива розгону, апроксимація.

А. Г. Шутинский, Д. В. Снурников

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОПРОВОДА СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛИ

Система газоочистки (СГ) – технологический комплекс котел-утилизатор – газоочистка - дымосос, что состоит из ряда взаимосвязанных подсистем, которые содержат многочисленные элементы управления. Очистка дымовых газов перед выбросами их дымососом в атмосферу является сложным технологическим процессом [1].

Отделение тепла в системах газоочистки является основной задачей. В связи с этим к ее работе предъявляются жесткие требования, которые определяются качеством очищаемого газа и производительностью отделения. Задание цеха очистки газа – вытягивать из загрязненного газа пыль при стабильной работе оборудования. От стабильной работы всей системы зависит качество очищаемого газа, экономическая эффективность установленного оборудования, затраты на ремонт и обслуживание, и расходы за выбросы в атмосферу [7].

Для оптимального режима работы системы необходимо обеспечить плавность управления технологическим процессом.

В результате проведения эксперимента по снятию временной характеристики в газопроводе было нанесено возмущающее действие – ступенчатое изменение расхода оборотной воды относительно номинального на 8 % с 170 м³/в год до 185 м³/год. Для определения этих величин была получена экспериментальная кривая разгона объекта по

каналу "расход оборотной воды – температура загрязненного газа на входе к трубам Вентури".

Для выделения действительной переходной характеристики применяют разные методы сглаживания. Для сглаживания значений в данном случае применяется метод скользящего усреднения [8]

Аппроксимация – замена графика математическими выражениями. Динамические свойства объекта регулирования характеризуются дифференциальными выражениями, переходными и передаточными функциями, частотными характеристиками, между которыми существует однозначная зависимость. При расчете автоматических систем регулирования, математическую модель удобно представить в виде передаточной характеристики. Получить ее можно в результате аппроксимации временной характеристики. Разработано большое количество методов анализа переходной характеристики с целью получения передаточной функции линейного объекта регулирования [3].

Суть методов заключается в определении коэффициентов передаточной функции, заранее выбранного вида, подстановка которых сводится к получению расчетной характеристики, наилучшим образом совпадающей с экспериментальной

Существует несколько методов аппроксимации: графически-логарифмический, метод площадей, метод решения дифференциальных уравнений, и др.

Расчет осуществляется с помощью ЭВМ. Начальными данными для расчета является экспериментальная переходная характеристика объекта, заданная в виде равноудаленных по времени ординат и величина входного сигнала.

Для аппроксимации переходной характеристики данного объекта используем метод Симою [6,9].

Метод Симою является универсальным методом аппроксимации, что позволяет получить аппроксимирующие выражения любого порядка. Этот метод очень удобен для обработки на ЭВМ, он легко алгоритмизуется и отличается большой точностью.

В результате проведения аппроксимации получена передаточная функция объекта, то есть его математическая модель.

Ключевые слова: математическая модель, переходная характеристика, кривая разгона, аппроксимация.

O. G. Shutynskyi, D. V. Snurnikov

MATHEMATICAL MODELING OF THE GAS PIPELINE OF A GAS CLEANING SYSTEM IN STEEL PRODUCTION

A gas cleaning system (GCS) is a technological complex boiler-utilizer-gas cleaning-smoke exhauster consisting of a number of interconnected subsystems containing numerous controls. Flue gas purification before its emission by a smoke exhauster into the atmosphere is a complex technological process [1].

Heat separation in gas purification systems is a key task. In this regard, strict requirements are imposed on its operation, which are recognized by the quality of the gas to be cleaned and the performance of the separation unit. The task of the gas purification shop is to remove

dust from contaminated gas while ensuring stable operation of the equipment. The stable operation of the entire system affects the quality of the gas being cleaned, the economic efficiency of the installed equipment, repair and maintenance costs, and the cost of air emissions [7].

For optimal system operation, it is necessary to ensure smooth process control. For optimal system operation, it is necessary to ensure smooth process control.

As a result of the experiment on removing the temporary characteristic, a disturbing effect was applied to the gas pipeline - a stepwise change in the recycled water flow rate relative to the nominal one by 8 %, from 170 m³/h to 185 m³/h. To determine these values, an experimental curve of the object acceleration through the channel “circulating water flow - temperature of contaminated gas at the inlet to the venturi pipes” was obtained.

Different smoothing methods are used to extract the actual transient response. For smoothing of values in this case the method of moving averaging is used [8]

Approximation - replacing the graph with mathematical expressions. Dynamic properties of the control object are characterized by differential expressions, transition and transfer functions, frequency characteristics, between which there is an unambiguous dependence. When calculating automatic control systems, it is convenient to represent the mathematical model as a transfer characteristic. It can be obtained as a result of approximation of the time characteristic. A large number of methods have been developed to analyze the transient response in order to obtain the transfer function of a linear control object [3].

The essence of the methods is to determine the coefficients of the transfer function of a pre-selected form, the basis of which is to obtain the calculated characteristic that best matches the experimental one.

There are several approximation methods: graphical and logarithmic, area method, method of solving differential equations, etc.

The calculation is carried out using a computer. The initial data for the calculation are the experimental transient response of the object, given in the form of equidistant ordinates in time, and the input signal value.

To approximate the transient response of this object, we use the Simoy method [6, 9].

The Simoy method is a universal approximation method that allows obtaining approximating expressions of any order. This method is very convenient for computer processing, it is easily algorithmized and has great accuracy.

As a result of the approximation, the transfer function of the object, i.e. its mathematical model, is obtained.

Keywords: mathematical model, transient response, acceleration curve, approximation.