

технико-экономические расчеты оптимальной температуры подогрева воздуха в игольчатых теплообменниках. Расчет был произведен для печи № 40 при различных режимах производительности [5]. Большинство остальных нагревательных проходных печей – типовые и аналогичны по характеристикам печи № 40, поскольку вводились в эксплуатацию двумя этапами [6] в 1960–1980-е гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р а с ч е т оптимальной температуры подогрева воздуха в рекуператоре на примере действующей термической печи современного машиностроительного завода с технико-экономической точки зрения / В. И. Тимошпольский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 2. – С. 8–12.
2. Т е б е н ь к о в, Б. П. Рекуператоры для промышленных печей / Б. П. Тебеньков. – 2-е изд. – М.: Металлургиздат, 1958. – 405 с.
3. Р а с ч е т ы рекуператоров промышленных печей металлургического и машиностроительного производств / В. И. Тимошпольский // *Металлургические печи. Теория и расчеты: учеб.* / В. И. Тимошпольский [и др.]; под ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 7–61.
4. Р а с ч е т и конструирование современных газопламенных установок для нагрева и термообработки металла / В. И. Тимошпольский [и др.] // *Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ)*. – 2008. – № 4. – С. 34–43.
5. М е н д е л е в, Д. В. Теплотехнические исследования нагревательных толкательных печей проходного типа с целью определения и улучшения их основных энерготехнологических показателей / Д. В. Менделев // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 4. – С. 47–51.
6. О б з о р основных направлений модернизации печного парка и совершенствование технологий нагрева и термической обработки слитков и заготовок в условиях современного машиностроительного предприятия / В. И. Тимошпольский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2007. – № 4. – С. 54–62.

Представлена кафедрой
металлургических технологий

Поступила 11.11.2008

УДК 621.18-5

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ВПРЫСКОВ

Докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т., асп. ГОРЕЛЫШЕВА М. Л.

Белорусский национальный технический университет

Износ основных производственных фондов, рост цен на топливно-энергетические ресурсы, финансово-экономический кризис и увеличение затрат на текущий и капитальный ремонт актуализируют проблему существенного улучшения качества регулирования температуры перегретого пара за котлом, так как это позволит повысить экономичность, надежность и долговечность работы технологического оборудования.

Системы автоматического регулирования (САР) с дифференцированием промежуточного сигнала широко используются при автоматизации технологических процессов на ТЭС. Такие системы работают совместно с устройством коррекции параметров динамической настройки (УКПДН), которое корректирует настройку регулятора и дифференциатора в зависимости от нагрузки (рис. 1) [1–3]. Одной из главных задач при проектировании, наладке и эксплуатации САР является выбор оптимальных параметров динамической настройки системы, обеспечивающей сохранение хорошего качества регулирования в широком диапазоне изменения нагрузок, для расчета которых необходимо иметь динамические характеристики объектов регулирования.

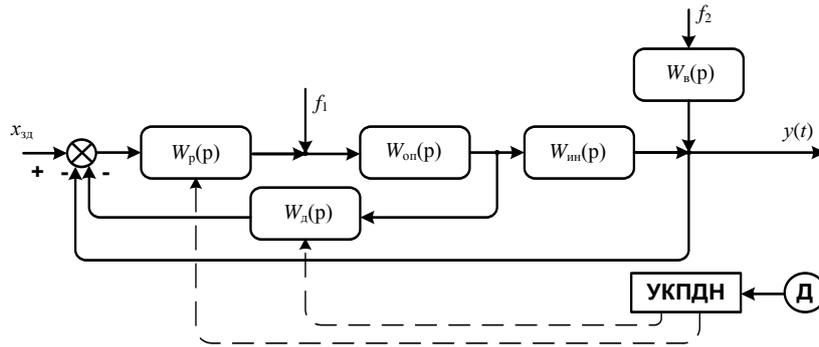


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной САР с дифференциатором и УКПДН: $W_p(p)$ – передаточная функция (ПФ) регулятора; $W_d(p)$ – ПФ дифференциатора; $W_{он}(p)$ – ПФ опережающего участка; $W_{ин}(p)$ – ПФ инерционного участка; $W_b(p)$ – ПФ по каналу действия крайнего внешнего возмущения; $Д$ – датчик расхода пара; $x_{зд}$ – задающее воздействие; f_1, f_2 – внутреннее и внешнее возмущения

Поэтому повысить качество регулирования температуры перегретого пара можно при определении параметров динамической настройки САР за счет уменьшения погрешности при аппроксимации экспериментальных переходных характеристик опережающего и инерционного участков объекта регулирования. Для определения расчетных динамических характеристик инерционного участка пароперегревателя обычно используют экспериментальные переходные характеристики главного и опережающего участков при возмущении впрыском, что приводит к существенному увеличению погрешности расчета [4]. Для устранения этой погрешности необходимо перейти к разомкнуто-замкнутой системе (РЗС) регулирования (рис. 2): разомкнутую по основной регулируемой величине $y(t)$ и замкнутую по промежуточной регулируемой величине $y_1(t)$. При этом скачкообразное изменение задания на входе одноконтурной быстродействующей системы (регулятор – опережающий участок) обеспечивает при соответствующем выборе параметров динамической настройки регулятора такие изменения промежуточной регулируемой величины $y_1(t)$, которые колеблются вокруг виртуального высокочастотного сигнала на входе в инерционный участок объекта регулирования. Так как быстродействующие колебания внутреннего контура РЗС не пропускаются инерционным участком пароперегревателя, расчет параметров оптимальной динамической настройки дифференциатора по методике [2] осуществляется по передаточной функции инерционного участка, которая при достаточно большом зна-

чении коэффициента усиления разомкнутой САР соответствует передаточной функции разомкнуто-замкнутой САР по задающему воздействию $W_{y, x_{зд}}(p)$:

$$W_{y, x_{зд}}(p) = \frac{W_p(p)W_{оп}(p)}{1 + W_p(p)W_{оп}(p)} W_{ин}(p) = \frac{1}{\frac{1}{W_p(p)W_{оп}(p)} + 1} W_{ин}(p).$$

Следовательно, $W_{y, x_{зд}}(p) = W_{ин}(p)$.

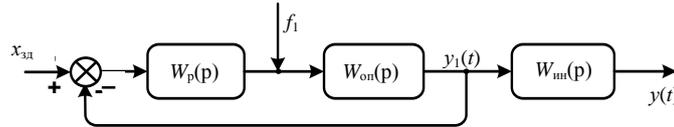


Рис. 2. Структурная схема разомкнуто-замкнутой САР

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид

$$W_p(p) = \frac{k_p(T_{ин}p + 1)}{T_{ин}p}, \quad (1)$$

где k_p – максимальное значение коэффициента усиления регулятора.

При этом время интегрирования $T_{ин}$ регулятора устанавливается равным времени разгона термпары за местом впрыска.

Передаточная функция дифференциатора

$$W_d(p) = \frac{k_d T_d p}{T_d p + 1}, \quad (2)$$

где k_d – коэффициент усиления дифференциатора; T_d – время дифференцирования.

Уменьшения погрешности при вычислении параметров передаточных функций объекта регулирования по экспериментальным переходным характеристикам можно достичь за счет устранения ручных операций, например при использовании метода «площадей» [4].

Передаточные функции опережающего и инерционного участков можно вначале представить в виде передаточной функции n -го порядка

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{(T_{об}p + 1)^n}, \quad (3)$$

где $k_{об}$ – коэффициент передачи объекта регулирования; $T_{об}$ – постоянная времени участка объекта регулирования; n – степень дифференциального уравнения.

Разложив знаменатель формулы (3), получим [4]

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{(T_{об}p + 1)^n} = \frac{k_{об}}{1 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots}, \quad (4)$$

где $a_1 = nT_{об}$; $a_2 = a_1^2 \frac{n-1}{2n}$.

При этом численное значение коэффициента a_1 передаточной функции (3) находят методом «площадей» по формуле [2]

$$a_1 = S_1 = \frac{\int_0^{\infty} [1 - h(t)] dt}{k_{об}}, \quad (5)$$

где S_1 – площадь между кривой переходной характеристики объекта и прямой $1(t)$ при коэффициенте передачи, равном 1.

Для определения степени уравнения n используем зависимость $n = f(\lambda_0)$, представленную на рис. 3, где $\lambda_0 = \frac{t_{0,663}}{t_{0,1}}$ [7]. Значение коэффициента λ_0

определяется по графику переходной характеристики (рис. 4). Для этого необходимо найти отношение времен при достижении переходным процессом 66,3 и 10 % от коэффициента усиления объекта регулирования.

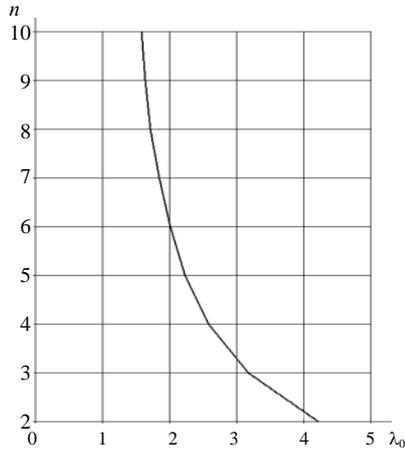


Рис. 3. Зависимость степени дифференциального уравнения n от коэффициента λ_0

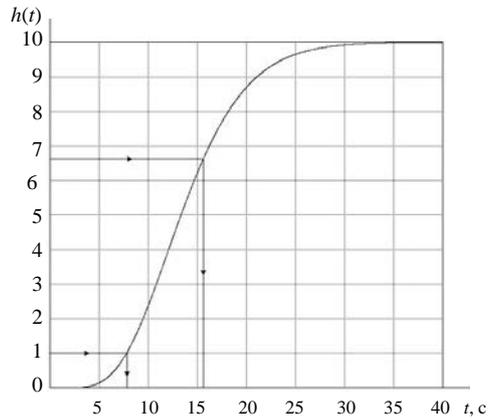


Рис. 4. Экспериментальный график переходной характеристики инерционного участка пароперегревателя

После определения степени дифференциального уравнения n находим постоянную времени объекта

$$T_{об} = \frac{a_1}{n}.$$

Затем рассчитываем запаздывание и время разгона [4]:

$$\tau = T_{об}(n-1) - \frac{(n-1)!T_{об}}{(n-1)^{n-1}e^{-(n-1)}} + T_{об} \left[\frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-1}} + \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-2}} + \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-3} \cdot 2!} + \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-4} \cdot 3!} + \dots + 1 \right]; \quad (6)$$

$$T_a = T_{об} \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-1} e^{-(n-1)}}. \quad (7)$$

Определив время разгона и порядок дифференциального уравнения, в соответствии с методикой [5] находим численное значение малой постоянной времени передаточной функции инерционного участка объекта регулирования

$$\sigma_{ин} = 0,105 T_a, \quad (8)$$

а затем определяем численное значение времени условного запаздывания

$$\tau_y = \tau_y - \sigma_{ин}. \quad (9)$$

В результате этого передаточная функция инерционного участка пароперегревателя примет вида

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{1 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots} = \frac{k_{об} e^{-\tau_y p}}{1 + T_k p}, \quad (10)$$

где T_k – постоянная времени инерционного участка

Так как динамические свойства объекта регулирования могут оставаться практически постоянными, условием этого является неизменность обобщенной суммы постоянной времени [6]

$$a_1 = \tau_y + T_k = \text{const}, \quad (11)$$

из формулы (11) можно найти постоянную времени:

$$T_k = a_1 - \tau_y. \quad (12)$$

Передаточную функцию опережающего участка представим в виде инерционного звена второго порядка, у которого: $a_{1оп} = T_{оп} + \sigma_{оп}$; $a_{2оп} = T_{оп} \sigma_{оп}$, где $T_{оп}$ – большая постоянная времени; $\sigma_{оп}$ – то же меньшая.

Выбор методики определения параметров оптимальной динамической настройки (ПДН) существенно влияет на качество регулирования. Традиционный расчет параметров оптимальной динамической настройки типовой САР с дифференциатором базируется на предположении о возможности расчета одного контура независимо от другого [4]. При этом параметры оптимальной динамической настройки дифференциатора вычисляются по динамическим характеристикам инерционного участка пароперегревателя, входом которого является промежуточная регулируемая величина (температура перегретого пара за местом впрыска), а выходом – основная регулируемая величина (температура перегретого пара за котлом). После определения ПДН дифференциатора переходят к расчету ПДН основного регулятора с учетом оптимального значения коэффициента усиления дифференциатора. При этом ПДН дифференциатора рассчитывают, исходя из оптимальной обработки крайнего внешнего возмущения, приложенного к выходу объекта регулирования, а основного регулятора – из оптимальной обработки внутренних возмущений, поступающих на вход опережающего участка объекта регулирования совместно с регулирующим воздействием [1–5].

Регулятор настраиваем по внутреннему контуру по передаточной функции опережающего участка объекта регулирования по методу частичной компенсации (МЧК) для отработки внутреннего возмущения f_1 [5]:

$$K = k_d k_p k_{оп} = 0,7395T \left(1 + \frac{1}{T}\right)^2 - 1; \quad (13)$$

$$I = \frac{T_i}{\sigma_{оп}} = \frac{6,36K}{T \left(1 + \frac{1}{T}\right)^3}, \quad (14)$$

где

$$T = \frac{T_{оп}}{\sigma_{оп}}. \quad (15)$$

Здесь K – относительный коэффициент усиления; I – относительное время интегрирования; T – относительная постоянная времени опережающего участка объекта регулирования.

Дифференциатор настраиваем по методу полной компенсации в частном виде (МПК ЧВ) на отработку крайнего внешнего возмущения f_2 [5]:

$$T_d = T_k; \quad (16)$$

$$k_{д1} = \frac{2k_{ин}\tau_y}{T_k}, \quad (17)$$

где $k_{ин}$ – коэффициент усиления инерционного участка.

В качестве базы для сравнения качества регулирования температуры перегретого пара за котлом типовой САР с дифференциатором при различных способах оптимизации параметров динамической настройки были рассмотрены методики Всероссийского теплотехнического института (ВТИ) и Белорусского национального технического университета (БНТУ). Для настройки системы по методике ВТИ использовались формулы [4].

Исходные данные для расчета параметров динамической настройки САР с дифференциатором по методам [5, 4] и предлагаемой методике аппроксимации инерционного участка приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Исходные данные
для определения параметров динамической настройки САР**

Методика	Модель объекта для расчета настройки САР	Передаточная функция крайнего внешнего возмущения
ВТИ	$W_{оп}(p) = \frac{15,1}{1 + 20,5p + 61,5p^2};$ $W_{оп}(p) = \frac{1,47}{1 + 104p + 4056p^2}.$	$W_b(p) = \frac{10}{30p + 1}$
БНТУ	$W_{оп}(p) = \frac{15,1}{(17,5p+1)(3p+1)};$ $W_{оп}(p) = \frac{1,47e^{-23,8p}}{80,2p + 1}.$	

На рис. 5–8 приведены графики переходных характеристик при обработке основных видов возмущений САР с дифференциатором, настроенной по методам [5, 4].

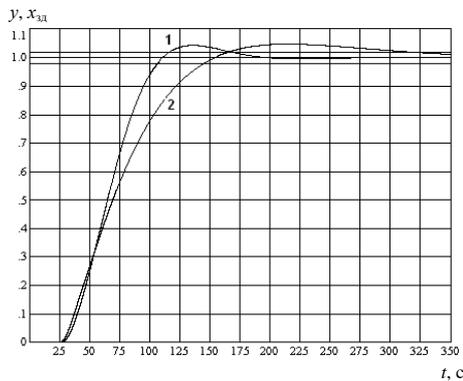


Рис. 5. Графики переходных процессов САР с дифференциатором при обработке задающего воздействия по методикам: 1 – БНТУ; 2 – ВТИ

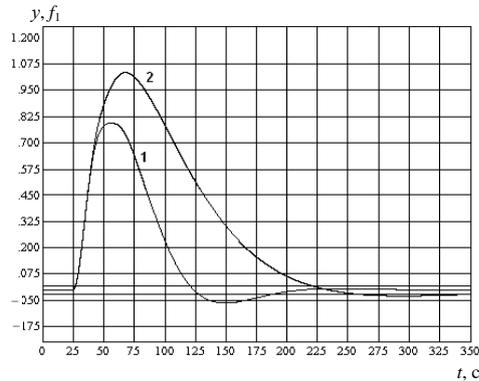


Рис. 6. Графики переходных процессов САР с дифференциатором при обработке внутреннего возмущения по методикам: 1 – БНТУ; 2 – ВТИ

Из анализа графиков переходных процессов при обработке задающего воздействия (рис. 5) видно, что в системе, настроенной по методам [5] с применением предложенной методики аппроксимации инерционного участка объекта регулирования, перерегулирование составляет 4,3 %, по методике ВТИ – 4,6 %; при этом время регулирования в 1,9 раза меньше в системе, настроенной по методике БНТУ.

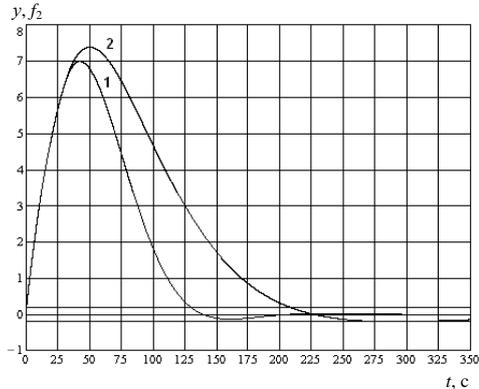


Рис. 7. Графики переходных процессов САР с дифференциатором при обработке внешнего возмущения по методикам: 1 – БНТУ; 2 – ВТИ

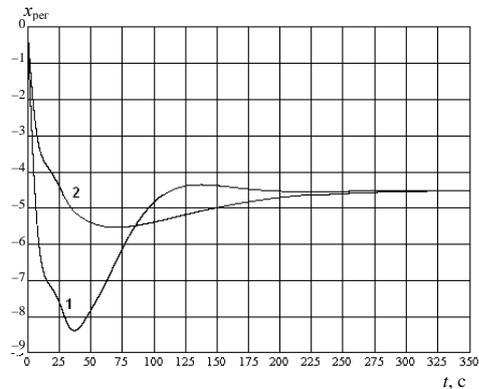


Рис. 8. Регулирующее воздействие по методикам: 1 – БНТУ; 2 – ВТИ

При обработке внутреннего возмущения (рис. 6) максимальная динамическая ошибка в системе, настроенной по методикам БНТУ, на 25 % меньше, время регулирования на 14 % меньше по сравнению с системой, настроенной по методикам ВТИ.

На рис. 7 представлены графики переходных процессов САР с дифференциатором при обработке крайнего внешнего возмущения. В случае если система настроена по методикам БНТУ, максимальная динамическая

ошибка регулирования меньше на 5 %, а время регулирования – на 37 %, чем, если система настроена по методам ВТИ. При этом лучшее качество регулирования достигается за счет большего регулирующего воздействия (рис. 8, кривая 1).

Из анализа графиков переходных процессов типовой САР при основных воздействиях видно, что использование предложенной методики аппроксимации инерционного участка и современных методик оптимизации параметров динамической настройки позволит получить лучшее качество регулирования.

ВЫВОДЫ

1. Применение предложенной методики экспериментального определения динамических характеристик пароперегревателя котлов позволит снизить погрешности при аппроксимации инерционного участка за счет использования разомкнуто-замкнутой системы регулирования и метода «площадей».

2. Сравнительный анализ графиков переходных процессов в САР с дифференцированием промежуточной величины показал, что предложенная методика определения динамических характеристик объекта регулирования улучшает качество регулирования температуры перегретого пара по сравнению с традиционными методами определения настроек.

3. Использование предлагаемой методики аппроксимации исходных динамических характеристик, а также современной методики расчета параметров динамической настройки позволит улучшить качество регулирования в широком диапазоне изменения нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х у т с к и й, Г. И. Система автоматического регулирования температуры перегретого с устройством коррекции параметров динамической настройки / Г. И. Хутский, Г. Т. Кулаков // Теплоэнергетика. – 1968. – № 3. – С. 64–67.
2. К у л а к о в, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: спр. пособие / Г. Т. Кулаков. – Минск: Вышэйш. шк., 1984. – 192 с.
3. К у з ь м и ц к и й, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизация технологических процессов и производств» / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2006. – 486 с.
4. С т е ф а н и, Е. П. Основы расчетов настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е. П. Стефани. – 2-е изд., перераб.– М.: Энергия, 1972. – 376 с.
5. К у л а к о в, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования / Г. Т. Кулаков. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 135 с.
6. И з е р м а н, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман; пер. с англ.– М.: Мир, 1984. – 541 с.
7. Н а с т р о й к а системы автоматического регулирования на стенде-тренажере: лабораторный практикум / Г. Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: Изд-во БГПА, 1996. – 112 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 12.12.2009