

УДК 621.18-5

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА НА СРОК СЛУЖБЫ
МЕТАЛЛА ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ КОТЛОВ**

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

Белорусский национальный технический университет

Государственная комплексная программа модернизации основных производственных фондов Белорусской энергетической системы утверждена в 2005 г. Износ основных производственных фондов по системе в целом составил 60,7 % [1]. В связи с этим актуальной становится проблема снижения износа основных производственных фондов, в том числе за счет увеличения долговечности (срока службы) металла пароперегревателя кот-

лов. Поэтому особый интерес вызывает определение зависимостей изменения

срока службы металла от качества регулирования. Увеличение срока службы металла пароперегревателя зависит от качества регулирования температуры перегретого пара котлов, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок.

Существуют различные методы решения этой проблемы.

В [2] представлен сравнительный анализ качества регулирования и чувствительности систем с оптимальным по быстродействию регулятором и ПИД-регулятором на примере системы автоматического регулирования температуры перегретого пара прямооточного котла ТПП-210. Исследование эффективности алгоритмов максимального быстродействия рассматривается в сопоставлении с ПИД-алгоритмом. Параметры оптимальной динамической настройки ПИД-регулятора рассчитаны для корневого показателя запаса устойчивости $m = 0,366$ и косвенного критерия оптимальности $k_p/T_n \rightarrow \max$ (m – степень колебательности; k_p – коэффициент усиления регулятора; T_n – постоянная времени интегрирования). Эти настройки обеспечивают минимальное значение дисперсии при низкочастотных случайных воздействиях и минимальное значение линейного интегрального критерия качества регулирования при ступенчатых воздействиях.

Результаты исследований в [2] подтверждают возможность применения прогностических алгоритмов максимального быстродействия в замкнутом контуре регулирования объектов с запаздыванием, подверженных действию случайных или ступенчатых возмущений. Описываемые алгоритмы оптимального по времени регулятора и прогностической функции дают меньшее время переходного процесса по сравнению с ПИД-регулятором и существенно меньшее значение среднеквадратичного отклонения (дисперсии).

Автоматическая система регулирования температуры перегретого пара должна гарантировать в регулировочном диапазоне изменения нагрузок котла: устойчивую работу автоматических регуляторов впрысков (отсутствие автоколебаний) и ограниченную частоту их включения; протекание переходных процессов, вызываемых скачкообразным изменением нагрузки на 10 % (при исходной номинальной нагрузке), с максимальным отклонением температуры свежего пара на выходе из котла на 8 °С, для промежуточного пара – 10 °С и значениями интегрального квадратичного критерия соответственно 5000 и 10000 (°С)²·с [3].

Точность поддержания заданного значения температуры свежего пара на выходе из котла существенно влияет на экономичность, надежность и долговечность его работы. Так, повышение температуры пара на 1,0 °С снижает долговечность пароперегревателя из стали 12Х1МФ на 3 %.

На практике требуется, чтобы отклонение регулируемой величины было не просто приемлемым, т. е. не превышало заранее заданного, достаточно малого значения, а оптимальным. Если это требование выполняется, то система принимается к реализации, если нет, то необходимо менять алгоритм работы системы, ее информационную структуру или изменять конструкцию объекта управления [4].

Статистические методы оценки качества системы автоматического регулирования (САР) используются для оценки технико-экономической эф-

фективности САР за счет повышения экономичности, надежности и долговечности работы оборудования [5, 6].

В качестве типовой системы регулирования температуры перегретого пара в настоящее время применяется САР с дифференциатором и устройством коррекции параметров динамической настройки (УКПДН) в широком диапазоне изменения нагрузки (рис. 1) [7].

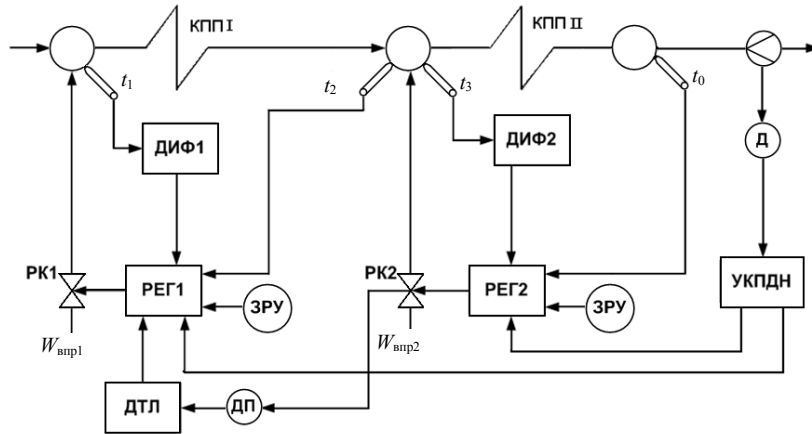


Рис. 1. Структура типовой САР регуляторов впрысков: КПП I, КПП II – первая и вторая части конвективного пароперегревателя; $W_{впр1}$, $W_{впр2}$ – расход питательной воды соответственно на первый и второй впрыски; t_0 , t_1 , t_2 , t_3 – температуры перегретого пара соответственно за котлом, за местом первого впрыска, за КПП I, за местом второго впрыска; ЗРУ – задатчик ручного управления; РЕГ1, РЕГ2 – регуляторы первого и второго впрысков; ДИФ1, ДИФ2 – дифференциаторы первого и второго впрысков; РК1, РК2 – регулируемые клапаны первого и второго впрысков; ДП – датчик положения РК2; ДТЛ – датчик типа люфт; Д – датчик расхода пара; УКПДН – устройство коррекции параметров динамической настройки САР

Различные методы расчета параметров оптимальной динамической настройки САР с дифференциатором приведены в [8–10]. Для улучшения качества регулирования температуры перегретого пара за котлом в широком диапазоне изменения нагрузок применяют УКПДН, которое в функции расхода пара Д корректирует параметры динамической настройки регуляторов и дифференциаторов в функции нагрузки котла. При больших внешних возмущениях изменением нагрузки котла датчик типа люфт ДТЛ по сигналу датчика положения ДП о 100%-м открытии регулирующего клапана РК2 конечного впрыска корректирует задание РЕГ1, регулирующее воздействие которого, суммируясь с регулирующим воздействием на впрыск $W_{впр2}$, улучшает качество регулирования конечного впрыска.

На рис. 2 представлены графики оптимальных переходных процессов САР конечного впрыска энергоблока 300 МВт Лукомльской ГРЭС при разных уровнях нагрузки: 100; 50 и 30 %, при которых система настроена оптимально на обработку наиболее опасного крайнего внешнего возмущения расходом пара на соответствующую нагрузку.

В качестве исходных данных использовались динамические характеристики пароперегревателя котла ТГМП-314 Лукомльской ГРЭС, приведен-

ные в [1]. Расчет параметров оптимальной динамической настройки конечного впрыска для трех уровней нагрузки произведен по методике [9].

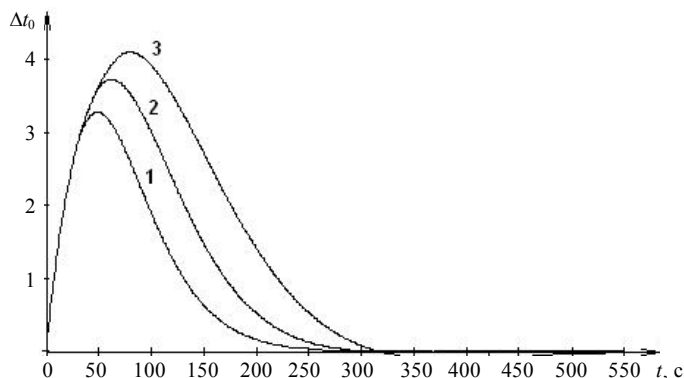


Рис. 2. Переходные характеристики по отклонению температуры перегретого пара за котлом ТГМП-314 от номинального заданного значения Δt_0 при возмущении расходом пара для разных уровней нагрузок: 1 – 100%-й; 2 – 50%-й; 3 – 30%-й

Моделирование переходных процессов замкнутой САР проводилось с использованием методики расчета переходных процессов, приведенной в [7]. Из анализа графиков переходных процессов (рис. 2) следует, что даже при оптимальных параметрах динамической настройки регуляторов впрыска качество регулирования температуры перегретого пара за котлом с уменьшением нагрузки ухудшается. Так, максимальная динамическая ошибка регулирования $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при 30%-й нагрузке котла на 20 % больше, чем при 100%-й, а интегральный квадратичный критерий качества при 100%-й нагрузке составит $4600\text{ }^{\circ}\text{C}^2$, а при 30%-й – $9370\text{ }^{\circ}\text{C}^2$, что не соответствует правилам технической эксплуатации тепловых электрических станций.

По результатам обработки суточных диаграмм средняя дисперсия температуры перегретого пара за котлом при 100- и 30%-й нагрузках типовой САР составляла соответственно $10,3$ и $16,8\text{ }(^{\circ}\text{C})^2$; при ручном управлении и 30%-й нагрузке – $25,9\text{ }(^{\circ}\text{C})^2$; а в усовершенствованной САР за счет существенного улучшения качества регулирования при 30%-й нагрузке – $6,5\text{ }(^{\circ}\text{C})^2$.

Таким образом, за счет улучшения качества регулирования температуры перегретого пара за котлом, например путем приближения переходной характеристики при 30%-й нагрузке (кривая 3) к переходной характеристике при 100%-й нагрузке (кривая 1) в усовершенствованной САР, можно существенно увеличить срок службы металла пароперегревателя (рис. 2).

Исследуем влияние изменения качества регулирования температуры перегретого пара на срок службы металла пароперегревателя. При расчете технического эффекта по технологическому оборудованию от усовершенствования САР необходимо определение средних значений и дисперсии температуры перегретого пара для разных способов регулирования (ручное, типовая САР, усовершенствованная САР).

Отношение времени до разрушения металла пароперегревателя для типовой САР при ручном управлении и в усовершенствованной САР находим по формулам [6]:

$$\Psi_t = \frac{1}{1 + \alpha_1 a_1 + \alpha_2 a_2}, \quad (1)$$

где Ψ_t – отношение времени до разрушения металла; α_1 – средневзвешенное по нагрузке относительное значение математического ожидания для ручного управления в типовой и усовершенствованной САР; α_2 – средневзвешенное по нагрузке значение дисперсии для ручного управления в типовой и усовершенствованной САР; a_1, a_2 – коэффициенты, определяемые характеристиками длительной прочности сталей,

$$a_1 = \frac{2,3b_i}{T_{\text{мо}}}; \quad (2)$$

$$a_2 = a_1 \frac{a_1 - 2}{2}, \quad (3)$$

где b_i – коэффициент, характеризующий длительную прочность стали, зависящий от марки стали (например, для стали 12Х2МФСР $b_i = 34500$, а для стали 12Х1МФ $b_i = 25400$); $T_{\text{мо}}$ – расчетное значение температуры металла, К,

$$T_{\text{мо}} = t_{\text{по}} + \Delta t_{a2} + 0,5\Delta t_{\lambda} + 273 \text{ К}, \quad (4)$$

где, по данным тепломеханического расчета: расчетная температура пара $t_{\text{по}} = 545$ °С; значения перепадов температур соответственно в стенке и от рабочей среды к стенке $\Delta t_{a2} = 15$ °С; $\Delta t_{\lambda} = 4$ °С,

$$\alpha_2 = \alpha_1^2 + \frac{2,1}{(t_{\text{по}} + 273)^2} D, \quad (5)$$

где D – средневзвешенное по нагрузке относительное значение дисперсии для ручного управления при 30%-й нагрузке $D = 25,9$ (°С)²; в типовой САР при 30%-й нагрузке $D = 16,8$ (°С)², а при 100%-й нагрузке $D = 10,3$ (°С)²; в усовершенствованной САР при 30%-й нагрузке $D = 6,5$ (°С)².

После подстановки исходных данных в формулы получаем следующие значения:

$$T_{\text{мо}} = 835 \text{ К}; \quad a_1 = 95,03; \quad a_2 = 4420.$$

С учетом полученных значений a_1, a_2, α_2 (табл. 1) находим отношение времени до разрушения металла. По данным ТЭС, реальное время работы оборудования от начала эксплуатации до момента усовершенствования САР $\tau_0 = 18200$ ч; среднегодовое время работы технологического оборудования до момента внедрения САР $h_1 = 5500$ ч.

Расчет срока службы металла поверхностей нагрева котла, остающегося в эксплуатации после внедрения усовершенствованной САР, рассчитывается по формулам [6]:

$$\tau = 14,3 \frac{\Psi_t}{\Psi_k} - \frac{\tau_0}{h_1}; \quad (6)$$

$$\tau_n = \tau \frac{\Psi_{нл}}{\Psi_t}, \quad (7)$$

где τ , τ_n – соответственно срок службы металла первоначального и нового вариантов; Ψ_k – коэффициент коррекции: для стали 12X2МФСР $\Psi_k = 0,7$; для стали 12X1МФ $\Psi_k = 0,79$.

Таблица 1

Исходные и расчетные данные для определения зависимости срока службы металла от величины дисперсии

$D, (^\circ\text{C})^2$	α_2	Ψ_1	Ψ_2	τ_1	τ_2
25,9	0,00011	0,895	1,014	14,98	15,05
24,6	0,00011	0,922	1,033	15,52	15,38
23,3	0,0001	0,950	1,051	16,09	15,72
22,0	9,3E-05	0,978	1,070	16,67	16,05
20,7	8,7E-05	1,008	1,089	17,28	16,39
19,4	8E-05	1,039	1,108	17,91	16,74
18,1	7,3E-05	1,070	1,127	18,56	17,09
16,8	6,7E-05	1,103	1,146	19,23	17,44
15,5	6,1E-05	1,137	1,166	19,93	17,79
14,2	5,5E-05	1,173	1,185	20,65	18,15
13,0	4,9E-05	1,209	1,205	21,39	18,50
11,7	4,3E-05	1,247	1,225	22,16	18,86
10,3	3,8E-05	1,285	1,245	22,95	19,22
9,1	3,3E-05	1,325	1,264	23,76	19,58
7,8	2,7E-05	1,366	1,284	24,60	19,94
6,5	2,2E-05	1,409	1,304	25,46	20,29

Формула для определения увеличения срока службы металла

$$\tau_c = \tau_n - \tau. \quad (8)$$

Будем изменять величины дисперсий от значений при ручном управлении при 30%-й нагрузке до значения дисперсии усовершенствованной САР. Введем дополнительное обозначение: Ψ_1, Ψ_2 – отношение времени до разрушения металла пароперегревателя соответственно для стали 12X2МФСР и 12X1МФ; τ_1, τ_2 – срок службы металла соответственно для стали 12X2МФСР и 12X1МФ. Исходные и расчетные данные приведены в табл. 1.

С использованием табличных данных были построены графические зависимости срока службы металла от значений дисперсии для разных типов сталей.

Используя формулы (7) и (8), можно получить численные значения увеличения срока службы металла пароперегревателя. Так, при переходе от ручного управления к типовой САР при 30%-й нагрузке срок службы металла для стали 12X2МФСР увеличивается на 3,48 года; для стали

12Х1МФ – на 1,96 года. При переходе от типовой к усовершенствованной САР при 30%-й нагрузке срок службы металла для стали 12Х2МФСР увеличивается на 5,33 года; для стали 12Х1МФ – на 2,4 года (рис. 3).

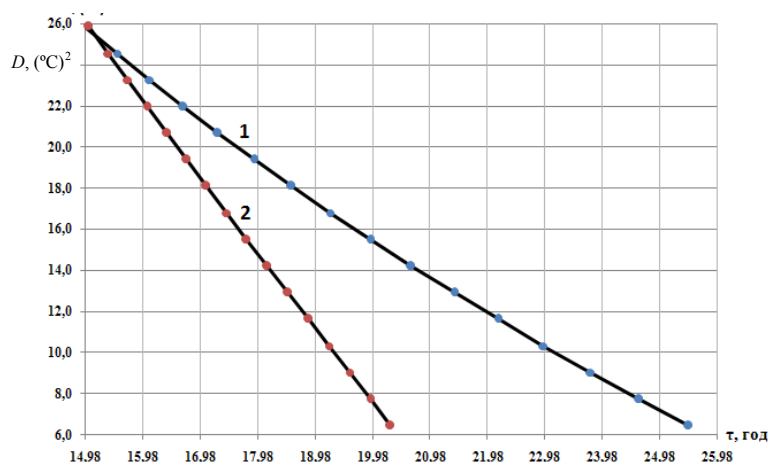


Рис. 3. Зависимость срока службы металла от величины дисперсии:
1 – для стали 12Х2МФСР; 2 – 12Х1МФ

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали, что изменение условий работы металла КПП за счет улучшения качества регулирования приводит к существенному увеличению времени, которое остается до истечения срока службы поверхности нагрева пароперегревателя.

2. Переход от ручного управления к типовой САР впрысков котлоагрегата ТГМП-314 при 30%-й нагрузке позволит увеличить срок службы металла для стали 12Х2МФСР на 3,48 года; для стали 12Х1МФ – на 1,96 года.

3. Применение усовершенствованной САР даже при 30%-й нагрузке позволяет увеличить срок службы металла пароперегревателя по сравнению с типовой САР при 100%-й нагрузке для стали 12Х2МФСР на 2,21 года; для стали 12Х1МФ – на 0,91 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная комплексная программа модернизации основных производственных фондов белорусской энергетической системы, энергосбережения и увеличения доли использования в республике собственных топливно-энергетических ресурсов в 2006–2010 гг.: Указ Президента Респ. Беларусь, 25 авг. 2005 г., № 399. – Минск, 2006.
2. Качаровский, Д. Н. Сравнение эффективности прогностического алгоритма максимального быстрогодействия и ПИД-алгоритма в замкнутой системе автоматического регулирования / Д. Н. Качаровский, Г. А. Пикина // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 62–68.
3. Клюев, А. С. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А. С. Клюев, А. Т. Лебедев, С. И. Новиков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.

4. Ротач, В. Я. Расчет параметров систем автоматического управления при высокой точности их функционирования / В. Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 2006. – № 10. – С. 17–19.

5. Плетнев, Г. П. Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок: учеб. для энергетических и энергостроительных техникумов / Г. П. Плетнев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 424 с.

6. Свирин, Ю. П. К вопросу оптимизации системы регулирования температуры перегретого пара из учета надежности работы металла пароперегревателя / Ю. П. Свирин, В. А. Птичкин, Г. Т. Кулаков // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1972. – № 9. – С. 139–142.

7. Автоматическое регулирование технологических процессов котлоагрегатов ПГУ-215 Березовской ГРЭС // Энергетика и ТЭК. – 2006. – № 3. – С. 36–38.

8. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: спр. пособие / Г. Т. Кулаков. – Минск: Вышэйш. шк., 1984. – 192 с.

9. Кулаков, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования / Г. Т. Кулаков. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 135 с.

10. Кузьмицкий, 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.

11. Кулаков, Г. Т. Теоретические основы экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления для повышения эффективности использования теплоэлектростанций в переменных режимах: дис. ... д-ра техн. наук / Г. Т. Кулаков. – Минск, 1989. – 295 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 12.02.2009

УДК 621.311.22

К ВОПРОСУ РЕКОНСТРУКЦИИ ДЫМОВЫХ ТРУБ

**Канд. техн. наук, проф. АКЕЛЬЕВ В. Д., канд. техн. наук СИЗОВ В. Д.,
магистрант ПИТИРИМОВ В. В.**

Белорусский национальный технический университет

Исследованиям процессов низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева котельных агрегатов, дымовых труб посвящены работы А. К. Виеркова, В. Ш. Магадаева, Р. А. Петросяна, А. Ф. Гаврилова, И. И. Стрихи и др., в которых представлены результаты исследований по вопросам механизма образования коррозионных агентов в продуктах сгорания серосодержащих топлив, взаимодействия образующейся серной кислоты с внутренними поверхностями дымовых труб с учетом теплообменных процессов, влияющих на их эффективную работу и долговечность.

Для обоснованного выбора материалов в целях защиты низкотемпературных поверхностей футеровок дымовых труб необходимо иметь достоверные сведения об агрессивности дымовых газов, общепринятым показателем которой в отношении низкотемпературной коррозии является со-