

УДК 621.3

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА БАРАБАННОГО КОТЛА

Цветков А.А.

Научный руководитель - к.э.н., доцент Кравченко В.В.

**Объект управления.** Рассматривается пароперегреватель котла в виде двух теплообменников типа «газ-пар» конвективного типа (рис. 1). В необогреваемую рассечку подведен трубопровод для впрыска собственного конденсата котла, представляющий собой пароохладитель. В пароохладителе происходит смешивание пара и собственного конденсата и охлаждение пара. Для контроля температуры пара установлено две термопары: после пароохладителя и после пароперегревателя. Схематично, пароперегреватель выполнен следующим образом. В верхнюю секцию пароперегревателя поступает пар из котла. После этой секции идет необогреваемый участок, где происходит смешивание собственного конденсата котла и пара и нагрев пара газами, которые уже нагрели вторую по ходу пара секцию. Далее пар поступает во вторую секцию, связанную с общим паропроводом, расположенную ниже первой секции, где происходит начальный нагрев пара. Эта секция обогревается дымовыми газами в первую очередь. За этой секцией установлена термопара, измеряющая температуру перегретого пара (см. рисунок 1).

Поэтому, когда изменяется температура, расход дымовых газов, расход пара через пароперегреватель, происходит изменение как температуры в рассечке, так и температуры на выходе ПП. Причем, коэффициенты усиления по каналам возмущения температуры в рассечке и температуры после ПП различны, что объясняется тем, что на температуру в рассечке действует поток пара, охлажденный в первой по ходу дымовых газов секции ПП. Секция 2 пароперегревателя является регулируемой. Измеряют температуры пара на входе и выходе из секции, (иногда, расход пара), и по этим параметрам ведут процесс. Из этого рисунка видно, что при изменении расхода пара, температуры и расхода дымовых газов изменяются синхронно как температура пара в месте впрыска конденсата, так и температура пара после пароперегревателя (ПП).

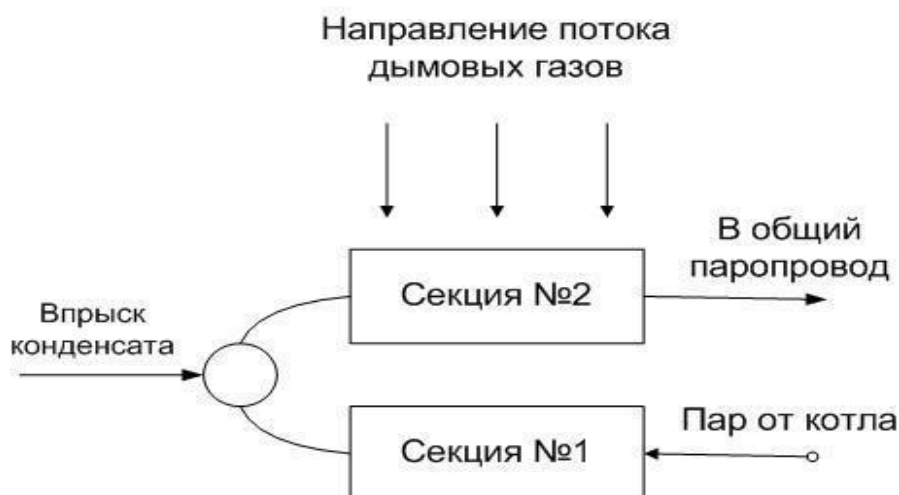


Рисунок 1 – Схема пароперегревателя

**Математическая модель пароперегревателя как объекта управления температурой пара.** Объектом регулирования является участок котла между точкой ввода регулирующего воздействия и точкой контроля регулируемой температуры, включающей в себя радиационные, полурadiационные и конвективные поверхности нагрева. На температуру пара оказывают влияние большое количество факторов: из них наиболее существенными оказываются: нагрузка котла, загрязнение поверхностей нагрева,

ошлаковывание топки, температура питательной воды, избытки воздуха. При снижении нагрузки удельное тепловосприятие радиационных поверхностей нагрева повышается, а конвективных – уменьшается. Кроме того, на температуру перегрева оказывают большое влияние такие возмущения, как случайные возмущения подачи топлива при заданной нагрузке, изменение тягодутьевого режима и т.п. В последнее время САР ТПП проектируются с вводом дополнительного воздействия по расходу пара. Встречаются САР с различного рода связями типа «люфт» между отдельными схемами регулирования расхода пара на участках парового тракта котла, ПИ и ПИД – регуляторы, САР ТПП с корректирующим и стабилизирующим регуляторами, которые, в некоторых случаях, могут иметь значительные преимущества перед типовыми с исчезающим импульсом из промежуточной точки. Для регулирования впрыска широко применяются шибберные клапаны.

Для исследуемой системы характерно большое транспортное запаздывание в объекте управления, нестационарность и априорная неопределенность математической модели ПП, что приводит, в конечном счете, к ручной перенастройке коэффициентов регулятора и необходимости проектировать систему из условий робастности.

Передаточная функция объекта регулирования включает в себя:

$W_{TH}$  – передаточную функцию участка трубопровода от места впрыска до места установки термодатчика (передаточная функция опережающего участка);

$W_T$  – передаточную функцию ПП между местами установки термодатчиков 1 и 2, ее называют передаточной функцией инерционного участка;

$W_{TH}W_T$  – передаточную функцию главного участка;

$W_D$  – передаточную функцию ПП при возмущении расходом пара;

$W_F$  – передаточную функцию ПП при топочных возмущениях по теплоте дымовых газов.

$$W_{TH}(p) = k_{vpr} \frac{T_{sp+1}}{T_{sp+1}} \quad (1)$$

$$W_T(p) = k_T e^{-\left(\frac{T_{kp}}{T_{p+1}} + t_{0p}\right)} \quad (2)$$

$$W_p(p) = -k_p \frac{0.2T_{p+1} [1 - \exp(-(\tau_{0p} + \frac{T_{kp}}{T_{p+1}}))] }{T_{p+1}(\tau_{0p} + \frac{T_{kp}}{T_{p+1}})} [1 - e^{-(\tau_{0p} + \frac{T_{kp}}{T_{p+1}})}] \quad (3)$$

Передаточная функция  $W_F$  - по теплоте газов, уходящих из топки, имеет вид

$$W_F(p) = k_F \frac{[1 - \exp(-(\tau_{0p} + \frac{T_{kp}}{T_{p+1}}))] }{T_{p+1}(\tau_{0p} + \frac{T_{kp}}{T_{p+1}})} [1 - e^{-(\tau_{0p} + \frac{T_{kp}}{T_{p+1}})}] \quad (4)$$

Характерные параметры участка пароперегревателя, состоящего из одного пакета, определяют по формулам:

$$T = 3600 \frac{G_M C_M}{a_{IC} F_{INC}} \quad (5)$$

$$\tau_0 = \frac{l}{w} \quad (6)$$

где  $a_{IC}$  – условный коэффициент теплоотдачи от стенки змеевика к пару на внутренней поверхности змеевиков, кДж/(м<sup>2</sup>·ч·°С);

$C_{ST}$  – средняя изобарная теплоёмкость пара, проходящего через пакет, кДж/(кг·°С);

$F_{IN}$ ,  $F_{OUT}$  – соответственно внутренняя и наружная поверхности змеевиков пакета, омываемые паром и дымовыми газами, м<sup>2</sup>;

$G_M$  – масса металла змеевиков пакета, кг;

$l$  – длина пути от входа до выхода из обогреваемой поверхности нагрева, м;

$w$  – средняя скорость пара, м/с.

**Синтез системы управления пароперегревателем.** На рисунке 2 приведена функциональная схема управления пароперегревателем. На этой схеме приняты следующие условные обозначения:  $FE$  – расходомеры (измеряют расход пара и собственного конденсата на впрыск),  $SPH$  1,  $SPH$  2 – первая и вторая секции пароохладителя и после

пароперегревателя),  $TE$  термопары (установлены после пароперегревателя по ходу пара);  $DSH$  – пароохладитель;  $COL$  – коллектор.

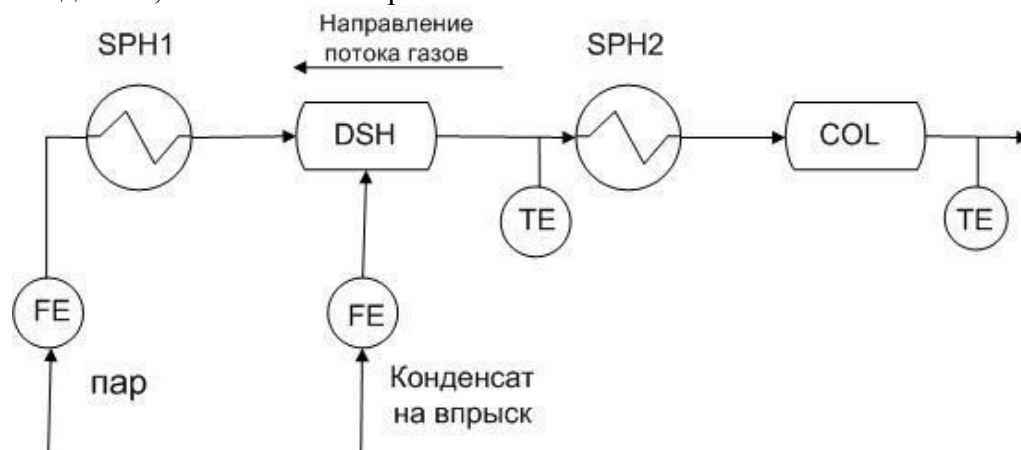


Рисунок 2 – Функциональная схема пароперегревателя как объекта управления

На рисунке 3 приведена структурная схема пароперегревателя как объекта управления в системе регулирования температуры.

На этом рисунке приняты следующие обозначения:

$W_C(p)$  – передаточная функция основного регулятора САР,

$p$  – оператор дифференцирования,

$W_2$  – передаточная функция компенсирующего звена расхода пара,

$W_3$  – передаточная функция компенсирующего звена температуры дымовых газов,

$W_{T1}, W_{T2}$  – передаточные функции термопар,

$W_{K1}, W_{K2}$  – передаточные функции звеньев, компенсирующих инерционность термопар,

$W_{FS2}$  – передаточная функция, связывающая расход пара и расход газа в канале возмущения на температуры пара после пароохладителя,

$W_{FS1}$  – передаточная функция, связывающая расход пара и расход газа в канале возмущения на температуры пара после пароперегревателя,

$W_{T-Tim}$  – передаточная функция, связывающая температуру дымовых газов и температуру пара после пароохладителя,

$W_{T-Te}$  – передаточная функция, связывающая температуру дымовых газов и температуру пара после пароперегревателя,

$W_{ST-PV}$  – задание температуры пара после пароперегревателя, пароохладителя.

$G_F$  – приращение расхода топлива,  $G_S$  – приращение расхода пара,  $T_S$  – температура дымовых газов. Как видно из рассмотрения структурной схемы системы управления пароперегревателем, инерционные звенья, включенные в цепи сигналов главной обратной связи и сигнала опережения по производной сигнала из промежуточной точки, существенно замедляют реакцию системы. Поэтому включим последовательно с этими звеньями, звенья, компенсирующие инерционность термопар.

Передаточная функция компенсирующего звена имеет вид:

$$W_{K2(K3)} = k_T (T_{T2} T_{T3} p + 1) \quad (7)$$

В этом уравнении постоянные времени зависят от ряда факторов, определяемых как конструкцией узлов измерения температур, так и скоростью, и температурой и давлением перегретого пара. Определение этих постоянных времени представляет собой решение классической задачи параметрической идентификации и не входит в задачу данного исследования.

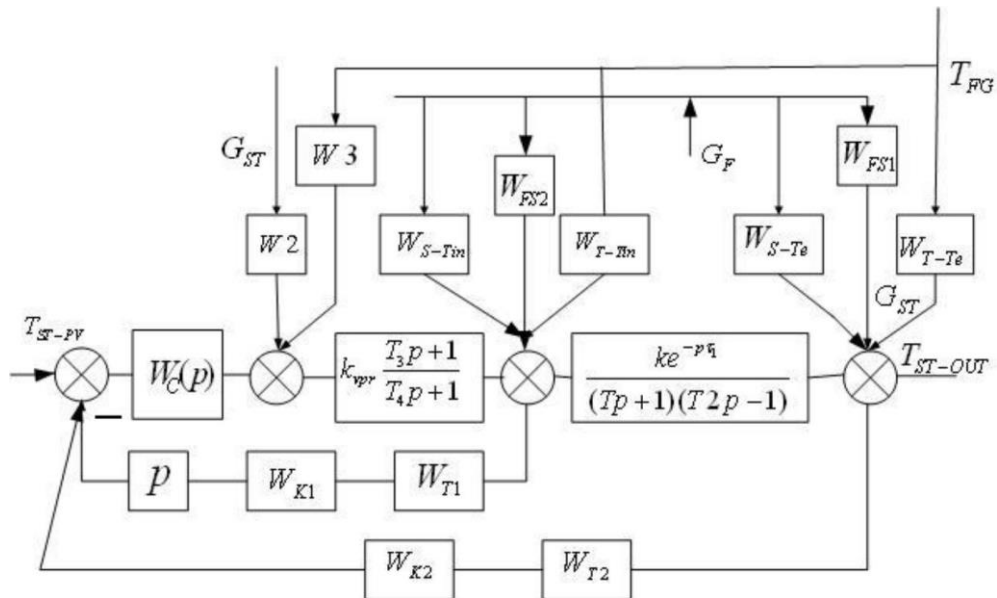


Рисунок 3 – Структурная схема системы управления температурой перегретого пара.

На рисунке 4 приведен результат моделирования системы при задании по температуре пара относительно базового значения  $-30^{\circ}\text{C}$  и возмущении по расходу топлива равному 10% от базового значения и возмущении коэффициентом избытка воздуха.

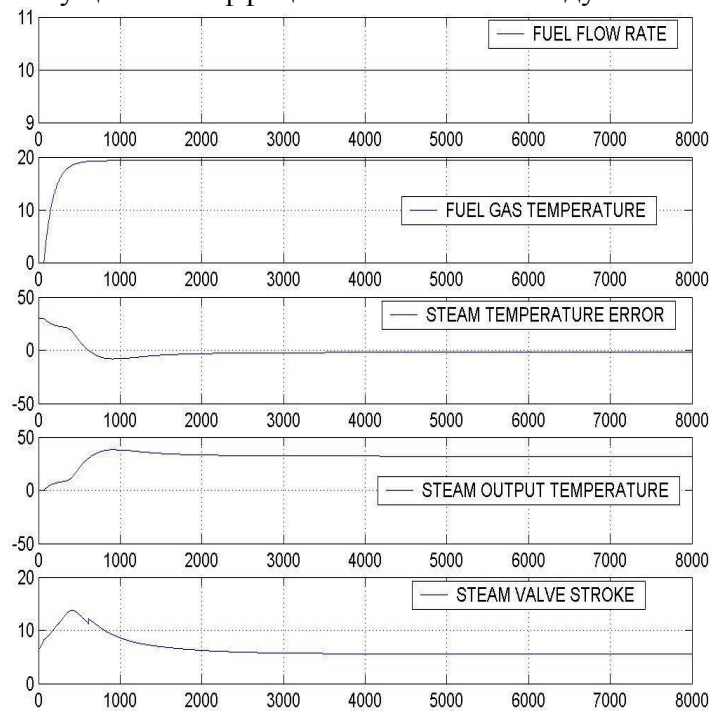


Рисунок 4 – Графики работы модернизированной системы при положительном знаке изменения расхода пара и температуры дымовых газов.

На верхнем графике приведена зависимость расхода топлива от времени (так называемый, единичный скачок). На втором сверху графике приведено изменение температуры дымовых газов при увеличении коэффициента избытка воздуха по отношению к базовому значению. На третьем сверху графике приведена зависимость ошибки регулирования от времени. На четвертом сверху графике зависимость выходной температуры от времени. На нижнем графике приведена зависимость управления от времени. Время переходного процесса составляет для этого варианта 445,2 с., а значение интегрального квадратичного критерия  $1.1874\text{e}+004$ .

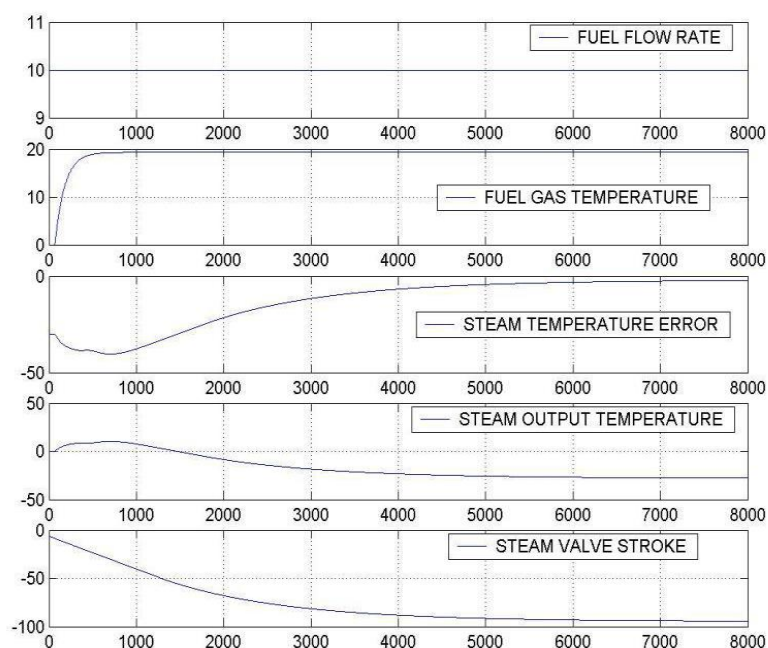


Рисунок 5 – Графики работы типовой системы при отрицательном знаке изменения расхода пара и температуры дымовых газов.

Для этого варианта время переходного процесса составляет 1187,1 с, а значение квадратичного критерия качества –  $4.1230e+004$ , что соответственно на 85,6% и 241,5%: больше, чем у модернизированной системы. Рассмотрим работу модернизированной системы управления при тех же возмущающих воздействиях по расходу пара и температуре дымовых газов, что и в предыдущих примерах, но при нулевых начальных условиях. На рисунке 6 приведены графики работы для модернизированной системы, а на рисунке 6 графики работы системы для типовой системы.

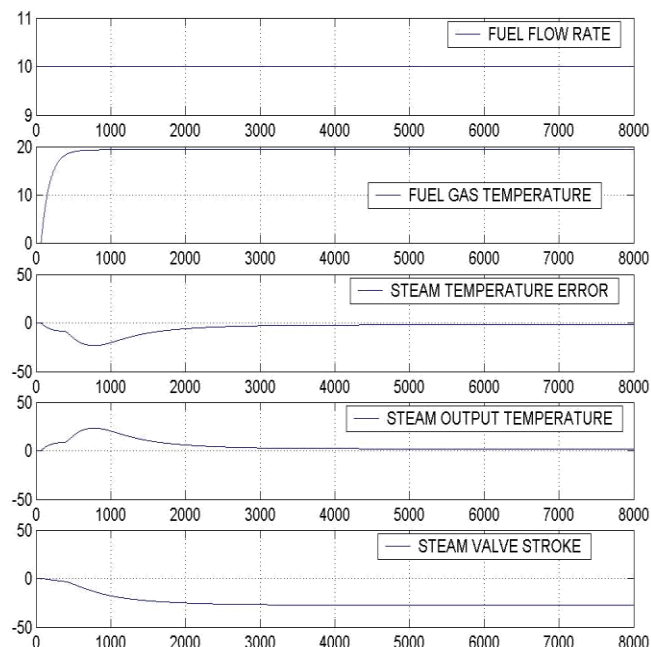


Рисунок 6 – Графики работы модернизированной системы при положительном знаке изменения расхода пара и температуры дымовых газов и нулевых начальных условиях по температуре пара.

Время переходного процесса (время достижения отклонением пара от заданного (базового) значения температуры равного  $2^0\text{C}$ ) составляет для этого случая 568 с., а значение



квадратичного критерия качества (интеграла квадрата рассогласования) равно  $1.5158e+004$ . Рассмотрим тот же вариант расчета, но для типовой системы (рисунок 7).

Время переходного процесса (время достижения отклонением пара от заданного (базового) значения температуры равного  $2^{\circ}\text{C}$ ) составляет для этого случая 983,4 с., а значение квадратичного критерия качества (интеграла квадрата рассогласования)  $2.9140e+004$ .

Как следует из изложенного, время переходного процесса для модернизированной системы сократилось на 73%, а значение квадратичного критерия качества сократилось на 92%. Как известно, снижение температуры пара на  $10^{\circ}\text{C}$  эквивалентно перерасходу топлива на 0,2%. Так как происходит уменьшение величины критерия качества в модернизированной системе, по сравнению с типовой, следовательно, при сбросах нагрузки происходит экономия тепловой энергии (за счет снижения отрезка времени, в течение которого снижается температура пара). При набросах нагрузки за счет снижения времени превышения температурой пара заданного значения повышается долговечность пароперегревателя.

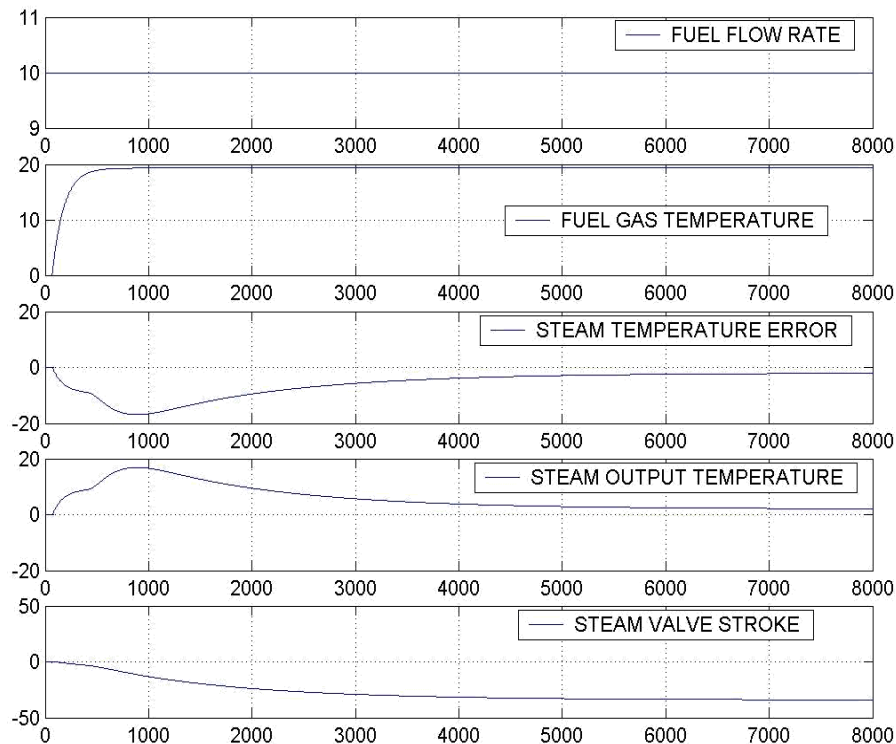


Рисунок 7 – Графики работы типовой системы при положительном знаке изменения расхода пара и температуры дымовых газов и нулевых начальных условиях по температуре пара.

Рассмотрим влияние на температуру пара изменения температуры дымовых газов, возникающей при работе подсистемы регулирования «топливо-воздух».

Обозначим:

$G_G$  – расход природного газа на котел;

$k_e$  – отношение массового расхода воздуха к расходу газа, необходимое для обеспечения стехиометрического режима сгорания газа;

$T_G, T_A$  – температуры газа и воздуха, поступающие на горение, соответственно;

$c_G, \bar{c}_A$  – изобарные теплоемкости газа воздуха, соответственно;

$B_G$  – удельная теплота сгорания природного газа.

Определим зависимость между приращением температуры дымовых газов и коэффициентом избытка воздуха, для чего продифференцируем второе выражение в относительной близости от некоторого установившегося режима работы котла, принятого за базовый.

$$\Delta T_{GF} = \left( \frac{\partial T_{GF}}{\partial a} \right)_0 \Delta a = \frac{T_A \bar{c}_A (1 + a_0 k_e) c_{GF} - c_{GF} T_G c_G + a_0 k_e T_A \bar{c}_A + \eta B_G}{(1 + a_0 k_e) c_{GF}} \quad (8)$$

Так как процессы в следящих системах «топливо воздух», в основном, имеют линейный характер, то оператор, связывающий изменение рассогласования коэффициента избытка воздуха и температуру дымовых газов  $T_{FG}$ , является линейным, т.е.,

$$W_{T_{FG}-a} = \left( \frac{T_{GF}(p)}{\Delta a(p)} \right)_0 = \frac{k}{T_{DF}p+1} \quad (9)$$

Величина  $T_{DG}$  определяется инерционностью топки. Так как канал, по которому движутся дымовые газы, имеет сложную форму, присутствуют пульсации давления в газоздушном тракте, то измерение температуры газов в одной точке, является непредставительным, а измерение температуры в нескольких точках с последующим усреднением может потребовать большого количества точек измерения и дорого. В связи с этим, вычисление коэффициента избытка воздуха и последующее вычисление отклонения температуры газов от базового значения и введение соответствующего корректирующего воздействия на впрыск является рациональным способом компенсации влияния температуры дымовых газов на температуру пара.

Составим условие полной инвариантности выходного сигнала относительно температуры дымовых газов:

$$W_{T_{FG}-a} W_{T-T_e} = W_3 W_{TH} W_{SH} \quad (10)$$

$$W_3 = \frac{W_{T_{FG}-a} W_{T-T_e}}{W_{TH} W_{SH}} = \frac{kK_1(T_4p+1)k_2(Tp+1)(T_2p+1)(2+p\tau_0)}{k_{vpe}(T_{DGP}+1)(T_{FG}-T_e p+1)(T_3p+1)(2+p\tau_0)} \quad (11)$$

Из этого выражения можно вычислить  $W_3$ .

Выражение (11) является сложно реализуемым, поэтому ограничимся следующим представлением  $W_3$ .

$$W_3 = K_3;$$

где  $K_3$  является функцией расхода пара и конструктивных параметров пароперегревателя и должно определяться в результате идентификационных экспериментов. Корректирующие связи по расходу пара и температуре дымовых газов обеспечивают снижение времени переходного процесса регулирования температуры пара и повышение качества переходного процесса, величина интегрального квадратического критерия снижается от 7 до 37%).

### Литература

1. Плетнев, Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 344 с.
2. Плетнев, Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: Учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с.
3. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования / Г.Т. Кулаков. – Мн.: Выш. шк., 1984. – 192 с.