

УДК 681.5

МЕТОД НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ЛОКАЛИЗАЦИИ

А. С. Востриков, А. А. Пономарев

*Новосибирский государственный технический университет,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: aleapv@mail.ru*

Рассмотрена настройка регулятора газозвоздушного тракта теплоэнергетического котла с использованием принципа локализации. Приведено описание математической модели объекта, входящих в её состав уравнений, условий их вывода и перехода к уравнениям состояния. Осуществлены постановка задачи синтеза и расчёт регуляторов отдельно для каждого канала системы. Составлена структурная схема системы автоматического регулирования и на её основе смоделированы переходные процессы для получения выводов о работе системы. Представлена программа для автоматического вычисления коэффициентов дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: газозвоздушный тракт, модель объекта, двухконтурный ПИД-регулятор, система автоматического регулирования, переходный процесс, автоматический расчёт коэффициентов.

Введение. Газозвоздушный тракт (ГВТ) может представлять собой различные сочетания тягодутьевых машин, газозвоздухопроводов и топочных устройств (топок) котельных агрегатов. Применительно к теплоэнергетике выделяются два параметра: расход воздуха и разрежение в топке [1], регулирование которых целесообразно осуществлять в виде двухканальной системы, поскольку величины взаимосвязаны. Управляющими воздействиями системы служат величины производительности дутьевого вентилятора (ДВ) и дымоcоса (ДС).

Математическая модель ГВТ создаётся на основе анализа физических уравнений процессов. Такой подход более предпочтителен в сравнении с практической идентификацией объектов, применяемой в теплоэнергетике [2], и с общепринятой идентификацией систем управления в автоматике [3]. Критерием выбора считается максимальная реалистичность для выявления нелинейностей объекта.

Важные в энергетике аспекты регулирования ГВТ рассмотрены в работе [4]. Объект требует высокой точности поддержания параметров по заданным критериям качества, поскольку материальный баланс производства электроэнергии зависит от расхода топлива. Качественное регулирование расхода общего воздуха и разрежения в топке снижает расход сжигаемого топлива.

Для синтеза регулятора из всех возможных методов (метод логарифмических частотных характеристик, модальный метод, метод типовых регуляторов и т. д.) применяется метод локализации [5], так как он позволяет рассчитывать регуляторы для нелинейных объектов, которые могут работать с неизменными настройками.

Целью данной работы является распространение применения метода локализации на теплоэнергетические объекты.

Модель объекта. На основе проведённых исследований [4] получена система уравнений ГВТ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{\text{вх}} = -k_{\text{сопр.в}} S_{\text{в}} Q_{\text{вх}}^2 / l_{\text{в}} + k_{\text{ДВ}} \omega_{\text{ДВ}} + S_{\text{в}} p_{\text{т}} / l_{\text{в}}, \\ \dot{\omega}_{\text{ДВ}} = -M_{\text{ДВ}}^{\text{с}} J_{\text{ДВ}} + M_{\text{ДВ}} / J_{\text{ДВ}}, \\ \dot{M}_{\text{ДВ}} = -M_{\text{ДВ}} / T_{\text{ДВ}}^{\text{э}} - \beta_{\text{ДВ}} \omega_{\text{ДВ}} / T_{\text{ДВ}}^{\text{э}} + 2\pi \beta_{\text{ДВ}} f_{\text{ДВ}} / p_{\text{ДВ}}^{\text{п}} T_{\text{ДВ}}^{\text{э}}, \\ \dot{Q}_{\text{вых}} = -k_{\text{сопр.г}} S_{\text{г}} Q_{\text{вых}}^2 / l_{\text{г}} + k_{\text{ДС}} \omega_{\text{ДС}} - S_{\text{г}} p_{\text{т}} / l_{\text{г}}, \\ \dot{\omega}_{\text{ДС}} = -M_{\text{ДС}}^{\text{с}} J_{\text{ДС}} + M_{\text{ДС}} / J_{\text{ДС}}, \\ \dot{M}_{\text{ДС}} = -M_{\text{ДС}} / T_{\text{ДС}}^{\text{э}} - \beta_{\text{ДС}} \omega_{\text{ДС}} / T_{\text{ДС}}^{\text{э}} + 2\pi \beta_{\text{ДС}} f_{\text{ДС}} / p_{\text{ДС}}^{\text{п}} T_{\text{ДС}}^{\text{э}}, \\ \dot{p}_{\text{т}} = Q_{\text{вх}} / k_{\text{с}} - Q_{\text{вых}} / k_{\text{с}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь $f_{\text{ДВ}}$ — частота тока электродвигателя (ЭД) дутьевого вентилятора (Гц); $M_{\text{ДВ}}$ — электромагнитный момент привода ДВ (Н · м); $\omega_{\text{ДВ}}$ — угловая скорость вращения ДВ (рад/с); $Q_{\text{вх}}$ — расход общего воздуха (кг/с); $p_{\text{т}}$ — разрежение в топке (Па); $Q_{\text{вых}}$ — расход уходящих газов (кг/с); $\omega_{\text{ДС}}$ — угловая скорость вращения ДС (рад/с); $M_{\text{ДС}}$ — электромагнитный момент привода ДС (Н · м); $f_{\text{ДС}}$ — частота тока ЭД ДС (Гц); $k_{\text{сопр.в}}$ — коэффициент аэродинамического сопротивления воздушного участка (кг/м · с²); $S_{\text{в}}$ — площадь поперечного сечения воздушного участка (м²); $l_{\text{в}}$ — длина воздушного участка (м); $k_{\text{ДВ}}$ — коэффициент зависимости давления ДВ от угловой скорости вращения (принимается по аэродинамической характеристике) (Па · с); $M_{\text{ДВ}}^{\text{с}} = f(\omega_{\text{ДВ}})$ — момент сопротивления ДВ (пропорционален квадрату угловой скорости вращения) (Н · м); $J_{\text{ДВ}}$ — момент инерции ДВ (кг · м²); $T_{\text{ДВ}}^{\text{э}}$ — электромагнитная постоянная времени ДВ (с); $\beta_{\text{ДВ}}$ — статическая жёсткость ДВ (Н · м · с); $p_{\text{ДВ}}^{\text{п}}$ — число пар магнитных полюсов обмотки статора ДВ; $k_{\text{сопр.г}}$ — коэффициент аэродинамического сопротивления газового участка (кг/м · с²); $S_{\text{г}}$ — площадь поперечного сечения газового участка (м²); $l_{\text{г}}$ — длина газового участка (м); $k_{\text{ДС}}$ — коэффициент зависимости давления ДС от угловой скорости вращения (принимается по аэродинамической характеристике) (Па · с); $J_{\text{ДС}}$ — момент инерции ДС (кг · м²); $M_{\text{ДС}}^{\text{с}} = f(\omega_{\text{ДС}})$ — момент сопротивления ДС (пропорционален квадрату угловой скорости вращения) (Н · м); $T_{\text{ДС}}^{\text{э}}$ — электромагнитная постоянная времени ДС (с); $\beta_{\text{ДС}}$ — статическая жёсткость ДС (Н · м · с); $p_{\text{ДС}}^{\text{п}}$ — число пар магнитных полюсов обмотки статора ДС; $k_{\text{с}}$ — коэффициент состояния газовой среды (отношение массы и давления) (м · с²).

Система базируется на уравнениях аэродинамических процессов в ГВТ. Закон сохранения массы допускает, что аккумулирующая ёмкость топки котельного агрегата расположена в одном объёме. Уравнение Менделеева — Клапейрона применяется в составе закона сохранения массы вследствие переменной массы газа. Балансы давлений в дифференциальной форме устанавливают соотношения между производительностями тягодутьевых машин, давлениями тягодутьевых машин (напорами) и потерями давления на трение. Такой системе присущи колебательные свойства, которые порождают комплексно-сопряжённые корни при решении уравнений. С точки зрения физики колебания представляют собой пульсации разрежения, являющиеся известной проблемой в практике.

В баланс давлений входит уравнение Дарси — Вейсбаха, определяющее соотношение между скоростью движения газа и потерями давления на трение для газопроводов конечной длины. Эти зависимости формируют квадратичные нелинейности в системе. В урав-

нениях принимается допущение, что все газопроводы круглого сечения, скорости потоков используются усреднённые по диаграмме векторов.

Из практики следует, что электродинамические инерционности оказывают существенное влияние на ГВТ. Поэтому зависимость между напором тягодутьевых машин и входной частотой ЭД необходимо описывать уравнениями электропривода, в нашем случае асинхронного. Модель может выглядеть существенно проще, если в качестве управляющей величины выбрать скорость вращения на выходе из электропривода, а не частоту на входе, т. е. считать эти величины линейно зависимыми. Однако в таком случае будет снижена реалистичность модели. Уравнения электропривода, как и аэродинамические уравнения, содержат квадратичные нелинейности.

С использованием обозначений и коэффициентов, указанных в табл. 1, система (1) приводится к уравнениям состояния

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11}x_1^2 + a_{12}x_2 + a_{17}x_7, \\ \dot{x}_2 = -a_{22}x_2^2 + a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = -a_{33}x_3 - a_{32}x_2 + b_{31}u_1, \\ \dot{x}_4 = -a_{44}x_4^2 + a_{45}x_5 - a_{47}x_7, \\ \dot{x}_5 = -a_{55}x_5^2 + a_{56}x_6, \\ \dot{x}_6 = -a_{66}x_6 - a_{65}x_5 + b_{62}u_2, \\ \dot{x}_7 = a_{71}x_1 - a_{74}x_4. \end{cases} \quad (2)$$

Синтез регуляторов. Перед началом синтеза регулятора необходимо определить требования к системе автоматического регулирования (САР). Во-первых, система должна поддерживать на заданном уровне регулируемые параметры, т. е. отрабатывать вход и парировать возмущения при стационарном режиме работы. Во-вторых, регулятор должен работать в режиме ступенчатых входов (для ГВТ характерно скачкообразное изменение задания). Как можно заметить, здесь и проявляется уже упомянутая нестационарность объекта, вследствие которой изменяются коэффициенты дифференциальных уравнений. Согласно исследованиям регуляторов, синтезированных по методу локализации [6], для таких объектов целесообразно применять двухконтурный ПИД-регулятор. Его важным

Таблица 1

Переменные	Коэффициенты дифференциальных уравнений		
	$x_1 = Q_{\text{вх}}$	$a_{11} = k_{\text{сопр.в}} S_{\text{в}} / l_{\text{в}}$	$a_{12} = k_{\text{ДВ}}$
$x_2 = \omega_{\text{ДВ}}$	$a_{22} = 1 / J_{\text{ДВ}}$	$a_{23} = 1 / J_{\text{ДВ}}$	—
$x_3 = M_{\text{ДВ}}$	$a_{33} = 1 / T_{\text{ДВ}}^2$	$a_{32} = \beta_{\text{ДВ}} / T_{\text{ДВ}}^2$	$b_{31} = 2\pi\beta_{\text{ДВ}} / p_{\text{ДВ}}^{\text{н}} T_{\text{ДВ}}^2$
$x_4 = Q_{\text{вых}}$	$a_{44} = k_{\text{сопр.г}} S_{\text{г}} / l_{\text{г}}$	$a_{45} = k_{\text{ДС}}$	$a_{47} = S_{\text{г}} / l_{\text{г}}$
$x_5 = \omega_{\text{ДС}}$	$a_{55} = 1 / J_{\text{ДС}}$	$a_{56} = 1 / J_{\text{ДС}}$	—
$x_6 = M_{\text{ДС}}$	$a_{66} = 1 / T_{\text{ДС}}^2$	$a_{65} = \beta_{\text{ДС}} / T_{\text{ДС}}^2$	$b_{62} = 2\pi\beta_{\text{ДС}} / p_{\text{ДС}}^{\text{н}} T_{\text{ДС}}^2$
$x_7 = p_{\text{г}}$	$a_{71} = 1 / k_{\text{с}}$	$a_{74} = 1 / k_{\text{с}}$	—
$u_1 = f_{\text{ДВ}}$	—	—	—
$u_2 = f_{\text{ДС}}$	—	—	—

свойством является возможность отдельно корректировать требования к статике и динамике системы. Так, интегральный регулятор обеспечивает ошибку не более допустимой, в пределе нулевую, а ПИД-регулятор используется в качестве регулятора динамики.

Для двухканальной системы синтез проводится последовательно для обоих каналов. Условием разделения системы является разрыв межканальных связей. После восстановления межканальных связей изменения в модели объекта могут трактоваться как нестационарные свойства и поэтому обрабатываются регулятором. По отдельности каналы записываются в виде функций $f_1(t, X_1)$, где $X_1 = \{x_1, x_2, x_3\}$, и $f_2(t, X_2)$, где $X_2 = \{x_4, x_5, x_6, x_7\}$.

Для обоих каналов задаются требования к качеству переходных процессов: время переходного процесса $t_{\text{п}} = 1$ с (на практике может быть существенно больше), перерегулирование $\sigma = 5\%$. Статическую точность требуется обеспечивать на уровне $\Delta_1 = \Delta_2 = 1-5\%$. Исходя из этого, можно оговориться заранее, что коэффициенты усиления регуляторов k_1, k_2 следует выбирать из диапазона 20–100 в соответствии с методом локализации. Здесь уместно будет добавить, что при таком достаточно большом коэффициенте усиления регулятор обеспечивает независимость свойств системы от параметров объекта, т. е. позволяет обрабатывать нестационарности. Таким образом, регулятор не требует перенастройки при различных значениях входных воздействий, что упрощает эксплуатацию оборудования. Желаемые уравнения формируются на основе требований к качеству переходных процессов согласно модальному методу синтеза.

Желаемое уравнение первого канала можно представить в виде передаточной функции

$$C_1(p) = c_1 p + 1.$$

При подстановке числового значения $c_1 = t_{\text{п}} = 1$ желаемое уравнение принимает вид

$$C_1(p) = p + 1.$$

Характеристический полином фильтра записывается как

$$D_1(\mu_1 p) = \mu_1 p + d_{10} = 0,$$

где μ_1 — малый параметр, величина которого на порядок меньше c_1 . Такое соотношение для малого параметра используется в соответствии с методом локализации и будет справедливо для второго канала. Коэффициент последнего члена выражения принимается $d_{10} = 1$. Таким образом, дифференцирующий фильтр первого канала с расчётными параметрами имеет вид

$$D_1(\mu_1 p) = 0,1 p + 1 = 0.$$

Закон управления двухконтурного ПИД-регулятора на основе метода локализации в общем виде записывается как

$$u = k_i / p (v - x) - k C(p) / D(\mu p) x,$$

где k_i — коэффициент усиления интегрирующего звена.

Для первого канала закон управления с числовыми параметрами записывается в виде

$$u_1 = 0,2 / p (v_1 - x_1) - 20(p + 1) / (0,1 p + 1) x_1,$$

где коэффициент усиления интегрирующего звена $k_{i1} = 0,2$ устанавливается экспериментально.

Для второго канала, имеющего больший порядок, чем первый, желаемый полином описывается уравнением второго порядка

$$C_2(p) = T_2^2 p^2 + 2d_2 T_2 p + 1, \quad (3)$$

где $c_2 = t_{\pi} = 1$; коэффициент демпфирования выбирается из условий колебательности $d_2 = 2$. С числовыми значениями выражение (3) переписывается как

$$C_2(p) = p^2 + 4p + 1.$$

Характеристический полином фильтра представляется уравнением

$$D_2(\mu_2 p) = \mu_2^2 p^2 + d_{21} \mu_2 p + d_{20} = 0,$$

или с числовыми значениями в виде

$$D_2(\mu_2 p) = 0,01 p^2 + 0,2 p + 1 = 0,$$

где малый параметр $\mu_2 = 0,1$; коэффициент демпфирования выбирается из условий колебательности $d_{21} = 2$, а коэффициент последнего члена выражения принимается $d_{20} = 1$.

Закон управления второго канала с числовыми параметрами может быть записан как

$$u_2 = 0,5/p(v_2 - x_7) - 20(p^2 + 4p + 1)/(0,01p^2 + 0,2p + 1)x_7,$$

где $k_{i2} = 0,5$ — экспериментально подобранный коэффициент усиления интегрирующего звена.

Обобщённая структурная схема САР для первого и второго каналов представлена на рис. 1.

Исследование свойств системы автоматического регулирования осуществляется путём построения структурной схемы САР ГВТ в пакете прикладных программ Simulink.

Переходные характеристики определяются как реакция системы на ступенчатые воздействия по входу (рис. 2). Таким образом проводится проверка работы САР в различных режимах. В модель добавлены ступенчатые возмущающие воздействия для проверки отработки регулятором. Такие возмущения характерны для эксплуатации ГВТ. На практике это может соответствовать изменению расхода воздуха или разрежения в топке на выходе САР под воздействием технологических условий.

Числовые значения, используемые при моделировании, принимаются для стандартного теплоэнергетического оборудования (барабанного котла ТПЕ-214, дутьевого вентилятора ВДН-32Б, дымососа ДОД-28,5). Подобное оборудование установлено на Новосибирской ТЭЦ-5. Значения технологических параметров приведены в табл. 2. Номер строки параметра соответствует номеру уравнения в математической модели объекта (1). При моделировании в Simulink необходимо учитывать, что большой разброс коэффициентов объекта

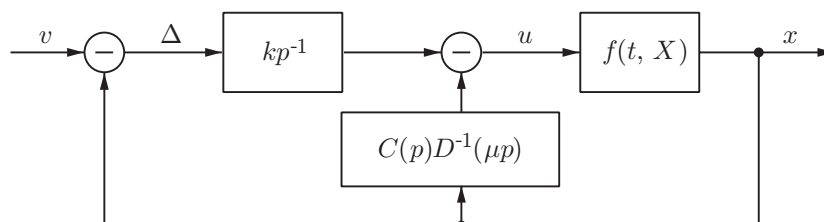


Рис. 1

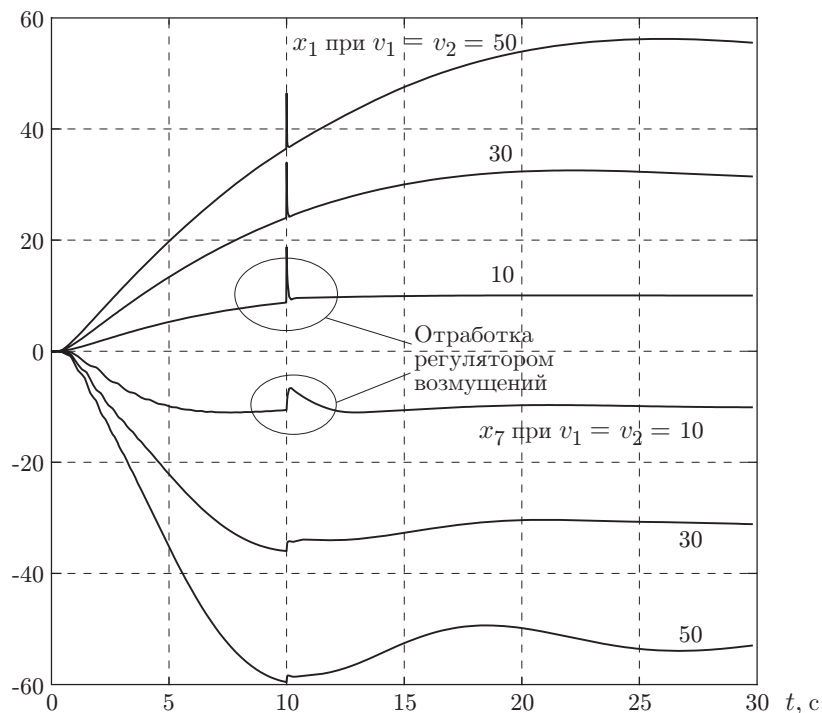


Рис. 2

не соответствует возможностям программы, вследствие чего требуется увеличивать коэффициент состояния газовой среды $k_c = 0,002 \text{ м} \cdot \text{с}^2$ на порядок для устойчивости системы.

Ресурсное ограничение управляющих воздействий u_1 и u_2 при моделировании добавляет ещё одну нелинейность — предельные нижние и верхние значения. Фактически это минимальная и максимальная частоты тока ЭД тягодутьевых машин.

Моделирование демонстрирует, что показатели качества удовлетворяют заданным требованиям. Можно отдельно выделить время переходного процесса, соответствующее реальным практическим значениям.

Работа регуляторов остаётся удовлетворительной при восстановлении межканальных связей. Также регуляторы обрабатывают входные ступенчатые воздействия.

Таблица 2

Номер строки параметра	Значения технологических параметров			
1	$k_{\text{сопр.в}} = 0,072 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}$	$S_{\text{в}} = 2 \text{ м}^2$	$l_{\text{в}} = 20 \text{ м}$	$k_{\text{ДВ}} = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}$
2	$J_{\text{ДВ}} = 100 \text{ кг}/\text{м}^2$	—	—	—
3	$T_{\text{ДВ}}^{\circ} = 0,1 \text{ с}$	$\beta_{\text{ДВ}} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$	$p_{\text{ДВ}}^{\text{н}} = 6$	—
4	$k_{\text{сопр.г}} = 0,072 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}$	$S_{\text{г}} = 2 \text{ м}^2$	$l_{\text{г}} = 20 \text{ м}$	$k_{\text{ДС}} = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}$
5	$J_{\text{ДС}} = 100 \text{ кг}/\text{м}^2$	—	—	—
6	$T_{\text{ДС}}^{\circ} = 0,1 \text{ с}$	$\beta_{\text{ДС}} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$	$p_{\text{ДС}}^{\text{н}} = 6$	—
7	$k_c = 0,002 \text{ м} \cdot \text{с}^2$	—	—	—

2	<input type="text" value="5000"/>	J_fdf – Момент инерции ДВ, кг·м ²	<input type="text" value="0,0002"/>	<input type="text" value="0,0002"/>
	<input type="button" value="a22"/>		<input type="button" value="a23"/>	
3	<input type="text" value="0,1"/>	T_mot_fdf – Электромагнитная постоянная времени ДВ, с	<input type="text" value="1"/>	
	<input type="button" value="a33"/>			
	<input type="text" value="1000"/>	B_fdf – Статическая жёсткость ДВ, Н·м·с	<input type="text" value="1000"/>	
	<input type="button" value="a32"/>			
	<input type="text" value="3"/>	polar_ext_fdf – Число пар магнитных полюсов обмотки статора ДВ	<input type="text" value="2093,33"/>	
	<input type="button" value="b31"/>			
7	<input type="text" value="0,002"/>	k_cond – Коэффициент состояния газовой среды (отношение массы и давления), м·с ⁻²	<input type="text" value="0,5"/>	<input type="text" value="0,5"/>
	<input type="button" value="a71"/>		<input type="button" value="a74"/>	

Рис. 3

Автоматический расчёт коэффициентов модели. Расчёт коэффициентов для модели из семи уравнений может допускать ошибки ручного пересчёта и требует значительных временных затрат. Целесообразно создать программное приложение, например, в среде Matlab, позволяющее автоматически рассчитывать коэффициенты. В результате для проведения расчёта потребуются лишь технологические параметры объекта — обычно это паспортные данные оборудования.

Как уже было замечено, ГВТ как технологический объект может представлять собой различные компоновки тягодутьевых машин и котельных агрегатов и соответственно иметь разные технические характеристики. Предложенная программа (рис. 3) позволяет работать со всем множеством моделей ГВТ.

Полезным свойством программы является автоматический перенос рассчитанных коэффициентов на заранее построенную структурную схему САР в Simulink. Таким образом, воедино собираются этапы расчёта дифференциальных уравнений и моделирования.

Заключение. В данной работе рассмотрена методика настройки регулятора ГВТ. Объект широко распространён в теплоэнергетике и требует высокого качества регулирования.

Анализ модели объекта (1) наглядно иллюстрирует физическую сущность такого свойства объекта, как пульсации разрежения, которое соответствует колебательным свойствам модели.

Применяемый для синтеза метод локализации позволяет использовать прямую одноконтурную схему включения ПИД-регулятора или двухконтурную [6] при наличии большой статической ошибки.

Полученный регулятор учитывает особенности ГВТ, такие как нестационарность и нелинейность. Отсутствие необходимости перенастройки регулятора в связи с изменением режима работы или износом объекта является важным моментом при эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плетнев Г. П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1981. 368 с.

2. **Новиков С. И.** Практическая идентификация динамических характеристик объектов управления теплоэнергетического оборудования: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 64 с.
3. **Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л.** Идентификация систем управления. М.: Наука, 1974. 248 с.
4. **Востриков А. С., Пономарев А. А.** Синтез двухканального регулятора газовоздушного тракта теплоэнергетического котла // Доклады АН ВШ РФ. 2011. № 1(16). С. 1–10.
5. **Востриков А. С.** Синтез систем регулирования методом локализации. Новосибирск: НГТУ, 2007. 252 с.
6. **Востриков А. С.** Проблема синтеза регуляторов для систем автоматики: состояние и перспективы // Автометрия. 2010. **46**, № 2. С. 3–19.

Поступила в редакцию 22 мая 2012 г.
