

УДК 697.32

Я. А. ГУСЕНЦОВА^а, А. А. КОВАЛЕНКО^а, М. В. ПИЛАВОВ^а, К. К. КОПЕЦ^б^а ГОУ ВПО «Луганский национальный университет им. В. Даля», ^б ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет»

ВЫБОР РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБЪЕКТА

Аннотация. Приведен анализ работы теплогенерирующих объектов с различными типами регуляторов при разных значениях параметров объекта регулирования. Проведен сравнительный анализ эффективности использования регуляторов в системах регулирования.

Ключевые слова: теплогенератор, регулирование, эффективность, переходный процесс.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Системы теплоснабжения являются частью топливно-энергетического комплекса и потребляют до 20 % энергоресурсов республики. Поэтому рациональное использование первичных энергетических ресурсов, а именно внедрение новых технологических процессов, реконструкция, модернизация, оптимизация режимов эксплуатации теплогенерирующих объектов, которые приводят к экономии энергоресурсов, имеют важное значение для экономики [1, 6].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Широкий круг исследований, проведенный различными авторами [3, 5] показал, что эксплуатация теплогенерирующих объектов неэффективна без широкой и полной автоматизации систем управления. В настоящее время промышленностью выпускается достаточно широкий класс приборов и оборудования, позволяющих автоматизировать практически любую систему регулирования теплогенерирующих объектов [4, 5]. Остается открытым вопрос выбора закона регулирования для конкретной системы, обеспечивающего наиболее экономичный режим как в условиях статики, так и в переходных режимах.

ЦЕЛЬ

Исследование режимов регулирования теплогенерирующих объектов с различными типами регуляторов для повышения их эффективности.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Экспериментальные и теоретические исследования динамических характеристик промышленных теплогенераторов [2] показали, что их динамика описывается передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{k_0 \exp(-\tau p)}{\prod_1^n (T_i p - 1)}, \quad (1)$$

где k_0 – коэффициент передачи (отношение выходного сигнала к входному);
 τ – время транспортного запаздывания;
 T – постоянная времени, зависящая от инерционности объекта.

Закон регулирования для подобного типа систем является важным средством повышения технологической эффективности. Известно, что с повышением степени автоматизации уровень технологической эффективности увеличивается. Однако в исследуемых объектах существует рентабельный уровень автоматизации (насыщения системами автоматического регулирования). При значительной тепловой мощности становится рентабельнее применение все большего числа систем автоматического регулирования. При этом должна быть решена задача о выборе типа регулятора для регулирования технологического процесса.

Выбор закона регулирования для конкретного объекта зависит от предъявляемых к нему требований: минимальная ошибка регулирования, постоянство параметра регулирования и т. д.

При попытке практического использования формулы (2) для технической реализации оптимального регулятора сразу же возникает трудность в моделировании оператора объекта W_{μ}^0 . Этот оператор выражается обычно весьма сложными (как правило, трансцендентными) математическими зависимостями, а в случае, когда характеристики объекта получены экспериментально, они вообще задаются таблично или в виде графиков. В этой связи возникает проблема аппроксимации реальной характеристики объекта.

$$W_{p, \text{opt.}}(p) \approx \frac{1}{\tau_{\mu} p W_{\mu}^0(p)}. \quad (2)$$

В основу критерия приближения при аппроксимации динамических характеристик объекта должна быть положена конечная цель аппроксимации, а именно получение системы регулирования, в минимальной степени отличающейся от оптимальной системы. При этом критерий приближения должен быть подчинен показателю точности оптимальной системы. В частности, для показателя оптимальности системы регулирования – минимума среднеквадратичной ошибки регулирования задача оптимального приближения при аппроксимации динамической характеристики объекта должна формулироваться следующим образом.

По заданной динамической характеристике объекта W_{μ}^0 выбрать структуру и параметры аппроксимирующей характеристики $W_{\mu a}^0$ так, чтобы среднеквадратичная ошибка системы регулирования с регулятором, частотная характеристика которого определяется полученной формулой при замене в ней W_{μ}^0 на $W_{\mu a}^0$ отличалась от среднеквадратичной ошибки оптимальной системы на минимально возможную величину. В этом отражается необходимость использования системного подхода при построении математической модели объекта.

$$W_p(p) \approx \frac{1}{\tau_{\mu a} p W_{\mu a}^0(p)}, \quad (3)$$

Соответственно решение задачи синтеза реального регулятора, в наименьшей степени отличающегося от регулятора, обеспечивающего предельную динамическую точность регулирования, может осуществляться в такой последовательности.

Исходя из общего вида характеристики W_{μ}^0 , подбирается достаточно простая структура аппроксимирующей динамической характеристики $W_{\mu a}^0$ и определяется соответствующая ей структура оператора регулятора $W_p(p)$.

По характеристике объекта W_{μ}^0 и спектру мощности $G_{xx}(p)$ входного воздействия $x(t) = s(t) - u(t)$ отыскиваются численные значения оптимальных коэффициентов оператора регулятора (эти коэффициенты обычно называются параметрами настройки регулятора, минимизирующих дисперсию ошибки для каждой комбинации параметров настройки), по формуле:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Phi_{ss}(j\omega)|^2 G_{xx}(\omega) d\omega, \quad (4)$$

где Φ_{ss} – частотная характеристика системы регулирования, определяемая по формуле

$$\Phi_{ss} = \frac{1}{1+W(p)}. \quad (5)$$

При выборе структуры аппроксимирующей характеристики $W_{\mu a}^0$ необходимо, чтобы характеристическое уравнение регулятора не имело корней в правой полуплоскости. В противном случае полученная система может оказаться не грубой к вариациям параметров.

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования показали, что переходные характеристики в теплогенерирующих установках имеют апериодический характер. Такие характеристики были аппроксимированы инерционной системой n -го порядка с запаздыванием, а в случаях, когда может быть допущена большая динамическая ошибка регулирования, – инерционной системой первого порядка с запаздыванием или даже просто безинерционной системой с запаздыванием.

$$W(p) = \frac{k_0 \exp(-\tau p)}{\prod_1^n (T_i p + 1)} \quad (6)$$

Подстановка указанных аппроксимирующих характеристик в общее выражение приводит к следующим трем типам регулятора, которые в настоящее время обычно реализуются в серийной аппаратуре регулирования и считаются типовыми.

Численный эксперимент с аналоговыми регуляторами (пропорциональным П-регулятором, интегральным И-регулятором, пропорционально-дифференциальным ПД-регулятором, пропорционально-интегральным ПИ-регулятором и пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором) показал, что в наибольшей степени указанному критерию удовлетворяет ПИД-регулятор, передаточная функция которого определяется выражением

$$W_p(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} + T_d p \right) \quad (7)$$

где k_p – коэффициент передачи регулятора;
 T_u, T_d – постоянные интегрирования и дифференцирования регулятора, являющиеся параметрами его настройки.

Регулятор с таким алгоритмом работы осуществляет перемещение регулирующего органа в каждый момент времени пропорционально отклонению регулируемой величины, интегралу и производной отклонения:

$$\mu(t) = k_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \int \varepsilon(t) dt + T_d \varepsilon'(t) \right] \quad (8)$$

Особенностью характеристики теплогенераторов является то, что регулируемая переменная (температура теплоносителя) с течением времени стабилизируются на некотором новом значении. Объекты с такими переходными характеристиками получили название объектов с саморегулированием.

Переходные и частотные характеристики наиболее распространенных законов регулирования и соответствующие каждому закону переходные характеристики аппроксимирующей модели объекта приведены в [2, 3].

Анализ динамических характеристик теплогенераторов показал, что с достаточной степенью точности она может быть представлена в виде последовательного соединения двух инерционных звеньев с постоянными времени T_1 и T_2 и звена транспортного запаздывания с временем запаздывания (рис. 1). Здесь x – регулирующее воздействие, tg – параметр возмущения.

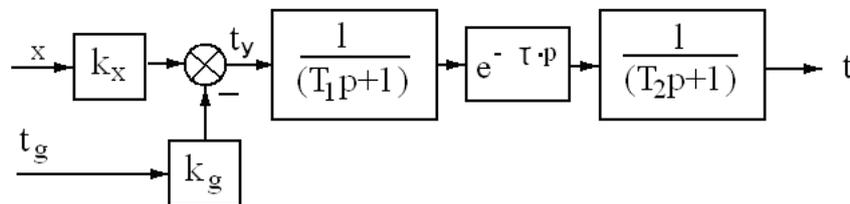


Рисунок 1 – Структурная схема объекта управления.

На такой структурной схеме проводился численный эксперимент.

Исследовались следующие параметры, характеризующие качество регулирования переходных процессов (рис. 2):

- длительность переходного процесса – $T_{пер}$;

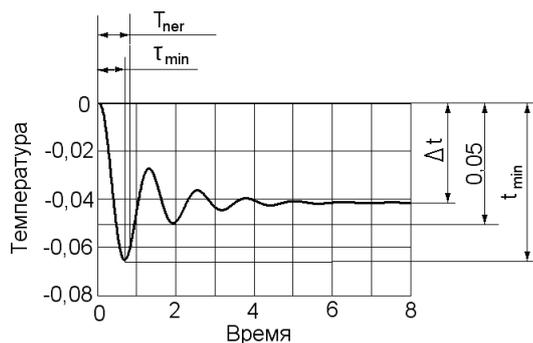


Рисунок 2 – Схема определения показателей качества переходного процесса.

- максимальное или минимальное значение регулируемого параметра в течение переходного процесса (в данном случае – минимальная безразмерная температура – t_{min});
- время достижения минимума или максимума τ_{min} ;
- амплитуда автоколебаний;
- период автоколебаний;
- среднее значение температуры при автоколебаниях;
- установившееся по окончании переходного процесса значение температуры (статическая ошибка регулирования) – Δt .

Вначале для каждого типа регулятора установлен допустимый диапазон изменения его параметров настройки, например для пропорционально-интегро-дифференциального регулятора, это – коэффициент усиления пропорциональной части и постоянные времени интегрирования и дифференцирования. Допустимый диапазон параметров ограничивается, с одной стороны – колебательной границей области устойчивости, с другой – требованиями к точности в установившемся режиме (с учетом физических ограничений). В работе точность ограничивается 5%-ой зоной от величины заданного значения температуры, в безразмерных величинах – $\pm 0,05$ (рис. 3).

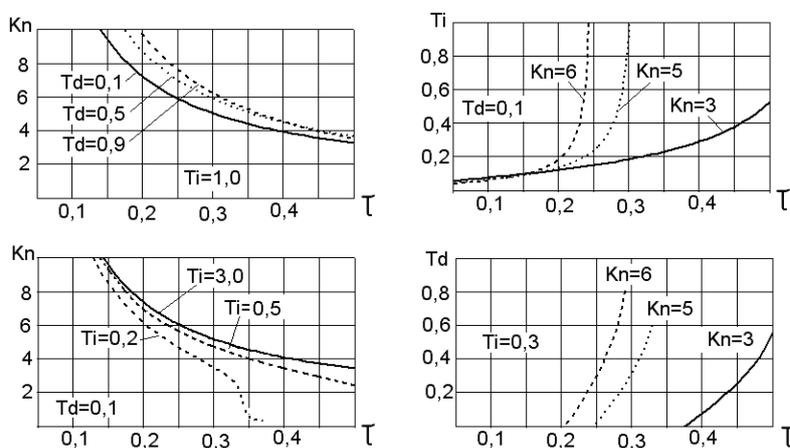


Рисунок 3 – Области устойчивости системы с ПИД-регулятором.

Проведенные исследования работы теплогенерирующих объектов с различными типами регуляторов и при различных значениях параметров объекта регулирования позволили сделать следующий вывод:

Пропорционально-интегро-дифференциальные регуляторы являются наиболее эффективными из аналоговых линейных регуляторов, позволяя в достаточно широком диапазоне времен запаздывания объекта получать качественные переходные процессы с хорошим быстродействием и с нулевой статической ошибкой. Однако при таком выборе следует учитывать сложность ПИД-регулятора и его стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления Текст / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
2. Экспериментальное определение динамических характеристик теплогенерирующих объектов [Текст] / Я. А. Гусенцова, А. А. Коваленко, М. В. Пилавов, С. А. Письменная // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. трудов. – Луганск: Изд. ЛГУ им. В. Даля, 2016. – № 2(17). – С. 166–170.
3. Характеристика тепломассопереноса в котельных установках Текст: монография / А. А. Коваленко, М. В. Пилавов, Н. Д. Андрийчук, Я. А. Гусенцова. – Луганск: Издательство Луганского национального университета им. В. Даля. 2016. – 316 с.
4. Bujak, J. Mathematical modelling of a steam boiler room to research thermal efficiency [Текст] / J. Bujak // Energy. – 2008. – 33. – P. 1779–1787.
5. Lee, Seungro. Performances of a heat exchanger and pilot boiler for the development of a condensing gas boiler [Текст] / Seungro Lee, Sung-Min Kum, Chang-Eon Lee // Energy. – 2011. – Volume 36, Issue 7. – P. 3945–3951.
6. Comparison of different testing methods for gas fired domestic boiler efficiency determination [Текст] / M. D. Paere, C. T. Joen, H. Huisseune [et al.] // Appl. Therm. Eng. – 2013. – 50. – P. 275–281.

Получено 12.10.2017

Я. А. ГУСЕНЦОВА ^a, А. О. КОВАЛЕНКО ^a, М. В. ПИЛАВОВ ^a, К. К. КОПЕЦЬ ^b
ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧОГО ОБ'ЄКТА

^a ДОО ВПО «Луганський національний університет ім. В. Даля», ^b ДОО ЛНР «Луганський національний аграрний університет»

Анотація. Наведено аналіз роботи теплогенеруючих об'єктів із різними типами регуляторів при різних значеннях параметрів об'єкта регулювання. Проведено порівняльний аналіз ефективності використання регуляторів в системах регулювання.

Ключові слова: теплогенератор, регулювання, ефективність, перехідний процес.

YANA GUSENTZOVA ^a, ALIM KOVALENKO ^a, MANOLIS PILAVOV ^a,
KARINA KOPETS ^b

THE CHOICE OF CONTROLLER FOR THE HEAT GENERATING OBJECT

^a Vladimir Dahl Lugansk National University, ^b Lugansk National Agrarian University

Abstract. The analysis of work of heat-generating objects with different types of controllers with different values of parameters of object of regulation was presented. A comparative analysis of the efficiency of regulators in the systems of heat generators has been carried out.

Key words: heat generating object, regulation, efficiency, transient.

Гусенцова Яна Алимовна – доктор технических наук, профессор кафедры вентиляции, теплогозо- и водоснабжения ГОУ ВПО «Луганский национальный университет им. В. Даля». Научные интересы: математическое моделирование гидромеханических процессов в гидроприводах различного назначения, моделирование и расчет вентиляционных систем промышленных предприятий и зданий, вопросы регулирования процессов тепломассообмена

Коваленко Алим Алексеевич – кандидат технических наук, профессор кафедры гидрогазодинамики ГОУ ВПО «Луганский национальный университет им. В. Даля». Научные интересы: нестационарные процессы тепломассопереноса, диффузионные процессы, динамика технических систем, реология жидкости.

Пилавов Манолис Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вентиляции, теплогозо- и водоснабжения ГОУ ВПО «Луганский национальный университет им. В. Даля». Научные интересы: нестационарные процессы тепломассопереноса.

Копец Карина Константиновна – аспирантка кафедры технологии и организации строительного производства ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет». Научные интересы: моделирование и расчет вентиляционных систем промышленных предприятий и зданий, вопросы регулирования процессов тепломассообмена.

Гусенцова Яна Алімівна – доктор технічних наук, професор кафедри вентиляції, теплогазо- та водопостачання ДООУ ВПО «Луганський національний університет ім. В. Даля». Наукові інтереси: математичне моделювання гідромеханічних процесів у гідроприводах різного призначення, моделювання та розрахунок вентиляційних систем промислових підприємств та будівель, питання регулювання процесів тепло масообміну.

Коваленко Алім Олексійович – кандидат технічних наук, професор кафедри гідрогазодинаміки ДООУ ВПО «Луганський національний університет ім. В. Даля». Наукові інтереси: нестационарні процеси тепломасопереносу, дифузійні процеси, динаміка технічних систем, реологія рідини

Пілавов Маноліс Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри вентиляції, теплогазо- та водопостачання ДООУ ВПО «Луганський національний університет ім. В. Даля». Наукові інтереси: нестационарні процеси тепломасопереносу.

Копець Каріна Костянтинівна – аспірант кафедри технології і організації будівельного виробництва ДООУ ЛНР «Луганський національний аграрний університет». Наукові інтереси: моделювання і розрахунок вентиляційних систем промислових підприємств і будівель, питання регулювання процесів тепло масообміну.

Gusentsova Yana – D.Sc. (Eng.), Professor the department of Ventilation, Heat and Gas and Water Supply, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interests: mathematical simulation of hydrodynamic processes in hydraulic drives for various purposes, modeling and calculation of ventilation systems for industrial plants and buildings, the regulation of processes of heat and mass exchange.

Kovalenko Alim – Ph. D. (Eng.), Professor, Hydro-gas Dynamics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interests: non-stationary processes of heat and mass transfer, diffusion processes, dynamics of technical systems, fluid rheology.

Pilavov Manolis – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Ventilation, Heat and Gas and Water Supply Department, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interests: non-stationary processes of heat and mass transfer.

Kopets Karina – post-graduate student, Technology and Organization of Building Production Department, Vladimir Dahl Lugansk National Agrarian University. Scientific interests: modeling and calculation of ventilation systems of industrial enterprises and buildings, regulation of heat and mass exchange.