17. Bormotov A. V., German-Galkin S. G., Zagashvili Yu. V., Lebedev V. V. *Modul'naya elektricheskaya mashina* (Modular electrical machine). Patent RU 2510121 C2. 20.03.2014 (in Russian).

18. German-Galkin S. G., Bormotov A. V. *Modul'naya ventil'naya mashina s kommutatsiei magnitnogo potoka* (Modular machine with a magnetic flux switching), *Power Electronics*, 2012, no. 4, pp. 46–50 (in Russian).

19. German-Galkin S., Bormotov A. Analytical and model study of a modular electric machine in the electric drive, *American Journal of Scientific and Educational Research*, 2014, no. 1 (4), pp. 614–623.

20. *User's guide* — Maxwell 3D, Ansys Inc., USA, 2012, Rev. 6.

21. Rymsha V. V., Radimov I. N., Barantsev M. V. *Tekhnologiya rascheta trekhmernogo statsionarnogo magnitnogo polya v ventil'no-reaktivnykh elektrodvigatelyakh na platforme Ansys Workbench* (Ansys Workbench powered calculation technique of stationary 3D magnetic field in switched-reluctance motors), *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2006, no. 6, pp. 25–32 (in Russian).

22. Gollandtsev Yu. A. *Ventil'nye induktorno-reaktivnye dvigateli* (Synchronous inductor-reluctance motors), St. Petersburg, SSC of RF CSRI "Elektropribor", 2003, 148 p. (in Russian).

23. Lubarskii B. G., Ryabov Ye. S., Overyanova L. V., Emel'yanov V. L. *Imitatsionnaya model' tyagovogo ventil'no-induktornogo elektropriroda* (Simulation model of a synchronous inductor traction motor), *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2009, no. 5, pp. 67–72 (in Russian).

24. Kozachenko V. F., Korpusov D. V., Ostrirov V. N. *Elektroprivod na baze ventil'nykh induktornykh mashin s elektromagnitnym vzbuzhdeniem* (Electrical drive based on synchronous inductor machines with electromagnetic excitation), *Electronic Components*, 2005, no. 6, pp. 60–64 (in Russian).

25. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. *Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną*, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2000, 242 p. (in Polish).

УДК 681.515.8

DOI: 10.17587/mau.16.631-636

Н. С. Земцов, аспирант, nikita.zemtsov@tul.cz,
Либерецкий технический университет, г. Либерец, Чешская Республика,
Г. А. Французова, д-р техн. наук, проф., frants@ac.cs.nstu.ru,
Новосибирский государственный технический университет

Синтез ПИД регулятора для системы управления прямоточным котлом¹

Обсуждается задача синтеза системы управления для прямоточного котла. Рассматривается упрощенная модель одного из нагревателей, для которого с учетом возможности измерения промежуточной переменной предлагается формировать каскадное управление. Показано, что во внутреннем контуре достаточно применения типового П регулятора. Параметры внешнего контура нагревателя нестационарны и существенно зависят от нагрузки на котел, поэтому предлагается использовать ПИД регулятор, коэффициенты которого рассчитываются на основе метода локализации. Представлены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность системы управления нагревателем для основных режимов функционирования.

Ключевые слова: прямоточный котел, нагреватель, каскадное управление, нестационарный объект, ПИД регулятор, метод локализации

Введение

Паровые котлы широко применяются в теплоэнергетике и промышленности. Их основным назначением является генерация насыщенного или перегретого пара высокого давления, который приводит в движение турбину. Существуют два типа паровых котлов: газотрубные и водотрубные котлы. Последние, в свою очередь, делятся на барабанные и прямоточные [1]. Главным отличием принципа действия прямоточного котла является то, что вода проходит через испарительные трубы однократно, постепенно превращаясь в пар. В случае барабанного котла кратность циркуляции воды может достигать 30 раз, что приводит к более длительному времени приведения такого типа котлов в рабочее состояние и замедляет время нагрева пара. В работе

рассматривается система стабилизации температуры в прямоточном котле, параметры которого изменяются в ходе технологического процесса в зависимости от нагрузки. Такие котлы широко используются в качестве резервных установок, применяющихся при пиковых сбоях или при сбоях основных котельных агрегатов. Прямоточные паровые котлы малой мощности благодаря своей компактности и относительно невысокой стоимости находят широкое применение в сфере коммунального хозяйства, небольших производствах, сельском хозяйстве [2].

1. Принцип действия прямоточного котла

В работе рассматривается прямоточный котел (рис. 1), который состоит из последовательно соединенных нагревателей [3]. Здесь НР — контур высокого давления; LP — контур низкого давления; V1–V3 — клапаны, позволяющие контролировать температуру пара на входе соответствующего нагревателя; T11 — датчик температуры пара, поступающего на лопатки турбины.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию № 2014/138, тема проекта "Новые структуры, модели и алгоритмы для про-рывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности".

Рис. 1. Упрощенная схема прямооточного котла

Экономайзер служит для подогрева питательной воды перед подачей в котел с помощью уходящих из котла газов. Нагретая до 200 °С питательная вода поступает на вход "Выпаривателя", где превращается в пар.

Полученный пар последовательно проходит четыре нагревателя (Нагреватель I — Нагреватель IV), где он постепенно нагревается до температуры 460...575 °С (значение температуры зависит от нагрузки), после чего подается на рабочие лопатки высокого давления и приводит в движение турбину.

Пар низкого давления после турбины поступает на "Рекуперативный теплообменник", подогревается и подается на рабочие лопатки турбины низкого давления [4]. Такая организация позволяет обеспечить более высокий КПД.

Если рассматривать систему в целом, то технологический процесс является достаточно сложным, строго говоря, нелинейным и включает множество параметров, которые зависят от нагрузки на котел (Q) и качества пара.

Возможная нагрузка в диапазоне 50...100 % соответствует 125...250 МВт мощности.

В данной работе основное внимание уделяется контролю температуры в котле, причем наиболее важной является температура пара на выходе последнего нагревателя, который приводит в движение турбину.

В системе предусмотрены клапаны V1 — V3 для подачи холодной воды под высоким давлением, что позволяет контролировать процесс нагрева пара в соответствующих нагревателях. Вода поступает напрямую в трубы с паром через специальные распылители, тем самым понижая температуру пара.

2. Упрощенная математическая модель нагревателя

Поскольку нагреватели II—IV идентичны, то достаточно рассмотреть один из них, схема системы управления которым представлена на рис. 2.

Рабочей средой здесь является нагреваемый пар, а холодная вода позволяет регулировать темпера-

Рис. 2. Схема системы управления нагревателем

туру входного пара нагревателя посредством клапана V. Двойная стрелка Q показывает зависимость параметров нагревателя от текущей нагрузки. Наличие датчиков температуры входного и выходного пара (t_{in} , t_{out}) позволяет организовать каскадное управление в системе.

Во внутреннем контуре с помощью регулятора (Регулятор 1) контролируется значение температуры пара на входе нагревателя t_{in} , а во внешнем контуре второй регулятор (Регулятор 2) обеспечивает стабилизацию значения температуры на выходе нагревателя t_{out} . При этом управляющим воздействием, генерируемым регулятором, является положение клапана.

В техническом университете города Либерец (Чешская Республика) была разработана линеаризованная модель рассматриваемого прямооточного котла [5], которая достаточно точно отражает его динамические свойства. Она имеет вид последовательного соединения звеньев со следующими передаточными функциями:

$$G_1(p) = \frac{K_{t_{in}}}{(T_{in1}p + 1)(T_{in2}p + 1)(T_{in3}p + 1)}, \quad (1)$$

$$G_2(p) = \frac{K_{t_{out}}}{(T_{out}p + 1)^n}, \quad (2)$$

параметры которых и порядок передаточной функции $G_2(p)$ в зависимости от уровня нагрузки представлены в табл. 1.

Структура каскадной системы управления нагревателем показана на рис. 3.

Здесь $G_{C1}(p)$ и $G_{C2}(p)$ — передаточные функции регуляторов внутреннего и внешнего контуров соответственно. Передаточная функция $G_1(p)$ опре-

Таблица 1

Нагрузка Q , %	G_1				G_2		
	$K_{t_{in}}$	T_{in1}	T_{in2}	T_{in3}	$K_{t_{out}}$	T_{out}	n
0...50	-118,74	1,69	1,82	3,8	1,0675	43	4
50...70	-73,6931	1,69	1,82	3,8	1,1313	39	3
70...90	-48,9919	1,69	1,82	3,8	1,1723	28	3
90...100	-40,6271	1,69	1,82	3,8	1,1948	25	3

Рис. 3. Структурная схема системы управления

деляет взаимосвязь между положением клапана и температурой на входе нагревателя. Как видно из табл. 1, коэффициент $K_{t_{in}}$ отрицательный, и это означает, что открытие клапана приводит к уменьшению температуры пара. Постоянные времени (T_{in1} , T_{in2} и T_{in3}) не зависят от уровня нагрузки и определяются самим клапаном. Однако уровень нагрузки влияет на коэффициент усиления передаточной функции. Это объясняется тем, что при увеличении нагрузки увеличивается давление пара, что уменьшает эффективность процесса охлаждения.

Передаточная функция $G_2(p)$ определяет взаимосвязь между температурой на входе и температурой на выходе нагревателя. Увеличение нагрузки приводит к ускорению процесса нагрева пара — постоянная времени T_{out} уменьшается, а коэффициент $K_{t_{out}}$ увеличивается, что говорит об увеличении эффективности нагрева пара.

Следует отметить, что при увеличении давления пара (при увеличении нагрузки) проявляются нелинейные свойства клапана, а именно, положение клапана V смещается на соответствующее значение v_0 (табл. 2).

Таблица 2

Смещение клапана	$Q, \%$					
	0...50	50...60	60...70	70...80	80...90	90...100
v_0	0,005952	0,05849	0,0966	0,1179	0,1109	0,0732

Однако представленную математическую модель нагревателя можно считать линейной, если рассматривать нелинейные свойства клапана как возмущение по управлению.

3. Особенности проточного котла как объекта управления

Нагреватель как объект управления обладает следующим рядом особенностей, которые необходимо учитывать при выборе регулятора:

- параметры и порядок объекта зависят от текущей нагрузки (см. табл. 1);
- управление в системе ограничено;
- на вход и выход нагревателя действуют возмущения.

При работе с ним следует помнить, что управляющее воздействие может изменяться только в диапазоне от 0 до 1 (0...100 %), что соответствует

полностью открытому и полностью закрытому положением клапана. Также следует отметить, что единственная возможность воздействия на систему — это охлаждение пара. Если температура пара слишком мала, то единственное возможное действие с точки зрения регулирования температуры — закрыть клапан до тех пор, пока температура пара не войдет в рабочую зону.

В системе имеется два типа возмущений, причем работа со вторым типом (приложенным к выходу системы) является наиболее трудной, так как возмущение "проходит" напрямую в регулятор. Следовательно, при синтезе регулятора нужно учитывать необходимость отработки такого возмущения.

Отметим также, что "наихудшим" случаем является система с параметрами, соответствующими нагрузке 50 % от максимальной. Этому состоянию соответствуют наибольший порядок системы, наибольшие постоянные времени и наибольший коэффициент усиления, что по отдельности и в целом затрудняет синтез регулятора.

4. Требования к системе управления

В настоящее время система контроля температуры пара уже разработана и используется в реальной установке [6]. Имеющаяся система представляет собой каскад адаптивных ПИ регуляторов, параметры которых были подобраны эмпирическим путем. Очевидно, что такой подход к синтезу системы управления не является оптимальным, что говорит об актуальности разработки робастного регулятора, который должен обеспечивать заданное качество работы системы.

Основные требования, предъявляемые к системе управления, следующие:

- постоянная структура и параметры регулятора;
- время отработки входного воздействия в рабочей зоне температур должно соответствовать технологическому процессу;
- парирование изменения параметров объекта при изменении текущей нагрузки;
- отработка возмущения по температуре выходного пара;
- управляющее воздействие должно находиться в диапазоне от 0 до 1;
- управляющее воздействие не должно содержать высокочастотных колебаний.

На основе указанных требований выделим три основных режима работы системы для проверки работоспособности регулятора:

- постоянный уровень нагрузки, ступенчатое входное воздействие;
- постоянный уровень нагрузки, отсутствие входного воздействия, отработка возмущения, приложенного к выходу системы;
- переменный уровень нагрузки (изменяется по линейному закону), ступенчатое входное воздействие.

5. Стабилизация внутреннего контура

Исследуемая модель проточного котла включает в себя два контура (рис. 3), процессы в которых являются разнотемповыми, так как постоянные времени внутреннего и внешнего контуров различаются более чем на один порядок. В этом случае можно синтезировать регуляторы для внутреннего $G_{C1}(p)$ и внешнего контуров $G_{C2}(p)$ независимо друг от друга.

Проведенные ранее исследования в области синтеза регулятора для рассматриваемого проточного котла показывают, что для стабилизации внутреннего контура целесообразно использовать пропорциональный регулятор [6], коэффициент которого был выбран опытным путем (рис. 4).

Рис. 4. Выбор коэффициента П регулятора:

1 — переходный процесс без регулятора; 2 — переходный процесс регулятора с коэффициентом, равным 0,05; 3 — переходный процесс регулятора с коэффициентом 0,07; 4 — переходный процесс регулятора с коэффициентом 0,09

Как видно, приемлемые динамические свойства в контуре обеспечивает коэффициент П регулятора, равный 0,07. Имеющаяся статическая ошибка будет скомпенсирована регулятором внешнего контура.

6. Расчет параметров ПИД регулятора внешнего контура

При расчете внешнего контура внутренний можно не учитывать, поскольку процессы в нем уже закончились. В качестве регулятора внешнего контура предлагается использовать типовой ПИД регулятор

$$G_{C2}(p) = K_{\Pi} + \frac{K_{\text{И}}}{p} + \frac{K_{\text{Д}}p}{\tau p + 1}, \quad (3)$$

где τ — постоянная времени реального дифференцирующего устройства. В результате преобразований (3) принимает вид

$$G_{C2}(p) = \frac{(K_{\text{Д}} + \tau K_{\Pi})p^2 + (K_{\Pi} + \tau K_{\text{И}})p + K_{\text{И}}}{p(\tau p + 1)}. \quad (4)$$

Рис. 5. Структурная схема внешнего контура

Как видно, регулятор $G_{C2}(p)$ содержит форсирующий полином и для $G_2(p)$ второго порядка по форме соответствует регулятору, основанному на методе локализации [7, 8]. В связи с этим предлагается рассчитывать параметры ПИД регулятора (3) на базе данного метода, аналогично работам [9, 10]. Предварительно выражение (4) записывается в форме

$$G_{C2}(p) = K \frac{p^2 + 2cp + c^2}{p(\tau p + 1)},$$

где c — параметр, который определяет длительность процесса, K — точность. Их численные значения следующие: $K = 35$, $c = 0,017$, $\tau = 20$.

Преобразованная расчетная схема системы представлена на рис. 5. Здесь Δ — ошибка регулирования; $G_f(p)$ — предварительный фильтр, который позволяет улучшить качество переходного процесса:

$$G_f(p) = \frac{c}{p^2 + 2cp + c^2}.$$

В соответствии с алгоритмом расчета робастного ПИД регулятора [9, 10] его параметры определяются по соотношениям

$$K_{\Pi} = Kc(2 - \tau c), \quad K_{\text{И}} = Kc^2, \quad K_{\text{Д}} = K - \tau K_{\Pi}$$

и имеют численные значения: $K_{\Pi} = 0,988$; $K_{\text{И}} = 0,0101$; $K_{\text{Д}} = 0,0656$.

7. Проверка работоспособности ПИД регулятора

Работоспособность полученной системы управления проточным котлом проверяли путем моделирования выделенных основных режимов. Представленные графики иллюстрируют результаты отработки ступенчатого входного воздействия (рис. 6) и возмущения, приложенного к выходу системы (рис. 7); здесь v — изменение положения клапана.

Данные результаты (рис. 6, 7) были получены при нагрузке $Q = 50\%$, что является "наихудшим случаем". Для остальных уровней нагрузки наблюдается отсутствие перерегулирования и меньшее время переходных процессов, т. е. выполняются все требования к системе регулирования.

Второй режим работы соответствует изменению уровня нагрузки с течением времени и является не менее важным с технологической точки зрения. Изменение нагрузки моделировалось в виде линейно-возрастающей функции в диапазоне от 50 до 100 %. Полученные результаты представлены на рис. 8.

Следует отметить, что в данном режиме работы проточный котел представляет собой нестационарную систему.

Рис. 6. Обработка ступенчатого входного воздействия

Рис. 7. Обработка возмущения

нарный объект управления, поскольку изменение нагрузки по линейному закону приводит к изменению параметров объекта. Однако и в данной ситуации рассчитанный ПИД регулятор обеспечивает выполнение заданных требований к системе.

Рис. 8. Влияние переменного уровня нагрузки

Заключение

В работе исследована возможность использования робастного ПИД регулятора в системе управления прямоточным котлом. Главным отличием и преимуществом полученного регулятора по сравнению с разработанным ранее адаптивным регулятором является то, что он имеет постоянные параметры и структуру. Использование старшей производной выходной величины при формировании управляющего воздействия позволяет парировать влияние нелинейных характеристик и нестационарных параметров нагревателя. Описанные качества предложенного регулятора говорят о его эффективности, и, следовательно, данный подход может быть использован для решения относительно широкого круга задач управления.

Список литературы

1. Паровой котел. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Паровой_котел (дата обращения: 20.11.14).
2. Преимущества прямоточных паровых котлов. URL: <http://www.otopimdom.ru/index.php?id=509> (дата обращения: 05.12.14).
3. Nahlovsky T., Modrlak O. The Fuzzy Approach to the Temperature Control of Superheated Steam.
4. Паровая турбина. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Паровая_турбина (дата обращения: 28.03.14).
5. Opalka J., Nahlovsky T. Continuously switched linearized models of the nonlinear once-through boiler model // Proc. of International Conference on Process Control (18–21 June 2013). 2013. P. 263–267. doi: 10.1109/PC.2013.6581420.

6. Hubka L., Modrlak O. The practical possibilities of steam temperature dynamic models application // Proc. of 13th International Conference "Carpathian Control Conference (ICCC)" (28–31 May 2012). 2012. P. 237–242. doi: 10.1109/CarpathianCC2012.6228646.

7. Востриков А. С., Французова Г. А. Теория автоматического регулирования. М.: Высшая школа, 2006. 365 с.

8. Востриков А. С., Уткин В. И., Французова Г. А. Система с производной вектора состояния в управлении // Автоматика и телемеханика. 1982. № 3. С. 22–25.

9. Французова Г. А., Земцов Н. С. Применение метода локализации для расчета робастного ПИД-регулятора // Научный вестник НГТУ. 2013. № 3 (52). С. 18–21.

10. Zemtsov N. S., Frantsuzova G. A., Hubka L., Modrlak O. Calculation of robust PID-controller // Proc. of 12th Intern. Conf. "Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE—2014)" (2–4 October 2014). Novosibirsk. 2014. Vol. 1. P. 675–678.

11. Hubka L. Temperature dynamics of heat exchangers in boiler // Proc. of 7th Eurosime Congress on Modeling and Simulation. Praha. 2010.

Design of PID-Controller for a Once-Through Boiler

N. S. Zemtsov, nikita.zemtsov@tul.cz, Technical University of Liberec,

Faculty of Mechatronics, Informatics and Interdisciplinary Studies, Liberec, 46117, Czech Republic,

G. A. Frantsuzova, frants@ac.cs.nstu.ru✉,

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Corresponding author: Frantsuzova Galina A., Professor,

Novosibirsk State Technical University, Automatics Department,
Novosibirsk, 630073, Russian Federation, e-mail: frants@ac.cs.nstu.ru

Received on March 23, 2015

Accepted on April 17, 2015

The problem of synthesis of control system for once-through boiler is discussed in the paper. The simplified linear model of the boiler heater is considered here. It is proposed to use cascade control approach to control the plant as it is possible to measure the intermediate variable. Different dynamics of the inner and outer circuits simplifies the designing process. It is shown that the inner loop can be controlled by using typical P-controller. Parameters of the external heater circuit are non-stationary and depend on the boiler load so it is suggested to use the robust PID controller to control it. The coefficients of this controller are suggested to be calculated on the basis of the localization method. The main advantage of the method is using the derivative vector for manipulated variable calculations, which allows us to deal with the pending type of control object. This paper includes numerical experiments with a set of linearized model of the super-heater. The results show that the obtained control system has good enough quality of transient processes. The designed set of controllers was applied to the great non-linear model of the once-through boiler, which provides more realistic transient processes. The simulation results of this application are almost the same as in case of the linear model. Therefore it can be said that the designed control system fully perform all the requirements.

Keywords: once-through boiler, heater, cascade control, non-stationary object, PID-controller, localization method

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Ministry of Science and Education, State Task № 2014/138, theme "New structures, models and algorithms for the management of the break-through technology systems based on high-tech results of intellectual activity".

For citation:

Zemtsov N. S., Frantsuzova G. A. Design of PID-Controller for a Once-Through Boiler, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 631–636.

DOI: 10.17587/mau.16.631-636

References

1. Parovoj kotel (steam boiler), available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Parovoj_kotel (data of access 20.11.14).

2. Preimushhestva prjamotochnykh parovykh kotlov (advantages of the steam boilers), available at: <http://www.otopimdom.ru/index.php?id=509> (data of access: 05.12.14).

3. Nahlovsky T., Modrlak O. The Fuzzy Approach to the Temperature Control of Superheated Steam. In 17th International Conference on System Theory, Control and Computing 2013 (ICSTCC 2013) — Joint Conference Proceedings. 11–13 October 2013. Sinaia, Romania, s. 374–379. ISBN 978-1-4799-2228-4.

4. Parovaja turbina (steam turbines), available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Parovaja_turbina (data of access: 28.03.14).

5. Opalka J., Nahlovsky T. Continuously switched linearized models of the nonlinear once-through boiler model, *Proc. of International Conference on Process Control (18–21 June 2013)*, 2013, pp. 263–267. doi: 10.1109/PC.2013.6581420.

6. Hubka L., Modrlak O. The practical possibilities of steam temperature dynamic models application, *Proc. of 13th International Conference "Carpathian Control Conference (ICCC)"* (28–31 May 2012), 2012, pp. 237–242. doi: 10.1109/CarpathianCC2012.6228646.

7. Vostrikov A. S., Frantsuzova G. A. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of the automatic control), Moscow, Vischaj chkola, 2006, 365 p. (in Russian).

8. Vostrikov A. S., Utkin V. I., Frantsuzova G. A. *Sistema s proizvodnoy vektora sostojaniya v upravlenii* (System with using vector of state derivative for manipulated variable calculations), *Avtomatika i Telemechanika*, 1982, no. 3, pp. 22–25 (in Russian).

9. Frantsuzova G. A., Zemtsov N. S. *Primenenie metoda lokalizatsii dlya rascheta robastnogo PID-regulyatora* (Using the localization method for robust PID-controller calculations), *Nauchnyj Vestnik NGTU*, 2013, no. 3 (52), pp. 18–21 (in Russian).

10. Zemtsov N. S., Frantsuzova G. A., Hubka L., Modrlak O. Calculation of robust PID-controller, *Proc. of 12th Intern. Conf. "Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE—2014)"* (2–4 October 2014), Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 675–678.

11. Hubka L. Temperature Dynamic of Heat Exchangers in Boilers, *Eurosime 2010 — 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, Praha. CTU, Praha, 2010, p. 1–5.