

УДК 621.18.05:681.536

Д.И. Коньков, С.В. Захаркина, О.М. ВласенкоРоссийский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия**СИСТЕМА ЭФФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА
НА ВЫХОДЕ ИЗ КОТЛА**

В статье рассмотрена проблема эффективного регулирования температуры пара на выходе из котла. Температура перегрева пара на выходе из пароперегревателя относится к важнейшим параметрам, определяющим экономичность работы паровой турбины и энергетического котла. Автоматическое регулирование перегрева пара должно обеспечить поддержание температуры перегретого пара в заданных пределах вне зависимости от нагрузки котельного агрегата. Металл труб котельного агрегата находится в особенно тяжелых условиях работы. Повышение температуры выше допустимых значений может привести к аварии вследствие появления ползучести металла, повышенных тепловых расширений и ряда других причин. Из условий прочности металла труб пароперегревателя, паропровода и турбины важно не только обеспечить поддержание температуры в заданных пределах, но и не допустить резких ее изменений. В то же время значительное понижение температуры пара перед турбоагрегатом приводит к недопустимому повышению влажности в последних ступенях турбины и эрозии лопаток, следствием чего оказывается увеличение удельного расхода пара, а в некоторых случаях и аварийный останов турбоагрегата. В статье описано решение проблемы точного регулирования температуры пара на выходе из пароперегревателя и одновременно защиты металла предвключенных ступеней перегревателя. Для достижения поставленных целей в работе решаются следующие задачи: внедрение коррекции по температуре перед вторым впрыском, автоподстройка коэффициентов регулятора в зависимости от нагрузки котла; внедрение блока антилюфт. В статье приведена и описана функциональная схема системы автоматического регулирования температуры пара. Результаты технических исследований получены с помощью программно-технического комплекса «САРГОН».

Ключевые слова: эффективное регулирование, температура пара, коэффициенты регулятора, котлоагрегат.

D.I. Konkov, S.V. Zakharkina, O.M. VlasenkoRussian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art),
Moscow, Russia**SYSTEM OF EFFECTIVE AUTOMATIC CONTROL
OF THE STEAM TEMPERATURE AT THE OUT OF BOILER**

The problem of effective steam temperature control at the out of boiler is considered in the article. The temperature of superheating of steam at the outlet from the superheater is one of the most important parameters that determine the economical operation of the steam turbine and power boiler. Automatic regulation of steam superheating should ensure that the temperature of superheated steam is maintained

within the specified limits, regardless of the load of the boiler. The metal of the pipes of the boiler is in particularly difficult operating conditions. Increasing the temperature above the allowable values can lead to an accident due to the appearance of creep of the metal, increased thermal expansion and a number of other reasons. From the strength conditions of the metal pipes of the superheater, the steam pipe and the turbine it is important not only to maintain the temperature within the specified limits, but also to prevent its sudden changes. At the same time, a significant lowering of the vapor temperature in front of the turbo unit leads to an unacceptable increase in humidity in the last stages of the turbine and erosion of the blades, which results in an increase in the specific steam consumption, and in some cases, an emergency stop of the turbine unit. The article describes the solution of the problem of precise control of the steam temperature at the outlet of the superheater and, at the same time, the protection of the metal of the preheating stages of the superheater. To achieve the set goals, the following tasks are solved: introduction of temperature correction before the second injection, automatic adjustment of the regulator coefficients depending on the boiler load; the introduction of the anti-backlash unit. The article describes the functional diagram of the automatic steam temperature control system. The results of technical studies were obtained with the help of the SARGON software and hardware complex.

Keywords: Effective control, steam temperature, regulator coefficients, boiler.

Температура перегрева пара на выходе из пароперегревателя относится к важнейшим параметрам, определяющим экономичность работы паровой турбины и энергетического котла [1, 2].

Необходимость достаточно точного поддержания температуры перегрева вызвана следующими причинами [3–6]:

- металл труб котельного агрегата находится в особенно тяжелых условиях работы;
- повышение температуры выше допустимых значений может привести к аварии вследствие появления ползучести металла, повышенных тепловых расширений и ряда других причин;
- надежность работы турбины при повышении температуры пара ограничивается предельными тепловыми расширениями ее элементов;
- понижение температуры перегретого пара снижает экономичность работы котла и ТЭС в целом, кроме того, значительное понижение температуры пара перед турбоагрегатом приводит к недопустимому повышению влажности в последних ступенях турбины и эрозии лопаток, следствием чего оказывается увеличение удельного расхода пара, а в некоторых случаях и аварийный останов турбоагрегата.

Из условий прочности металла труб пароперегревателя, паропровода и турбины важно не только обеспечить поддержание температуры в заданных пределах, но и не допустить резких ее изменений.

В соответствии с инструкцией по эксплуатации котла ТГМ-96Б отклонение по температуре пара 560 °С составляет в сторону увеличения +5 °С, а в сторону уменьшения – 10 °С. Современные барабанные парогенераторы оснащены впрыскивающими пароохладителями.

Принцип действия впрыскивающего пароохладителя основан на изменении энтальпии частично перегретого пара за счет теплоты, отбираемый от него на испарение охладителя, впрыскиваемого в паровой тракт пароперегревателя [3]. Регулирование температуры пара на выходе из пароперегревателя осуществляется изменением количества впрыскиваемого охладителя. Впрыскивающие пароохладители устанавливаются в одном из промежуточных сечений пароперегревателя. Стремление получить хорошее качество регулирования температуры пара и обеспечить надежность металла поверхностей нагрева пароперегревателя привело к применению трех впрысков по каждой стороне котла. Последний по ходу пара впрыск является основным, регулирующим температуру пара. Так же неодинаковы по каналам возмущающих и регулирующих воздействий динамические характеристики пароперегревателя, но обладают общим свойством – значительной инерционностью, которая присуща термопарам, установленным по ходу пароперегревателя и являющихся источниками информации.

Синтезу системы автоматического регулирования температуры пара посвящены работы [7–9]. Недостатком этих работ является отсутствие практических результатов внедрения предложенных алгоритмов. В данной статье ниже приведены результаты технических исследований.

Система автоматического регулирования (САР) температуры пара построена по каскадному принципу (рис. 1) и состоит из основного регулятора (импульсный ПИ-регулятор), поддерживающего температуру до впрыска 3, дифференциатора сигнала (DIF) температуры за впрыском 2 и корректирующего сигнала по температуре за предыдущим впрыском 1. Условные обозначения на рисунок: $T_{п}$ – температура перегретого пара; УП – указатель положения; РК – регулирующий клапан; УЕ, УА – выходные сигналы регулятора скорости; КВМ – конечный выключатель «меньше»; КВБ – конечный выключатель «больше»; ПБР – пускатель бесконтактный реверсивный; ZO – задание оператора; ZAPRINC, ZAPRDEC – уставки срабатывания; PLU – программное логическое управление; PDI – блок ПИД-регулятора с ШИМ-модулятором; LUFT – блок антилюфт; KUS – кусочно-линейная аппроксимация; NEISPR – формирование признака неисправности ИМ; DIF – блок дифференцирования; VKB – блок выдачи управления на дискретные выходы контроллера; ZADAT – универсальный задатчик.

Чтобы не произошло выхода температуры за значения, при которых возможен температурный перегрев поверхностей нагрева котла в регуляторе, предусмотрено ограничение ZAPRINC и ZAPRDEC по температуре $T_{п1}$. Уставка по температуре задается по режимной карте, исходя из технических условий эксплуатации пароперегревателя экспериментальным путем после наладки. Температурные ограничения прописываются в постоянные константы программы регулятора и могут меняться по результатам опытной эксплуатации. САР воздействует на регулирующий клапан 2-го впрыска. Перед выдачей управляющего воздействия на регулирующий клапан (РК) импульсы проходят обработку в блоке антилюфт (LUFT). При смене направления движения импульс на управляющем выходе блока антилюфт не снимается до тех пор, пока не выполнится одно из трех условий:

- пройдет заданное время;
- указатель положения изменится на заданное значение;
- сигнал технологического параметра (расход конденсата на впрыск) изменится на заданное значение.

Результаты технических исследований получены с помощью программно-технического комплекса (ПТК) «САРГОН» [10].

Техническое обеспечение ПТК «САРГОН» состоит:

- 1) из микропроцессорных контроллеров семейства МФК и «Теконик»;
- 2) стандартных IBM-совместимых персональных компьютеров;
- 3) сетевого оборудования.

До применения новой структуры регулятора при изменении паровой нагрузки на 55 т температура пара на выходе из котла составляла $\pm 2-5$ °С от заданного параметра. В результате внедрения новой структуры регулятора температура пара на выходе из котла составила $\pm 1-2$ °С от заданного параметра. Кроме того, следует отметить, что колебания клапанов при внедрении значительно уменьшились, что позитивно отражается на ресурсе долговечности системы автоматического управления.

Внедрение систем эффективного регулирования сложных технологических процессов выработки тепловой и электрической энергии позволяет существенно повысить экономичность работы энергооборудования. Источники экономии энергоресурсов в результате реализации САР следующие:

– стабилизация температуры свежего пара на всех режимах работы котла обеспечивает повышение износостойкости металлических поверхностей нагрева и сокращение потребления топлива за счёт уменьшения перегревов;

– поддержание оптимальных параметров пара, подаваемого на турбину, обеспечивает работу турбины с заданным КПД и существенно сокращает износ последних ступеней турбины;

Также были произведены предварительные усредненные расчеты пережога топлива по турбинному отделению в зависимости от изменения температуры острого пара на входе в турбину. При оптимальной температуре пара на входе в турбину 555 °С экономия топлива составит 2285 м³ природного газа за сутки. Если выразить данную экономию в денежном эквиваленте, она составит 1 млн 800 тыс. рублей в год. С понижением температуры острого пара на 1 °С экономия газа сокращается на 465 м³ газа в сутки.

Библиографический список

1. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. – Л.: Энергия, 1982. – 311 с.
2. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А.С. Ключев [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.
3. Липатников Г.А., Гузев М.С. Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 225 с.
4. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 528 с.
5. Эстеркин Р.И. Эксплуатация, наладка и испытание теплотехнического оборудования промышленных предприятий: учебник для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 288 с.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 396 с.
7. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – 2-е изд. перераб. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.
8. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В. Дискретно-непрерывная система адаптивного управления температурным режимом пароперегревателя // Адаптивные и робастные системы. – 2004. – № 1(7). – С. 117–129.

9. Сметана А.З. Модифицированная методика автоматической и автоматизированной настройки регуляторов теплоэнергетических процессов // Теплоэнергетика. – 2009. – № 4. – С. 44–46.

10. Российский программно-технический комплекс Саргон. Краткое описание / НТЦ НВТ «Автоматика». – М., 2017. – 28 с.

References

1. Ivanov V.A. Regulirovanie energoblokov [Regulation of power units]. Leningrad: Energiia, 1982. 311 p.

2. Kliuev A.S. [et al.]. Naladka sistem avtomaticheskogo regulirovaniia barabannykh parovykh kotlov [Adjustment of automatic control systems for drum steam boilers]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 280 p.

3. Lipatnikov G.A., Guzeev M.S. Avtomaticheskoe regulirovanie ob"ektov teploenergetiki [Automatic control of heat power facilities]. Vladivostok: Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007. 225 p.

4. Sidel'kovskii L.N., Iurenev V.N. Kotel'nye ustanovki promyshlennykh predpriatii [Boiler installations of industrial enterprises]. 3rd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 528 p.

5. Esterkin R.I. Ekspluatatsiia, naladka i ispytanie teplotekhnicheskogo oborudovaniia promyshlennykh predpriatii [Operation, adjustment and testing of thermal equipment of industrial enterprises]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 288 p.

6. Rotach V.Ia. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia [Theory of automatic control]. 5nd ed. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2008. 396 p.

7. Stefani E.P. Osnovy rascheta nastroiки regulatorov teploenergeticheskikh protsessov [Basics of calculating the adjustment of regulators of heat and power processes]. 2nd ed. Moscow: Energiia, 1972. 376 p.

8. Eremin E.L., Telichenko D.A., Chepak L.V. Diskretno-nepreryvnaia sistema adaptivnogo upravleniia temperaturnym rezhimom paroperegrevatel'ia [Discrete-continuous system of adaptive control of the temperature regime of a superheater]. Adaptivnye i robstnye sistemy, 2004, no. 1(7), pp. 117-129.

9. Smetana A.Z. Modifitsirovannaia metodika avtomaticheskoi i avtomatizirovannoi nastroiки regulatorov teploenergeticheskikh protsessov [Modified technique for automatic and automated adjustment of heat and power processes regulators]. *Teploenergetika*, 2009, no. 4, pp. 44-46.

10. Rossiiskii programmno-tekhnicheskii kompleks Sargon. Kratkoe opisaniye [The Russian software and hardware complex Sargon. Short description]. NTTs NVT "Avtomatika". Moscow, 2017. 28 p.

Сведения об авторах

Коньков Дмитрий Игоревич (Москва, Россия) – магистрант кафедры автоматики и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (117997, Москва, ул. Садовническая, д. 33, e-mail: konkovofficial@mail.ru).

Захаркина Светлана Валерьевна (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (117997, Москва, ул. Садовническая, д. 33, e-mail: kruglovas@mail.ru).

Власенко Ольга Михайловна (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (117997, Москва, ул. Садовническая, д. 33, e-mail: o.m.vlasenko@gmail.com).

About the authors

Konkov Dmitry Igorevich (Moscow, Russian Federation) is a Master Student of Automatics and Industrial Electronics Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art) (117997, Moscow, Sadovnicheskaya St., 33, e-mail: konkovofficial@mail.ru).

Zakharkina Svetlana Valeryevna (Moscow, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Industrial Electronics Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art) (117997, Moscow, Sadovnicheskaya St., 33, e-mail: kruglovas@mail.ru).

Vlasenko Olga Mikhailovna (Moscow, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Industrial Electronics Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art) (117997, Moscow, Sadovnicheskaya St., 33, e-mail: o.m.vlasenko@gmail.com).

Получено 31.07.2017