УДК 519.651

DOI: 10.17223/19988605/54/2

М.А. Работников, А.С. Александрова, А.Г. Шумихин**РЕКОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОСЫРЬЕВОЙ СМЕСИ НА ВЫХОДЕ ПЕЧИ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

Представлены подход и результаты эксперимента по реконфигурации системы автоматического управления и расчета комбинированной системы управления на основе предложенной концептуальной модели идентификации технологических объектов по данным их эксплуатации. Приведены результаты исследования подхода для системы автоматического управления температурой потока газосырьевой смеси установки каталитического риформинга.

Ключевые слова: идентификация; комплексная частотная характеристика; комбинированные системы управления.

Стратегия управления непрерывными технологическими процессами в подавляющем большинстве случаев заключается в стабилизации технологических параметров на значениях, обеспечивающих оптимальную работу промышленной установки. Это достигается за счет корректного выбора структуры и параметров системы управления, применения алгоритмов улучшенного управления [1–3] и обеспечения эффективной работы алгоритмов системы управления. В настоящее время на современных предприятиях качеству функционирования систем автоматического регулирования, вопросам совершенствования алгоритмов регулирования и их оперативной реконфигурации в промышленных условиях уделяется повышенное внимание [4]. Широкое распространение получили алгоритмы управления с прогнозирующей моделью (Model Predictive Control), внедрение которых позволяет повысить качество процессов управления [5–8]. Но необходимо также отметить, что существует потребность обеспечения требуемого качества функционирования традиционных классических алгоритмов регулирования. Вследствие постоянного изменения динамических характеристик объектов управления и наличия множества параметров, оказывающих влияние на технологический процесс, алгоритмы автоматического регулирования нуждаются в периодической перенастройке, позволяющей сохранить требуемые показатели качества системы регулирования. Накопленные в процессе эксплуатации и хранящиеся в базах данных распределенных систем управления данные содержат в себе информацию об объекте, позволяющую в режиме реального времени оценить адекватность алгоритмов управления текущему состоянию объекта и, если необходимо, выполнить их перенастройку. Вопросы идентификации технологических объектов по данным эксплуатации и оперативной перенастройки алгоритмов систем регулирования являются актуальными [9]. На основе подхода, изложенного в [10], выполнена реконфигурация системы регулирования путем расчета компенсирующего устройства для комбинированной системы управления технологическим объектом.

Интеграция комбинированных систем в управление технологическим процессом позволяет повысить качество регулирования параметров процесса, снижая флуктуацию, коррелирующую с воздействием возмущающих воздействий. Управляющий сигнал в данных системах формируется с учетом рассогласования регулируемой величины от установленного задания и изменения возмущающих воздействий. Синтез комбинированных систем предполагает решение задачи структурной и параметрической идентификации каналов передачи объекта управления с последующим расчетом компенсиру-

ющих устройств. В статье показаны результаты реконфигурации системы регулирования температуры газосырьевой смеси на выходе печи П-1 установки каталитического риформинга с предварительной гидроочисткой исходного сырья на основе данных эксплуатации технологического объекта.

1. Описание объекта управления

Установка каталитического риформинга предназначена для получения ароматических углеводородов – бензола, толуола, растворителя – после гидроочистки бензиновых фракций и последующей экстрактивной дистилляцией ароматических углеводородов. Печь П-1 входит в состав блока гидроочистки данной установки и обеспечивает нагрев сырья до необходимой температуры. С увеличением температуры интенсивность реакций гидрообессеривания и гидрирования непредельных углеводородов увеличивается, но также увеличиваются в большей степени реакции гидрокрекинга. В результате гидрокрекинга происходит потеря сырья, превратившегося в газы. Недостаточный нагрев сырья ведет к недостаточному очищению от серы, азота и кислорода, вследствие чего отравляется катализатор риформинга. Стратегия управления температурой газосырьевой смеси заключается в поддержании температуры на минимально необходимом для реакций гидроочистки значении, при этом режим всегда ведется с некоторым запасом по качеству, т.е. температуру приходится поддерживать на несколько градусов выше, чем это необходимо. Чем лучше стабилизирована температура, тем меньший запас по качеству нужен и тем меньше вероятность образования брака и меньше потери сырья на гидрокрекинг.

Регулирование температуры газосырьевой смеси на выходе из печи П-1 (TIRC) осуществляется посредством изменения подачи топливного газа в печь. Основным регистрируемым источником возмущения данной системы автоматического регулирования является изменение давления потока газосырьевой смеси (PIR). На рис. 1 представлена схема объекта.

Рис. 1. Печь П-1
Fig. 1. Furnace P-1

Реконфигурация системы регулирования температуры путем введения блока компенсации возмущающего воздействия позволит лучше стабилизировать температуру и снизить целевое значение температуры.

2. Идентификация объекта управления

С целью решения задачи структурной и параметрической идентификации технологического объекта по данным его эксплуатации рассмотрен подход, представленный на рис. 2.

В соответствии с концептуальной моделью (см. рис. 2) для расчета системы регулирования использованы значения технологических параметров процесса, хранящиеся в базе данных системы управления установки, в ходе нормального режима работы. После анализа и обработки экспериментальных данных обучена автокорреляционная нейронная сеть, аппроксимирующая поведение объекта управления, работающего в динамическом режиме. В состав нейросетевой модели также включена модель регулятора, обеспечившая корректную работу модели. На построенной нейросетевой модели

проведен вычислительный эксперимент с подачей периодических сигналов, результатом которого является комплексная частотная характеристика (КЧХ) по каналу «давление потока газосырьевой смеси (возмущающее воздействие) – температура газосырьевой смеси на выходе из П-1 (регулируемая величина)» с замкнутым контуром по каналу управления [8]. По полученной частотной характеристике произведена структурная и параметрическая идентификация объекта в форме передаточных функций по методу наименьших квадратов с помощью специально разработанного для решения подобных задач приложения [11]:

$$W_{yu}(s) = \frac{0,22}{56,96s + 1} e^{-33,13s}, \quad W_{yl}(s) = -\frac{6,94}{9,81s + 1} e^{-74,41s}, \quad s = j\omega, \quad (1)$$

где $W_{yu}(s)$ – передаточная функция по каналу «управляющий сигнал – температура газосырьевой смеси на выходе из П-1», $W_{yl}(s)$ – передаточная функция по каналу «давление газосырьевой смеси на выходе из П-1 – температура газосырьевой смеси на выходе из П-1», s – оператор Лапласа.

Рис. 2. Концептуальная модель идентификации технологического объекта по данным его эксплуатации
 Fig. 2. Conceptual model for identifying a technological object based on exploitation data

На рис. 3 представлены экспериментальная КЧХ исследуемого канала при соответствующих частотах и аппроксимирующая ее характеристика, построенная по результатам проведенной идентификации.

На рис. 4 представлена имитационная модель, прогнозирующая поведение температуры газосырьевой смеси на выходе из печи П-1 с учетом изменения давления потока, где $W_{reg}(s)$ – передаточная функция регулятора в замкнутом контуре управления.

Рис. 3. КЧХ по каналу «давление газосырьевой смеси на выходе из П-1 – температура газосырьевой смеси на выходе из П-1» (точки – экспериментальная КЧХ, сплошная линия – аппроксимирующая КЧХ)
 Fig. 3. CFR on the channel «pressure of the gas-feed mixture at the exit from P-1 – temperature of the gas-feed mixture at the exit from P-1» (points – experimental CFR, solid line – approximating CFR)

Рис. 4. Имитационная модель системы регулирования температуры газосырьевой смеси
 Fig. 4. Simulation model system of a gas-temperature mixture temperature control

Рис. 5. Температура потока газосырьевой смеси: 1 – реальные значения, 2 – имитационная модель
 Fig. 5. The temperature of the gas mixture: 1 – real values, 2 – imitation model

Для оценки достоверности построенная модель протестирована на реальных экспериментальных данных. Входным сигналом является давление потока газосырьевой смеси. Сигнал управляющего

воздействия формирует модель регулятора. На выходе имитационная модель объекта выдает температуру потока газосырьевой смеси (рис. 5) со средним квадратичным отклонением (СКО) от реальных значений, не превышающим 0,372°C.

3. Синтез комбинированной системы управления

Исходя из условия абсолютной компенсации возмущающих воздействий на регулируемую величину, произведен расчет идеального компенсирующего устройства:

$$W_k(s) = -\frac{W_{y\lambda}(s)}{W_{yu}(s)} = 31,55 \frac{56,96s + 1}{9,81s + 1} e^{-41,28s}. \quad (2)$$

Для его аппроксимации использовано апериодическое звено второго порядка:

$$W'_k(s) = \frac{K'_k}{T'_{k2}s^2 + T'_{k1}s + 1} = \frac{31,55}{302,35s^2 + 5,69s + 1}. \quad (3)$$

Параметры K'_k , T'_{k1} , T'_{k2} определены из условия равенства комплексных частотных характеристик идеального и реального компенсирующих устройств при нулевой и резонансной частотах:

$$\begin{cases} W_k(0) = W'_k(0) \\ W_k(j\omega_r) = W'_k(j\omega_r) \end{cases}, \quad (4)$$

где ω_r – резонансная частота, определяемая как аргумент вспомогательной функции $F(\omega)$, соответствующий первому положительному экстремуму,

$$F(\omega) = -\frac{M\omega[M \sin \varphi_{yu}(\omega) + 1]}{A_{yu}(\omega)[M^2 - 1]}, \quad (5)$$

где $M = 2,37$ – частотный показатель колебательности, $A_{yu}(\omega)$ и $\varphi_{yu}(\omega)$ – амплитуда и сдвиг фазы частотной характеристики по каналу управления yu соответственно [12].

На рис. 6 представлены комплексные частотные характеристики идеального компенсирующего устройства и аппроксимирующего его звена.

Рис. 6. КЧХ компенсирующих устройств: 1 – идеальный компенсатор, 2 – реальный компенсатор
Fig. 6. CFR of compensating devices: 1 – ideal compensator, 2 – real compensator

На рис. 7 представлена имитационная модель системы комбинированного управления температурой газосырьевой смеси с блоком компенсации изменения давления потока.

Рис. 7. Комбинированная система регулирования температуры газосырьевой смеси

Fig. 7. Combined system of a gas-temperature mixture temperature control

На рис. 8 представлены тренды подавления возмущающих воздействий действующей одноконтурной и построенной комбинированной систем регулирования температуры потока газосырьевой смеси.

Рис. 8. Подавление возмущающих воздействий: 1 – одноконтурная система управления, 2 – комбинированная система управления

Fig. 8. Disturbance suppression: 1 – single-loop control system, 2 – combined control system

В сравнении с одноконтурной системой комбинированная система позволяет существенно улучшить качество процесса регулирования: среднее квадратичное отклонение и максимальный выброс снизились с 0,207 и 3,769°C до 0,027 и 0,439°C соответственно.

Заключение

Преимущество описанного метода построения систем комбинированного управления заключается в отсутствии необходимости проведения активного эксперимента непосредственно на действующем технологическом объекте, так как для идентификации объекта используются данные его эксплуатации. Адекватность используемых для расчета блоков компенсации моделей проверяется на экспериментальных данных. Для исследуемого технологического объекта СКО значений температуры потока газосырьевой смеси, полученных на имитационной модели, от реальных значений не превышает 0,207°C.

Реконфигурация системы управления дала возможность существенно снизить флуктуацию регулируемой величины. Внедрение комбинированной системы управления на технологическом объекте позволило уменьшить максимальный выброс и СКО температуры потока газосырьевой смеси

от установленного задания с 3,769°C и 0,207°C до 0,439°C и 0,027°C соответственно. Улучшение качества процессов регулирования позволяет снизить потери продукта на гидрокрекинг и повышает срок службы катализатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Торгашов А.Ю., Гончаров А.А., Самотылова С.А. Современные методы построения систем усовершенствованного управления технологическими процессами // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2016. № 4 (133). С. 102–107.
2. Шустова О.О., Разумова Е.И. Применение advanced process control в задачах автоматического регулирования технологическими установками нефтедобычи // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 22. С. 50–52.
3. Lehman K.A. Implement Advanced Process Control // Chemical engineering progress. 2018. V. 114, № 1. P. 60–66.
4. Ицкович Э.Л. Современные алгоритмы автоматического регулирования и их использование на предприятиях // Автоматизация в промышленности. 2007. № 6. С. 39–44.
5. Lorenzen M., Allgöwer F., Cannon M. Adaptive model predictive control with robust constraint satisfaction // IFAC-Papers On Line. 2017. V. 55, № 1. P. 3313–3318.
6. Capaci R.B., Vaccari M., Pannocchia G. Model predictive control design for multivariable processes in the presence of valve stiction // Journal of Process Control. 2018. V. 71. P. 25–34.
7. Saltik M.B., Özkan L., Ludlage J.H., Weiland S., Van den Hof P.M. An outlook on robust model predictive control algorithms: Reflections on performance and computational aspects // Journal of Process Control. 2018. V. 61. P. 77–102.
8. Домбровский В.В., Пашинская Т.Ю. Синтез прогнозирующих стратегий управления динамическими системами с коррелированными параметрами и мультипликативными и аддитивными шумами при ограничениях // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 47. С. 4–11.
9. Bakhtadze N.N., Lototsky V.A. Knowledge-based models of nonlinear systems based on inductive learning // Intelligent Systems Reference Library. 2016. V. 98. P. 85–104.
10. Шумихин А.Г., Александрова А.С. Идентификация управляемого объекта по частотным характеристикам, полученным экспериментально на нейросетевой динамической модели системы управления // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9, № 5. С. 729–740.
11. Работников М.А., Александрова А.С., Шумихин А.Г. Автоматизация обработки экспериментальной комплексной частотной характеристики при идентификации управляемого объекта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2018. № 1. С. 21–33.
12. Ротач В.Я., Шавров А.В., Бутырев В.П. Синтез алгоритмов машинного расчета оптимальных параметров систем регулирования // Теплоэнергетика. 1977. № 12. С. 75–79.

Поступила в редакцию 2 июня 2020 г.

Rabotnikov M.A., Aleksandrova A.S., Shumikhin A.G. (2021) RECONFIGURATION OF CONTROL SYSTEM OF THE GAS MIXTURE TEMPERATURE AT THE FURNACE OUTLET OF THE CATALYTIC REFORMING UNIT ACCORDING TO EXPLOITATION DATA OF TECHNOLOGICAL OBJECT. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 54. pp. 12–19

DOI: 10.17223/19988605/54/2

The approach and results of an experiment on reconfiguration of an automatic control system and calculation of a combined control system based on the proposed method for identifying technological objects according to exploitation data are presented.

Structural and parametric identification of the object is carried out in the form of transfer functions based on the obtained frequency response. To assess the reliability of the identification of the control object, a simulation model is constructed that predicts the behavior of the controlled variable taking into account the influence of disturbing influences. The output signal of the model is a controlled parameter.

Based on the results of the identification, the combined system is calculated. The condition for approximating the ideal compensating device is the compliance of the complex frequency responses at zero and resonant frequencies. To evaluate the results of building a combined system, simulation model of suppressing disturbances before and after the introduction of compensator is constructed.

The advantages of the presented method of identifying the control object are passive experiment, high accuracy of the synthesized model of the object and ability to calculate a compensating device that can reduce fluctuations of the adjustable parameter.

To demonstrate the described method for constructing combined control systems, the automatic control system of the temperature of the flow of a gas-feed mixture at the outlet of furnace of a catalytic reforming unit was reconfigured. Root-mean-square error and maximum outburst decreased from 3,769 °C and 0,439 °C to 0,207 °C and 0,027 °C after the introduction of the combined system.

Keywords: identification; complex frequency response; combined control systems.

RABOTNIKOV Mikhail Alekseevich (Master, Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russian Federation).
E-mail: rabotnikov@pstu.ru

ALEKSANDROVA Anna Sergeevna (Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russian Federation).

E-mail: boyarshinovaann@gmail.com

SHUMIKHIN Aleksandr Georgievich (Doctor of Engineering Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russian Federation).

E-mail: shumichin@gmail.com

REFERENCES

1. Torgashov, A.Yu., Goncharov, A.A. & Samotylova, S.A. (2016) Modern methods of evaluation of advanced process control systems. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya RAN – Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 4(133). pp. 102–107.
2. Shustova, O.O. & Razumova, E.I. (2014) Advanced process control application in tasks of automatic adjustment of the oil-producing units. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal – International Research Journal*. 22. pp. 50–52.
3. Lehman, K. A. (2018) Implement Advanced Process Control. *Chemical Engineering Progress*. 114(1). pp. 60–66.
4. Itskovich, E.L. (2007) Sovremennye algoritmy avtomaticheskogo regulirovaniya i ikh ispol'zovanie na predpriyatiyakh [Modern algorithms for automatic regulation and their use in facility]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti –Automation in Industry*. 6. pp. 39–44.
5. Lorenzen, M., Allgöwer, F. & Cannon, M. (2017) Adaptive Model Predictive Control with Robust Constraint Satisfaction. *IFAC-Papers On Line*. 55(1). pp. 3313–3318. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.512
6. Capaci, R.B., Vaccari, M. & Pannocchia, G. (2018) Model predictive control design for multivariable processes in the presence of valve stiction. *Journal of Process Control*. 71. pp. 25–34. DOI: 10.1016/j.jprocont.2018.09.006
7. Saltik, M.B., Özkan, L., Ludlage, J.H., Weiland, S. & Van den Hof, P.M. (2018) An outlook on robust model predictive control algorithms: Reflections on performance and computational aspects. *Journal of Process Control*. 61. pp. 77–102. DOI: 10.1016/j.jprocont.2017.10.006
8. Dombrovskii, V.V. & Pashinskaya, T.Yu. (2019) Model predictive control for discrete-time systems with serially correlated parameters and multiplicative and additive noises under constraints. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 47. pp. 4–11. DOI: 10.17223/19988605/47/1
9. Bakhtadze, N.N. & Lototsky, V.A. (2016) Knowledge-based models of nonlinear systems based on inductive learning. *Intelligent Systems Reference Library*. 98. pp. 85–104. DOI: 10.1007/978-3-319-23338-3_4
10. Aleksandrova, A.S. & Shumikhin, A.G. (2017) Identification of a controlled object using frequency responses obtained from a dynamic neural network model of a control system. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*. 5. pp. 729–740. DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-5-729-740
11. Rabotnikov, M.A., Aleksandrova, A.S. & Shumikhin, A.G. (2018) Automation of processing of experimental complex frequency characteristics with identification of the controlled object. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya – PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology*. 9(1). pp. 21–33. DOI: 10.15593/2224-9400/2018.1.02
12. Rotach, V.Ya., Shavrov, A.V. & Butyrev, V.P. (1977) Sintez algoritmov mashinnogo rascheta optimal'nykh parametrov sistem regulirovaniya [Synthesis of algorithms for computer calculation optimal parameters of control systems]. *Teploenergetika*. 12. pp. 77–79.