

УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ СТАБИЛЬНОГО КАТАЛИЗАТА В СТАБИЛИЗАЦИОННОЙ КОЛОННЕ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

А. М. Джамбеков¹, Б. С. Дмитриевский², А. А. Терехова²

*ГБПОУ АО «Астраханский колледж вычислительной техники» (1),
dzhambekovat@yandex.ru, Астрахань, Россия;
Кафедра «Информационные процессы и управление»,
terehova.aa@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ» (2), Тамбов, Россия*

Ключевые слова: автоматическая система регулирования; каталитический риформинг; множество неопределенностей; номинальный полином; робастная устойчивость; семейство полиномов; стабилизация катализата.

Аннотация: Предложен учет влияния неконтролируемых возмущений на регулирование уровня процесса стабилизации катализата изменением коэффициентов передаточной функции автоматической системы регулирования уровня в стабилизационной колонне блока стабилизации катализата установки каталитического риформинга на основе методов робастной устойчивости. Для исследования робастной устойчивости автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата представлена типовая схема системы регулирования. Получен общий вид передаточной функции автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата. Поставлена задача определения робастной устойчивости замкнутой автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата. Рассмотрено семейство передаточных функций автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата с частотной неопределенностью. Задача определения робастной устойчивости замкнутой автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата сведена к заданию области частотной неопределенности и построению годографа робастного критерия Найквиста. Для определения робастной устойчивости замкнутой автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата задана номинальная передаточная функция разомкнутой части автоматической системы регулирования уровня и функция, ограничивающая область неопределенности.

Введение

В работе [1] выполнено моделирование автоматической системы регулирования (АСР) температуры низа стабилизационной колонны (СК) блока стабилизации катализата (БСК) установки каталитического риформинга (КР) [2]. Октавное число продуктовой смеси БСК (стабильного катализата) определяет качество всей цепочки процесса КР [3]. Для эффективного управления БСК помимо разработки эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих достижение экономического или иного эффекта, необходимо обеспечение устойчивого режима работы АСР технологических параметров (температуры, давления, расхода, уровня и пр.) [4]. Одним из основных технологических параметров БСК является уро-

вень катализата в СК [5]. На регулирование уровня в СК оказывают влияние неконтролируемые возмущения: расход сбрасываемого газа стабилизации, перепад температуры в СК [6].

Данные возмущения необходимо учитывать при разработке АСР уровня катализата в СК. Коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции АСР уровня в СК постоянные. В настоящей работе предложен учет влияния возмущений путем изменения коэффициентов полинома знаменателя передаточной функции АСР уровня в СК на основе методов робастной устойчивости [7]. Предполагается, что данные коэффициенты изменяются под влиянием возмущений с течением времени. Важной является задача исследования робастной устойчивости АСР уровня в СК.

Постановка задачи

Для исследования робастной устойчивости АСР уровня в СК рассмотрим типовую схему, представленную на рис. 1, где обозначены: задающее воздействие $r(t)$; ошибка управления $e(t)$; управление $u(t)$; выход $y(t)$; регулятор (ПИД-регулятор) R; объект управления (процесс в СК) OU [1]. В качестве регулируемого параметра $y(t)$ рассмотрен уровень в СК. Задающее воздействие $r(t)$ – ступенчатое изменение положения (хода) регулирующего органа (задвижки) на линии (трубопроводе) стабильного катализата [1].

Передаточная функция разомкнутой части АСР уровня в СК, определенная на основе экспериментальной переходной кривой для установки КР Л-35-11/1000, имеет вид [8]

$$W(s) = \frac{25}{1 + 2,28s + 1,19s^2 + 4,16s^3}. \quad (1)$$

Для описания задачи в общем виде получим передаточную функцию (1)

$$W(s) = \frac{k}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3}, \quad (2)$$

где k – коэффициент усиления, $k = 25$; a_i – постоянные коэффициенты; s – оператор Лапласа.

Предполагается, что при воздействии возмущений коэффициенты передаточной функции (2) изменяются с течением времени.

Пусть разомкнутая часть АСР уровня в СК описывается семейством скалярных передаточных функций

$$W(s) = W_0(s) + \Delta(s), \quad (3)$$

где $W_0(s)$ – номинальная передаточная функция (2); $\Delta(s)$ – частотная неопределенность, удовлетворяющая условию

$$\Delta(j\omega) \leq \nu |H(j\omega)| \quad (4)$$

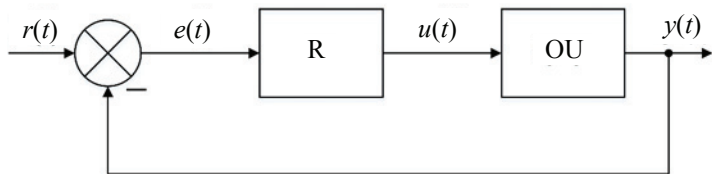


Рис. 1. Структурная схема АСР уровня в СК

при всех ω для некоторой функции $H(s)$, такой, что $H^{-1}(s)$ – устойчивая реализуемая дробно-рациональная функция.

Необходимо знать, будет ли робастно устойчива АСР уровня в СК, замкнутая единичной обратной связью (см. рис. 1). Как известно, при отсутствии неопределенностей вопрос решается с помощью годографа Найквиста. Рассмотрим его робастную модификацию применительно к настоящей работе.

При использовании робастного критерия Найквиста предполагается, что все передаточные функции из семейства (3) имеют одинаковое число N неустойчивых полюсов с $W_0(s)$ при всех допустимых $\Delta(s)$.

Построим годограф

$$\tilde{W}(j\omega) = \frac{W_0(j\omega)+1}{|H(j\omega)|} - 1, \quad 0 \leq \omega < \infty. \quad (5)$$

Исходя из робастного критерия Найквиста замкнутая АСР уровня в СК робастно устойчива тогда и только тогда, когда годограф $\tilde{W}(j\omega)$ охватывает круг с центром в точке $(-1, j0)$ и радиусом $\nu/2$ раз против часовой стрелки, при этом не пересекая его.

Задача заключается в определении робастной устойчивости замкнутой АСР уровня в СК (см. рис. 1) при заданной номинальной передаточной функции разомкнутой части АСР $W_0(s)$, частотной неопределенности $\Delta(s)$ и подтверждении (не подтверждении) выполнения условия робастного критерия Найквиста, на основании которого делаем вывод о робастной устойчивости (неустойчивости) замкнутой АСР уровня в СК.

Определим робастную устойчивость замкнутой АСР уровня в СК.

Робастная устойчивость замкнутой автоматической системы регулирования уровня в стабилизационной колонне

С учетом (1) имеем номинальную передаточную функцию разомкнутой АСР уровня в СК

$$W_0(s) = \frac{25}{1 + 2,28s + 1,19s^2 + 4,16s^3}.$$

Передаточная функция имеет два неустойчивых полюса: $s_{1,2} \approx 0,059 \pm j 0,769$; один устойчивый $s_3 \approx -0,404$.

Зададим функцию $H^{-1}(s)$ в виде

$$H^{-1}(s) = \frac{1 + 2s + s^2}{1 + 3s + 4s^2 + 2s^3}.$$

С учетом (4) зададим частотную неопределенность

$$\begin{aligned} \Delta(j\omega) \leq \nu |H(j\omega)| &= \nu \left| \frac{1 + 3j\omega + 4(j\omega)^2 + 2(j\omega)^3}{1 + 2j\omega + (j\omega)^2} \right| = \\ &= \nu \left| \frac{1 - 4\omega^2 + j(3\omega - 2\omega^3)}{1 - \omega^2 + j2\omega} \right| = \nu \sqrt{\frac{(1 - 4\omega^2)^2 + (3\omega - 2\omega^3)^2}{(1 - \omega^2)^2 + 4\omega^2}}. \end{aligned}$$

Все передаточные функции из семейства (3) имеют одинаковое число $N = 2$ неустойчивых полюсов с $W_0(s)$ при всех допустимых $\Delta(s)$.

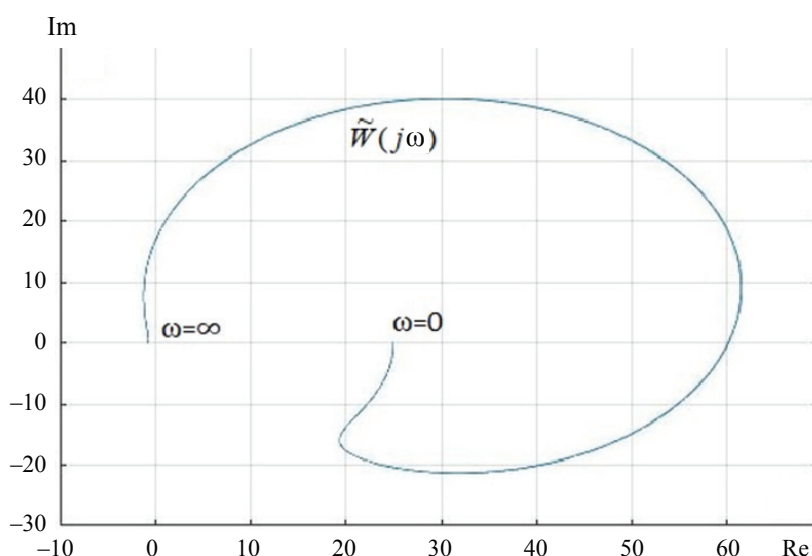


Рис. 2. Годограф робастного критерия Найквиста

Построим годограф робастного критерия Найквиста

$$\tilde{W}(j\omega) = \frac{W_0(j\omega)+1}{|H(j\omega)|} - 1 = \frac{1 + 2,28j\omega + 1,19(j\omega)^2 + 4,16(j\omega)^3 + 1}{\sqrt{\frac{(1-4\omega^2)^2 + (3\omega-2\omega^3)^2}{(1-\omega^2)^2 + 4\omega^2}}} - 1, \quad 0 \leq \omega < \infty.$$

Результаты моделирования приведены на рис. 2.

Поскольку выполняется условие робастного критерия Найквиста, делаем вывод о робастной устойчивости замкнутой АСР уровня в СК.

Заключение

Таким образом, на основе построения годографа робастного критерия Найквиста замкнутая АСР уровня в СК обладает робастной устойчивостью. Данный результат может быть использован при разработке АСР расхода орошения в СК и выборе настроек регуляторов.

Список литературы

1. Джамбеков, А. М. Локальный ПИД-регулятор стабилизации катализата / А. М. Джамбеков, И. А. Щербатов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 3 (51). – С. 98 – 104.
2. Ancheyta, J. Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining / J. Ancheyta. – Hoboken : Wiley, 2011. – 528 p.
3. Smith, J. M. Chemical Engineering Kinetics / J. M. Smith. – St. Louis : McGraw-Hill, 1981. – 676 p.
4. Gumen, M. I. Increasing of the Efficiency of the Reforming LG-35-11/300 / M. I. Gumen // Petroleum Processing and Petrochemistry. – 2001. – No. 11. – P. 54 – 57.
5. Fluid Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation and Control / C. I. C. Pinheiro, J. L. Fernandes, L. Domingues [et al.] // Industrial Engineering Chemistry Research. – 2012. – Vol. 51 (1). – P. 1 – 29. doi: 10.1021/IE200743C

6. Weekman, V. A. Model of Catalytic Cracking Conversion in Fixed, Moving and Fluid-Bed Reactors / V. A. Weekman // *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*. – 1968. – Vol. 7 (1). – P. 90 – 95. doi: 10.1021/I260025A018
7. Ефремов, В. В. Расчет робастно-устойчивости автоматической системы регулирования температуры водогреваемой спецодежды водолаза / В. В. Ефремов, А. Г. Шелудько, А. А. Анисимов // *Дизайн и технологии*. – 2013. – № 34 (76). – С. 75 – 79.
8. Cristea, M. V. Simulation and Model Predictive Control of a UOP Fluid Catalytic Cracking Unit / M. V. Cristea, S. P. Agachi, V. Marinoiu // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2003. – Vol. 42, Issue 2. – P. 67 – 91. doi: 10.1016/S0255-2701(02)00017-X
9. Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М. : Наука, 2002. – 303 с.
10. Nguang, S. K. Robust Stabilization of a Class of Time-Delay Nonlinear Systems / S. K. Nguang // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2000. – Vol. 45, No. 4. – P. 756 – 762. doi: 10.1109/9.847117
11. Wu, L. Delay-Dependent Robust Stabilization for Uncertain Singular Systems with Discrete and Distributed Delays / L. Wu, W. Zhou // *Journal of Control Theory and Applications*. – 2008. – Vol. 6. – P. 171 – 176. doi: 10.1007/S11768-008-6166-3
12. Мартынов, Е. И. Проблемно-ориентированная система управления и оптимизации основных параметров технически сложных систем / Е. И. Мартынов, С. В. Карпушкин, В. В. Алексеев // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 336 – 344. doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344
13. Математические модели многосвязных объектов управления / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 53 – 62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062

Stability of an Automatic System for Controlling the Level of Stable Catalyzate in the Stabilization Column of a Catalytic Reformer

A. M. Dzhambekov¹, B. S. Dmitrievsky², A. A. Terekhova²

*Astrakhan College of Computer Engineering (1),
dzhambekovam@yandex.ru, Astrakhan, Russia;
Department of Information Processes and Management,
terekhova.aa@mail.tstu.ru; TSTU (2), Tambov, Russia*

Keywords: automatic control system; catalytic reforming; a lot of uncertainty; nominal polynomial; robust stability; family of polynomials; catalyst stabilization.

Abstract: It is proposed to take into account the influence of uncontrolled disturbances on the level control of the catalyzate stabilization process by changing the transfer function coefficients of the automatic level control system in the stabilization column of the catalyzate stabilization unit of a catalytic reformer based on robust stability methods. To study the robust stability of an automatic system for controlling the level of the catalyzate stabilization process, a typical scheme of the control system is considered. To describe the problem in a general form, a general view of the transfer function of the automatic system for controlling the level of the catalyzate stabilization process is obtained. The problem of determining the robust stability of a closed automatic system for controlling the level of the catalyzate stabilization process is

posed. A family of transfer functions of an automatic system for controlling the level of the catalyze stabilization process with frequency uncertainty is considered. The problem of determining the robust stability of a closed-loop automatic system for controlling the level of the catalyze stabilization process is reduced to setting the region of frequency uncertainty and constructing a hodograph of the robust Nyquist criterion. To determine the robust stability of the closed-loop automatic level control system of the catalyze stabilization process, the nominal transfer function of the open-loop part of the automatic level control system and the function limiting the uncertainty area are given. Based on the construction of the hodograph of the robust Nyquist criterion, the closed automatic system for controlling the level of the catalyze stabilization process has robust stability.

References

1. Dzhambekov A.M., Shcherbatov I.A. [Local PID-controller for catalyze stabilization], *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyy analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2016, no. 3 (51), pp. 98-104. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Ancheyta J. *Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining*, Hoboken: Wiley, 2011, 528 p.
3. Smith J.M. *Chemical Engineering Kinetics*, St. Louis: McGraw-Hill, 1981, 676 p.
4. Gumen M.I. Increasing of the Efficiency of the Reforming LG-35-11/300, *Petroleum Processing and Petrochemistry*, 2001, no. 11, pp. 54-57.
5. Pinheiro C.I.C., Fernandes J.L., Domingues L. [et al.] Fluid Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation and Control, *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2012, vol. 51 (1), pp. 1-29, doi: 10.1021/IE200743C
6. Weekman V.A. Model of Catalytic Cracking Conversion in Fixed, Moving and Fluid-Bed Reactors, *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1968, vol. 7 (1), pp. 90-95, doi: 10.1021/I260025A018
7. Yefremov V.V., Shelud'ko A.G., Anisimov A.A. [Calculation of robust stability of an automatic temperature control system for a diver's water-heated overalls], *Dizayn i tekhnologii* [Design and technologies], 2013, no. 34 (76), pp. 75-79. (In Russ.)
8. Cristea M.V., Agachi S.P., Marinoiu V. Simulation and Model Predictive Control of a UOP Fluid Catalytic Cracking Unit, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2003, vol. 42, issue 2, pp. 67-91, doi: 10.1016/S0255-2701(02)00017-X
9. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. *Robastnaya ustoychivost' i upravleniye* [Robust stability and control], Moscow: Nauka, 2002, 303 p. (In Russ.)
10. Nguang S.K. Robust Stabilization of a Class of Time-Delay Nonlinear Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, vol. 45, no. 4, pp. 756-762, doi: 10.1109/9.847117
11. Wu L., Zhou W. Delay-Dependent Robust Stabilization for Uncertain Singular Systems with Discrete and Distributed Delays, *Journal of Control Theory and Applications*, 2008, vol. 6, pp. 171-176, doi: 10.1007/S11768-008-6166-3
12. Mart'yanov Ye.I., Karpushkin S.V., Alekseyev V.V. [Problem-oriented control system and optimization of the main parameters of technically complex systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 336-344, doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Saif M.N.M., Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Mathematical models of multiply connected control objects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 53-62, doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062 (In Russ., abstract in Eng.)

Stabilität der automatischen Niveauregulierung des stabilen Katalysators in der Stabilisierungskolonne der katalytischen Reformieranlage

Zusammenfassung: Es ist vorgeschlagen, den Einfluss unkontrollierter Störungen auf die Niveauregelung des Katalysatorstabilisierungsprozesses durch Veränderung der Übertragungsfunktionskoeffizienten der automatischen Niveauregelung in der Stabilisierungskolonne der Katalysatorstabilisierungseinheit der katalytischen Reformierungseinheit basierend auf robusten Stabilitätsmethoden zu berücksichtigen. Um die robuste Stabilität eines automatischen Systems zur Steuerung des Niveaus des Katalysatorstabilisierungsprozesses zu untersuchen, ist ein typisches Schema des Steuerungssystems betrachtet. Um das Problem in allgemeiner Form zu beschreiben, ist ein allgemeiner Überblick über die Übertragungsfunktion des automatischen Systems zum Steuern des Niveaus des Katalysatorstabilisierungsprozesses erhalten. Das Problem besteht darin, die robuste Stabilität eines geschlossenen automatischen Systems zur Steuerung des Niveaus des Katalysatorstabilisierungsprozesses zu bestimmen. Es ist eine Familie von Übertragungsfunktionen eines automatischen Systems zum Steuern des Niveaus des Katalysatorstabilisierungsprozesses mit Frequenzunsicherheit betrachtet. Um die robuste Stabilität des automatischen Niveauregelsystems mit geschlossenem Regelkreis des Katalysatorstabilisierungsprozesses zu bestimmen, sind die nominelle Übertragungsfunktion des offenen Regelkreisteils des automatischen Niveauregelungssystems und die den Unsicherheitsbereich begrenzende Funktion angegeben.

Stabilité du système de contrôle automatique du niveau du catalyseur stable dans la colonne de stabilisation de l'installation de reformage catalytique

Résumé: Est proposée la prise en compte de l'effet des perturbations incontrôlées sur la régulation du niveau du processus de stabilisation du catalyseur en modifiant les coefficients de la fonction de transfert de l'installation de reformage catalytique basée sur des méthodes de la stabilité robuste. Est étudié le schéma type du système de la régulation. Est obtenu une vue d'ensemble de la fonction de transfert du système automatique de régulation du niveau du processus de la stabilisation du catalyseur. Est examinée la famille des fonctions de transfert du système avec une incertitude de fréquence. Pour la détermination de la stabilité du système automatique fermé est définie la fonction de transfert nominale de la partie ouverte du système automatique de régulation du niveau et la fonction limitant la zone d'incertitude. A la base de la construction du godographe du test robuste de Nyquist, le système automatique fermé du contrôle du niveau du processus de stabilisation de catalyseur possède une stabilité robuste.

Авторы: *Джамбеков Азамат Матифулаевич* – кандидат технических наук, преподаватель, ГБПОУ АО «Астраханский колледж вычислительной техники», Астрахань, Россия; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Терехова Анастасия Андреевна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.