УДК 681.5.037

А.М. Джамбеков, Б.С. Дмитриевский, А.А. Терехова

Исследование устойчивости автоматической системы регулирования расхода орошения в стабилизационной колонне в процессе каталитического риформинга

Предложен учет влияния неконтролируемых возмущений на регулирование расхода орошения в стабилизационную колонну блока стабилизации катализата установки каталитического риформинга изменением коэффициентов полинома знаменателя передаточной функции автоматической системы регулирования расхода орошения на основе вероятностного подхода к робастной устойчивости. Для исследования робастной устойчивости автоматической системы регулирования расхода орошения в стабилизационную колонну рассмотрена типовая схема системы регулирования. Для описания задачи получен общий вид полинома знаменателя передаточной функции автоматической системы регулирования расхода орошения в стабилизационную колонну. Для робастной устойчивости автоматической системы регулирования расхода орошения в стабилизационную колонну при воздействии возмущений поставлена задача оценки вероятности устойчивости семейства полиномов знаменателя передаточной функции автоматической системы регулирования. Рассмотрено семейство полиномов знаменателя передаточной функции автоматической системы регулирования расхода орошения в стабилизационную колонну с параметрами неопределенности, изменяющимися в кубе. Задача оценки вероятности устойчивости семейства полиномов знаменателя передаточной функции автоматической системы регулирования расхода орошения в стабилизационную колонну сведена к решению задач генерации выборки и оценке вероятности по частоте. Для оценки вероятности устойчивости семейства полиномов знаменателя передаточной функции автоматической системы регулирования расхода орошения в стабилизационную колонну заданы четыре полинома, включая номинальный. На основе генерации выборки ста независимых случайных величин, вычисления соответствующих полиномов и проверки их устойчивости рассмотренное семейство полиномов знаменателя передаточной функции автоматической системы регулирования расхода орошения в стабилизационную колонну обладает устойчивостью с вероятностью, близкой к единице.

Ключевые слова: каталитический риформинг, стабилизация катализата, автоматическая система регулирования, семейство полиномов, номинальный полином, робастная устойчивость, множество неопределенности.
DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-2-68-71

В [1] выполнено моделирование автоматической системы регулирования (АСР) температуры низа стабилизационной колонны (СК) блока стабилизации катализата (БСК) установки каталитического риформинга (КР) [2]. Октановое 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 и пр.) [4]. Одним из основных технологических параметров БСК является расход орошения в СК [5]. На регулирование расхода орошения в СК оказывают влияние неконтролируемые возмущения: расход выводимой головки стабилизации, перепад температуры в СК [6].

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

Постановка задачи

Для исследования робастной устойчивости АСР расхода орошения в СК рассмотрим типовую схему, представленную на рис. 1 [1].

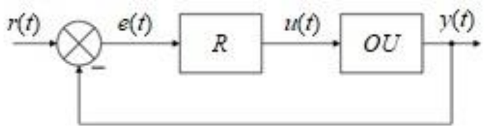

Рис. 1. Структурная схема АСР расхода орошения в СК

На рис. 1 используются обозначения: $r(t)$ – задающее воздействие; $e(t)$ – ошибка управления; $u(t)$ – управление; $y(t)$ – выход; R – регулятор (ПИД-регулятор); OU – объект управления (процесс в СК). В качестве регулируемого параметра $y(t)$ рассмотрен расход орошения в СК. Задающим воздействием $r(t)$ является ступенчатое изменение положения (хода) регулирующего органа (задвижки) на линии (трубопроводе) подачи орошения в СК [1].

Полином знаменателя передаточной функции АСР расхода орошения в СК имеет вид (1) [8]:

$$P(s) = 1 + 2,29s + 2,52s^2 + 2,23s^3 . \qquad (1)$$

Для описания задачи в общем виде получим общий вид полинома (1)

$$P(s) = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3, \ a_i > 0, \ i = 0,1,2,3 , \qquad (2)$$

где a_i – постоянные коэффициенты.

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

Теория робастной устойчивости опирается на минимаксный подход – требуется сохранить устойчивость при любой допустимой неопределенности. Однако можно считать неопределенность случайной, а систему робастно устойчивой, если она сохраняет устойчивость с вероятностью, близкой к 1 [9].

Для оценки робастной устойчивости АСР расхода орошения в СК при воздействии возмущений необходимо определить вероятность, при которой сохраняется устойчивость полинома знаменателя передаточной функции АСР расхода орошения в СК [10].

При изменении коэффициентов полином (2) преобразуется в семейство полиномов (3) знаменателя передаточной функции АСР расхода орошения в СК:

$$\wp(s,\Xi)=\left\{\begin{matrix} P(s,\xi)=P_0(s)+\xi_1 P_1(s)+ \\ +\xi_2 P_2(s)+\xi_3 P_3(s), |\xi_i|\le\gamma, \\ i=1,2,3 \end{matrix}\right\} \qquad (3)$$

с параметрами, изменяющимися в кубе (4):

$$\Xi=\left\{\xi\in R^3 : |\xi|_3 \le \gamma\right\}, \qquad (4)$$

где $\xi \in R^3$ – вектор неизвестных параметров, который принадлежит заданному множеству допустимых значений $\xi \in \Xi$ (множеству неопределенности); $P_0(s)$ – номинальный полином, равный (2); $|\xi|_3$ – евклидова норма вектора ξ (5):

$$|\xi|_3=\sqrt[3]{|\xi_1|^3+|\xi_2|^3+|\xi_3|^3}. \qquad (5)$$

Пусть полиномы $P_1(s)$, $P_2(s)$, $P_3(s)$ в (3) заданы выражениями (6)–(8):

$$P_1(s)=b_0+b_1 s+b_2 s^2+b_3 s^3, b_i>0, i=0,1,2,3, \qquad (6)$$

$$P_2(s)=c_0+c_1 s+c_2 s^2+c_3 s^3, c_i>0, i=0,1,2,3, \qquad (7)$$

$$\begin{matrix} P_3(s)=d_0+d_1 s+d_2 s^2+d_3 s^3, \\ d_i>0, \quad i=0,1,2,3, \end{matrix} \qquad (8)$$

где $b_i > 0$, $c_i > 0$, $d_i > 0$ – постоянные коэффициенты.

Будем считать, что на множестве Ξ задана равномерная плотность вероятности $f(\xi) = 1/\gamma$, $\xi \in \Xi$.

Применительно к настоящей работе опишем путь оценки вероятности устойчивости семейства полиномов (3) при заданной плотности $f(\xi)$ с использованием метода Монте-Карло [11].

Генерируется выборка независимых случайных величин $\xi^1, \ldots, \xi^N$, имеющих плотность вероятности $f(\xi)$, $\xi^1 = (\xi_1^1, \xi_2^1, \xi_3^1)$, $\xi^N = (\xi_1^N, \xi_2^N, \xi_3^N)$.

Для них вычисляются полиномы $P(s, \xi^1), \ldots, P(s, \xi^N)$ и проверяется их устойчивость с помощью критериев устойчивости либо путем прямого вычисления корней или собственных значений.

Пусть число устойчивых полиномов оказалось равным $M \le N$; если M близко к N, то вероятность устойчивости высока.

Чтобы формализовать такой подход, надо уметь более строго решать каждую из следующих задач: генерацию выборки и оценивание вероятности по частоте. Опишем данные задачи подробнее.

Генерация равномерно распределенных векторов $\xi \in \Xi$, изменяющихся в кубе (4), осуществляется путем независимой равномерной генерации каждой компоненты ξ_i вектора ξ.

Оценка вероятности устойчивости осуществляется следующим образом.

Задается истинная вероятность (9):

$$p_0=\frac{Vol(\Xi_{\text{уст}})}{Vol(\Xi)}, \qquad (9)$$

где $\Xi_{\text{уст}} \in \Xi$ – область устойчивости, $Vol(\cdot)$ означает объем множества.

Тогда имеет место (10):

$$\mathrm{Pr}ob\left\{p_0 \ge \frac{M}{N}-\varepsilon\right\} \ge 1-e^{-2\varepsilon^2 N}, \qquad (10)$$

т.е. отношение M/N отклоняется от p_0 больше чем на ε с вероятностью, не превосходящей $e^{-2\varepsilon^2 N}$. $\mathrm{Pr}ob(\cdot)$ означает вероятность того, что случайно выбранное значение будет находиться в заданном диапазоне.

В частности, если M/N близко к единице, а N достаточно велико, то с большой вероятностью можно заключить, что доля неустойчивых полиномов в Ξ мала.

Необходимо отметить, что вероятностный радиус устойчивости больше, чем детерминированный радиус робастной устойчивости.

Применительно к настоящей работе опишем термин «сходится по вероятности». Говорят, что случайная величина $x_n = M/N$ сходится по вероятности к величине «$a = p_0$», если при увеличении n вероятность того, что x_n и «a» будут сколь угодно близки, неограниченно приближается к единице, а это значит, что при достаточно большом n будет выполняться (11):

$$p\left(|x_n-a|<\varepsilon\right)>1-\delta, \qquad (11)$$

где ε, δ – произвольно малые положительные числа; $\delta=e^{-2\varepsilon^2 N}$.

Задача заключается в оценке вероятности устойчивости семейства полиномов знаменателя передаточной функции АСР расхода орошения в СК (3) при заданных полиномах $P_0(s)$ (устойчивого), $P_1(s)$, $P_2(s)$, $P_3(s)$, дополнительной информации p_0, ε, N, γ и подтверждении (неподтверждении) выполнения (10), (11), на основании которого делаем вывод о том, что вероятность устойчивости семейства (3) высока (мала) и доля неустойчивых полиномов мала (высока).

Робастная устойчивость семейства полиномов знаменателя передаточной функции АСР расхода орошения в СК

Оценим вероятность устойчивости семейства полиномов знаменателя передаточной функции АСР расхода орошения в СК (3).

С учетом номинального полинома знаменателя передаточной функции АСР расхода орошения в СК (1) зададим полиномы (2), (6), (7)

$$P_3(s)=0,9+2,3s+2,4s^2+9,65s^3,$$

$$P_0(s) = 1 + 2,29s + 2,52s^2 + 2,23s^3,$$

$$P_1(s) = 0,1 + 0,1s + 0,2s^2 + 0,2s^3,$$

$$P_2(s) = 0,2 + 0,2s + 0,3s^2 + 0,3s^3,$$

$$P_3(s) = 0,9 + 2,3s + 2,4s^2 + 9,65s^3$$

и дополнительную информацию

$p_0 = 0,95$; $\varepsilon = 0,001$; $N = 100$; $\gamma = 1$.

Сгенерирована выборка 100 независимых случайных величин $\xi^1, \ldots, \xi^{100}$; $\xi^1 = (\xi_1^1, \xi_2^1, \xi_3^1)$; $\xi^{100} = (\xi_1^{100}, \xi_2^{100}, \xi_3^{100})$. На ее основе вычислено 100 полиномов $P(s, \xi^1), \ldots, P(s, \xi^{100})$ семейства (3).

Из 100 полиномов 95 полиномов устойчивые ($M = 95$). Выполним проверку условия (10).

$$\frac{M}{N} - \varepsilon = \frac{95}{100} - 0,001 = 0,949 \Rightarrow p_0 = 0,95 > \frac{M}{N} - \varepsilon,$$

$$1 - e^{-2\varepsilon^2 N} = 1 - e^{-2\cdot(0,001)^2\cdot 100} = 1 - 0,9998 = 0,0002.$$

Следовательно, выполняется условие (10).

Поскольку M/N близко к единице, а N достаточно велико, то с большой вероятностью можно заключить, что доля неустойчивых полиномов в Ξ мала.

Проверим выполнение условия (11).

$$|x_n - a| = \left|\frac{M}{N} - p_0\right| = |0,95 - 0,95| = 0 < \varepsilon = 0,001,$$

$$1 - \delta = 1 - e^{-2\varepsilon^2 N} = 0,0002.$$

Следовательно, выполняется условие (11).

Поскольку выполняются условия (10), (11), полином $P_0(s)$ устойчив, делаем вывод о том, что вероятность устойчивости семейства (3) высока и доля неустойчивых полиномов мала.

Заключение

Таким образом, на основе генерации выборки 100 независимых случайных величин, вычисления соответствующих полиномов и проверки их устойчивости рассмотренное семейство полиномов знаменателя передаточной функции АСР расхода орошения в СК обладает устойчивостью с вероятностью, близкой к 1. Данный результат может быть использован при разработке АСР расхода орошения в СК и выборе настроек регуляторов.

Литература

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. – 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. – P. 54–57.

5. Catalytic cracking (FCC) process modeling, simulation and control / C.I.C. Pinheiro, J.L. Fernandes, L. Domingues // Industrial I Engineering Chemistry Research. – 2012. – No. 51(1). – P. 1–29.

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. – No. 7 (1). – P. 90–95.

7. Ефремов В.В., Шелудько А.Г. Расчёт робастно-устойчивости автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолаза // Дизайн и технологии. – 2013. – № 34 (76). – С. 75–79.

8. Simulation and model predictive control of a UOP fluid catalytic cracking / C. Mircea, S. Agachi, V. Marimoiu // Chemical Engineering and Processing. – 2003. – Vol. 42. – P. 67.

9. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.

10. Nguang S.K. Robust stabilization of a class of time-delay nonlinear systems // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2000. – Vol. 45, No. 4. – P. 756–762.

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. – No. 6. – P. 171–176.

Джамбеков Азамат Матифулаевич
Канд. техн. наук, преп. отд. «Связь и телекоммуникации» факультета среднего профессионального образования ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
Татищева ул., 16, г. Астрахань, Россия, 414056
Тел.: 8-927-662-50-58
Эл. почта: dzhambekovam@yandex.ru.

Дмитриевский Борис Сергеевич
Д-р техн. наук, проф. каф. информационных процессов и управления Института автоматики и информационных технологий ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
Советская ул., 106, г. Тамбов, Россия, 392000
Тел.: 8-915-675-46-82
Эл. почта: dmiboris@yandex.ru.

Терехова Анастасия Андреевна
Ассистент каф. информационных процессов и управления Института автоматики и информационных технологий ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
Советская ул., 106, г. Тамбов, Россия, 392000
Тел.: 8-964-130-59-73
Эл. почта: terehova.aa@mail.tstu.ru

Dzhambekov A.M., Dmitrievsky B.S., Terekhova A.A.

Investigation of the stability of an automatic system for regulating the flow rate of reflux in a stabilization column in the process of catalytic reforming

It is proposed to take into account the influence of uncontrolled disturbances on the regulation of irrigation flow into the stabilization column of the catalytic reforming unit catalyst stabilization unit by changing the coefficients of the polynomial of the denominator of the transfer function of the automatic irrigation flow control system based on a probabilistic approach to robust stability. To study the robust stability of the automatic irrigation flow control system in the stabilization column, a typical scheme of the regulation system is considered. To describe the problem, a general view of the denominator polynomial of the transfer function of an automatic irrigation flow control system in a stabilization column is obtained. For the robust stability of the automatic irrigation flow control system in the stabilization column under the influence of disturbances, the task of estimating the probability of stability of the family of polynomials of the denominator of the transfer function of the automatic control system is set. A family of polynomials of the denominator of the transfer function of an automatic irrigation flow control system in a stabilization column with uncertainty parameters varying in a cube is considered. The problem of estimating the probability of stability of a family of polynomials of the denominator of the transfer function of an automatic irrigation flow control system in a stabilization column is reduced to solving problems: sample generation and probability estimation by frequency. To assess the probability of stability of the family of polynomials of the denominator of the transfer function of the automatic irrigation flow control system in the stabilization column, four polynomials, including the nominal one, are given. Based on generating a sample of one hundred independent random variables, calculating the corresponding polynomials and checking their stability, the considered family of polynomials of the denominator of the transfer function of the automatic irrigation flow control system in the stabilization column has stability with a probability close to unity.

Keywords: catalytic reforming, catalyst stabilization, automatic control system, family of polynomials, nominal polynomial, robust stability, uncertainty set.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-2-68-71

References

1. Dzhambekov A.M. [Local PID controller for catalyzate stabilization] *Modern Technologies. System Analysis. Modelling*, 2016, no. 3 (51), pp. 98–104.

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. L. [Increasing of the efficiency of the reforming LG-35-11/300] *Petroleum Processing and Petrochemistry*, 2001, no. 11, pp.54–57.

5. Pinheiro J.L., Fernandes L. Domingues [Catalytic cracking (FCC) process modeling, simulation and control] *Industrial I Engineering Chemistry Research*, 2012, no. 51(1), pp. 1–29.

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, no. 7(1), pp. 90–95.

7. Efremov V.V., Sheludko A.G. [Calculation of robust-stability of an automatic temperature control system for a water-heated diver's overalls] *Design and Technologies,* 2013, no. 34(76), pp. 75–79.

8. Mircea C., Agachi S., Marimoiu V. [Simulation and model predictive control of a UOP fluid catalytic cracking] *Chemical Engineering and Processing*, 2003, vol. 42, p. 67.

9. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. [Robust stability and control]. M., Nauka, 2002. 303 p.

10. Nguang S.K. [Robust stabilization of a class of time-delay non-linear systems] *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, vol. 45, no. 4, pp. 756–762.

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, no. 6, pp. 171–176.

Azamat M. Dzhambekov
Candidate of Science in Engineering, Lecturer
Department of Communications and Telecommunications,
Faculty of Secondary Vocational Education,
Astrakhan State Technical University
16, Tatishchev st., Astrakhan, Russia, 414056
Phone: 8-927-662-50-58
Email: dzhambekovam@yandex.ru

Boris S. Dmitrievskiy
Doctor of Science in Engineering, Professor
Department of Information Processes and Management,
Institute of Automation and Information Technologies,
Tambov State Technical University
106, Soviet st., Tambov, Russia, 392000
Phone: +8-915-675-46-82
Email: dmiboris@yandex.ru

Anastasiya A. Terekhova
Assistant, Department of Information Processes
and Management, Institute of Automation and Information
Technologies, Tambov State Technical University
106, Soviet st., Tambov, Russia, 392000
Phone: 8-964-130-59-73
Email: terehova.aa@mail.tstu.ru