

УДК 681.5.037.6

Брыков Б.А., Лопатин А.Г., Вент Д.П.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С НЕЧЕТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Брыков Богдан Александрович, студент 2 курса магистратуры факультета информационных технологий и управления РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия, Москва, e-mail: brybogdan@yandex.ru;

Лопатин Александр Геннадиевич, к.т.н, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов НИ РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия, Новомосковск;

Вент Дмитрий Павлович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов НИ РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия, Новомосковск;

Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковск, Россия
301665, Тульская область, г. Новомосковск, ул. Дружбы, д. 8

Работа посвящена анализу устойчивости робастной системы автоматического управления с нечетким регулятором с использованием критерия Попова. Были определены и построены на комплексной плоскости модифицированная и обычная амплитудно-фазовые частотные характеристики для объекта управления первого порядка с запаздыванием, исходя из чего были получены необходимые и достаточные условия устойчивости системы.

Ключевые слова: критерий Попова, амплитудно-фазовая частотная характеристика, устойчивость, нелинейные системы, нечеткий регулятор.

STABILITY ANALYSIS OF ROBUST CONTROL SYSTEM WITH FUZZY CONTROLLER

Brykov B.A. *, Lopatin A.G., Vent D.P.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Novomoskovsk, Russia

* D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

The article is devoted to the sustainability analysis of robust automatic control system with fuzzy controller using the Popov criterion. The modified and the usual amplitude-frequency characteristics were determined and build on the complex plane for the first order object with transport delay, on the basis of which were obtained the necessary and sufficient conditions for the stability of the control system.

Keywords: Popov's criterion, amplitude-phase frequency response, stability, non-linear systems, fuzzy controller.

Известно, что в химической промышленности объекты управления (различного рода реакторы) являются весьма слабо структурированными, т.е. обычно об объекте управления нет достаточного количества информации (например о действующих на него возмущающих воздействиях), в связи с чем традиционные методы управления с использованием ПИ- или ПИД-регуляторов не могут дать достаточного качества управления. Вследствие этого все большее распространение получают так называемые робастные (от англ. *robust* – сильный, крепкий) системы автоматического управления (РСАУ), т.е. системы, которые могут поддерживать достаточное качество регулирования, несмотря на полное или частичное отсутствие информации об объекте управления [1]. Одним из направлений робастного управления являются нечеткие системы регулирования, особенностью которых является настраиваемая база знаний, в которую можно включить все известные характеристики объекта управления и которую можно дополнять результатами наблюдений и экспертными оценками.

Существует несколько видов нечетких РСАУ, одна из которых была подробно рассмотрена в

[2]. Отметим лишь, что особенностью нечеткого регулятора в такой РСАУ является наличие блоков предобработки сигналов ошибки и ее интеграла и блока постобработки сигнала управления, наличие которых позволяет избежать перенастройки регулятора при изменении параметров протекания процесса. Диапазон изменения входных и выходной величин был выбран симметричным $[-1;1]$, предобработка сигналов ошибки и ее интеграла происходит путем умножения соответствующих значений на нормирующий коэффициент, который определяется, исходя из максимального значения ошибки или ее интеграла соответственно, а постобработка сигнала управления происходит методом денормализации.

Данная РСАУ является нелинейной, причем нелинейной частью является непосредственно нечеткий регулятор, поэтому для анализа устойчивости такой системы управления необходимо использовать критерий устойчивости Попова В.М. [3-5], в соответствии с которым можно определить устойчивость нелинейных систем для нелинейности, лежащей в секторе. Критерий Попова гласит, что если статическая характеристика нелинейности лежит в границах сектора, определяемого прямой kx , то

коэффициент нелинейности не больше значения k , следовательно, если устойчива соответствующая линейная система со статической характеристикой kx , то будет устойчива и нелинейная система.

Внутренняя структура используемого в РСАУ нечеткого регулятора подробно приведена в работе [2], отметим лишь, что для лингвистического описания каждой переменной использованы 7 термов, в качестве функций принадлежности выбраны кривые Гаусса, а база знаний регулятора включает в себя 49 правил.

У регулятора имеется 2 параллельно соединенные входные переменные (пропорциональная (P) и интегральная (I) части) и 1 выходная переменная (управляющее воздействие на объект управления U) (рис. 1), статические характеристики входных переменных P и I идентичны друг другу и показаны на рис. 2.

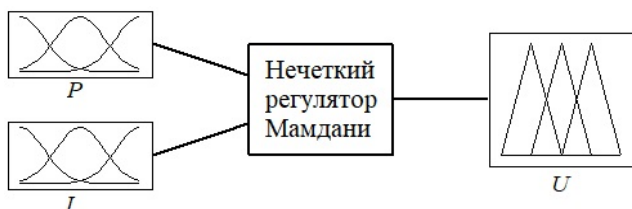


Рис.1. Структура нечеткого регулятора

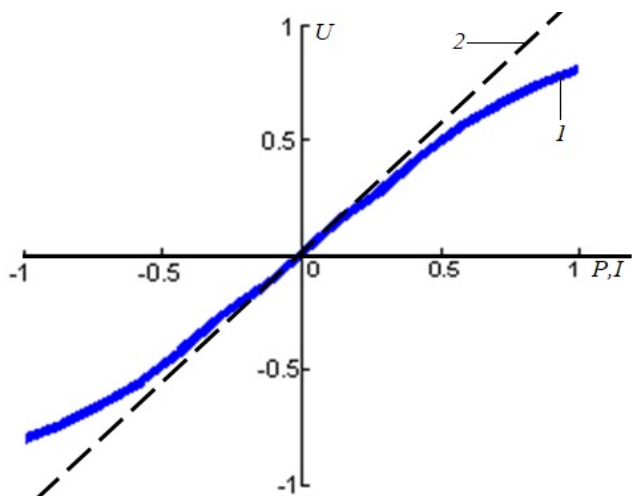


Рис.2. Статическая характеристика для входных переменных P и I (линия 1) и прямая kx (линия 2), определяющая сектор нелинейности, $k = 1.04$

Суммарная статическая характеристика регулятора может быть определена простым сложением статических характеристик частей P и I, а учитывая, что для каждой из них сектор нелинейности ограничен прямой kx (где $k = 1.04$), то сектор нелинейности суммарной статической характеристики будет иметь вид прямой $2.08x$.

В качестве объекта управления было использовано аperiodическое звено первого порядка с запаздыванием, передаточная функция которого выглядит следующим образом:

$$W_{об}(S) = \frac{K}{TS + 1} e^{-\tau S}, \quad (1)$$

где K – коэффициент усиления объекта управления;

T – постоянная времени объекта управления, сек;

τ – время транспортного запаздывания, сек.

Для определения устойчивости нелинейной системы используем частотный критерий устойчивости, подобный критерию Найквиста: прямая на комплексной плоскости, проходящая через точку с координатами $(-1/k; j0)$, где $k = 2.08$ – коэффициент нелинейности, должна быть левее и не касаться модифицированной амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) объекта управления (2):

$$W'(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\omega \text{Im}(\omega), \quad (2)$$

$$\text{Re}(\omega) = \frac{K (\cos(\tau\omega) - T\omega \sin(\tau\omega))}{T^2\omega^2 + 1}, \quad (3)$$

$$\text{Im}(\omega) = \frac{-K (\sin(\tau\omega) + T\omega \cos(\tau\omega))}{T^2\omega^2 + 1}, \quad (4)$$

где $\text{Re}(\omega)$ – вещественная частотная характеристика, $\text{Im}(\omega)$ – мнимая частотная характеристика, j – мнимая единица.

Обратим внимание, что вышеприведенное условие является достаточным, т.е. оно позволяет определять только неустойчивые системы. Необходимым же условием устойчивости является условие критерия Найквиста, т.е. если АФЧХ объекта управления

$$W(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega) \quad (5)$$

не охватывает точку $(-1/k; j0)$, то система устойчива.

В работе [2], используя критерий Найквиста, были определены значения параметров объекта управления (1), при которых система управления с ПИ-регулятором оказывалась на границе устойчивости. Теперь, используя эти значения, построим модифицированные (рис.3) и обычные (рис.4) АФЧХ заданного объекта управления и объектов управления с критическими значениями $K_{кр}$, $T_{кр}$, $\tau_{кр}$, соответственно.

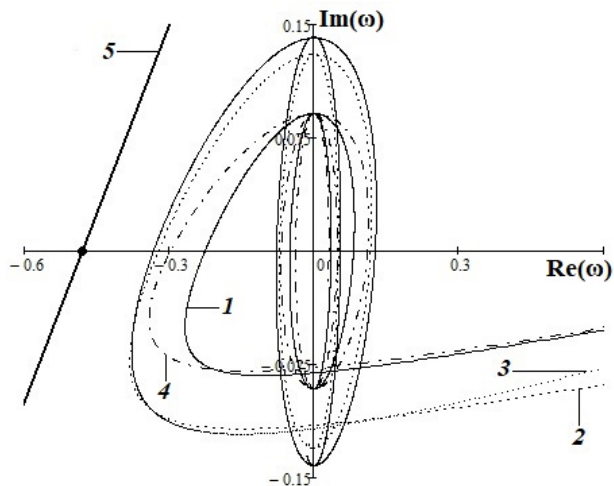


Рис.3. Модифицированные АФЧХ для объектов управления с параметрами:

- 1 – $K = 1.5, T = 16.41$ сек, $\tau = 4.3$ сек;
- 2 – $K_{кр} = 2.143, T = 16.41$ сек, $\tau = 4.3$ сек;
- 3 – $K = 1.5, T_{кр} = 10.549$ сек, $\tau = 4.3$ сек;
- 4 – $K = 1.5, T = 16.41$ сек, $\tau_{кр} = 5.865$ сек;
- 5 – прямая, проходящая через точку $(-1/k; j0)$

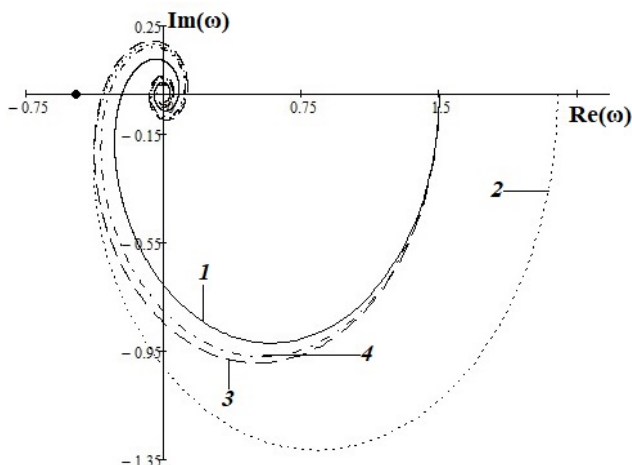


Рис.4. Обычные АФЧХ для объектов управления с параметрами:

- 1 – $K = 1.5, T = 16.41$ сек, $\tau = 4.3$ сек;
- 2 – $K_{кр} = 2.143, T = 16.41$ сек, $\tau = 4.3$ сек;
- 3 – $K = 1.5, T_{кр} = 10.549$ сек, $\tau = 4.3$ сек;
- 4 – $K = 1.5, T = 16.41$ сек, $\tau_{кр} = 5.865$ сек

Исходя из полученных данных видно, что в каждом из рассмотренных случаев, даже при критических значениях параметров объекта управления $K_{кр}, T_{кр}, \tau_{кр}$ модифицированные АФЧХ оказались справа от прямой, проходящей через точку с координатами $(-1/k; j0)$, где $k = 2.08$, а обычные АФЧХ не охватывали эту же точку, значит выполнены как достаточное, так и необходимое условия устойчивости, следовательно РСАУ с нечетким регулятором имеет повышенный запас устойчивости по сравнению с классической САУ с ПИ-регулятором, что было доказано, используя критерий Попова.

Список литературы

1. Афанасьев В.Н. Управление неопределенными системами: учеб. пособие. М.: РУДН, 2008. 325 с.
2. Вент Д.П., Лопатин А.Г., Брыков Б.А. Исследование применения нечеткого регулятора в робастной системе управления // Вестник Международной Академии Системных Исследований. Информатика, Экология, Экономика. 2017. Т. 19, часть I. С. 3-12.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.
4. Воронов А.А. Теория автоматического управления. Часть 2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. М.: Высшая школа, 1986. 504 с.
5. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. СПб: Питер, 2006. 271 с.