



СИНТЕЗ ИНТЕРВАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С АДАПТИВНЫМ ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

Е.В. Лубенцова, Г.В. Масютина, Т.А. Рудакова, В.Ф. Лубенцов (НТИ (филиал) СКФУ)

Предложен метод адаптивной настройки параметров ПИД-регулятора, использующий функциональные зависимости между оптимальными параметрами настроек регулятора и коэффициентом передачи объекта. При этом для объектов управления интервального типа при изменениях коэффициента усиления поддерживается постоянный запас устойчивости.

Ключевые слова: интервальная система, адаптивный ПИД-регулятор, робастный регулятор, максимальная степень устойчивости, переходный процесс.

Существенной практической проблемой автоматического управления является обеспечение эффективного управления нестационарными объектами при интервальной параметрической неопределенности. Синтез управления объектом, функционирующим в условиях неопределенности, можно проводить с использованием систем с разрывными управлениями на основе скользящих режимов, методов робастного и адаптивного управления [1, 2, 3]. Однако использование систем со скользящим режимом работы ограничивается наличием большого запаздывания в объекте, инерционностью исполнительных устройств и наличием различного рода неидеальностей, приводящих к невыполнению условий реализации скользящего режима в системе. Обеспечение робастных свойств систем с помощью параметрически оптимизированных регуляторов ограничивается высокой чувствительностью к изменению параметров объекта [4]. Эти изменения в свою очередь обусловлены, например, для непрерывных процессов изменениями нагрузки на объект, которые всегда связаны с изменениями положения регулирующих органов. Как отмечено в [3], наклон рабочих характеристик регулирующих органов может изменяться в 2...3 раза, при этом соответственно в 2...3 раза меняется и коэффициент усиления объекта, примерно во столько же раз при этом следует изменять коэффициент пропорциональности регулятора.

Чтобы избежать частых перенастроек регулятора, можно установить настройки, оптимальные по отношению к наиболее неблагоприятным параметрам объекта, обеспечивая робастную устойчивость интервальной системы регулирования при различных режимах работы [5, 6]. Однако при этом во всех других режимах, кроме наиболее неблагоприятного при частых и существенных изменениях нагрузки на объект, приводящих к изменению коэффициента усиления объекта, качество переходных процессов ухудшается. Иными словами, известные методы робастного управления рассчитаны на наихудшую возможную неопределенность, реализация которой на практике может быть маловероятной, то есть с практической точки зрения

получаемые границы робастности оказываются иногда завышенными. Поэтому для достижения необходимых показателей качества работы САУ в режимах, кроме наиболее неблагоприятного, требуется адаптация регулятора к изменению коэффициента передачи объекта.

Как известно, ПИД-регулятор относится к наиболее распространенному типу регуляторов. По различным данным порядка 90...95% промышленных регуляторов используют закон ПИД-регулирования [7, 8, 9]. Однако, несмотря на широкое использование этих регуляторов, до настоящего времени остаются нерешенными проблемы адаптации всех трех настроечных коэффициентов этих регуляторов к условиям промышленной эксплуатации. С учетом изложенного рассмотрим адаптацию САУ с ПИД-регулятором максимальной степени устойчивости с передаточной функцией $W_p(p) = K_{II} + K_{I/p} + K_{D \cdot p}$ (K_{II} , $K_{I/p}$, $K_{D \cdot p}$ — коэффициенты передачи, интегрирования и дифференцирования) к изменению коэффициента передачи объекта с передаточной функцией $W_{об}(p) = k_{об} \exp(-\tau \cdot p) / (T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1)$. В качестве объекта управления рассматривался биотехнологический процесс выращивания микроорганизмов в реакторе периодического культивирования [7, 10]. Биотехнологический процесс относится к сложным объектам управления, неопределенность характеристик которых и условий их функционирования обусловлена невысокой воспроизводимостью процессов, связанных с метаболизмом микроорганизмов и синтезом продуктов. Уровни априорной параметрической неопределенности в объекте зададим соотношениями [6]:

$$\begin{aligned} 0,0766 &= k_{об}^- \leq k_{об} \leq k_{об}^+ = 0,3830; \\ 2,2 &= \tau^- \leq \tau \leq \tau^+ = 6,0; \\ 14,35 &= T_1^- \leq T_1 \leq T_1^+ = 41,56; \\ 8,55 &= T_2^- \leq T_2 \leq T_2^+ = 25,01, \end{aligned}$$

где $k_{об}$, τ , T_1 , T_2 — коэффициент передачи, запаздывание, постоянные времени объекта; верхние индексы $(-)$, $(+)$ — значения нижней и верхней границ параметров объекта.

Для данной модели объекта число возможных вариантов граничных значений параметров равно $N=2^4=16$ (два

Таблица 1. Варианты моделей объекта и максимальная степень устойчивости системы с ПИД-регулятором

№	k	T_1	T_2	J	K			
1	0,3830	6,0	14,35	8,55	-0,1805	3,57	0,28	15,06
2	0,3830	6,0	41,56	8,55	-0,2250	18,53	1,40	40,69
3	0,3830	6,0	14,35	25,01	-0,0827	5,95	0,16	126,59
4	0,3830	6,0	41,56	25,01	-0,0979	11,81	0,35	127,98

граничных значения для каждого из четырех параметров $k_{об}, \tau, T_1, T_2$). Однако с учетом рекомендаций [6] наилучшее качество регулирования для статического объекта 1-го порядка соответствует максимуму выражения $I = k_{об} / (1,5 + \pi T / 4\tau)$ на множестве возможных параметров $k_{об}, T, \tau$. Из данного выражения следует, что параметры $\tau = \tau_{об\max}$ и $k_{об} = k_{об\max}$ оказывают значительное влияние на робастность системы с запаздыванием. На этом основании можно предположить, что достаточное количество исследуемых вариантов интервальной модели объекта, имеющего n параметров, может быть уменьшено до 2^{n-2} вариантов (где n — число интервальных параметров объекта) с максимальными граничными значениями параметров $\tau = \tau_{об\max}$ и $k_{об} = k_{об\max}$. Эти варианты представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, параметры объекта $k_{об}$ и τ в исследуемых вариантах имеют максимальные значения. Здесь же приведены соответствующие им оптимальные по критерию максимальной степени устойчивости J параметры настроек ПИД-регулятора [9].

По данным табл. 1 можно сделать вывод, что наиболее «трудным» для управления является вариант 3, которому соответствует наименьший запас устойчивости $J = -0,0827$. Тогда в качестве параметров робастного ПИД-регулятора следует взять значения, соответствующие оптимальным настройкам для варианта 3, для которого параметры $K_{об}$ и τ максимальны, а значение критерия максимальной степени устойчивости J минимально по модулю.

Для подтверждения вывода о том, что при определении робастных настроек регулятора для интервального объекта достаточно рассмотреть «укороченную» таблицу вариантов с 2^{n-2} строками, рассмотрим табл. 2, где приведены все 2^n вариантов сочетаний граничных значений параметров объекта управления.

Из сопоставления данных табл. 1 и 2 видно, что наиболее «трудный» вариант 3 из табл. 1 (ему соответствует минимальное по модулю значение J) является наиболее «трудным» и в полной табл. 2 вариантов. Анализ робастной устойчивости системы предусма-

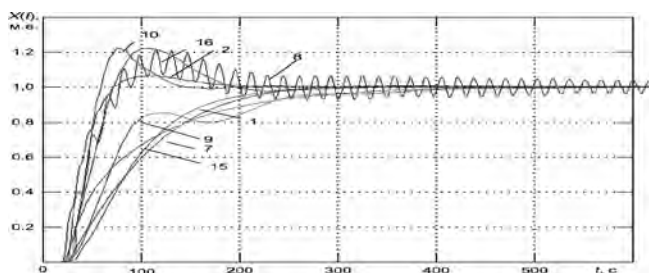


Рис. 1. Переходные процессы в интервальной системе управления: кривые соответствуют вариантам моделей табл. 2

Таблица 2. Параметры моделей объекта и оптимальные параметры настроек ПИД-регулятора

№	k	T_1	T_2	J	K			
1	0,0766	2,2	14,35	8,55	-0,2731	51,02	4,10	198,22
2	0,3830	2,2	14,35	8,55	-0,2731	10,20	0,82	39,64
3	0,0766	6,0	14,35	8,55	-0,1350	10,21	0,68	55,07
4	0,3830	6,0	14,35	8,55	-0,1350	2,04	0,147	11,01
5	0,0766	2,2	41,56	8,55	-0,2360	130,41	0,65	206,14
6	0,3830	2,2	41,56	8,55	-0,2360	26,07	2,13	41,23
7	0,0766	6,0	41,56	8,55	-0,2250	92,63	7,00	203,43
8	0,3830	6,0	41,56	8,55	-0,2250	18,53	1,40	40,69
9	0,0766	2,2	14,35	25,01	-0,2050	227,77	11,15	1833,30
10	0,3830	2,2	14,35	25,01	-0,2050	45,55	2,23	366,65
11	0,0766	6,0	14,35	25,01	-0,0827	27,99	0,74	622,43
12	0,3830	6,0	14,35	25,01	-0,0827	5,59	0,14	124,49
13	0,0766	2,2	41,56	25,01	-0,2110	278,89	14,248	1783,00
14	0,3830	2,2	41,56	25,01	-0,2110	55,78	2,85	356,54
15	0,0766	6,0	41,56	25,01	-0,0979	59,05	1,72	639,90
16	0,3830	6,0	41,56	25,01	-0,0979	11,81	0,34	127,98

тривает сохранение системой устойчивости при любых значениях ее интервальных параметров из заданного диапазона. С учетом этого желательно перейти от значения J к графикам переходных процессов. Для анализа переходных процессов из табл. 2 были выбраны 8 вариантов, соответствующие строкам 1, 2, 7, 8, 9, 10, 15, 16. Для вариантов 1, 2 значение J равно максимальному по модулю. Для вариантов 15, 16 значение J близко к минимальному по модулю, варианты 7, 8, 9, 10 заданы чередующимися предельными значениями параметров $k_{об}, \tau, T_1$ и T_2 . Выбор этих вариантов обоснован тем, что кроме анализа робастной устойчивости желательно проанализировать робастное качество системы при различных сочетаниях граничных значений интервальных параметров $k_{об}, \tau, T_1$ и T_2 . Для перечисленных 8 вариантов из табл. 2 были получены переходные процессы в САУ с регулятором, настройки которого соответствовали наилучшему сочетанию параметров объекта (то есть варианту 3 из табл. 1). Графики переходных процессов представлены на рис. 1.

Из анализа полученных переходных процессов следует, что ПИД-регулятор, параметрически оптимизированный для объекта с наилучшим сочетанием параметров, обеспечивает робастную устойчивость интервального объекта. Однако качество переходного процесса в робастно устойчивой системе существенно зависит от изменений коэффициента передачи объекта. Причем вид переходного процесса с максимальным динамическим отклонением, максимальным перерегулированием и наименьшим временем нарастания переходного процесса в системе (время первого достижения заданного значения регулируемой переменной $x(t)$, м. е. — машинные единицы) определяют варианты модели объекта с максимальным значением коэффициента передачи объекта $k_{об}$, то есть кривые 2, 8, 10, 16 переходных процессов, соответствующие вариантам моделей объекта табл. 2. Учитывая, что при изменившемся в k раз коэффициенте передачи объекта значения оптимальных параметров настроек регулятора изменяются в $1/k$ раз, рассмотрим разработанный нами алгоритм подстройки параметров ПИД-регулятора, обеспечива-

ющий сохранение динамических параметров замкнутой системы (и в частности, значение запаса устойчивости J) для случая, когда изменяется статический параметр объекта — его коэффициент передачи $k_{об}$.

Идентифицируя изменяющийся коэффициент передачи объекта $k_{об}$, например, в зависимости от измеряемой нагрузки на объект либо по начальному участку кривой разгона объекта (например [10]), можно получить значения параметров настроек регулятора, используя функциональную зависимость между коэффициентом передачи объекта и параметрами настройки регулятора, не прибегая к более сложным алгоритмам адаптации, требующим, как правило, больших вычислительных затрат.

Следовательно для компенсации изменений $k_{об}$ должна производиться подстройка всех параметров ПИД-регулятора в одинаковое число раз, а именно, параметры регулятора должны изменяться обратно пропорционально отношению $\alpha = \hat{k}_{об} / k_{об}^*$ по алгоритму:

$$K_{Пад} = \begin{cases} K_n^* & \text{при } \hat{k}_{об} / k_{об}^* = 1; \\ K_n^* / \alpha & \text{при } \hat{k}_{об} / k_{об}^* = \alpha; \end{cases}$$

$$K_{Иад} = \begin{cases} K_u^* & \text{при } \hat{k}_{об} / k_{об}^* = 1; \\ K_u^* / \alpha & \text{при } \hat{k}_{об} / k_{об}^* = \alpha; \end{cases}$$

$$K_{Дад} = \begin{cases} K_d^* & \text{при } \hat{k}_{об} / k_{об}^* = 1; \\ K_d^* / \alpha & \text{при } \hat{k}_{об} / k_{об}^* = \alpha, \end{cases}$$

где $\hat{k}_{об}$ — идентифицированное значение $k_{об}$; K_n^* , K_u^* , K_d^* — первоначальные параметры регулятора, рассчитанные при значении $k_{об}^*$.

Для наглядности на рис. 2 приведена зависимость коэффициентов ПИД-регулятора от $K_{об}$ при $J = -0,2731$. При незначительном перерегулировании ($< 5,71\%$) время переходных процессов в адаптивной системе в 4–8 раз меньше времени переходных процессов в системе с робастным регулятором. Поскольку при активной идентификации нестационарного биотехнологического объекта управления важным качественным показателем работы системы является время выхода на заданный режим, то есть быстрдействие в переходном режиме, что способствует идентификации $K_{об}$ на интервалах квазистационарности, то полученные результаты по качеству управления можно считать удовлетворительными.

Таким образом, показано, что синтез адаптивного регулятора системы для биотехнологического объекта управления, имеющего интервальные параметры, можно эффективно осуществить по критерию максимальной степени устойчивости, используя минимаксный подход к выбору наилучшего сочетания параметров объекта. Предложенный способ позво-

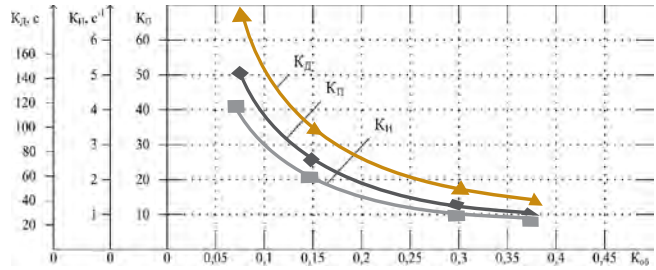


Рис. 2. Зависимость коэффициентов ПИД-регулятора от $K_{об}$: $K_n = 3,908 \cdot K_{об}^{-1}$; $K_u = 0,314 \cdot K_{об}^{-1}$; $K_d = 15,183 \cdot K_{об}^{-1}$

ляет исключить полный перебор вариантов моделей с граничными значениями параметров. Параметры настройки регулятора для выбранной этим способом модели объекта предлагается использовать для обеспечения робастной устойчивости системы. Для улучшения показателей качества управления интервальными объектами с наибольшей чувствительностью системы к статическому коэффициенту усиления объекта предлагается изменять коэффициенты полученного робастного регулятора обратно пропорционально изменениям коэффициента усиления объекта.

Список литературы

1. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник. Под ред. Н. Д. Егупова. 2 изд. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
3. Штейнберг Ш.Е., Залуцкий И.Е. Адаптация стандартных регуляторов к условиям эксплуатации в промышленных системах регулирования//Промышленные АСУ и контроллеры. № 4. 2003.
4. Панько М.А. Расчет настроек ПИД регуляторов при цифровой реализации алгоритма регулирования//Теплоэнергетика. № 10. 2004.
5. Автоматическое управление в химической промышленности: учебное пособие для ВУЗов. Под ред. Дудникова Е.Г. М. Химия, 1987.
6. Рудакова Т.А., Червяков Н.И., Лубенцов В.Ф. Разработка модели технологического объекта для синтеза системы управления при параметрической неопределенности//Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. № 8. 2007.
7. Киселев О.Н. Синтез регуляторов низкого порядка по критерию H^∞ и по критерию максимальной робастности//Автоматика и телемеханика. № 3. 1999.
8. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации//Современные технологии автоматизации. № 4. 2006.
9. Загарий Г.И., Шубладзе А.М. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости: Библиотека по автоматике. Вып. 669. М.: Энергоатомиздат. 1988.
10. Лубенцов В.Ф., Болдырев Д.В. Методы динамической идентификации биотехнологических объектов. Ставрополь: СевКавГТУ. 2005.

Лубенцов Валерий Федорович — д-р техн. наук, проф., Лубенцова Елена Валерьевна — канд. техн. наук, доцент; Рудакова Татьяна Анатольевна — канд. техн. наук, доцент; Масюткина Галина Владимировна — аспирант каф. «Информационные системы, электропривод и автоматика» Невинномысского технологического института ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет». Контактные телефоны: (86554) 7-17-32, (86554) 6-94-44. E-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru