Обеспечение точности в установившемся режиме при стабилизации нестационарного объекта с запаздыванием по управлению

И. В. Гоголь[1], О. А. Ремизова[2], В. В. Сыроквашин, А. Л. Фокин
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)
[1]new.ivan.gogol@gmail.com, [2]remizova-oa@technolog.edu.ru

***Аннотация*. Рассматривается метод решения задачи обеспечения точности в установившемся режиме при традиционном управлении технологическим объектом с переменными параметрами и с запаздыванием по управлению, состоящий в использовании двухконтурной системы комбинированного управления, в которой осуществляется компенсация действия параметрического возмущения, и которая позволяет решить задачу при достаточно медленном изменении параметров и при наличии неопределенности задания величины запаздывания и коэффициентов модели объекта**

Ключевые слова: робастные системы регулирования; ПИД закон регулирования; запаздывание; переменные параметры

В работе рассматривается объект с запаздыванием по управлению и с неопределенностью задания величины запаздывания и переменными параметрами инерционной части. Предполагается выполнение гипотезы квазистационарности, когда за время регулирования коэффициенты модели инерционной части практически неизменны, но, так как время регулирования велико, они могут изменяться существенно. Это соответствует предположениям метода замороженных коэффициентов и справедливо во многих практических задачах управления технологическими процессами.

В этих предположениях решение задачи управления в динамике может решаться для постоянных медианных значений параметров инерционной части. Отметим, что при этом возрастает ценность робастных настроек ПИД регулятора, так как регулятор должен обеспечивать качественное регулирование в возможно более широком диапазоне изменения коэффициентов модели объекта. Это повышает надежность системы в период между двумя смежными перенастройками регулятора. Альтернативное решение состоит в использовании более сложного адаптивного управления.

При построении системы адаптивного управления основная трудность состоит в наличии неопределенного запаздывания по управлению. В настоящее время известен целый ряд работ по адаптивному управлению, где имеется запаздывание по выходной величине или по состоянию. Здесь, во-первых, следует отметить системы, в которых

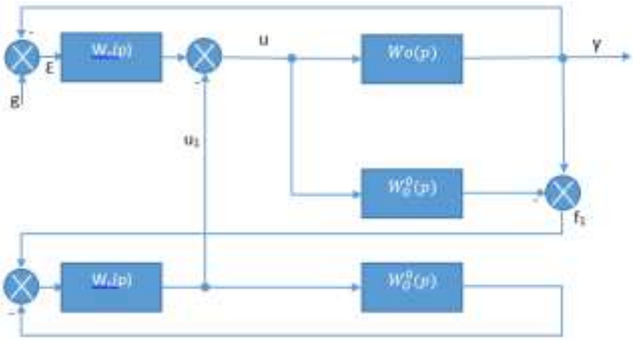

Рис. 1. Структурная схема двухконтурной АСР

При наличии запаздывания по управлению для парирования параметрического возмущения традиционно используется предиктор возмущения. Его достаточно просто построить, если заранее известен вид возмущения и величина запаздывания. Но в нашем случае не известно ни то, ни другое.

Это вызывает необходимость искать другие решения. Одно из таких решений предлагается в данной работе на основе робастного подхода для настройки параметров ПИД закона регулирования и использования специальной структурной схемы, показанной на рис. 1.

Для объекта с запаздыванием по управлению время адаптации зависит от величины запаздывания. Поэтому качество стабилизации определяется скоростью изменения параметров. Как показывает практика моделирования, точность поддержания выходной величины в 5% ой зоне достигается только для достаточно медленного изменения параметров так, что результаты управления при адаптивном управлении могут оказаться соизмеримыми с результатами робастного управления.

Но при переменных параметрах при робастном управлении возникает проблема обеспечения точности робастной системы в установившемся режиме, так как в системе присутствует ограниченное параметрическое возмущение, которое приводит к изменению выходной величины в определенном диапазоне, который зависит от амплитуд изменения параметров и частотного диапазона, в котором эти изменения происходят, а также от входного воздействия.

Так объект управления находится в области нормального режима, то параметрическое возмущение можно считать ограниченным, но изменяющимся в бесконечном временном интервале. Если возмущение действует на конечном интервале времени, то возникают проблемы управления в динамике. Если возмущение действует на бесконечном интервале, то нужно решать проблемы и в динамике и в установившемся режиме.

В динамическом диапазоне проблема решается выбором робастных настроек ПИД закона регулирования. Для увеличения точности в установившемся режиме в качестве решения можно использовать двухконтурную систему, которая ранее была предложена для парирования внешних ограниченных возмущений [11], [12]. Такая структура представлена на рис. 1.

Из-за наличия параметрической неопределенности в передаточной функции объекта $W_0(p)$ возникает возмущение f_1, для компенсации которого используется дополнительный сигнал u_1 на входе объекта. Для вычисления f_1 используется номинальная передаточная функция $W_0^0(p)$. При формировании этого сигнала вместо предиктора использована дополнительная номинальная следящая система. Если в идеале предположить, что выход следящей системы точно совпадает с f_1, то она может быть использована в качестве модели, по которой можно проследить, дополнительное движение в любой точке структурной схемы, вызванное неопределенностью математической модели относительно номинального движения, и использовать эти движения для управления.

Полученная таким образом переменная u_1 используется в системе для компенсации влияния неопределенности на выходную величину. Такой подход позволяет решить задачу обеспечения точности при неопределенности в задании величины запаздывания на входе объекта.

Введение второго контура, состоящего из следящей системы, позволяет уменьшить амплитуду колебаний на выходе, вызванную изменением параметров модели объекта, по сравнению с одноконтурной системой. Было показано [11], [12], что такая система также обладает грубостью по отношению к параметрической неопределенности и запаздыванию, которая соответствует грубости одноконтурной системы.

Поэтому здесь важное значение имеет создание методов робастного управления одноконтурной системой в классе традиционных законов управления, так как они в основном используются при автоматизации технологических процессов [13].

На основании структурной схемы получим

$$f_1(p) = \Delta W(p) u(p), \tag{1}$$

где $\Delta W(p) = W_0(p) - W_0^0(p)$.

$$u_1(p) = W_P(p) f_1(p) - W_P(p) W_0^0(p) u_1(p),$$

$$\varepsilon(p) = g(p) - y(p) = g(p) - \left(W_0(p) W_P(p) \varepsilon(p) - W_0(p) u_1(p)\right).$$

Отсюда получим ошибку для реального движения

$$\varepsilon_1(p) = \Phi_{\varepsilon 1}(p) g(p), \tag{2}$$

где $\Phi_{\varepsilon 1}(p) = \dfrac{1 + W_P(p) W_0(p)}{1 + 2W_P(p) W_0(p) + W_P^2(p) W_0^0(p) W_0(p)}$.

Также для одноконтурной реальной системы известна формула

$$\varepsilon_2(p) = \Phi_{\varepsilon 2}(p) g(p), \tag{3}$$

где $\Phi_{\varepsilon 2}(p) = \dfrac{1}{1 + W_P(p) W_0(p)}$.

Как видно из формул (2), (3) при постоянных параметрах неопределенности модели объекта $\Delta W(p)$ и при наличии интегратора в передаточной функции $W_P(p)$ в обеих системах обеспечивается астатизм, так как $W_P(p) \to \infty$ при $p \to 0$.

Для номинальной одноконтурной системы будет

$$\varepsilon^0(p) = \Phi_\varepsilon^0(p) g(p), \tag{4}$$

где $\Phi_\varepsilon^0(p) = \dfrac{1}{1 + W_P(p) W_0^0(p)}$.

При переменных параметрах неопределенности рассмотрим изменение величины ошибки в двухконтурной (2) и в одноконтурной системе (3) по сравнению с номинальной одноконтурной системой (4). С учетом $W(p) = W_0^0(p) + \Delta W(p)$ получим

$$\Delta\varepsilon_1(j\omega) = \varepsilon_1(j\omega) - \varepsilon^0(j\omega) = I_1(j\omega) \Phi_\varepsilon^0(j\omega) g(j\omega), \tag{5}$$

где

$$I_1(j\omega) = \frac{W_P(j\omega) \Delta W(j\omega)}{1 + W_P(j\omega)\left(W_0^0(j\omega) + \Delta W(j\omega)\right) + W_P(j\omega)\left(1 + W_P(j\omega) W_0^0(j\omega)\right)\left(W_0^0(j\omega) + \Delta W(j\omega)\right)}$$

$$\Delta\varepsilon_2(j\omega) = \varepsilon_2(j\omega) - \varepsilon^0(j\omega) = I_2(j\omega) \Phi_\varepsilon^0(j\omega) g(j\omega) \tag{6}$$

где $I_2(j\omega) = \dfrac{W_P(j\omega) \Delta W(j\omega)}{1 + W_P(j\omega)\left(W_0^0(j\omega) + \Delta W(j\omega)\right)}$

Наличие интегратора в передаточной функции $W_P(p)$ обеспечивает большее уменьшение модуля изменения ошибки (5) в низкочастотной области по сравнению с (6) благодаря второму контуру, так как в знаменателе $I_1(j\omega)$ передаточная функция $W_P(p)$ присутствует в квадрате, а в числителе только в первой степени, а в формуле для $I_2(j\omega)$ везде только в первой степени.

Если, например, для оценки точности использовать максимальные значения модуля для величин (5), (6), то при одинаковом задании g и при заданном изменении параметров неопределенности ΔW в низкочастотной области в двухконтурной системе имеется дополнительный механизм для обеспечения большей близости показателя точности параметриче-ски возмущенной системы к точности номинальной системы. Предварительная оценка близости может проводиться за счет моделирования.

Для примера рассмотрим номинальную передаточную функцию объекта

$$W_0^0(p) = k_0^0 \frac{\exp(-10\,p)}{15\,p+1}, \qquad (7)$$

где $k_0^0 = 1$.

В качестве передаточной функции регулятора робастной системы рассмотрим ПИ закон

$$W_P(p) = 0.0343\,\frac{17\,p+1}{p}. \qquad (8)$$

Пусть в реальном объекте коэффициент передачи изменяется во времени по закону

$$k_0(t) = 1 + 0.3\sin 0.01t\,. \qquad (9)$$

При этом в передаточной функции номинальной системы использовано медианное значение для коэффициента передачи (9) $k_0^0 = 1$.

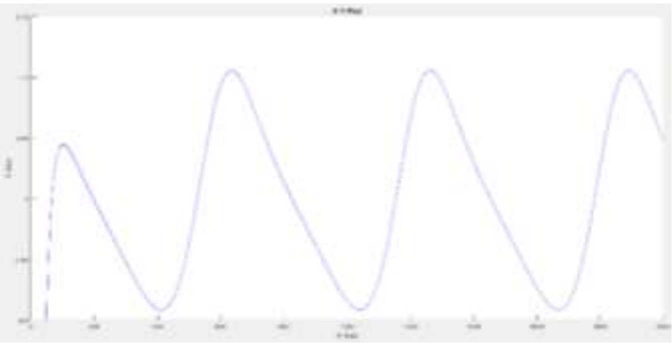

Рис. 2. Переходная характеристика одноконтурной АСР

Тогда переходная характеристика одноконтурной системы (7), (8) имеет вид, показанный на рис. 2. Видно, что в установившемся режиме появляются периодические колебания и кривая выходит за пределы 5%-й зоны.

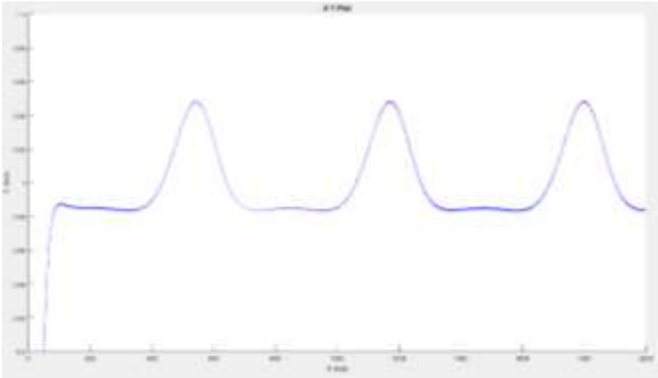

Рис. 3. Переходная характеристика двухконтурной АСР

Соответствующая кривая для двухконтурной системы показана на рис. 3. Видно, что требования точности здесь выполняются.

Список литературы

[1] Dynamic Positioning System for Nonlinear MIMO Plants and Surface Robotic Vessel [text] / S.M. Vlasov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, M.O. Surov, A.A. Vedyakov, A.D. Feskov, A.Y. Krasnov, O.I. Borisov, V.S. Gromov // IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control, June 19-21, 2013, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia. P. 1867-1872.

[2] Simple Robust and Adaptive Tracking Control for Mobile Robots [text] / S.M. Vlasov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, M.V. Faronov, O.I. Borisov, V.S. Gromov, N.A. Nikolaev // IFAC Proceedings Volumes (IFACPapersOnline), MICNON 2015, Vol. 48, No. 11, pp. 143-149 102

[3] Output Control Algorithms of Dynamic Positioning and Disturbance Rejection for Robotic Vessel [text] / S.M. Vlasov, J. Wang, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, O.I. Borisov, V.S. Gromov, S.A. Kolyubin // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), MICNON 2015, Vol. 48, No. 11, pp. 295-300

[4] MIMO positioning system for surface robotic vessel [text] / S.M. Vlasov, V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, A.A. Vedyakov // Automation & Control: Proceedings of the International Conference of Young Scientists, 21-22 November 2013, pp. 82-86

[5] Output Control for Time-Delay Nonlinear System Providing Exponential Stability [text] / A. Bobtsov, A. Pyrkin, M. Faronov //The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation (IEEE), Corfu, Greece, 2011.

[6] Output Control Approach "Consecutive Compensator" Providing Exponential and L-infinity-stability for Nonlinear Systems with Delay and Disturbance [text] / A. Pyrkin, A. Bobtsov, S. Kolyubin, M. Faronov, S. Shavetov, Y. Kapitanyuk, A. Kapitonov // Proc. IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Denver, USA, 2011.

[7] Furtat, I.B. Modified Backstepping Algorithm with Disturbances Compensation [Text] / Furtat I.B., Furtat E., Tupichin E.A. // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2015. P. 1056–1061

[8] Furtat, I.B. Modified Robust Backstepping Algorithm for Plants with Time Delay [Text] / Furtat I.B., Tupichin E.A. // Proc. of the 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2014. P. 441–445.

[9] Furtat, I.B. Modified Simple Adaptive-Robust Backstepping Algorithm [Text] / Furtat I.B., Tupichin E.A. // Proc. of the 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. MMAR. 2014. P. 183–188.

[10] Фуртат, И.Б. Управление нелинейными объектами с запаздыванием на базе модифицированного алгоритма бэкстеппинга [Текст] /Фуртат И.Б., Тупичин Е.А. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 707-712.

[11] Ремизова О.А., Фокин А.Л. Робастное управление устойчивым техническим объектом при наличии запаздывания по управлению с компенсацией возмущений// Изв. вузов. Приборостроение. 2016. т.59. №12. С. 10–17.

[12] Гоголь И.В., Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. Управление техническими системами с запаздыванием при помощи типовых регуляторов с компенсацией возмущений// Изв. вузов. Приборостроение. 2017. т.60. №9. С. 882–890.

[13] Денисенко В.В. Разновидности ПИД - регуляторов//Автоматизация в промышленности, 2007, №6, С. 45–50.