

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СО СТАТИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

*В.И. Панферов, С.В. Панферов*

Широко известно, что наибольшая экономия тепловой энергии в системах теплоснабжения зданий достигается за счет их автоматизации, поэтому разработка вопросов, связанных с проблемой построения высококачественных систем автоматического управления, является вполне актуальной задачей. В настоящее время в промышленности, в том числе и в системах теплоснабжения зданий для автоматического регулирования различных переменных технологических процессов широко используются ПИД-регуляторы и их частные варианты. Накоплен огромный опыт применения таких регуляторов, в частности, разработаны и апробированы различные способы их настройки. Вместе с тем, как неоднократно отмечает В.Я. Ротач в своем сравнительно недавно изданном учебнике [1], П-, ПИ- и ПИД- «...алгоритмы были получены чисто эвристическим путем» [1, с. 82 и др.] и что «...достаточно убедительное формальное доказательство целесообразности их применения ... до сих пор получить не удалось» [1, с. 24]. Кроме того, к этому необходимо добавить, что проблема нахождения настроек уже выбранного каким-то способом закона регулирования не проста сама по себе, поэтому настройки большинства промышленных регуляторов зачастую оказываются далекими от оптимальных.

В работе [2], как нам представляется, удалось получить некоторое формальное обоснование целесообразности применения ПИД-регуляторов,

здесь задача решалась методом «подгонки» передаточной функции замкнутой системы автоматического регулирования к некоторому достаточно разумному и практически достижимому виду. Найдены эталонные структуры и настройки регуляторов для типовых динамических характеристик промышленных объектов управления, при этом установлено, что все эти регуляторы принадлежат ПИД-семейству. Казалось бы, что поставленная цель достигнута, однако для полноты исследования проблемы необходимо рассмотреть вопрос о качестве переходных процессов в таких системах и о грубости этих структур и настроек, данная задача и решается в настоящей работе для одного из типовых объектов управления.

Рассмотрим вопрос о качестве переходных процессов и о грубости систем автоматического регулирования (САР) с объектом управления с передаточной функцией вида

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{T_{об}p + 1} \exp(-\tau_{об}p), \quad (1)$$

где  $k_{об}$ ,  $T_{об}$ ,  $\tau_{об}$  – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания объекта;  $p$  – комплексная переменная. В соответствии с [2] близким к идеальному для такого объекта будет ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_p(p) = \frac{T_{об}}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)} \left[ 1 + \frac{1}{T_{об}p} \right].$$

Здесь  $\theta$  –

постоянная времени эталонной передаточной функции замкнутой системы

$$W_{зс}(p) = \frac{1}{\theta p + 1} \exp(-\tau_{об}p).$$

Для анализа переходных процессов в системе с объектом управления данного типа разработаны две компьютерные программы: одна для анализа переходных процессов при возмущении по заданию, а другая – при возмущении со стороны регулирующего органа. В каждой из разработанных программ предусмотрен ввод  $k_{об}$ ,  $T_{об}$ ,  $\tau_{об}$ , а также коэффициента передачи ПИ-регулятора  $k_p$  и времени интегрирования  $T_{и}$ , каждая из программ осуществляет не только построение графика переходного процесса, но и определяет перерегулирование  $\sigma$  и время регулирования  $t_p$ , а также вычисляет значения критериев

$$I_1 = \int_0^{t_k} |\varepsilon(t)| dt; \quad (2)$$

$$I_2 = \int_0^{t_k} \varepsilon^2(t) dt, \quad (3)$$

где  $t_k$  – конечное время оценки переходного процесса;  $\varepsilon(t) = x^3(t) - x(t)$  –

ошибка регулирования (рассогласование);  $x^3(t)$  и  $x(t)$  – соответственно заданное и действительное значение регулируемой величины;  $t$  – время. При этом время регулирования  $t_p$  определялось как время, по истечении которого отклонение регулируемой величины от задания не будет превышать 5 %.

Интегрирование дифференциального уравнения объекта управления осуществлялось методом Рунге–Кутты с погрешностью, пропорциональной пятой степени шага по времени. Для компьютерного использования алгоритм ПИ-регулирования представляли в дискретной форме, при вычислении интеграла применяли метод трапеций. С целью сокращения объема необходимых вычислений использовали рекуррентную форму дискретного представления алгоритма ПИ-регулирования, приведенную в работе [3]:

$$U(m) = U(m-1) + q_0 \varepsilon(m) + q_1 \varepsilon(m-1), \quad (4)$$

где  $m$  – номер расчетного шага по времени;  $q_0 = k_p [1 + h / (2T_i)]$ ;  $q_1 = k_p [h / (2T_i) - 1]$ ;  $h$  – величина шага по времени;  $U$  – выходная величина регулятора (% хода исполнительного механизма (ИМ)).

Исследование качества переходных процессов в САР проводилось в окрестности базовых настроек:  $k_p = \frac{T_{об}}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)}$ ;  $T_i = T_{об}$ , при этом в координатах « $k_p \dots T_i$ » точка с базовыми настройками располагалась в центре прямоугольника, вычисления проводились для настроек, расположенных на диагоналях и на отрезках прямых, соединяющих середины противоположных сторон прямоугольника. Создавались возмущения по заданию, так и со стороны регулирующего органа. Установлено, что практически значимая вариация параметров настройки ПИ-регулятора не приводит к существенному ухудшению поведения сконструированной системы, поэтому можно сделать заключение, что рассматриваемая система является достаточно робастной по отношению к настройкам регулятора.

Сравнивая качество переходных процессов при возмущении по заданию и при возмущении по нагрузке при одинаковых настройках регулятора, можно отметить, что в целом, по нашим оценкам, рассматриваемая САР все-таки лучше обрабатывает возмущение по заданию, показатели качества переходных процессов принимают более желательные значения. По-видимому, все это является следствием применяемого подхода к решению задачи синтеза САР: наилучшим образом обработать возмущение именно по каналу задания.

Настройки ПИ-регулятора, оптимальные по критериям  $I_1$  и  $I_2$ , могут не совпадать как между собой, так и с базовыми настройками, но в целом их различие достаточно небольшое.

Численно-аналитическими методами исследована робастность системы по отношению к изменениям параметров объекта управления на величины  $\Delta k_{об}$ ,  $\Delta T_{об}$  и на  $\Delta \tau_{об}$  соответственно, при этом считалось, что регулятор имеет прежнюю базовую настройку. Для этого случая найдено условие устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования:  $\omega_{кр} \tau_{об} (1 + \Delta \tau_{об} / \tau_{об}) - \arctg(\omega_{кр} T_{об}) + \arctg[\omega_{кр} T_{об} (1 + \Delta T_{об} / T_{об})] < \pi / 2$ , где критическая частота  $\omega_{кр}$  вычисляется по следующему уравнению:

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{-(\theta + \tau_{об})^2 - T_{об}^2 (1 + \Delta k_{об} / k_{об})^2}{2(\theta + \tau_{об})^2 T_{об}^2 (1 + \Delta T_{об} / T_{об})^2} + \sqrt{\frac{[(\theta + \tau_{об})^2 - T_{об}^2 (1 + \Delta k_{об} / k_{об})^2]^2 + 4(\theta + \tau_{об})^2 T_{об}^2 (1 + \Delta T_{об} / T_{об})^2 (1 + \Delta k_{об} / k_{об})^2}{2(\theta + \tau_{об})^2 T_{об}^2 (1 + \Delta T_{об} / T_{об})^2}}}. \quad (5)$$

Исследования, выполненные, в том числе и с помощью среды программирования «Maple 10» показали, что система имеет значимый запас устойчивости относительно вариации параметров объекта управления  $\Delta k_{об}$ ,  $\Delta T_{об}$  и  $\Delta \tau_{об}$ , причем размеры области устойчивости САР увеличиваются при увеличении параметра  $\theta$  (увеличиваются размеры допустимых вариаций всех параметров объекта управления).

Установили, что для данного случая дифференциальное уравнение замкнутой САР будет иметь вид:

$$(T_{об} + \Delta T_{об})(\theta + \tau_{об}) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + (\theta + \tau_{об}) \frac{dx(t)}{dt} + T_{об} (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \frac{dx(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об})}{dt} + (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \cdot x(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}) = T_{об} (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \frac{dx^3(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об})}{dt} + (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \cdot x^3(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}). \quad (6)$$

Решая, как непосредственно данное дифференциальное уравнение, так и используя программу расчета переходных процессов в САР, в которой математические описания элементов системы регулирования представлены по отдельности, установили, что при возмущении как по заданию, так и по нагрузке в окрестности точки  $(0, 0, 0)$  существует довольно заметная область вариации параметров  $\Delta k_{об}$ ,  $\Delta T_{об}$  и  $\Delta \tau_{об}$ , для которой сохраняются приемлемые значения показателей качества переходных процессов. Установили также, что САР астатическая по задающему воздействию, так и по каналу «возмущение со стороны регулирующего органа – ошибка регулирования».

Таким образом, достаточно подробный анализ показал, что рассматриваемый метод синтеза промышленных САР, позволяющий однозначно выбрать как структуру, так и параметры настройки регулятора, обеспечивает

приемлемое качество переходных процессов и достаточный запас устойчивости системы при довольно заметных по размерам вариациях параметров объекта управления и погрешностях задания настроек регулятора. Поэтому данный метод синтеза можно достаточно уверенно рекомендовать для практического использования.

#### Библиографический список

1. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / В.Я. Ротач. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
2. Панфёров, С.В. К обоснованию метода структурно-параметрического синтеза автоматических регуляторов / С.В. Панфёров, А.И. Телегин, В.И. Панфёров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2009. – Вып. 9. – № 3 (136). – С. 29–36.
3. Плютто, В.П. Практикум по теории автоматического управления химико-технологическими процессами. Цифровые системы / В.П. Плютто, В.А. Путинцев, В.М. Глумов. – М.: Химия, 1989. – 279 с.