

УДК 681.5

Применение метода локализации для расчета робастного ПИД-регулятора¹

Г.А. ФРАНЦУЗОВА, Н.С. ЗЕМЦОВ

Рассмотрена задача расчета параметров ПИД-регулятора. В работе предлагается ее решение на основе метода локализации. Применение этого метода обеспечивает желательные свойства для линейных систем второго порядка. Параметры объекта не влияют на качество переходного процесса, а внешнее возмущение быстро отрабатывается.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, метод локализации, линейная система второго порядка, «грубость».

ВВЕДЕНИЕ

Одними из первых промышленных регуляторов являются ПИД-регуляторы, которые до настоящего времени широко используются в различных технических системах автоматического регулирования. Благодаря своей универсальной структуре такие регуляторы позволяют добиться приемлемых результатов в случае управления объектами невысокого порядка, а это широкий класс объектов, который часто встречается в технике и производстве.

Несмотря на большее число существующих способов настройки и расчета параметров типовых регуляторов [1–5], универсальной методики их синтеза пока не предложено. Зачастую после настройки ПИД-регулятора (обычно это делается по специальным таблицам, полученным эмпирическим путем) приходится уточнять параметры. В ситуации, когда на систему существенное влияние оказывают внешние факторы (изменение нагрузки, температуры окружающей среды и т. п.) или с течением времени изменяются параметры самого объекта, типовые регуляторы не всегда обеспечивают требуемое качество переходного процесса.

В работе представлен метод расчета параметров ПИД-регулятора для одного типа объектов второго порядка, основанный на методе локализации, который разработан на кафедре автоматики НГТУ [6]. Достоинством этого метода является возможность обеспечить робастное управление объектами с нестационарными параметрами при действии внешних возмущений.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем рассматривать объект управления, модель которого представлена в виде передаточной функции

$$W_0(p) = \frac{y}{u} = \frac{K_0}{p^2 + a_1 p + a_2},$$

где y – выходная переменная; u – управление; K_0 – коэффициент передачи объекта; параметры a_1 и a_2 известны не точно и могут медленно (по сравнению с темпом переходных процессов) изменяться произвольным образом в пределах 10 % от номинальных значений. Неопределенность параметров объекта приближает задачу синтеза системы управления к ре-

¹ Статья получена 24 января 2013 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 7.559.2011.

альной, но затрудняет расчет параметров регулятора, который располагается в прямом канале. Кроме того, на объект может действовать внешнее неконтролируемое возмущение M .

Передаточная функция ПИД-регулятора, связывающая ошибку управления Δ и управляющее воздействие имеет вид

$$W_p(p) = \frac{u}{\Delta} = K_p + \frac{K_i}{p} + \frac{K_d p}{\tau p + 1}, \quad (1)$$

где τ – инерционность реального дифференцирующего звена.

Требования к качеству переходных процессов в системе заданы в виде желаемой передаточной функции

$$W_*(p) = \frac{y}{v} = \frac{c_2}{p^2 + c_1 p + c_2}, \quad (2)$$

здесь v – входное воздействие на систему.

Необходимо определить параметры типового ПИД-регулятора (K_p, K_i, K_d), обеспечивающего в системе свойства, соответствующие желаемой передаточной функции (2), и независимость от нестационарных параметров объекта.

2. МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Особенность метода локализации заключается в использовании производных выходной переменной объекта (включая старшую) для формирования управляющего воздействия [7]. При этом с целью оценки производных используется дифференцирующий фильтр. Передаточная функция дифференцирующего фильтра (ДФ) второго порядка имеет вид

$$W_{df}(p) = \frac{1}{\tau_f^2 p^2 + 2\tau_f p + 1},$$

где τ_f – постоянная времени ДФ.

Структурная интерпретация системы, основанной на методе локализации, для линейного объекта второго порядка показана на рис. 1.

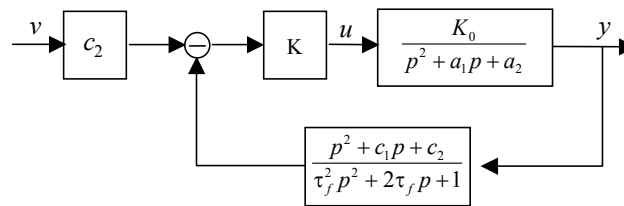


Рис. 1. Структурная интерпретация метода локализации

Здесь коэффициенты c_1 и c_2 соответствуют параметрам желаемой передаточной функции (2).

Обозначим передаточную функцию обратной связи (рис. 1)

$$W_{os}(p) = \frac{p^2 + c_1 p + c_2}{\tau_f^2 p^2 + 2\tau_f p + 1} \quad (3)$$

и, используя структурные преобразования, перенесем (3) в прямой канал. В результате получим преобразованную систему, изображенную на рис. 2.

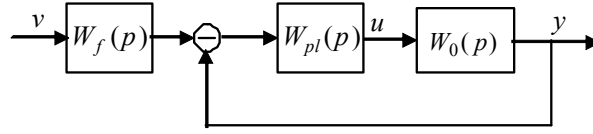


Рис. 2. Структурная схема преобразованной системы

Здесь введены следующие обозначения:

$$W_f(p) = \frac{c_2(\tau_f^2 p^2 + 2\tau_f p + 1)}{p^2 + c_1 p + c_2} \quad (4)$$

и передаточная функция регулятора на основе метода локализации

$$W_{pl}(p) = \frac{K(p^2 + c_1 p + c_2)}{\tau_f^2 p^2 + 2\tau_f p + 1}. \quad (5)$$

Определим передаточную функцию замкнутой системы

$$W_s(p) = \frac{W_f(p)W_{pl}(p)W_0(p)}{1 + W_{pl}(p)W_0(p)} \quad (6)$$

и, подставив в выражение (6) значения функций (3), (4) и (5), получим

$$W_s(p) = \frac{c_2 K K_0 (\tau_f^2 p^2 + 2\tau_f p + 1)}{(\tau_f^2 p^2 + 2\tau_f p + 1)(p^2 + a_1 p + a_2) + K K_0 (p^2 + c_1 p + c_2)}. \quad (7)$$

При идеальном дифференцировании, когда $\tau_f = 0$, вместо (7) имеем

$$W_s(p) = \frac{c_2 K K_0}{(p^2 + a_1 p + a_2) + K K_0 (p^2 + c_1 p + c_2)}.$$

Будем теперь увеличивать коэффициент усиления регулятора K и рассмотрим предельный случай, когда он равен бесконечности. В пределе поведение системы (7) описывает передаточная функция

$$W_s(p) = \frac{c_2}{p^2 + c_1 p + c_2}. \quad (8)$$

Как видно, выражение (8) соответствует желаемой передаточной функции (2). Следовательно, процессы в замкнутой системе с таким регулятором будут обладать требуемыми свойствами независимо от изменения параметров объекта a_1 и a_2 , что является отличительной особенностью метода локализации.

3. СВОЙСТВА СИСТЕМЫ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

Рассмотрим теперь систему с типовым регулятором (рис. 1) и преобразуем передаточную функцию ПИД-регулятора (1) к виду

$$W_p(p) = \frac{(K_d + \tau K_p)p^2 + (K_p + \tau K_i)p + K_i}{p(\tau p + 1)}. \quad (9)$$

Введем следующие обозначения:

$$K = K_d + \tau K_p, \quad \tilde{n}_1 = \frac{K_p + \tau K_i}{K_d + \tau K_p}, \quad \tilde{n}_2 = \frac{K_i}{K_d + \tau K_p}. \quad (10)$$

Следует заметить, что с учетом (10) передаточная функция ПИД-регулятора (9) принимает форму

$$W_p(p) = \frac{K(p^2 + c_1 p + c_2)}{p(\tau p + 1)}. \quad (11)$$

Как видим, описание типового регулятора (11) аналогично передаточной функции регулятора, основанного на методе локализации (5).

Одним из приемов улучшения качества процессов в системе с типовым ПИД-регулятором является добавление на вход системы предварительного фильтра [8]. Если в качестве такого фильтра использовать (4) с учетом $\tau_f = 0$

$$W_f(p) = \frac{c_2}{p^2 + c_1 p + c_2}, \quad (12)$$

то структура системы принимает вид, представленный на рис. 2.

Исследуем свойства замкнутой системы, полагая, что дифференциальная составляющая типового регулятора (11) может быть реализована точно (т. е. полагаем $\tau = 0$). В этом случае передаточная функция системы принимает форму

$$W_s(p) = \frac{c_2 K K_0}{(p^2 + a_1 p + a_2) + K K_0 (p^2 + c_1 p + c_2)}. \quad (13)$$

Как и в случае систем на основе метода локализации будем увеличивать коэффициент усиления регулятора K и в пределе при $K \rightarrow \infty$ вместо (13) получим вырожденную систему вида (8).

Таким образом, в пределе передаточная функция системы (13) соответствует желаемой функции (2) и не зависит от изменяющихся параметров объекта. Не трудно показать также, что она не будет зависеть и от действующих на объект внешних возмущений.

4. ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Поскольку структура системы с ПИД-регулятором соответствует структурной интерпретации линейной системы, основанной на методе локализации (рис. 3), то для расчета параметров типового регулятора используем известные рекомендации, полученные для этого метода [7].

При этом расчет ПИД-регулятора можно представить в виде процедуры.

1. В зависимости от требований к точности регулирования рассчитывается коэффициент усиления K по соотношению $KK_0 \geq (20 \dots 100)$, что соответствует статической ошибке $\delta^0 \leq (0,05 \dots 0,01)$.

2. Выбирается численное значение постоянной времени дифференцирующего звена τ , которая должна быть на порядок меньше постоянной времени желаемой передаточной функции (2).

3. С учетом выражения (10) значения коэффициентов типового регулятора рассчитываются на основе следующих соотношений:

$$K_i = K c_2, \quad K_p = K c_1 - \tau K_i, \quad K_d = K - \tau K_i. \quad (14)$$

4. С целью улучшения качества переходного процесса в замкнутой системе на вход добавляется предварительный фильтр вида (12).

Отметим, что рассчитанный по данной процедуре типовой регулятор позволяет обеспечить в системе требуемые свойства, заданные желаемой передаточной функцией (2) и обладает свойством грубости по отношению к параметрам объекта.

5. ПРИМЕР

Для объекта, передаточная функция которого имеет вид $W_0(p) = \frac{10}{p^2 - 3p + 10}$, необходимо рассчитать ПИД-регулятор, обеспечивающий в системе переходный процесс в соответствии с желаемой передаточной функцией $W_*(p) = \frac{100}{p^2 + 20p + 100}$.

Параметры регулятора при значении $K = 20$ и $\tau = 0,01$, рассчитанные по предложенной процедуре, равны: $K_p = 380$, $K_i = 2000$ и $K_d = 16,2$. Входное воздействие подается через предварительный фильтр (12).

Свойства замкнутой системы исследовались путем имитационного моделирования в среде MatLab. Результаты моделирования процесса на выходе объекта, желаемого переходного процесса и процесса на выходе замкнутой системы с регулятором представлены на рис. 3.

Как видно, желаемый переходный процесс и переходный процесс в системе с ПИД-регулятором полностью совпали.

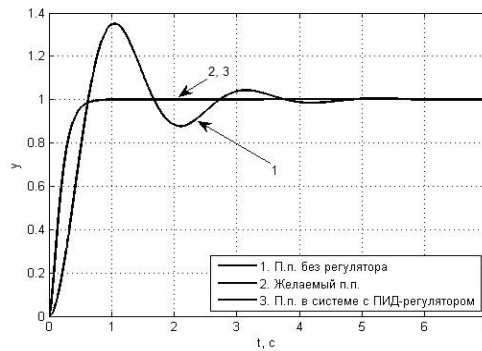


Рис. 3. Изменение выходной переменной

На рис. 5 и 6 представлены результаты исследования влияния параметров объекта и возмущения соответственно на качество переходного процесса в системе. С этой целью параметры объекта (a_1 , a_2 и K) последовательно скачкообразно изменялись в пределах $\pm 10\%$.

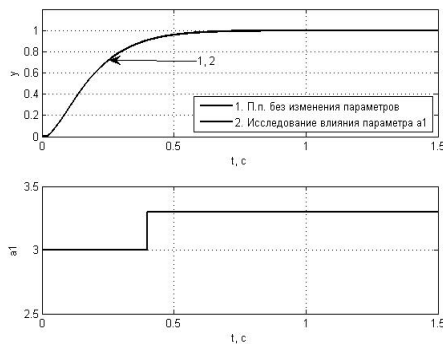


Рис. 4. Влияния параметра a_1

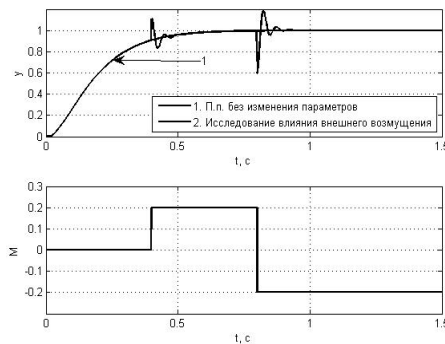


Рис. 5. Влияние внешнего возмущения

Исследования показали, что изменение параметров объекта не влияет на качество переходного процесса в системе. Возмущения, приложенные в различные моменты времени, достаточно быстро отрабатываются регулятором, который имеет эквивалентный достаточно большой для системы коэффициент усиления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена оригинальная процедура расчета ПИД-регуляторов для объектов второго порядка на основе метода локализации по процедуре, которая позволяет получить робастную систему управления с требуемым качеством переходных процессов независимо от нестационарных параметров объекта и действия внешних возмущений. При этом входное воздействие на систему рекомендуется подавать через специальный предварительный фильтр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Никулин Е.Ф. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем: учеб. пособие для вузов / Е.Ф. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 631 с.
- [2] Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации / В.В. Денисенко // СТА. – 2006. – № 4. – С. 66–74.
- [3] ПИД-регулирование (ПИД-регулятор) на практических примерах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pidcontrollers.narod.ru/pidregulator/chapter3page18.html>. Дата обращения: 23.03.13.
- [4] Шляйхер М. Техника автоматического регулирования для практиков / М. Шляйхер. – Москва: JUMO, 2006. – 273 с.
- [5] Энциклопедия АСУ ТП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bookasutp.ru/>. Дата обращения: 23.03.13.
- [6] Востриков А.С. Синтез систем регулирования методом локализации / А.С. Востриков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 209 с.
- [7] Востриков А.С. Теория автоматического регулирования / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – М.: Высшая школа, 2006. – 368 с.
- [8] Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

Французова Галина Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики НГТУ. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления. Имеет более 150 публикаций, в том числе 5 учебных пособий. E-mail: frants@sintez.nstu.ru.

Земцов Никита Сергеевич, магистрант первого года обучения кафедры автоматики НГТУ. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления. E-mail: z-nik@yandex.ru.

G.A. Frantsuzova, N.S. Zemtsov

Application of the localization method for calculation of robust PID-controllers

The problem of calculating the PID-controllers parameters has been considered. The decision based on localization method is offered in paper. The obtained method provides desired properties for linear second-order systems. The object parameters don't influence on transient quality and external disturbance is quickly eliminated.

Key words: PID-controller, localization method, linear second-order system, roughness.