УДК 681.513

А.А. Воевода, К.М. Бобобеков

Активная идентификация параметров ПИ-регулятора в системе автоматического управления неустойчивым объектом первого порядка

Предлагается алгоритм активной идентификации параметров регулятора, стабилизирующего одноканальный неустойчивый объект первого порядка, входящего в систему управления. Для управления неустойчивым объектом рассчитан регулятор полиномиальным методом. Ввиду требования астатизма выбран пропорционально-интегральный регулятор. Суть методики состоит в подаче периодического сигнала (синусоиды) определенной частоты и амплитуды. Для определения параметров регулятора приведено семейство годографов Найквиста для замкнутой системы при значениях параметров регулятора в заданном диапазоне. Амплитуда и фаза установившегося значения выходного сигнала используются для построения специальной номограммы, которая дает возможность определять параметры регулятора.

Ключевые слова: активная идентификация, система автоматического управления, неустойчивый объект, пропорционально-интегральный регулятор, тестовый синусоидальный сигнал, переходный процесс, псевдогодограф Найквиста, специальная номограмма.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-100-104

Задача идентификации параметров системы автоматического управления (САУ) довольно актуальная. С этой проблемой можно познакомиться, например, по монографиям [1–4]. Идентификация параметров объекта или параметров САУ может решаться при помощи как пассивных методов [5], так и активных методов [1–5], если это допустимо. В преобладающем количестве работ, исследующих активные методы, как правило, предполагается использование статистических методов. Альтернативный подход – использование тестовых воздействий. В настоящее время активно развиваются методы планирования таких воздействий на объект (САУ), при которых достигается оптимальное решение задачи идентификации [1, 5–7]. Идентификация параметров неустойчивого объекта усложняется из-за того, что исследование приходится проводить для замкнутой системы, включающей регулятор. Данная работа продолжает исследования по активной идентификации параметров системы, включающей неустойчивый объект, при помощи периодических тестовых сигналов.

В [8] исследуется задача активной идентификации параметров неустойчивого объекта первого порядка, входящего в САУ, включающего пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, который можно рассматривать как некоторое приближение к модели реального неустойчивого объекта.

К таким системам можно отнести системы, включающие пропорционально-дифференцирующий (ПД) регулятор и неустойчивый объект второго порядка с интегратором $W_{obj}(s) = k/s(1 - \tau s)$. Задачи идентификации параметров регулятора для вышеуказанных систем совершенно идентичны. К последнему классу систем можно отнести, например, управление вертикальным взлетом самолета [9, Р. 434] или управление движением протеза ноги человека [9, Р. 545].

Для определения параметров объекта построена специальная номограмма по результатам прохождения тестового сигнала типа меандра со специально подобранными значениями амплитуды и частоты через систему управления. Для построения номограммы, связывающей параметры объекта и значения выходного сигнала в фиксированные моменты времени, моделировалась система при различных значениях параметров объекта. При помощи этой номограммы имеется возможность определения параметров объекта с ошибкой, не превышающей 5–7%.

Методика, предложенная в [8], далее была модифицирована для более сложного неустойчивого объекта второго порядка с интегратором, условно введенным в объект, и регулятором второго порядка. При помощи этой методики идентифицируются два параметра объекта при подаче на вход тестового сигнала типа синусоиды. В [10] решается задача идентификации двух параметров объекта при подаче на вход тестового сигнала типа меандра и наконец в [11] – идентификация двух параметров объекта при подаче на вход тестового сигнала типа наложение двух меандров. В [10, 11] в качестве объекта взят перевернутый маятник на тележке по каналу «задание – угол отклонения».

Задача активной идентификации параметров более сложного объекта с одним входом и двумя выходами решена в [12]. Примером такого объекта может служить перевернутый маятник на тележке. Для определения параметров объекта построены специальные номограммы и таблицы. В таблицы заносили значения углового положения маятника и положение тележки, измеренные в фиксированные моменты времени, после пуска САУ при фиксированном начальном угловом положении маятника. Такие эксперименты проведены для ряда значений трех параметров объекта, которые необходимо идентифицировать. По этим таблицам были построены номограммы, связывающие значения идентифици-

руемых параметров объекта с измеренными значениями переходных процессов.

В некоторых случаях требуется умение оценить параметры регулятора, входящего в САУ. В данной работе предлагается активный метод решения такой задачи для системы стабилизации неустойчивого объекта, существенно проще модели перевернутого маятника, при помощи ПИ-регулятора. Далее предполагается развитие этой методики уже для модели перевернутого маятника. В отличие от работ [8, 10, 11, 13, 14], где в качестве тестовых сигналов использовались сигналы типа меандров и их комбинаций, здесь используется синусоидальный тестовый сигнал. Параметры тестовой синусоиды определяются на основе анализа годографа Найквиста замкнутой системы. Этот годограф ввиду специфического использования для анализа замкнутой системы в работе называется псевдогодографом Найквиста [14]. Анализ состоит в выборе такой частоты, при которой параметры псевдогодографа Найквиста наиболее чувствительны к вариациям параметров регулятора. Далее строится специальная номограмма, «связывающая» амплитуду и фазу установившегося значения выходного сигнала системы с конкретными параметрами ПИ-регулятора. Для этого необходимо провести серию экспериментов, состоящую в подаче тестовой синусоиды на систему при различных значениях параметров регулятора. Работоспособность предлагаемого алгоритма проверена посредством измерения параметров синусоиды на выходе САУ, нанесения соответствующей точки на диаграмму и определения искомых параметров регулятора.

Постановка задачи

В данной работе решается задача активной идентификации параметров регулятора

$$W_r(s) = (\beta s + \alpha) / s,$$

охваченного обратной связью с неустойчивым объектом первого порядка

$$W_{obj}(s) = k / (1 - \tau s),$$

параметры которого считаем известными. В передаточной функции регулятора α и β -параметры, подлежащие определению (идентификации), а в передаточной функции объекта k и τ – известные параметры объекта. Соответствующая структурная схема САУ, или, если воспользоваться рекомендациями ГОСТ 2.701–76 и стандартом СЭВ 651–77, более корректно назвать ее алгоритмической структурной схемой [15, 16], приведена на рис. 1, где v – задание, y – выходной сигнал системы, e – отклонение выходного сигнала от задающего сигнала.

Рис. 1. Операторно-структурная схема системы

Запишем передаточную функцию замкнутой системы (ПФЗС) [17, 18]:

$$W_{зам}(s) = \frac{W_r(s)W_{obj}(s)}{1 + W_r(s)W_{obj}(s)} = \frac{(\alpha + \beta s) \frac{k}{1 - \tau s}}{1 + \frac{(\alpha + \beta s) \frac{k}{1 - \tau s}}{s}} = \frac{k\beta s + k\alpha}{-\tau s^2 + (1 + k\beta)s + k\alpha}. \quad (1)$$

Знаменатель передаточной функции системы (1) (характеристический полином замкнутой системы – ХПЗС) – полином второй степени. Зададим полюса системы равными, например, $\{-1, -1\}$:

$$\tau s^2 - (1 + k\beta)s - k\alpha = s^2 + 2s + 1.$$

Пусть значения параметров объекта следующие: $k=2$ и $\tau=1$. В статье используется описание системы в относительных переменных и с относительным временем. После подстановки параметров объекта

$$s^2 - (1 + 2\beta)s - 2\alpha = s^2 + 2s + 1 \quad (2)$$

определим параметры регулятора полиномиальным методом [19, 20]:

$$\alpha = -0,5, \quad \beta = -1,5. \quad (3)$$

Область допустимых значений параметров регулятора (α, β) считаем известной и, по крайней мере, она принадлежит области $\alpha < 0, \beta < 0,5$, что нетрудно получить из анализа характеристического полинома замкнутой системы:

$$s^2 - (1 + 2\beta)s - 2\alpha.$$

Для иллюстрации методики идентификации параметров регулятора в статье рассмотрен случай принадлежности параметров регулятора интервалам

$$\alpha \in [-0,25; -1,25], \quad \beta \in [-1; -2],$$

которые соответствуют прямоугольной области в плоскости параметров регулятора. В общем случае область может быть и непрямоугольной, что не усложняет процедуру идентификации. На рис. 2 приведены переходные функции в системе для нескольких значений параметров регулятора. Параметры регулятора выберем из указанных интервалов, например, с равномерным шагом:

$$\begin{cases} \alpha = \{-0,25; -0,5; -0,75; -1; -1,25\}, \\ \beta = \{-1; -1,25; -1,5; -1,75; -2\}. \end{cases} \quad (4)$$

Переходные функции в системе для указанных значений параметров регулятора, часть из которых приведена на рис. 2, имеют колебательный характер. Переходная функция при значениях параметров регулятора (3) соответствует передаточной функции замкнутой системы

$$W_{зам}(s) = \frac{3s + 1,5}{s^2 + 2s + 1,5},$$

в отличие от других допустимых значений выделена толщиной линии.

Далее перейдем к решению задачи определения параметров регулятора по результатам активного эксперимента.

Рис. 2. Переходные функции в системе для нескольких значений параметров регулятора

Построение специальной номограммы для идентификации параметров регулятора

В отличие от работ [8, 10–13, 21], в которых в качестве тестовых воздействий использован периодический сигнал типа меандра, двойного меандра или синусоиды, в данной работе используется синусоидальный сигнал для оценки параметров регулятора. Значения параметров регулятора (4) соответствуют точкам сетки на рис. 3, пронумерованным от 1 до 25.

Рис. 3. Вариация параметров регулятора при $\alpha \in [-0,25; -1,25]$ и $\beta \in [-1; -2]$

С целью выбора частоты тестового сигнала построено семейство псевдогодографов Найквиста (годограф Найквиста замкнутой системы), которое приведено на рис. 4, за исключением начальных участков, соответствующих частотному интервалу $\omega = [0; \approx +0,4)$,

которые не несут полезной информации. Семейство годографов построено для параметров регулятора в соответствии с рис. 3, что соответствует двадцати пяти годографам.

На рис. 4 семейство годографов, выходящих из одной точки при значениях параметров

$$\beta = -1 \text{ и } \alpha = \{-0,25; -0,5; -0,75; -1; -1,25\},$$

отмечены соответствующей надписью. Оставшиеся четыре семейства могут быть оснащены аналогичными надписями. Точки годографов, соответствующие $\omega = 1,4$ рад/с, соединены ломаными линиями. Из рис. 4 следует, что при $\omega = 1,4$ рад/с линии до-

вольно хорошо «разошлись» (вариация существенная) и, таким образом, можно проводить активную идентификацию при выбранной частоте. Это соответствует сигналу с периодом $T = 4,49$ с. Выбор амплитуды тестового сигнала в общем случае зависит от уровня шумов. В данной задаче предполагаем, что шумы незначительные, и поэтому выберем амплитуду равной единице. Переходный процесс заканчивается примерно через 7 с (рис. 5). Необходимая информация о параметрах регулятора, как следует из рис. 4, может быть получена в результате измерения амплитуды и сдвига по фазе выходного сигнала.

Рис. 4. Семейство псевдогодографов Найквиста при значениях параметров регулятора, соответствующих (4)

Строим номограмму, в которой по оси X откладываются значения амплитуды выходного сигнала A , а по оси Y – значения фазы φ (рис. 6). Также на рис. 5 приведена входная синусоида, что позволяет вычислять фазу φ выходного сигнала.

Рис. 5. Переходные функции в системе при подаче входной синусоиды

На плоскости « A – φ » в результате замеров получаем 25 точек, что позволяет построить номограмму для определения значений параметров регулятора (α, β), которые лежат в пределах $\alpha \in [-0,25; -1,25]$ и $\beta \in [-1; -2]$.

Пример оценки параметров регулятора

Покажем, каким образом используется номограмма на рис. 6 в процессе идентификации параметров регулятора. Допустим, параметры регулятора соответствуют значениям $\alpha = -0,85$ и $\beta = -1,16$. На систему подаем синусоидальный сигнал с параметрами

$$A = 1, \quad \omega = 1,4 \text{ рад/с.}$$

После окончания переходного процесса измеряем амплитуду и сдвиг по фазе выходного сигнала:

$$(A, \varphi) = (2, -35^\circ).$$

Эти значения откладываем по оси A и φ , что соответствует точке K (рис. 6). Используя интерполяцию, получаем $\alpha = -0,875$ и $\beta = -1,16$. Идентифицированные значения параметров регулятора отличаются от истинных значений не более чем 5–8%.

Рис. 6. Номограмма для определения параметров регулятора по измеренным значениям A и φ

Задача активной идентификации параметров регулятора решена.

Заключение

В данной работе в отличие от [8], где исследуются методики активной идентификации параметров неустойчивого объекта, входящего в САУ, приведен метод активной идентификации параметров регулятора, стабилизирующего неустойчивый объект. Суть метода состоит в подаче тестового периодического воздействия с частотой, при которой система управления наиболее чувствительна к изменениям параметров регулятора. Для определения частоты тестового сигнала было построено семейство псевдогодографов Найквиста замкнутой системы, при которой годограф наиболее чувствителен к изменению параметров регулятора. Амплитуда и фаза выходного сигнала измеряются при различных значениях параметров регулятора. По результатам измерения построена специальная номограмма для определения параметров регулятора. Приведен пример, демонстрирующий процедуру идентификации параметров регулятора по предлагаемой методике.

Предложенная методика идентификации может быть обобщена для более сложных объектов, что, по-видимому, потребует усложнения тестового сигнала. Кроме того, следует развить предложенную методику активной идентификации с целью поиска оптимальной в смысле минимума дисперсии оценки оцениваемых параметров.

Литература

1. Mehra R.K. Optimal Input for Linear System Identification // IEEE Trans. Autom. Control – 1974. – Vol. 19, No. 3. – P. 192–200.
2. Льюнг Л. Идентификация систем: теория для пользователя / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
3. Ljung L. System identification. Theory for the User. – Second Edition – N.J.: PTR Prentice Hall, 1999. – 315 p.
4. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления: учеб. пособие. – Самара: Изд-во СГТУ, 2009. – 136 с.
5. Бильфельд Н.В. Использование пассивного эксперимента при идентификации объектов управления с изменяющимися свойствами // Молодой ученый. – 2013. – № 8 (55). – С. 77–82.
6. Трошина Г.В. Активная идентификация линейных динамических дискретных стационарных объектов во временной области / Г.В. Трошина: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2007. – 171 с.
7. Трошина Г.В. О комплексе программ для решения задачи идентификации линейных динамических дискретных стационарных объектов // Сборник научных трудов НГТУ (Новосибирск). – 2008. – № 4 (54). – С. 39–46.
8. Troshina G.V. Active identification of parameters for the unstable object / G.V. Troshina, A.A. Voevoda, K.M. Bobobekov // XI Междунар. форум по стратегическим технологиям, IFOST–2016: Новосибирск, 1–3 июня, 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 594–596.
9. Dorf R.C. Modern control systems – Twelfth Edition / R.C. Dorf, R.H. Bishop. – Harlow: PIARSON, 2011. – 1111 p.
10. Troshina G.V. The periodic signals application for the estimation of the unstable object parameters / G.V. Troshina, A.A. Voevoda, K.M. Bobobekov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference series. – 2017. – Vol. 803. – Art. 012166 (5 p.). – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012166/pdf> (дата обращения: 01.11.2017).
11. Бобобеков К.М. Идентификация параметров линейаризованной модели перевернутого маятника: тестовый сигнал – двойной меандр // Сборник научных трудов. – Новосибирск, 2016. – № 3 (85). – С. 7–17.
12. Troshina G.V. Unstable object parameters estimation with one Input and two outputs in automatic control system / G.V. Troshina, A.A. Voevoda, K.M. Bobobekov // 18th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM–2017: proc., Altai, Erlagol, June 29–July 3, 2017. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – P. 138–141.
13. Voevoda A.A. Active identification of the inverted pendulum control system / A.A. Voevoda, G.V. Troshina // Proc. of the 18th Intern. conf. on soft computing and measurements (SCM'2015). – Sankt-Peterburg: LETI Publ., 2015. – Vol. 1. – P. 153–156.
14. Бобобеков К.М. Псевдо-годограф Найквиста // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2016. – № 2 (84). – С. 49–57.
15. Малышенко А.М. Сборник тестовых задач по теории автоматического управления / А.М. Малышенко, О.С. Вадутов. – СПб.: ЛАНЬ, 2016. – 368 с.
16. Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. – М.: Наука, 1979. – 336 с.
17. Doyle J.C. Feedback control theory / J.C. Doyle, B. Francis, A. Tannenbaum. – London: Macmillan Publishing, 1990. – 198 p.
18. Ким Д.П. Теория автоматического управления. – Т. 1: Линейные системы. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
19. Воевода А.А. Полиномиальный метод синтеза: стабилизация перевернутого маятника / А.А. Воевода, Е.В. Шоба // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2012. – № 2 (68). – С. 15–30.
20. Воевода А.А. Расчет параметров регулятора для стабилизации перевернутого маятника по углу отклонения / А.А. Воевода, К.М. Бобобеков // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск. – 2016. – № 3 (85). – С. 18–32.
21. Troshina G.V. The parameters determination of the inverted pendulum model in the automatic control system /

G.V. Troshina, A.A. Voevoda, K.M. Bobobekov // XIII междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП–2016, Новосибирск, 3–6 октября 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 180–182.

Воевода Александр Александрович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматики
Новосибирского гос. технического ун-та (НГТУ)
Тел.: +7-913-922-30-92
Эл. почта: Voevoda@ucit.ru

Бобобеков Курбонмурод Мулломиракович

Аспирант каф. автоматики НГТУ
Тел.: +7-953-885-32-23
Эл. почта: kurbon_111@mail.ru

Voevoda A.A., Bobobekov K.M.

Active identification of PI-regulator parameters in the automatic control system for an unstable first-order object

The algorithm to identify parameters of the regulator stabilizing the single channel unstable first-order object incoming in the control system is proposed. In order to control an unstable object, the regulator was calculated using the polynomial method. Due to the requirements of astaticism a proportional-integral regulator was chosen. The main point of the method consists in injecting a periodic signal (sinusoids) of a certain frequency and amplitude. To determine the regulator parameters a family of Nyquist hodographs was proposed for a closed system at the regulator parameters values within the specified range. The amplitude and phase of the steady-state value of the output signal are used to construct a special nomogram, which makes possible to determine the regulator parameters.

Keywords: active identification, automatic control system, unstable object, proportional-integral regulator, transient, Nyquist pseudohodograph, test sinusoidal signal, special nomogram.