

УДК 681.513

АКТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА ПО УГЛУ ПРИ ПОДАЧЕ НА ВХОД СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ*

К.М. БОБОБЕКОВ¹, А.А. ВОЕВОДА²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: kurbon_111@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики. E-mail: ucit@ucit.ru

Рассматривается одноканальная система с линейным неустойчивым объектом третьего порядка, включающим два параметра и представляющим собой перевернутый маятник с искусственно введенным интегратором. Для этого объекта рассчитывается регулятор полиномиальным методом синтеза. Проводится активная идентификация параметров объекта с целью оценивания его параметров. Для оценки параметров объекта на вход системы подается по очереди синусоидальный сигнал с частотами ω_1 и ω_2 и измеряется амплитуда выходного сигнала. Эти амплитуды используются для определения параметров объекта при помощи двух диаграмм. Для построения этих диаграмм произведено исследование семейства годографов Найквиста замкнутой системы при вариации параметров объекта относительно базовых значений. В области частот 2.5 рад/с амплитуды годографов однозначно определяют значения параметров объекта: коэффициента усиления k и инерционности b . В области частотой 10 рад/с годографы склеиваются и практически зависят только от коэффициента усиления. Первая диаграмма – зависимость амплитуды от коэффициента усиления. Вторая диаграмма – зависимость амплитуды от коэффициента усиления и инерционности.

Ключевые слова: активная идентификация, перевернутый маятник, система управления, гармоническое воздействие, оценка параметров маятника, объект управления, вариации параметров объекта, годографы Найквиста

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-2-21-37

ВВЕДЕНИЕ

Идентификация параметров неустойчивого объекта затруднительна. Поэтому необходимо такого типа объекты рассматривать совместно с регулятором, обеспечивающим устойчивость системы «объект–регулятор». В поста-

* Статья получена 29 марта 2016 г.

новке задаче оговаривается заранее, что параметры объекта лежат в заданных интервалах. На первом этапе рассчитывается регулятор при значениях параметров из середины допустимых интервалов (которые будем называть *базовыми значениями*). Регулятор рассчитывается полиномиальным методом синтеза, [3, 4, 6, 7]. Регулятор следует рассчитать так, чтобы устойчивость системы сохранялась при любых допустимых значениях параметров. Кроме того, предполагается, что параметры могут меняться достаточно медленно и непрерывно по сравнению со временем переходного процесса системы. В данной работе предлагается методика определения параметров линеаризованного перевернутого маятника (выходная переменная – угловое положение маятника), состоящая в следующем. На вход системы «маятник–регулятор» подаем синусоиду заданной частоты и измеряем амплитуду выходного сигнала в установившемся режиме. Затем эту же процедуру проделываем с синусоидой другой частоты. Значения двух амплитуд используются для определения параметров объекта по специальным номограммам. Эти номограммы строятся следующим образом. Построим семейство годографов Найквиста для всей замкнутой системы для целого набора параметров объекта из допустимых интервалов (сетка значений). В результате анализа данного семейства годографов выбираем частоты, на которых можно проследить вариацию изменения годографов на выбранных частотах. Обозначим их ω_1 и ω_2 . Выбранные точки позволяют построить искомые номограммы

1. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим описание перевернутого маятника на тележке [1, 2] в линейном приближении по одной координате θ и выберем определенные значения параметров объекта. Модель объекта в общем случае имеет вид

$$\left(1 - \frac{ml}{M_t L}\right) \ddot{\theta} - \frac{g}{L} \theta = -\frac{1}{M_t L} u. \quad (1)$$

Линеаризация осуществлена в окрестности точки $\theta = 0$ и $\dot{\theta} = 0$ и обозначена через $\alpha^{-1} = 1 - (ml / M_t L)$. Тогда уравнение (1) преобразуется к виду

$$s^2 \theta(s) - b \theta(s) = -\frac{\alpha}{M_t L} u(s), \quad (2)$$

где $b = \alpha g / L$. Структурная схема, соответствующая уравнению (2), приведена на рис. 1. Как следует, объект неустойчивый: в правой полуплоскости име-

ется один корень, равный $+\sqrt{b}$. Уточним параметры передаточной функции для случая, когда $I = 0$:

$$\left. \begin{aligned} L = (I + ml^2) / ml = l, \quad \alpha^{-1} = 1 - \frac{ml}{M_l L} = 1 - \frac{m}{M_l} = \frac{M}{M+m}, \quad \alpha = \frac{M+m}{M}, \\ b = \frac{\alpha g}{L} = \frac{M+m}{M} \frac{g}{l}, \quad k_\theta = \frac{\alpha}{M_l L} = \frac{M+m}{M} \frac{1}{M_l L} = \frac{M+m}{M} \frac{1}{(M+m)L} = \frac{1}{Ml} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

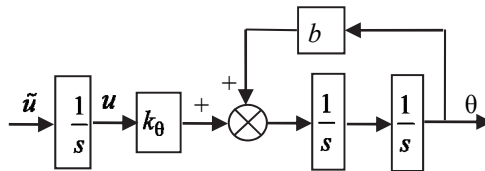


Рис. 1. Структурная схема объекта

Приведем передаточную функцию объекта

$$W \left[\frac{\theta(s)}{u(s)} \right] = - \frac{k_\theta}{s^2 - b}. \quad (4)$$

Далее, вместо k_θ будем писать k . Для обеспечения астатизма в систему введем интегратор, который условно отнесем к объекту. Таким образом, передаточная функция объекта принимает вид

$$W \left[\frac{\theta(s)}{\tilde{u}(s)} \right] = - \frac{k}{s^3 - bs}. \quad (5)$$

В следующем разделе для данного объекта рассчитаем регулятор.

2. РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА

Рассчитываем регулятор для условного объекта, в который включен интегратор (5). По общей методике степень регулятора на единицу меньше (рис. 2), т. е. выбираем регулятор (W_R) второго порядка.

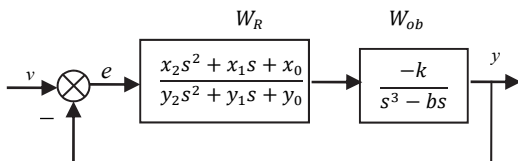


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Необходимо определить коэффициенты числителя и знаменателя регулятора:

$$W_R(s) = \frac{x(s)}{y(s)} = \frac{x_2 s^2 + x_1 s + x_0}{y_2 s^2 + y_1 s + y_0}. \quad (6)$$

Передаточная функция системы принимает вид

$$W_{sys} = \frac{x(s) \cdot n(s)}{x(s) \cdot n(s) + y(s) \cdot d(s)}. \quad (7)$$

Запишем *характеристический полином замкнутой системы* (ХПЗС) в предположении, что ее полюса равны $-\tau^{-1}$, т. е. ХПЗС равен $(\tau s + 1)^5$. Следовательно, можем записать

$$d(s) \cdot y(s) + n(s) \cdot x(s) = (\tau s + 1)^5. \quad (8)$$

Значения полиномов $d(s)$, $y(s)$, $n(s)$ и $x(s)$ подставим из (5) и (6) в (8):

$$\begin{aligned} (s^3 - bs)(y_2 s^2 + y_1 s + y_0) + (-k)(x_2 s^2 + x_1 s + x_0) = \\ = \tau^5 s^5 + 5\tau^4 s^4 + 10\tau^3 s^3 + 10\tau^2 s^2 + 5\tau s + \tau^0 s^0. \end{aligned}$$

Раскроем скобки и запишем:

$$\begin{aligned} y_2 s^5 + y_1 s^4 + (-by_2 + y_0)s^3 + (-by_1 - kx_2)s^2 + (-by_0 - kx_1)s - kx_0 = \\ = \tau^5 s^5 + 5\tau^4 s^4 + 10\tau^3 s^3 + 10\tau^2 s^2 + 5\tau s + 1s^0. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение (9) можно записать в матричном виде

$$A \cdot x = b,$$

или

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b & 0 & -k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b & 0 & -k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_2 \\ y_1 \\ y_0 \\ x_2 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau^5 \\ 5 \cdot \tau^4 \\ 10 \cdot \tau^3 \\ 10 \cdot \tau^2 \\ 5 \cdot \tau^1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Отсюда определяем вектор x :

$$x = A^{-1} \cdot b.$$

Откуда

$$x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b & 0 & -k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b & 0 & -k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau^5 \\ 5\tau^4 \\ 10\tau^3 \\ 10\tau^2 \\ 5\tau^1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

В нашем случае предполагаем, что параметры маятника $l = 4$ м, $M = 0.25$ кг, $m = 0.25$ кг, что при подстановке в (4) дает $k = 1$, $b = 5$. Зададим полюса замкнутой системы $\{-5, -5, -5, -5, -5\}$, т. е. выбрали $\tau = 0.2$. Это позволяет нам найти вектор x :

$$x = \begin{pmatrix} y_2 \\ y_1 \\ y_0 \\ x_2 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0003 \\ 0.008 \\ 0.0815 \\ -0.44 \\ -1.4075 \\ -1.0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Подставим параметры регулятора в (6):

$$W_R(s) = \frac{x(s)}{y(s)} = \frac{x_2 s^2 + x_1 s + x_0}{y_2 s^2 + y_1 s + y_0} = \frac{-0.44s^2 - 1.4075s - 1}{0.0003s^2 + 0.008s + 0.0815}. \quad (13)$$

Определяем передаточную функцию системы по формулам (7):

$$W_{\text{sys}} = \frac{(-0.44s^2 - 1.4075s - 1)(-k)}{(-0.44s^2 - 1.4075s - 1)(-k) + (0.0003s^2 + 0.008s + 0.0815)(s^3 - bs)}.$$

Подставим значения параметров объекта и получим передаточную функцию системы

$$W_{\text{sys}} = \frac{0.44s^2 + 1.4075s + 1}{0.0003s^5 + 0.008s^4 + 0.08s^3 + 0.4s^2 + s + 1}. \quad (14)$$

Переходной процесс системы при базовых значениях объекта показан на рис. 3.

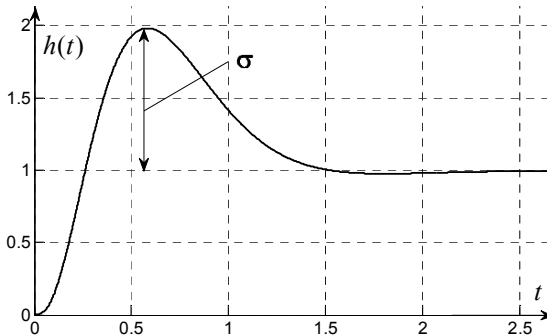


Рис. 3. График переходного процесса системы

Из графика (рис. 3) следует, что время переходного процесса в системе при базовых значениях параметров объекта $t_{nn} = 2.5$ с. Следовательно, при подаче тестовых сигналов на систему амплитуду выходного сигнала следует измерять по окончании переходного процесса.

3. ГОДОГРАФЫ НАЙКВИСТА ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА

В этом разделе рассматривается задача активной идентификации параметров объекта (4) с регулятором:

$$\frac{-0.44s^2 - 1.4075s - 1}{0.0003s^2 + 0.008s + 0.0815} \frac{1}{s}$$

образующих систему рис. 2.

Используем схему, представленную на рис. 4, для построения семейства годографов при вариации параметров объекта.

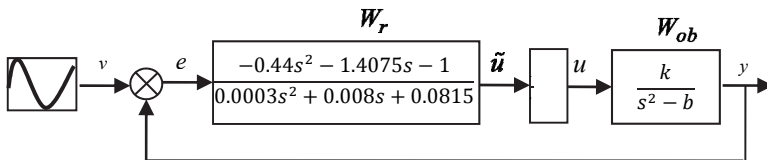


Рис. 4. Структурная схема системы с тестовым сигналом

Значения параметров объекта, равные $k=1$ и $b=5$, назовем *базовыми значениями*. Пусть параметры объекта могут меняться относительно базовых значений в пределах $b \in [4; 6]$ и $k \in [0.8; 1.4]$.

Построение семейства годографов Найквиста. Для значений параметров объекта k и b (на рис. 5 выбранным значениям параметров объекта присвоены номера от 1 до 20) строим семейство годографов (рис. 6). На рис. 6 значения параметра b приведены для годографов, соответствующих $k = 0.8$. При других значениях k и b расположены аналогично.

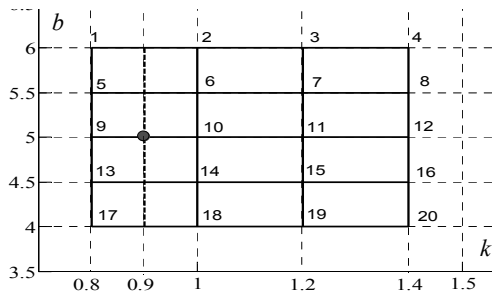


Рис. 5. Вариация значений параметров объекта

Из анализа рис. 6 следует что номограммы для определения параметров объекта могут быть существенно упрощены, если обратить внимание на то, что на частотах более $6 \dots 8$ рад/с годографы «склеиваются».

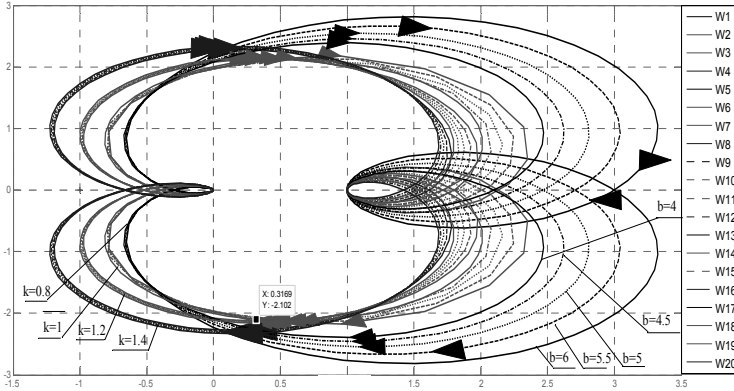


Рис. 6. Годографы Найквиста для замкнутой системы при вариации параметров объекта

Выбор частоты синусоиды. Предполагается на систему подавать синусоидальной сигнал двух частот. В данном примере выбираем $\omega = 10$ рад/с и $\omega = 2.5$ рад/с. На рис. 7 показана часть годографов, соответствующая частоте $\omega = 2.5$ рад/с. Нумерация точек на рис. 7 соответствует нумерации точек рис. 5.

На рис. 8 показана часть годографов, соответствующая частоте $\omega = 10$ рад/с.

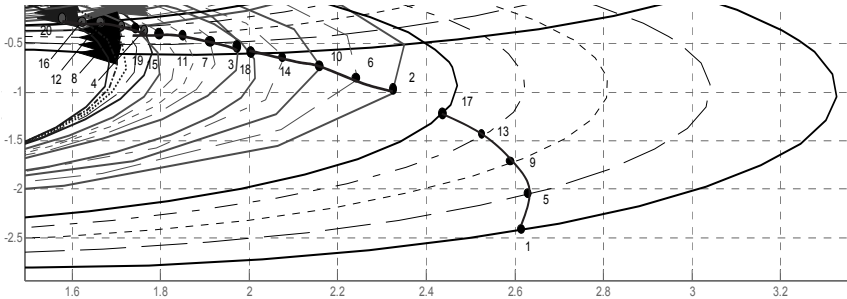


Рис. 7. Низкочастотный участок годографов Найквиста

Несовпадением точек 20–4, 19–3, 18–2 и 17–1 пренебрегаем.

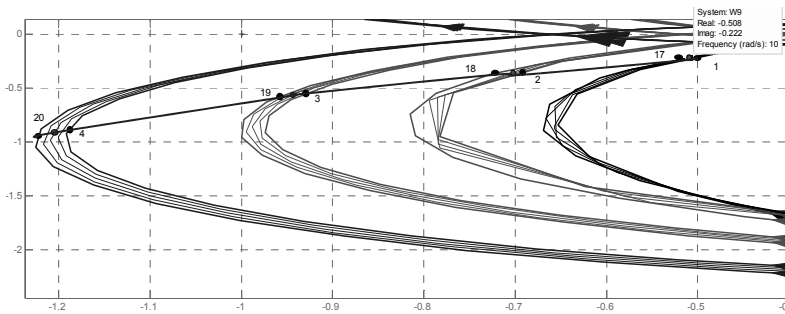


Рис. 8. Высокочастотный участок годографов Найквиста

Построение номограмм зависимости амплитуды от коэффициента усиления и инерционности. Координаты точек Re и Im а также амплитуда A для $\omega = 2.5$ рад/с (рис. 7) приведены в табл. 1, а усредненные координаты точек Re , Im и амплитуда A для $\omega = 10$ рад/с (рис. 8) – в табл. 2.

Таблица 1

Координаты точек для частоты $\omega = 2.5$ рад/с

Номер точки	k	b	Re	Im	Амплитуда A
1	0.8	6	2.82	-2.23	3.6
2	1		2.33	-0.85	2.48
3	1.2		1.97	-0.47	2.02
4	1.4		1.75	-0.31	1.78
5	0.8	5.5	2.72	-1.83	3.28
6	1		2.24	-0.74	2.36
7	1.2		1.91	-0.42	1.96
8	1.4		1.7	-0.27	1.72
9	0.8	5	2.7	-1.5	3.09
10	1		2.15	-0.64	2.24
11	1.2		1.84	-0.37	1.88
12	1.4		1.65	-0.25	1.67
13	0.8	4.5	2.59	-1.24	2.87
14	1		2.06	-0.55	2.13
15	1.2		1.78	-0.33	1.81
16	1.4		1.61	-0.23	1.63
17	0.8		2.46	-1.02	2.66

Окончание табл. 1

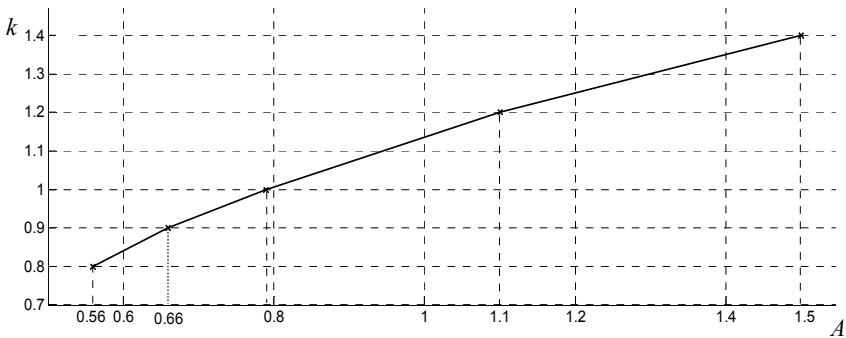
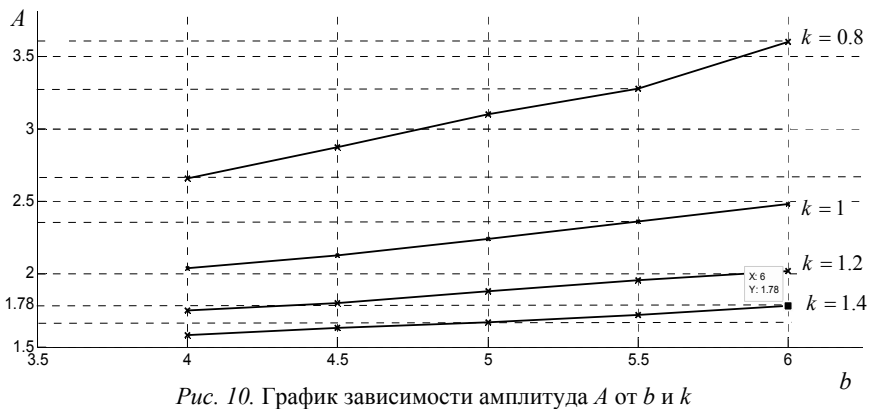
Номер точки	k	b	Re	Im	Амплитуда A
18	1	4	1.98	-0.48	2.04
19	1.2		1.72	-0.29	1.74
20	1.4		1.57	-0.21	1.58

Таблица 2

Координаты точек для частоты $\omega = 10$ рад/с

Номер точки	k	b	Re	Im	Амплитуда A
1	0.8	6	-0.5	-0.21	0.545
17	0.8	4	-0.52	-0.23	0.57
Усредненное значение	0.8	5	-0.51	-0.22	0.56
2	1	6	-0.7	-0.36	0.79
18	1	4	-0.7	-0.36	0.79
Усредненное значение	1	5	-0.7	-0.36	0.79
3	1.2	6	-0.93	-0.54	1.08
19	1.2	4	-0.96	-0.58	1.12
Усредненное значение	1.2	5	-0.94	-0.56	1.1
4	1.4	6	-1.21	-0.92	1.52
20	1.4	4	-1.19	-0.86	1.47
Усредненное значение	1.4	5	-1.2	-0.89	1.5

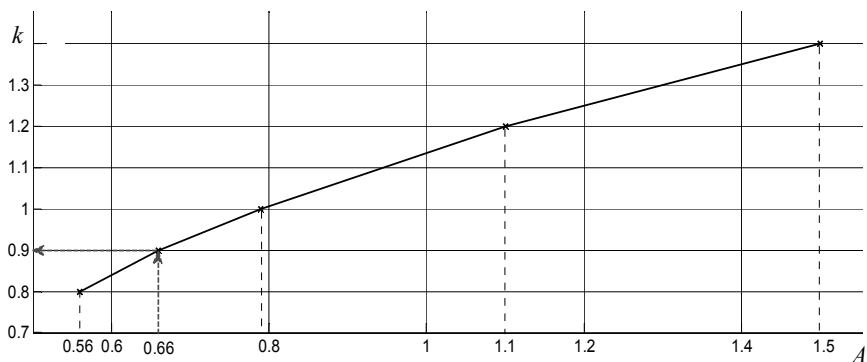
По табл. 2 строим график зависимости амплитуды A от коэффициента усиления k (рис. 9). Аналогично обрабатываем данные из табл. 1 и получаем семейство графиков зависимости амплитуды от коэффициента b (рис. 10). Процедуру идентификации параметров объекта поясним на примере.

Рис. 9. График зависимости амплитуды A от k Рис. 10. График зависимости амплитуды A от b и k

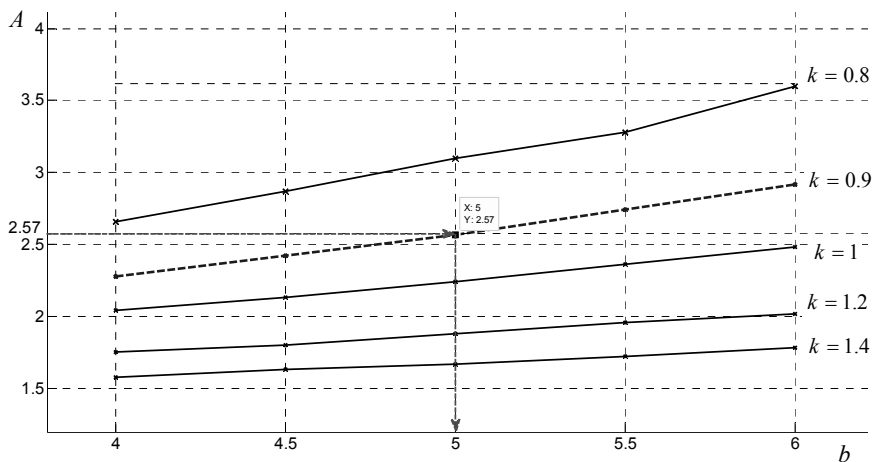
Рисунки 9 и 10 используются для определения параметров объекта k и b . Пример определения параметров объекта по данным эксперимента с использованием номограмм рис. 9 и 10 рассматривается в примере в следующем разделе.

4. ПРИМЕР ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА

Проиллюстрируем процедуру определения параметров объекта при значениях $k = 0.9$, $b = 5$ в предположении, что эти значения нам неизвестны. На вход системы (рис. 4) подаем синусоидальный сигнал с частотой $\omega = 10$ рад/с и единичной амплитудой A , а на выходе системы определяем амплитуду: в данном случае $A = 0.66$, что позволяет определить $k = 0.9$.

Рис. 11. График зависимости амплитуда A от k

«Достраиваем» семейство графиков рис. 10 – добавляем график с параметром $k = 0.9$ (рис. 12).

Рис. 12. График зависимости амплитуда A от b

Далее на вход системы (рис.4) падаем синусоидальный сигнал с частотой $\omega = 2.5$ рад/с и амплитудой $A = 1$. Измеряем амплитуду выходного сигнала, которая оказалась равной $A = 2.57$. По значениям $A = 2.57$ и $k = 0.9$ из рис. 11 определяем $b = 5$. Параметры неустойчивого объекта, представляющего собой перевернутый маятник входящего в систему управления, определены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку рассматриваемый нами объект является неустойчивым, проводить идентификация трудно. Поэтому рассчитываем регулятор для стабилизации объекта. В результате система (объект + регулятор) становится устойчивой и появляется возможность идентифицировать параметры объекта. Методика определения параметров объекта предполагает подачу на вход последовательно синусоидальных сигналов двух частот. Применение методики проиллюстрировано на примере. Предложенная методика идентификации применима для идентификации параметров линеаризованной модели перевернутого маятника по каналу θ – угловое положение маятника. В дальнейшем предполагается, что на вход системы будем подавать сигнал типа меандра и идентифицировать параметры объекта. К недостаткам данной работы следует отнести значительное перерегулирование, равное $\sigma = 95\%$ (рис. 3), и в соответствии с этим возникает отдельная задача поиска параметров регулятора, минимизирующих перерегулирование σ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воевода А.А., Шоба Е.В. Управление перевернутым маятником // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 2 (68). – С. 3–14.
2. Бобобеков К.М. Модель перевернутого маятника: частные случаи // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 3 (81). – С. 21–42.
3. Бобобеков К.М. Полиномиальный метод синтеза ПИ(Д)-регулятора для неминимально фазового объекта // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 4 (82). – С. 7–20.
4. Воевода А.А., Вороной В.В. Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2 (51). – С. 214–218.
5. Воевода А.А., Вороной В.В. Модальный синтез регуляторов пониженного порядка методом дифференцирования характеристического полинома // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 1 (63). – С. 3–12.
6. Воевода А.А., Вороной В.В., Шоба Е.В. Модальный синтез многоканального регулятора пониженного порядка с использованием «обратной» производной // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (46). – С. 15–23.
7. Воевода А.А. Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 195–198.
8. Voevoda A.A., Troshina G.V. Active identification of the inverted pendulum control system // Proceedings of the 18th International Conference on Soft Compu-

ting and Measurements (SCM'2015). – St. Petersburg: LETI Publ., 2015. – Vol. 1. – P. 153–156.

9. *Chen C.-T.* Linear system theory and design. – 3rd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.

10. *Трошина Г.В.* Активная идентификация линейных динамических дискретных стационарных объектов во временной области: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2007. – 171 с.

11. *Mehra R.K.* Optimal inputs for linear system identification // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1974. – Vol. 19, N 3. – P. 192–200.

12. *Трошина Г.В.* Об активной идентификации динамических объектов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 4 (78). – С. 41–52. – doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-41-52.

13. *Трошина Г.В.* D-оптимальный план эксперимента в задачах активной идентификации по данным установившегося режима для линейных стационарных дискретных систем // Наука. Промышленность. Оборона: труды VII Всероссийской научно-технической конференции, 19–21 апреля 2006 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 445–449.

14. *Ljung L.* System identification: theory for the User. – 2nd ed. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999. – 315 p.

15. *Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V.* The active identification of parameters for the unstable object // XI Международный форум по стратегическим технологиям, IFOST-2016, Новосибирск, 1–3 июня 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 594–596.

Бобобеков Курбонмурод Мулломиракович, аспирант кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез систем управления техническими системами. Имеет несколько публикаций. E-mail: kurbon_111@mail.ru

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 200 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

Active Identification of the Inverted Pendulum Model Data on Angle In Applied to the Input Sinusoidal Signal*

К.М. Bobobekov¹, А.А. Voevoda²

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department "Automatics" of Novosibirsk state technical university. E-mail: kurbon_111@mail.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: ucit@ucit.ru

We consider a single-channel system with a linear unstable subject of the third order, which includes two parameters and is an inverted pendulum with artificially introduced integrator. For this object the synthesis polynomial is calculated by the controller. An active object identification parameters for estimating its parameters. To estimate the input parameters of the object system is fed via line with the sinusoidal signal ω_1 and ω_2 the measured frequencies and the amplitude of the output signal. These amplitudes are used for determining the parameters of the object using the two graphs. To construct these diagrams investigated the family of the Nyquist hodographs of a closed system upon variation parameters of the object relative to baseline values. In the frequency 2.5 rad / s hodographs amplitude uniquely define the parameters obekta-gain k and b persistence. In the field of a frequency of 10 rad / sec hodographs stick together and practically depend only on the gain. The first diagram - dependence of the amplitude of the gain. Second diagramma- dependence of the amplitude of the gain and persistence.

Keywords: Active identification, inverted pendulum, control system, harmonic impact, assessment of the pendulum parameters, object management, object parameter variation, hodographs Nyquist

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-2-21-37

REFERENCES

1. Voevoda A.A., Shoba E.B. Upravlenie perevernutym mayatnikom [About model inverted pendulum]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 2 (68), pp. 3–14.
2. Bobobekov K.M. Model' perevernutogo mayatnika: chastnye sluchai [The model of the inverted pendulum: special cases]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (81), pp. 21–42.
3. Bobobekov K.M. Polinomial'nyi metod sinteza PI(D)-regulyatora dlya neminimal'no fazovogo ob'ekta [Polynomial method synthesis of PI(D) regulator for non-minimum-phase object]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 3 (81), pp. 43–48.

* Received 29 March 2016.

darstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university, 2015, no. 4 (82), pp. 7–20.

4. Voevoda A.A., Voronoy V.V. Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov zadannoi struktury [Polynomial method for calculating multi-channel controllers of a given structure]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 2 (51), pp. 214–218.

5. Voevoda A.A., Voronoy V.V. Modal'nyi sintez regulyatorov ponizhennogo poryadka metodom differentsirovaniya kharakteristicheskogo polinoma [Modal design of reduced order controllers by method of]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 1 (63), pp. 3–12.

6. Voevoda A.A., Voronoy V.V., Shoba E.B. Modal'nyi sintez mnogokanal'nogo regulyatora ponizhennogo poryadka s ispol'zovaniem "obratnoi" proizvodnoi [Modal synthesis of multi-channel low-order controller using the "reverse" derivative principle for three-mass system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (46), pp. 15–23.

7. Voevoda A.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya [Stabilisation of two-mass system by a modal method of synthesis with polynomial factorization]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (38), pp. 195–198.

8. Voevoda A.A., Troshina G.V., Active identification of the inverted pendulum control system [Aktivnaya identifikatsiya sistemy upravleniya perevernutij mayatnik]. *Proceedings of the 18th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2015)*. St. Petersburg, LETI Publ., 2015, vol. 1, pp. 153–156.

9. Chen C.-T. *Linear system theory and design*. 3rd ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.

10. Troshina G.V. *Aktivnaya identifikatsiya lineinykh dinamicheskikh diskretnykh statsionarnykh ob"ektov vo vremennoi oblasti*: diss. kand. tekhn. nauk [Active identification of linear dynamic discrete stationary objects in a time domain. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk, 2007. 171 p.

11. Mehra R.K. Optimal inputs for linear system identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. 19, no. 3, pp. 192–200.

12. Troshina G.V. Ob aktivnoi identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov [About active identification of dynamic objects]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific*

papers of the Novosibirsk state technical university, 2014, no. 4 (78), pp. 41–52. doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-41-52

13. Troshina G.V. [D-optimum design of experiment in active identification problems on base of steady state for single-line stationary discrete systems]. *Trudy VII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Nauka. Promyshlennost'. Oborona"* [Proceedings of the 7th All-Russian scientific and technical conference "Science. Industry. Defence"], Novosibirsk, Russia, 19–21 April 2006, pp. 445–449. (In Russian)

14. Ljung L. *System identification: theory for the User*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 1999. 315 p.

15. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V. [The active identification of parameters for the unstable object]. *XI Mezhdunarodnyi forum po strategicheskim tekhnologiyam, IFOST–2016* [The 11th International Forum on Strategic Technology IFOST–2016], Novosibirsk, 1–3 June 2016, pp. 594–596.