УДК 681.511

А. Н. Шумский, Д. С. Карпович
Белорусский государственный технологический университет

НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫСОТЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Произведена идентификация модели беспилотного летательного аппарата для стабилизации высоты. Идентификация системы управления проводилась в среде графического моделирования Simulink пакета Matlab. На основании полученных результатов выбраны рациональные алгоритмы управления для канала стабилизации высоты беспилотным летательным аппаратом. Созданная модель проверена на робастную устойчивость.

В данной статье предлагается подход идентификации модели беспилотного летательного аппарата для стабилизации высоты.

Ключевые слова: система управления, беспилотный летательный аппарат, идентификация.

A. N. Shumski, D. S. Karpovich
Belarusian State Technological University

SETTING THE PARAMETERS OF CONTROL LAW FOR STABILIZING HEIGHT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

The identification of the model of an unmanned aerial vehicle for height stabilization has been made. The identification of the control system was carried out in the Simulink simulation environment of the Matlab package. Based on the results obtained, rational control algorithms for the channel of stabilization of the height of an unmanned aerial vehicle were selected. The resulting model is tested for robust stability.

This article proposes an approach of identification model of an unmanned aerial vehicle for the stabilization height.

Key words: control system, unmanned aerial vehicle, identification.

Введение. Для выполнения качественного регулирования необходимы знания о динамическом поведении объекта управления. Процесс получения (синтеза) математического описания объекта на основе экспериментально полученных сигналов на его входе и выходе называется идентификацией объекта. Математическое описание может быть представлено в табличной форме или в форме уравнений. Идентификация может быть структурной, когда определяется структура математического описания объекта, или параметрической, когда для известной структуры находят величины параметров, входящих в уравнения модели. Когда ищутся параметры модели с известной структурой, то говорят об идентификации параметров модели, а не объекта [1].

Результатом идентификации может быть импульсная или переходная характеристика объекта, а также соответствующие им спектральные характеристики, которые представляются в виде таблицы (массива). Эти характеристики могут использоваться в дальнейшем для структурной и параметрической идентификации математической модели объекта регулирования или непосредственно для определения параметров ПИД-регулятора.

Основная часть. Процедуру построения модели принято называть идентификацией, при этом данный термин относится к построению аналитических математических моделей динамических объектов. Динамический объект – это объект, выход которого зависит не только от текущего значения входных сигналов, но и от их значений в предыдущие моменты времени [2].

Цель идентификации заключается в том, чтобы на основании наблюдений за входным $u(t)$ и выходным $y(t)$ сигналами на каком-то интервале времени определить вид оператора, связывающего входной и теоретический выходной сигналы. Перед началом экспериментальных исследований проводят априорный анализ перечня входных переменных с целью отбора и включения в состав модели приоритетных (или лимитирующих), оказывающих наиболее сильное воздействие на выходные переменные $y(t)$. В первую очередь в их состав включают управляющие входные переменные, с помощью которых осуществляется регулирующее воздействие на объект управления.

Идентификация – многоэтапная процедура. Основные ее этапы следующие:

1. Структурная идентификация заключается в определении структуры математической модели на основании теоретических соображений.

2. Параметрическая идентификация включает в себя проведение идентифицирующего эксперимента и определение оценок параметров модели по экспериментальным данным.

3. Проверка адекватности – проверка качества модели в смысле выбранного критерия близости выходов модели и объекта.

Идентификация проводилась по следующим пяти методам:

– iv (Instrument Variable approach) – подход оценки параметров регрессионных моделей, основанный на использовании дополнительных, не участвующих в модели, так называемых инструментальных переменных;

– svf (State Variable Filters approach) – подход, основанный на фильтре переменных состояний. Любая стационарная линейная система может быть описана как модель пространства состояний, с n переменными состояния для систем n-го порядка. Метод реализует модель пространства состояний напрямую. Мгновенное выходное значение соответствует одной из переменных пространства состояний модели;

– gpmf (Generalized Poisson Moment Functions approach) – подход, основанный на моделировании случайной величины, равной числу событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимо друг от друга (Распределение Пуассона);

– n4sid (Subspace state-space estimation approach) – используется для оценивания параметров моделей переменных состояния в канонической форме при произвольном числе входов и выходов;

– all (Combination of all of the preceding approaches) – сочетание всех предыдущих подходов.

Идентификация модели беспилотного летательного аппарата для стабилизации высоты. Рассмотрим настройку коэффициентов регулятора для стабилизации высоты. Динамическая характеристика изменения высоты от 100 до 1000 м представлена на рис. 1.

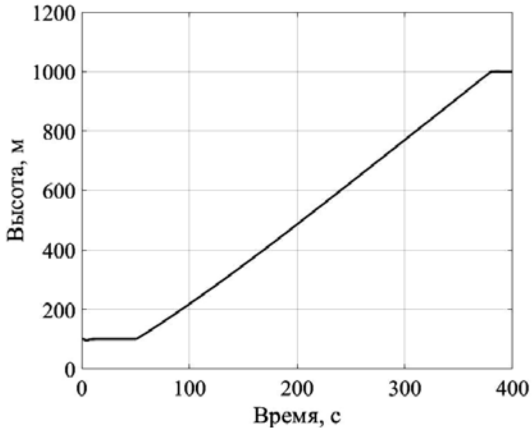

Рис. 1. Динамическая характеристика изменения высоты

В процессе идентификации будем следовать следующим принципам:

– полученная модель высоты должна максимально точно аппроксимировать динамическую характеристику;

– значение среднеквадратичной ошибки должно быть минимальным.

Для пяти подходов идентификации была получена модель высоты в виде передаточных функций:

– для подхода «iv»:

$$W(s) = \frac{8,727 \cdot 10^{-5} s + 2,354 \cdot 10^{-8}}{s^2 + 5,652 \cdot 10^{-5} s + 6,81 \cdot 10^{-8}}; \qquad (1)$$

Fit to estimation data: 99,32%; MSE: 0,6058;

– для подхода «svf»:

$$W(s) = \frac{1,722 \cdot 10^{-14} s^8 - 1,813 \cdot 10^{-14} s^7 +}{s^9 + 0,2111 s^8 + 0,2227 s^7 +}$$

$$\frac{+\ 8,322 \cdot 10^{-13} s^6 - 8,609 \cdot 10^{-13} s^5 + 8,163 \cdot 10^{-11} s^4 +}{+\ 0,001544 s^6 + 7,784 \cdot 10^{-5} s^5 + 2,953 \cdot 10^{-6} s^4 +}$$

$$\frac{+\ 1,596 \cdot 10^{-10} s^3 - 1,752 \cdot 10^{-12} s^2 +}{+\ 7,435 \cdot 10^{-8} s^3 + 1,404 \cdot 10^{-9} s^2 +}$$

$$\frac{+\ 1,271 \cdot 10^{-13} s + 3,335 \cdot 10^{-17}}{+\ 8,78 \cdot 10^{-14} s + 9,474 \cdot 10^{-17}}; \qquad (2)$$

Fit to estimation data: 99,3%; MSE: 0,6422;

– для подхода «gpmf»:

$$W(s)=\frac{0{,}0001003s^2+3{,}428\cdot 10^{-7}s+}{s^3+0{,}004027s^2+2{,}522\cdot 10^{-7}s+}\frac{+\ 9{,}168\cdot 10^{-11}}{+\ 2{,}594\cdot 10^{-10}}; \quad (3)$$

Fit to estimation data: 99,26%; MSE: 0,7315;

– для подхода «n4sid»:

$$W(s)=\frac{1{,}885\cdot 10^{-9}\ s\ +\ 5{,}915\cdot 10^{-13}}{s^2+7{,}463\cdot 10^{-10}s+1{,}67\cdot 10^{-12}}; \quad (4)$$

Fit to estimation data: 100%; MSE: $2{,}319\cdot 10^{-10}$;

– для подхода «all»:

$$W(s)=\frac{-1{,}468\cdot 10^{-6}s^6-6{,}355\cdot 10^{-9}s^5-}{s^7+8{,}658s^6+}\frac{-\ 2{,}625\cdot 10^{-8}s^4+4{,}543\cdot 10^{-8}s^3+}{+\ 46{,}16s^5+211{,}5s^4+218{,}3s^3+}$$

$$\frac{+\ 8{,}354\cdot 10^{-8}s^2+2{,}561\cdot 10^{-8}s-6{,}78\cdot 10^{-11}}{+\ 58{,}41s^2+1{,}061\cdot 10^{-9}s+1{,}585\cdot 10^{-23}}; \quad (5)$$

Fit to estimation data: 99,97%; MSE: 0,003599.

Выбираем передаточную функцию (4), поскольку она максимально точно описывает модель.

Проверка на робастную устойчивость. *Теорема Харитонова*. Для того чтобы система с характеристическим полиномом [3]:

$$Q(\lambda)=a_0\lambda^n+a_1\lambda^{n-1}+\ldots+a_n \quad (6)$$

была робастно устойчива на множестве

$$A=\{a:\underline{a_i}\le a_i\le \overline{a_i}\qquad i=0,1,\ldots,n\} \quad (7)$$

необходимо и достаточно, чтобы все полиномы Харитонова были устойчивыми.

$$Q_1(\lambda):\overline{a}_n,\ \underline{a}_{n-1},\ \underline{a}_{n-2},\ \overline{a}_{n-3},\ \overline{a}_{n-4},\ \underline{a}_{n-5},\ \ldots;$$
$$Q_2(\lambda):\overline{a}_n,\ \overline{a}_{n-1},\ \underline{a}_{n-2},\ \underline{a}_{n-3},\ \overline{a}_{n-4},\ \overline{a}_{n-5},\ \ldots;$$
$$Q_3(\lambda):\underline{a}_n,\ \overline{a}_{n-1},\ \underline{a}_{n-2},\ \underline{a}_{n-3},\ \underline{a}_{n-4},\ \overline{a}_{n-5},\ \ldots;$$
$$Q_4(\lambda):\underline{a}_n,\ \underline{a}_{n-1},\ \overline{a}_{n-2},\ \overline{a}_{n-3},\ \underline{a}_{n-4},\ \underline{a}_{n-5},\ \ldots\ . \quad (8)$$

В случае когда n = 1, 2, 3, 4, 5, нет необходимости проверять устойчивость всех четырех полиномов Харитонова. При n = 1, 2 необходимо условие: $\underline{a}_0>0,\ \underline{a}_1>0,\ \ldots,\ \underline{a}_n>0$ является достаточным.

Характеристическое уравнение для передаточной функции стабилизации высоты от 100 до 1000 м:

$$Q(\lambda)=\lambda^3+7{,}158\lambda^2+2{,}927\cdot 10^{-10}\lambda+ + 2{,}149\cdot 10^{-13}. \quad (9)$$

Поскольку все коэффициенты больше 0, то характеристическое уравнение для высоты от 100 до 1000 м является робастно устойчивым.

Синтез САУ исходя из условия обеспечения заданной степени затухания. При оценке качества систем управления на основе косвенных методов была получена зависимость степени ψ затухания от ближайшего к мнимой оси корня, связанного с параметром m:

$$\psi=1-e^{-2\pi m}. \quad (10)$$

При расчетах систем регулирования чаще всего выбирают значение m от 0,22 (ψ = 0,75) до 0,366 (ψ = 0,9).

$$u=k_p+k_i\int\varepsilon(t)dt+k_d\frac{d\varepsilon(t)}{dt}; \quad (11)$$

$$p=-m\omega\pm j\omega; \quad (12)$$

$$Wr(p)=k_p+\frac{k_i}{p}+k_d p= =k_p+\frac{k_i}{j\omega-m\omega}+k_d(j\omega-m\omega); \quad (13)$$

$$k_i=\omega(1+m^2)\,\mathrm{Im}+k_d\omega^2(1+m^2);$$
$$k_p=-\mathrm{Re}+\frac{k_i m}{\omega(1+m^2)}+k_d\omega m. \quad (14)$$

Синтез нечеткого регулятора для стабилизации высоты. В качестве закона управления (ЗУ) для стабилизации заданной высоты использована следующая зависимость [4]:

$$\delta_B=K_{\Delta H}\Delta H+K_{\dot H}\dot H+K_{\Delta H}^{\int\Delta H}\int\Delta H dt+ +K_{\vartheta}\vartheta+K_{\omega_y}\omega_y, \quad (15)$$

где $\Delta H=-H_{\text{заданная}}+H_{\text{текущая}}$.

Для контроллера, основанного на нечеткой логике, входными сигналами являются ошибка регулирования высоты (рис. 2), интеграл ошибки регулирования высоты (рис. 3) и текущее значение высоты (рис. 4) [5]. Для данных переменных вводятся следующие термы:

– отрицательное (minus);
– среднее (average);
– положительное (plus).

Для реализации процедур фазификации и дефазификации задаются функции принадлежности для каждой входной и выходной переменных.

Для контроллера выходными сигналами являются пропорциональная (рис. 5), интегральная (рис. 6) и дифференциальная составляющие ПИД-регулятора (рис. 7). Для данных переменных вводятся следующие термы:

– малое (small);
– среднее (middle);
– большое (big).

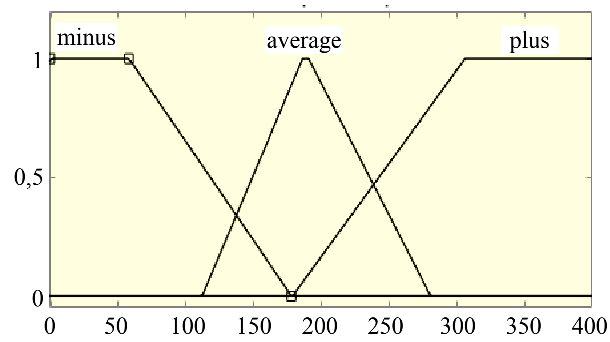

Рис. 2. Функция принадлежности
для терм-множества лингвистической переменной
«ошибка регулирования высоты»

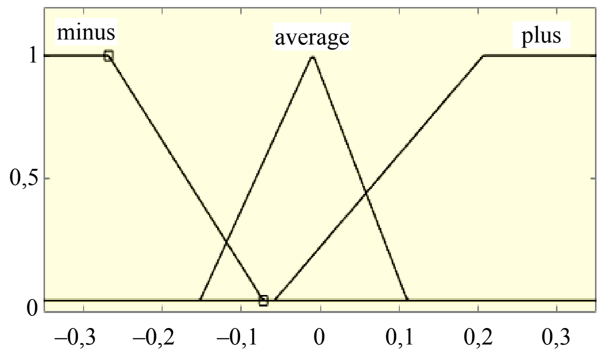

Рис. 3. Функция принадлежности
для терм-множества лингвистической переменной
«интеграл ошибки регулирования высоты»

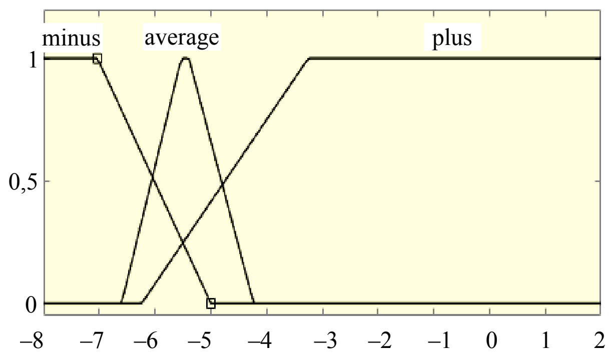

Рис. 4. Функция принадлежности
для терм-множества лингвистической переменной
«текущее значение высоты»

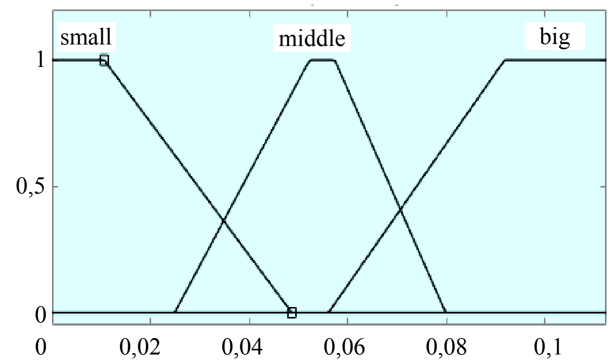

Рис. 5. Функция принадлежности
для терм-множества лингвистической переменной P

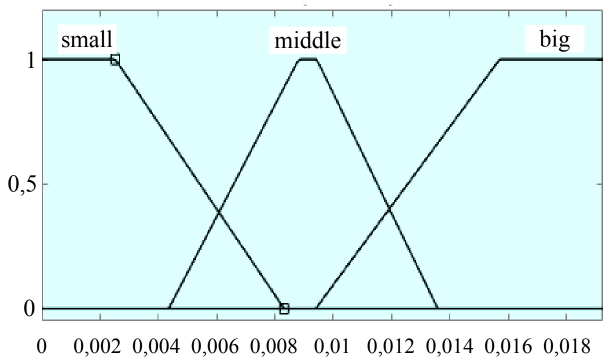

Рис. 6. Функция принадлежности
для терм-множества лингвистической переменной I

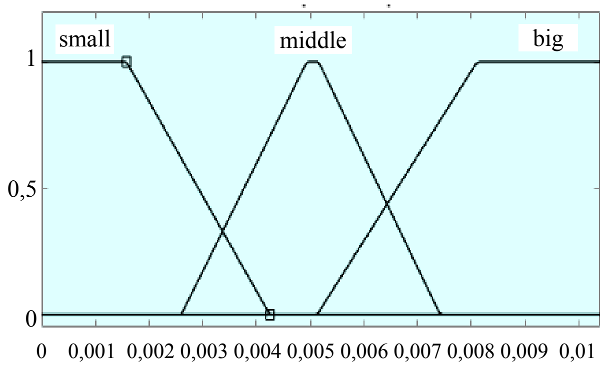

Рис. 7. Функция принадлежности
для терм-множества лингвистической переменной D

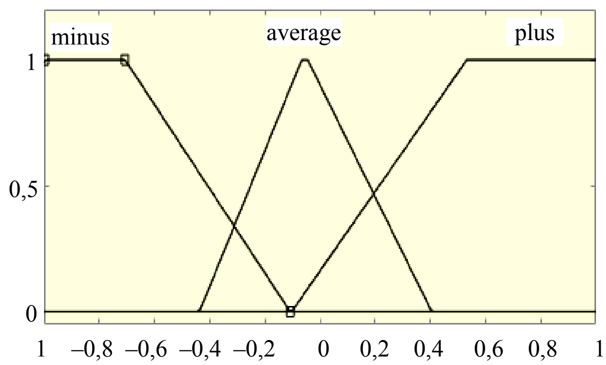

Рис. 8. Функция принадлежности
для терм-множества лингвистической переменной
«текущее значение тангажа»

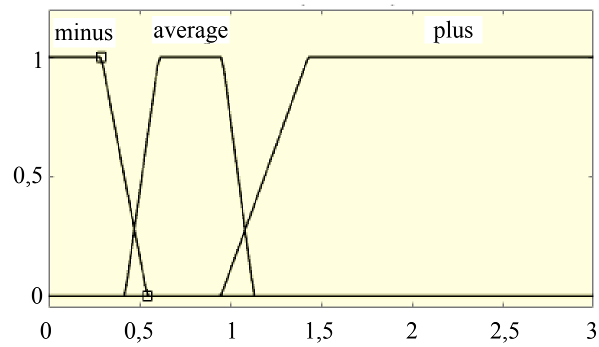

Рис. 9. Функция принадлежности
для терм-множества лингвистической переменной
«угловая скорость относительно оси Y»

ПД-регулятор ЗУ на продольный канал по тангажу без заданного тангажа. Для контроллера, основанного на нечеткой логике, входными сигналами являются текущее значение тангажа (рис. 8) и угловая скорость относительно оси Y (рис. 9).

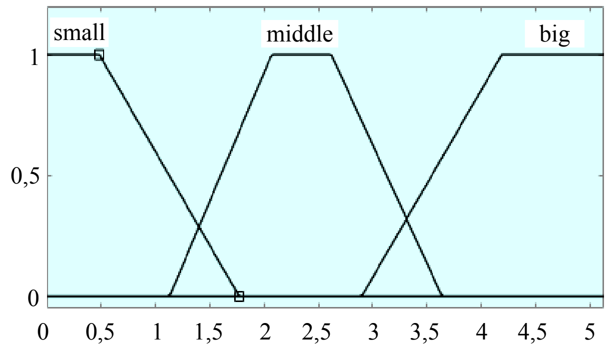

Рис. 10. Функция принадлежности для терм-множества лингвистической переменной P

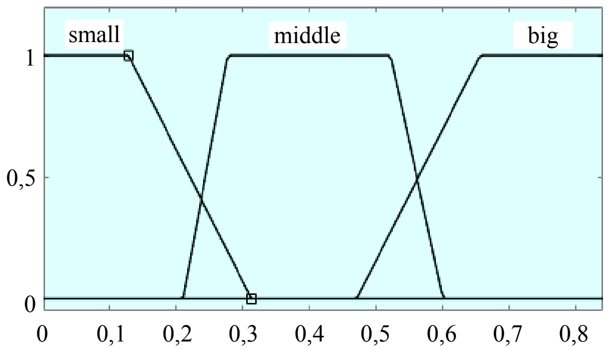

Рис. 11. Функция принадлежности для терм-множества лингвистической переменной D

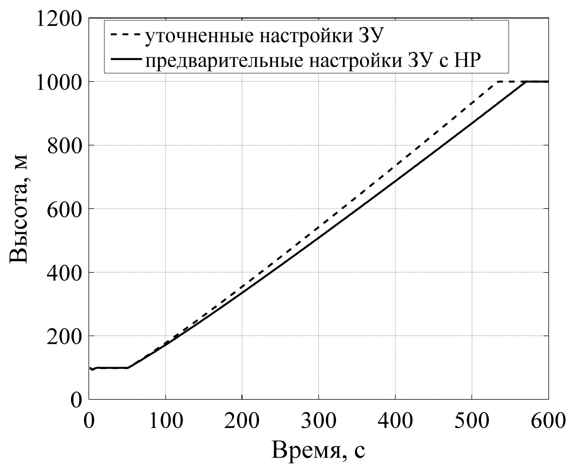

Рис. 12. Стабилизация высоты от 100 до 1000 м

При синтезе нечеткого регулятора были получены первичные настройки закона управления для стабилизации высоты.

$$\delta_B = 0{,}0562\Delta H + 0{,}0052\dot{H} + \\ + 0{,}009\int \Delta H dt + 2{,}074\vartheta + 0{,}6844\omega_y. \quad (16)$$

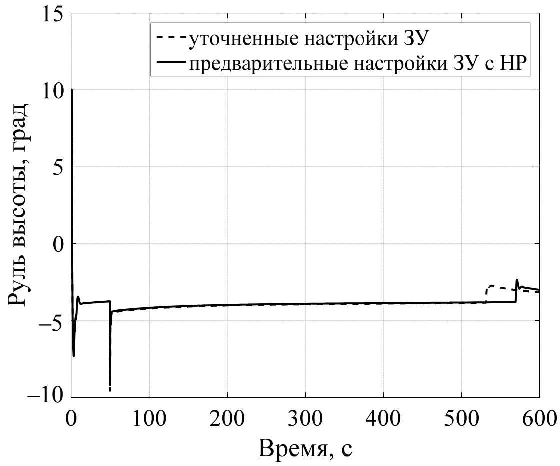

Рис. 13. Стабилизация руля высоты

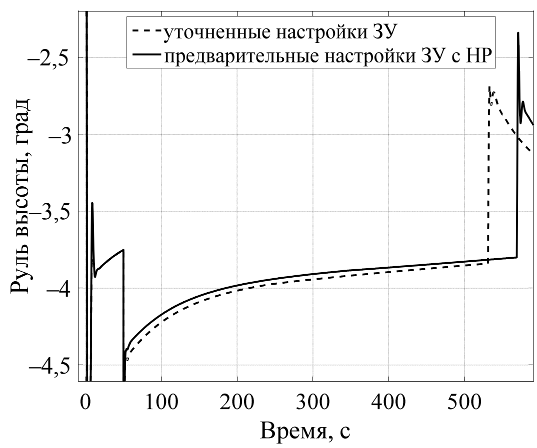

Рис. 14. Стабилизация руля высоты (увеличенный участок)

Заключение. Построение модели начинается с создания входных воздействий, которые передаются объекту, и измеряется реакция (отклик) на входные воздействия. Затем входные сигналы, выходные сигналы и выбранная для описания структура используются для расчета значений параметров модели в соответствии с установленным критерием качества. Критерий качества идентификации характеризует степень соответствия модели объекту в рамках согласованных условий и ограничений. Очень часто используется среднеквадратичный критерий. Соответствие модели также устанавливается в течение периода времени проверки путем сравнения откликов на независимые действия, которые не использовались при идентификации.

Литература

1. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.
2. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. М.: Физматлит, 1995. 336 с.

3. Ким Д. П., Дмитриева Н. Д. Сборник задач по теории автоматического управления. Линейные системы. М.: Физматлит, 2007. 168 с.

4. Системы автоматического управления летательных аппаратов / под ред. А. А. Красовского. М.: ВВИА, 1986. 478 с.

5. Рубанов В. Г. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2010. 170 с.

References

1. Grop D. *Metody identifikatsii sistem* [Methods of identification of systems]. Moscow, Mir Publ., 1979. 302 p.

2. Tsypkin Ya. Z. *Informatsionnaya teoriya identifikatsii* [Information theory of identification]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1995. 336 p.

3. Kim D. P., Dmitrieva N. D. *Sbornik zadach po teorii avtomaticheskogo upravleniya. Lineynyye sistemy* [Collection of problems on the theory of automatic control. Linear systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 168 p.

4. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya letatel'nykh apparatov* [Automatic control systems of aircraft]. Moscow, VVIA Publ., 1986. 478 p.

5. Rubanov V. G. *Intellektual'nyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya. Nechetkoye upravleniye v tekhnicheskikh sistemakh* [Intelligent automatic control system. Fuzzy control in technical systems]. Belgorod, Izdatel'stvo BGTU imeni V. G. Shukhova Publ., 2010. 170 p.

Информация об авторах

Шумский Андрей Николаевич – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andreishumski91@gmail.com

Карпович Дмитрий Семенович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: karpovich@tut.by

Information about the authors

Shumski Andrei Nikolaevich – PhD student, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andreishumski91@gmail.com

Karpovich Dmitriy Semenovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karpovich@tut.by

Поступила 30.11.2017