

УДК 62-523.8

DOI: 10.30987/article_5cb58f524a8103.45835040

И.Н. Швырков, А.В. Юдин

ИДЕНТИФИКАЦИЯ В ФОРМЕ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ И ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ЕЁ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработана методика описания объекта управления в форме пространства состояний. Показано, что начальные условия не оказывают влияния на результаты идентификации параметров объекта, идентификация с помощью пространства состояний

(Space State) даёт наиболее достоверные результаты.

Ключевые слова: идентификация, пространство состояний, начальные условия, лейкосапфир, конвективный теплообмен, Matlab.

I.N. Shvyrkov, A.V. Yudin

IDENTIFICATION IN FORM OF STATES SPACE AND INITIAL CONDITIONS IMPACT UPON ITS RESULTS

The aim of the work consists in the reveal of the most stable method of identification, in the reveal of factors influencing the parameter definition result of the melt model during leucosapphire single-crystal growth by Kyropoulos' method.

Investigation methods are based on an engineering process computer modeling under the assumption that the object of control is an aperiodic link of the second order. The comparison of identification results is carried out through different methods built-in Matlab system, their adequacy is defined by actual processes.

As a result of investigations there is obtained a description of an aperiodic link of the second order in the form of states space, an interpretation of results

obtained in the form of a time constant of object control is given.

It is shown that the engineering process description obtained in the form of states space is adequate, the availability of non-zero initial conditions (non-zero speed of technological parameter changes) has no influence upon an identification process. There are obtained dynamic characteristics for a set of experimental data by Process Models and Space State methods. The application of Space State method is recommended.

Key words: identification, states space, initial conditions, leucosapphire, convective heat exchange, Matlab.

Введение

При выращивании монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса типовой технологический процесс выращивания проходит несколько этапов: получение расплава (разогрев), затравление, рост и охлаждение. Затравление и начало роста являются самыми ответственными этапами. Здесь часто возникают ошибки, связанные либо с очень большим сбросом мощности оператором, ведущим к залипанию кристалла, либо с очень малым, ведущим к остановке роста и даже отрыву кристалла от расплава [1–3]. Конструкция ростовой установки и метод выращивания не дают возможности непосредственного измерения температуры. Поэтому на первый план выступают косвенные методы, например по изменению показаний измерителя мощности. По характеру изменения мощности на нагревателе можно опреде-

лить закон изменения температуры [4]. То есть появляется возможность по результатам косвенных измерений управлять процессом выращивания, например используя модель в составе беспойсковой адаптивной системы стабилизации скорости кристаллизации [5].

Для автоматизации данного процесса решаются различные задачи, одной из которых является получение динамических характеристик объекта управления. Причем идентификация в общем случае может быть проведена для неизвестной формы описания модели объекта [6; 7]. В нашем случае с учетом тепловой природы процесса примем, что модель расплава представляет собой аperiodическое звено второго порядка. Проведем идентификацию постоянных времени объекта с помощью пакета *ident* системы инженерных расчетов

Matlab [8] по данным напряжения и мощности нагревателя. Применение способа идентификации *Process Models* в некоторых случаях даёт неудовлетворительные результаты, поэтому было принято решение

использовать для идентификации аппарат пространства состояний, а также проверить влияние начальных условий (НУ) на результаты идентификации.

Математическое описание пространства состояний

В современных пакетах математической обработки форма пространства состояний базируется на матричном представлении и представляет собой наиболее удобную и компактную форму описания многозонных объектов. В пространстве состояний математическое описание системы задается в векторно-матричной форме [9]:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU, \quad (1)$$

где X – вектор состояния размера $n \times 1$; U – вектор входных воздействий размера $m \times 1$; A – матрица системы размера $n \times n$; B – матрица входа размера $n \times m$.

В то же время данная форма дает лишь универсальный механизм, конкретное содержание которого зависит от природы описываемого объекта. Рассмотрим представление в форме пространства состояний объекта второго порядка с передаточной функцией

$$W = \frac{Kp}{(\tau_1 + 1)(\tau_2 + 1)} = \frac{Kp}{Tp1S^2 + Tp2S + 1}, \quad (2)$$

где τ_1, τ_2 – постоянные времени объекта; Kp – коэффициент передачи объекта; $Tp1 = \tau_1\tau_2$; $Tp2 = \tau_1 + \tau_2$.

Такому объекту соответствует дифференциальное уравнение вида

$$Tp1 \frac{d^2X}{dt^2} + Tp2 \frac{dX}{dt} + X = KpU. \quad (3)$$

Поскольку кроме текущего состояния объекта необходимо учитывать и скорость его изменения, примем вектор состояния в виде

$$X = \begin{bmatrix} P \\ \frac{dP}{dt} \end{bmatrix},$$

где P – мощность, выделяемая на нагревателе, Вт; $\frac{dP}{dt}$ – скорость ее изменения, Вт/с.

Тогда уравнение для пространства состояний примет вид

$$\begin{bmatrix} \frac{dP}{dt} \\ \frac{d^2P}{dt^2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} P \\ \frac{dP}{dt} \end{bmatrix} + BU. \quad (4)$$

Определим размерности матриц, входящих в это выражение. Вектор-столбец в левой части имеет размерность 2×1 , т.е. для сохранения размерности матрица A должна иметь размерность 2×2 . Поскольку входное воздействие (напряжение на нагревателе) является одномерной величиной, то матрица B должна иметь размерность 2×1 . Выразим эти матрицы в общем виде через их элементы с учетом соглашения системы *Matlab* [10] (первый индекс кодирует номер строки, а второй – номер столбца):

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}.$$

С учетом принятых обозначений представим (4) в виде

$$\begin{bmatrix} \frac{dP}{dt} \\ \frac{d^2P}{dt^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \frac{dP}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} U. \quad (5)$$

Матричное уравнение (5) можно преобразовать к системе дифференциальных уравнений в соответствии с правилами перемножения матриц:

$$\frac{dP}{dt} = a_{11}P + a_{12} \frac{dP}{dt} + b_1U, \quad (6)$$

$$\frac{d^2P}{dt^2} = a_{21}P + a_{22} \frac{dP}{dt} + b_2U.$$

Определим значения коэффициентов матриц A и B таким образом, чтобы получить структуру уравнения (3). Поскольку уравнение (3) второго порядка, то в системе (6) нужно оставить только второе уравнение. Для этого первое уравнение в ней сведем к тождеству, т.е. положим $a_{11} = 0$,

$a_{12} = 1, b_1 = 0$. Уравнение (2) приведем к виду

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{Tp2}{Tp1} \frac{dX}{dt} + \frac{1}{Tp1} X = \frac{Kp}{Tp1} U,$$

а также перенесем в правую часть все, кроме выражения для второй производной

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{Tp1} & -\frac{Tp2}{Tp1} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{Kp}{Tp1} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, D = 0.$$

Идентификация с помощью пространства состояний, влияние НУ

Прежде всего проверим адекватность полученной модели. Для этого сравним реакцию модели объекта второго порядка (2), созданную с помощью функции *tf*, с реакцией модели в форме пространства состояний (*State Space*). На вход того и другого объекта подадим линейно нарастающий сигнал с помощью функции *lsim*.

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = -\frac{Tp2}{Tp1} \frac{dX}{dt} - \frac{1}{Tp1} X + \frac{Kp}{Tp1} U.$$

Тогда возможно определить недостающие коэффициенты матриц *A* и *B*. В итоге они примут вид

тающий сигнал с помощью функции *lsim*. Зададимся постоянными времени $\tau_1 = 2500$ с, $\tau_2 = 50$ с, коэффициентом передачи $Kp = 5$. Для случая нулевых НУ графики переходных процессов совпадают (рис. 1).

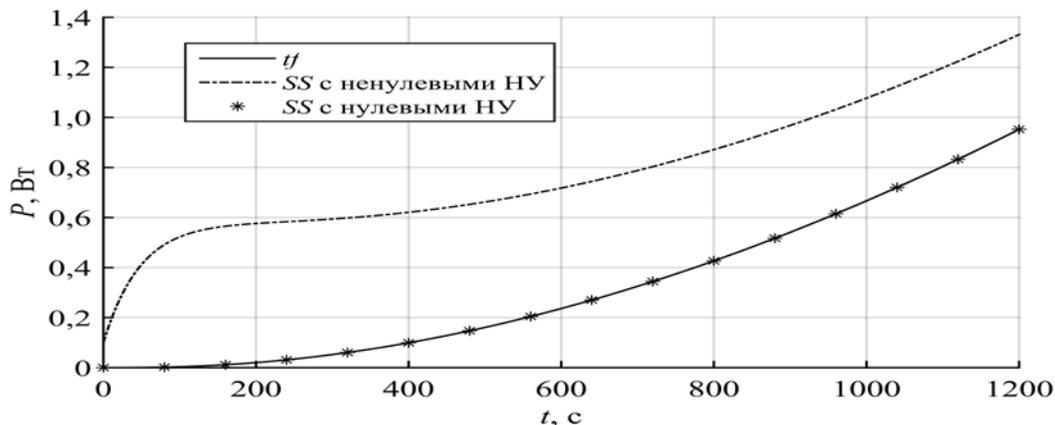


Рис. 1. Графики переходных процессов

Если же задать ненулевую начальную скорость, например 0,01 Вт/с, то начальная стадия переходного процесса существенно изменится (рис. 2). Также меняется вид графика скорости изменения мощности (рис. 2). В системе *Matlab* начальные условия задаются с помощью функции *initial*.

Рис. 2. Графики скоростей с нулевыми и ненулевыми начальными условиями

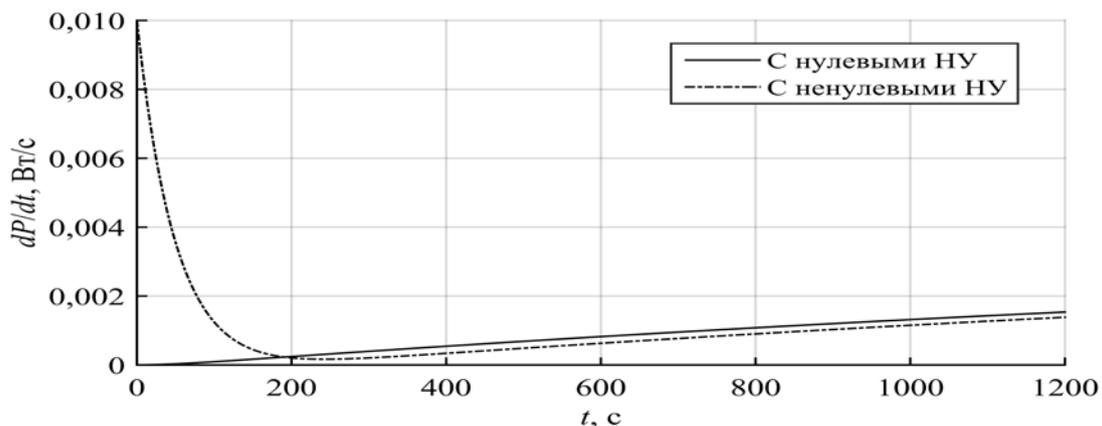


Рис. 2. Графики скоростей с нулевыми и ненулевыми начальными условиями

Проведём идентификацию по ранее полученным данным для случая с ненуле-

выми НУ в пакете *ident* (рис. 3) с помощью пространства состояний.

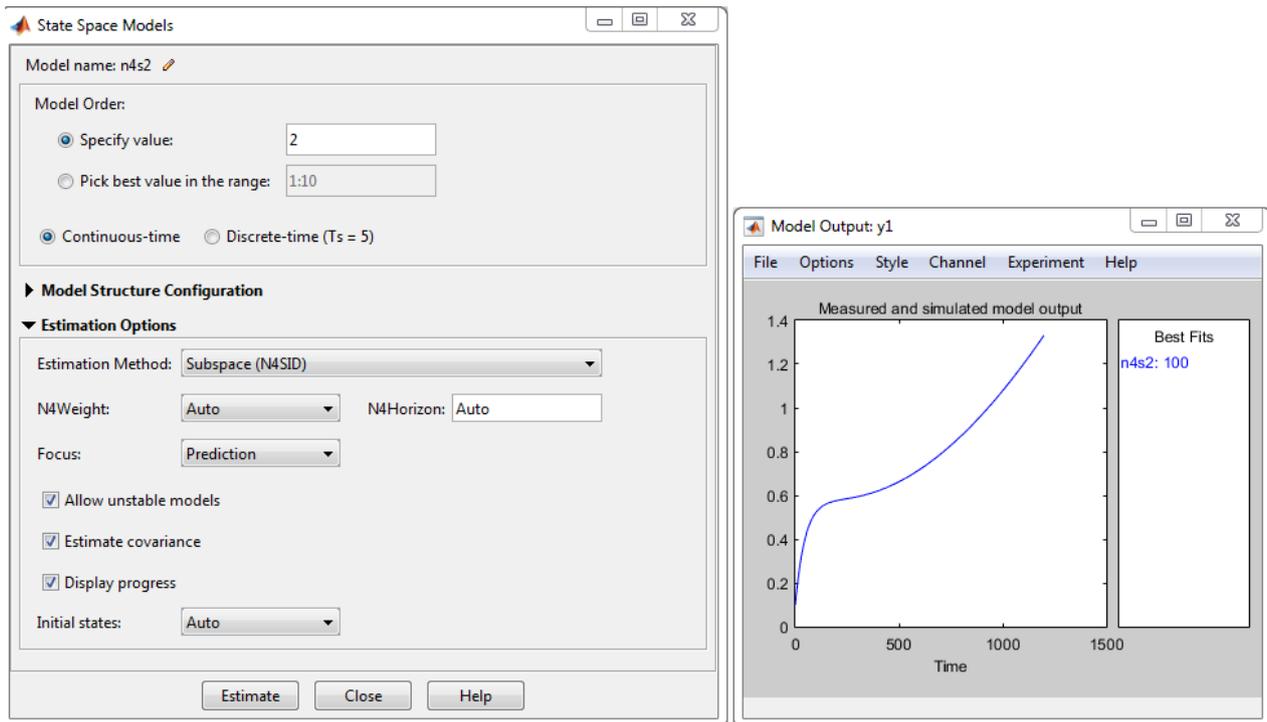


Рис. 3. Окна пакета идентификации

После экспорта в рабочее пространство *Workspace* и преобразования вида $tf(n4s2)$ будет получена передаточная функция

$$W = \frac{2,003 \cdot 10^{-5} S + 4,007 \cdot 10^{-5}}{S^2 + 0,02042S + 8,013 \cdot 10^{-6}}$$

После приведения ее к каноническому виду (1 при S в нулевой степени в знаменателе) получим, что

$$Kp = 5, Tp1 = 124790, Tp2 = 2548.$$

Учитывая, что $\tau_1 = Tp1 / Tp2$, $\tau_2 = Tp2 - \tau_1$, можно утверждать, что

$$\tau_1 = 48,978 \text{ с}, \tau_2 = 2499 \text{ с}.$$

Аналогичным образом проведем идентификацию с ненулевыми и нулевыми НУ. Результаты приведены в табл. 1, где *FTE* – процент соответствия полученной модели исходным данным.

Таблица 1

Результаты идентификации

НУ	Kp	$\tau_1, \text{с}$	$\tau_2, \text{с}$	<i>FTE</i> , %
Нулевые	5	48,978	2499	100
Ненулевые	5	48,978	2499	100

По данным табл. 1 можно сделать вывод, что наличие НУ не влияет на результаты идентификации параметров объ-

екта. Таким образом, при идентификации реального объекта НУ можно не учитывать.

Идентификация экспериментальных данных

На рис. 4 показан фрагмент экспериментальных данных для напряжения и мощности нагревателя, полученных при выращивании монокристалла. Характерной особенностью данных зависимостей

является то, что мощность меняет своё значение с 42,5 до 42,8 кВт, в то время как напряжение поддерживается на уровне 8,15 В (этому предшествовал линейный сброс напряжения). Данный эффект можно

объяснить большой инерционностью конвективных потоков в расплаве, которые выносят тепло со дна тигля на поверхность расплава, изменяя распределение температур по высоте вольфрамового высокотемпературного нагревателя. Процесс выращивания монокристалла чувствителен к точности поддержания температуры, и отклонение её значения от поддерживаемой

на величину более $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ является критичным. Поскольку из-за высокой температуры расплава её измерение напрямую невозможно, то используется косвенный метод на основе данных мощности, изменение которой примерно на 60 Вт соответствует 1°C .

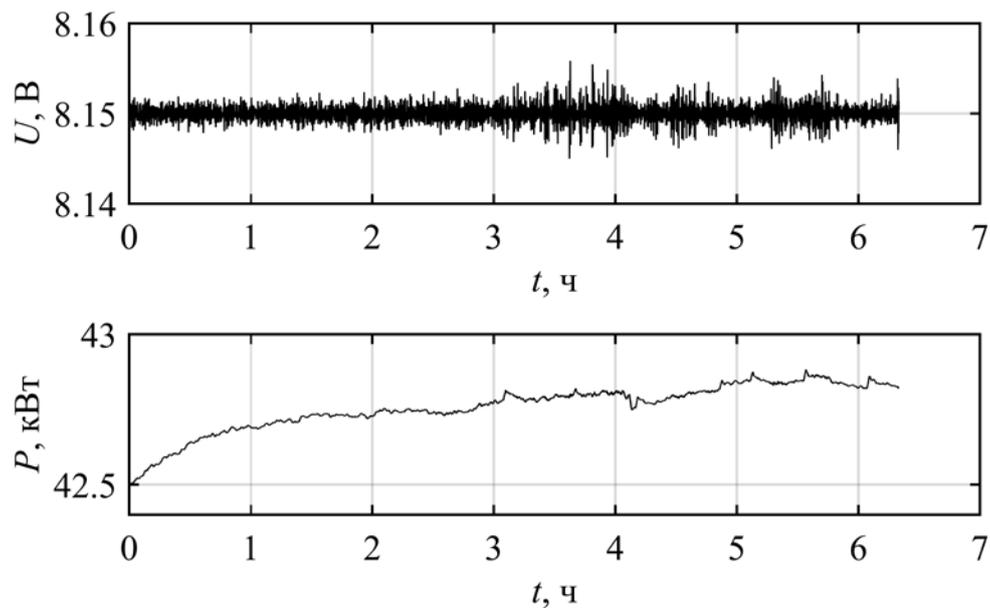


Рис. 4. Пример исследуемого участка

Кроме приведенного на рис. 4, рассматриваемый процесс выращивания монокристалла содержит 5 характерных участков со сходной зависимостью мощности от напряжения. Для оценки стабильности методов идентификации *Process Models* и *Space State* проведем обработку всех пяти участков, а полученные данные сведём в табл. 2 и 3 соответственно. При анализе

результатов будем учитывать не только процент соответствия полученной модели исходным данным (*FTE*), но и разброс получаемых значений, а также ожидаемый исходя из теплофизических характеристик ростовой установки диапазон постоянных времени (для τ_1 – десятки секунд, для τ_2 – тысячи секунд).

Таблица 2

Результаты идентификации с помощью *Process Models*

Участок	Kp	τ_1, c	τ_2, c	<i>FTE</i> , %
1	2,12	277,190	22906	96,66
2	3,22	0,007	7011	98,48
3	5,22	0,918	10^{-6}	36,11
4	5,11	0,028	1640	74,28
5	4,93	4,697	1169	41,42

Таблица 3

Результаты идентификации с помощью *State Space*

Участок	Kp	τ_1, c	τ_2, c	$FTE, \%$
1	2,14	6,772	23445	98,02
2	3,23	37,408	6781	97,75
3	5,23	52,574	1490	54,49
4	5,12	77,175	1362	71,60
5	4,93	78,647	1438	40,23

Заключение

Сравнение значений τ_2 в табл. 2 и 3 показывает, что идентификация при помощи *Space State* позволяет получить более достоверные результаты, о чём свидетельствует отсутствие значений, резко отличающихся от значений на соседних участках. Также получены более корректные значения τ_1 , поскольку предполагается,

что она равна десяткам секунд. Полученная модель позволяет косвенно оценить интенсивность движения тепловых потоков, создающих конвективный теплообмен, что может быть использовано в качестве корректирующего воздействия в системе управления установкой выращивания монокристаллов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасаров, Х.С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава / Х.С. Багдасаров. - М.: Физматлит, 2004. - 160 с.
2. Синельников, Б.М. Исследование кинетики выращивания крупных монокристаллов Al_2O_3 методом Киропулоса / Б.М. Синельников, А.Ю. Игнатов, С.В. Москаленко, О.Т. Гуднин // Химия твёрдого тела и современные микро- и нанотехнологии: VIII междунар. конф. - Ставрополь: СевКавГТУ, 2008. - 458 с.
3. Еськов, Э.В. Оптический сапфир, технические требования и технология выращивания кристаллов / Э.В. Еськов, А.Ю. Игнатов, В.С. Постолюков, А.С. Филимонов // Химия твёрдого тела и современные микро- и нанотехнологии: VIII междунар. конф. - Ставрополь: СевКавГТУ, 2008. - 458 с.
4. Юдин, А.В. Особенности регулирования мощности на вольфрамовом высокотемпературном нагревателе / А.В. Юдин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева: сб. науч. тр. - Рыбинск, 2011. - № 2 (21). - С. 108-112.
5. Лобацевич, К.Л. Беспoisковая адаптивная система стабилизации скорости кристаллизации монокристаллов / К.Л. Лобацевич, А.В. Юдин // Автоматизация и современные технологии. - М.: Машиностроение, 2010. - № 11. - С. 23-26.
6. Гайдук, А.Р. Алгоритмическое обеспечение адаптивных систем управления с идентификацией / А.Р. Гайдук, В.В. Шадрин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2018. - № 3. - С. 47-56.
7. Кузнецов, В.Е. Адаптивное управление с экзотической моделью техническим объектом с ограниченной неопределенностью / В.Е. Кузнецов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2016. - № 6. - С. 53-60.
8. Мельник, А.А. Построение моделей с применением пакета System Identification Toolbox матричной лаборатории MATLAB+SIMULINK / А.А. Мельник, Е.А. Медунова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - Иркутск, 2015. - № 3 (47). - С. 93-97.
9. Федосенков, Б.А. Теория автоматического управления: классические и современные разделы: учеб. пособие / Б.А. Федосенков. - Кемерово: КемГУ, 2018. - 322 с.
10. Потемкин, В.Г. Система MATLAB: справ. пособие / В.Г. Потемкин. - М.: Диалог - МИФИ, 1997. - 350 с.
1. Bagdasarov, H.S. *High-temperature Crystallization of Melt* / H.S. Bagdasarov. - M.: Physmathlit, 2004. - pp. 160.
2. Sinelnikov, B.M. Kinetics investigation of growing large mono-crystals Al_2O_3 by Kyropoulos' method / B.M. Sinelnikov, A.Yu. Ignatov, S.V. Moskalenko, O.T. Gudnin // *Chemistry of Solid and Modern Micro- and Nano-technologies: The VIII-th Inter. Conf.* - Stavropol: NorthCaucasusSTU, 2008. - pp. 458.
3. Yeskov, E.V. Optical sapphire, technical requirements and technology of crystal growing / E.V. Yeskov, A.Yu. Ignatov, V.S. Pospelov, A.S. Filimonov // *Chemistry of Solid and Modern Micro- and Nano-technologies: the VIII-th Inter. Conf.* - Stavropol: NorthCaucasusSTU, 2008. - pp. 458.

4. Yudin, A.V. Power control peculiarities on high-temperature tungsten heater / A.V. Yudin // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technological Academy of Rybinsk: Proceedings.* – Rybinsk, 2011. – No.2(21). – pp. 108-112.
5. Lobatsevich, K.L. Searchless adaptive system of mono-crystal crystallization speed stabilization / K.L. Lobatsevich, A.V. Yudin // *Automation and Modern Technologies.* – M.: Mechanical Engineering, 2010. – No.11. – pp. 23-26.
6. Gayduk, A.R. Algorithmic support of adaptive control systems with identification / A.R. Gayduk, V.V. Shadrina // *Bulletin of Ivanovo State Power University.* – 2018. – No.3. – pp. 47-56.
7. Kuznetsov, V.E. Adaptive control with exomodel of technical object with limited ambiguity / V.E. Kuznetov // *Proceedings of S-PbSETU "LETY".* – 2016. – No.6. – pp. 53-60.
8. Melnik, A.A. Model formation using Toolbox Identification System package of MATLAB+SIMULINK matrix laboratory / A.A. Melnik, E.A. Medunova // *Modern Technologies. System Analysis. Modeling.* – Irkutsk, 2015. – No.3 (47). – pp. 93-97.
9. Fedosenkov, B.A. *Theory of Automatic Control: Classic and Current Parts: manual* / B.A. Fedosenkov. - Kemerovo: KemSU, 2018. – pp. 322.
10. Potyomkin, V.G. *MATLAB System: reference book* / V.G. Potyomkin. – M.: Dialogue – MEPI, 1997. – pp. 350.

Статья поступила в редколлегию 20.12.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Киричек Ф.В.

Статья принята к публикации 22. 03. 19.

Сведения об авторах:

Швырков Илья Николаевич, аспирант Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, e-mail: www-vkcom@mail.ru.

Shvyrkov Piya Nikolaevich, Post graduate student of Soloviyov Aircraft Technical University of Rybinsk, e-mail: www-vkcom@mail.ru.

Юдин Алексей Викторович, зав. кафедрой «Электротехника и промышленная электроника» Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, e-mail: JudinAV@mail.ru.

Yudin Alexey Victorovich, Head of the Dep. "Electrical Engineering and Industrial Electronics", Soloviyov Aircraft Technical University of Rybinsk, e-mail: JudinAV@mail.ru.