УДК 681.51
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-627-636

# АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПОСТОЯННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

О. А. Козачёк*, А. А. Бобцов, Н. А. Николаев

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
**oakozachek@itmo.ru*

**Аннотация.** Предложен адаптивный наблюдатель вектора состояния нелинейной нестационарной системы по измерениям выходной переменной. Задача решена для случая, когда матрица (вектор) управления и нелинейный компонент уравнения состояния системы содержат неизвестные постоянные параметры. При синтезе наблюдателя проводится предварительная параметризация исходной нелинейной системы. Затем полученная система приводится к линейной регрессионной модели. На следующем этапе неизвестные постоянные параметры регрессии оцениваются с помощью метода наименьших квадратов с фактором забывания (forgetting factor). Результат предыдущей работы авторов, в которой рассмотрена линейная нестационарная система, содержащая неизвестные параметры в матрице (векторе) управления, расширен на случай, когда уравнение состояния системы содержит частично неизвестную нелинейность. Работоспособность предложенного алгоритма проиллюстрирована математическим моделированием.

***Ключевые слова:*** *адаптивный наблюдатель, нелинейная система, нестационарная система, линейная регрессионная модель, идентификация параметров*

**Благодарности:** статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 22-21-00499.

**Ссылка для цитирования:** *Козачёк О. А., Бобцов А. А., Николаев Н. А.* Адаптивный наблюдатель переменных состояния нелинейной нестационарной системы с неизвестными постоянными параметрами // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 627—636. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-627-636.

# ADAPTIVE OBSERVER OF STATE VARIABLES OF A NONLINEAR NONSTATIONARY SYSTEM WITH UNKNOWN CONSTANT PARAMETERS

**O. A. Kozachek*, A. A. Bobtsov, N. A. Nikolaev**

*ITMO University, St. Petersburg, Russia*
**oakozachek@itmo.ru*

**Abstract.** For a nonlinear nonstationary system an adaptive state vector observer using output variable measurement is developed the control matrix (vector) and the nonlinear component of the equation of state of the system contain unknown constant parameters. When synthesizing the observer, a preliminary parametrization of the original nonlinear system is carried out. Then the derived system is reduced to a linear regression model. At the next stage, unknown constant regression parameters are estimated using the least squares method with a forgetting factor. The result of the previous work by the authors, which considered a linear non-stationary system containing unknown parameters in the control matrix (vector), is extended to the case when the equation of state of the system contains a partially unknown nonlinearity. The performance of the proposed algorithm is illustrated by mathematical modeling.

**Keywords:** adaptive observer, nonlinear system, nonstationary system, linear regression model, parameters identification

**Acknowledment:** The article was prepared with the financial support of the Russian Science Foundation, grant 22-21-00499.

**For citation:** Kozachek O. A., Bobtsov A. A., Nikolaev N. A. Adaptive observer of state variables of a nonlinear nonstationary system with unknown constant parameters. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 8. P. 627—636 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-627-636.

**Введение.** Получение информации о состоянии системы является важной задачей при управлении динамическими системами. Для этого могут использоваться первичные измерительные преобразователи (датчики). Однако не всегда весь вектор состояния объекта доступен прямым измерениям. В случаях, когда невозможно разместить набор средств, достаточный для измерения всего вектора состояния, при оценке неизвестных переменных применяются наблюдатели.

Методы синтеза наблюдателей состояния линейных динамических систем с постоянными параметрами известны и достаточно эффективны [1, 2]. Однако интерес исследователей к проблеме синтеза наблюдателей для линейных систем не угасает. Об этом свидетельствует публикационная активность в изданиях, посвященных проблемам анализа и синтеза систем автоматического управления. В частности, в [2] рассмотрен синтез оптимальных эллипсоидных наблюдателей и алгоритмов, которые позволяют обеспечить оптимальные эллипсоидные оценки вектора состояния системы и неизвестных параметров.

Проблема разработки алгоритмов наблюдения переменных состояния нелинейных систем на данный момент изучена меньше. По этой причине в научном сообществе сохраняется интерес к исследованию нелинейных систем [3, 4].

Важным аспектом задачи построения наблюдателей является тот факт, что объект не всегда может быть описан моделью с постоянными параметрами. В некоторых случаях параметры системы изменяются со временем под действием внутренних и внешних факторов. К таким факторам, например, относятся изменение параметров вследствие старения элементов системы, воздействие экстремальных температур, изменение массогабаритных параметров в ходе эксплуатации. В связи с этим поведение сложных динамических систем может быть описано более точно с помощью математических моделей, содержащих нестационарные параметры. По этой причине исследования, посвященные проблеме синтеза наблюдателей для нестационарных систем, в настоящее время имеют большую актуальность.

При построении наблюдателей применяются различные подходы. Одним из них является сведение исходной модели объекта к линейной регрессионной (см., например, [5, 6]) с дальнейшей идентификацией неизвестных параметров модели.

Алгоритмы оценки вектора состояния нелинейной нестационарной системы могут использоваться не только при синтезе законов управления. Они также имеют и самостоятельное значение. К примеру, эти алгоритмы могут применяться при разработке средств контроля технического состояния [7, 8].

При решении задач, связанных с синтезом наблюдателей неизвестных переменных состояния нестационарных систем, исследователи вводят в отношении матриц описания объекта различные допущения и предположения. В качестве примера можно рассмотреть работу [9], где предполагается, что матрица состояния задана в канонической форме. Кроме того, в статье [10] предполагается, что матрица состояния может быть представлена в виде суммы, где одно слагаемое известно, а второе состоит из неизвестных постоянных параметров. В статье оцениваются неизвестные параметры, а затем на основе полученных оценок синтезируется наблюдатель неизвестного вектора состояния системы.

В настоящей работе предложено развитие результатов работы [11], в которой представлен алгоритм оценки вектора состояния линейной нестационарной системы. Рассмотренная система содержит неизвестные параметры в матрице состояния и матрице (векторе) управления. В настоящей работе подход, предложенный в [11], развивается на случай, когда система является нелинейной. Предполагается, что нелинейный компонент, содержащийся в уравнении состояния системы, частично неизвестен.

**Постановка задачи.** Рассматривается нелинейная нестационарная система с одним входом и одним выходом (SISO) вида:

$$\begin{gathered}\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t)+\mathbf{k}\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{x}(t)+\mathbf{b}u(t)+\mathbf{w}(y,t),\ \mathbf{x}(0)=\mathbf{x}_0\in\mathbb{R}^n,\ t\geq 0,\\ y(t)=\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{x}(t),\end{gathered} \tag{1}$$

где $\mathbf{x}(t)\in\mathbb{R}^n$ — неизвестный вектор состояния; $u(t)\in\mathbb{R}$ — известный входной сигнал; $y(t)\in\mathbb{R}$ — измеряемый выходной сигнал; матрицы $\mathbf{A}(t)\in\mathbb{R}^{n\times n}$, $\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\in\mathbb{R}^n$ являются известными и ограниченными с нестационарными параметрами; параметры $\mathbf{k}\in\mathbb{R}^n$ и $\mathbf{b}\in\mathbb{R}^n$ постоянны и неизвестны; $\mathbf{w}(y,t)$ — частично неизвестная нелинейная вектор-функция.

В отношении рассматриваемой системы при решении поставленной задачи были приняты следующие допущения.

*Допущение 1.* Нелинейная вектор-функция $\mathbf{w}(y,t)$ может быть представлена в виде:

$$\mathbf{w}(y,t)=\mathbf{m}f\big(y(t)\big),$$

где $f\big(y(t)\big)$ — известная нелинейная функция, а $\mathbf{m}\in\mathbb{R}^n$ — вектор неизвестных постоянных параметров.

*Допущение 2.* Предполагается, что траектории входа и состояний ограничены.

*Допущение 3.* Пара матриц $\mathbf{A}(t)$ и $\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)$ обнаруживаема. Это означает, что существует матрица обратной связи $\mathbf{L}(t)$ такая, что автономная система

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\left[\mathbf{A}(t)-\mathbf{L}(t)\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\right]\mathbf{x}(t)$$

асимптотически устойчива.

*Допущение 4.* Автономная система $\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}_0(t)\mathbf{x}(t)$, где $\mathbf{A}_0(t)=\mathbf{A}(t)-\mathbf{L}(t)\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)$, является равномерно устойчивой (uniformly stable), т.е. ее фундаментальная матрица удовлетворяет условию (см. теорему 6.4 [12]):

$$\mathbf{\Phi}_{\mathbf{A}_0}(t,\tau)\leq c_1,\ \forall\ t\geq\tau\geq 0.$$

Введенные допущения являются типовыми (см., например, [12—14]).

Для системы (1) ставится задача синтеза адаптивного наблюдателя вида:

$$\dot{\chi}(t)=\mathbf{F}\big(\chi(t),\ u(t),\ y(t)\big),$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \hat{\mathbf{k}}(t) \\ \hat{\mathbf{b}}(t) \\ \hat{\mathbf{m}}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{S}\big(\boldsymbol{\chi}(t),\, u(t),\, y(t)\big),$$

где $\boldsymbol{\chi}(t) \in \mathbb{R}^{n_\chi}$ такое, что все сигналы ограничены. Адаптивный наблюдатель должен обеспечивать сходимость оценок переменных состояния и оценок постоянных неизвестных параметров к реальным значениям:

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t),\;\; \hat{\mathbf{k}}(t) = \mathbf{k},\;\; \hat{\mathbf{b}}(t) = \mathbf{b},\; \hat{\mathbf{m}}(t) = \mathbf{m}$$

для всех $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^n$, $\boldsymbol{\chi}(t) \in \mathbb{R}^{n_\chi}$.

**Основной результат.** На первом этапе работы производится параметризация исходной системы с целью получения статической линейной регрессионной модели. Таким образом, основной задачей становится идентификация неизвестных постоянных параметров линейной статической регрессионной модели. В дальнейшем на основе полученных параметров можно будет восстановить компоненты вектора состояния. На втором шаге работы оцениваются неизвестные постоянные параметры линейной регрессионной модели. Существует множество различных методов решения этой задачи. Выбор метода зависит от условий возбуждения, накладываемых на регрессор (см., например, [6, 15, 16]).

*Теорема 1.* Рассмотрим динамическую систему вида

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}(t) = \mathbf{A}_0(t)\boldsymbol{\xi}(t) + \mathbf{L}(t)y(t),\;\; \boldsymbol{\xi}(0) = 0_{n\times 1}, \tag{2}$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) = \mathbf{A}_0(t)\boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{I}y(t), \qquad \boldsymbol{\eta}(0) = 0_{n\times n}, \tag{3}$$

$$\dot{\boldsymbol{\zeta}}(t) = \mathbf{A}_0(t)\boldsymbol{\zeta}(t) + \mathbf{I}u(t), \qquad \boldsymbol{\zeta}(0) = 0_{n\times n}, \tag{4}$$

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{A}_0(t)\boldsymbol{\rho}(t) + \mathbf{I}f(y), \qquad \boldsymbol{\rho}(0) = 0_{n\times n}, \tag{5}$$

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}(t) = \mathbf{A}_0(t)\boldsymbol{\Phi}(t), \qquad \boldsymbol{\Phi}(0) = \mathbf{I}_{n\times n}, \tag{6}$$

где матрицы $\mathbf{A}_0(t)$ и $\mathbf{L}(t)$ удовлетворяют допущениям 3, 4, а $\mathbf{I}$ — единичная матрица соответствующей размерности.

Таким образом, исходную динамическую систему (1) можно преобразовать к линейной регрессионной модели в новых переменных вида

$$z(t) = \boldsymbol{\Psi}(t)\boldsymbol{\Theta}, \tag{7}$$

где сигнал $z(t) = y(t) - \mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\xi}(t)$ измеряется,

$\boldsymbol{\Psi}(t) = \begin{bmatrix} -\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\Phi}(t) & \mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\eta}(t) & \mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\zeta}(t) & \mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\rho}(t) \end{bmatrix}$ — вектор известных функций,

$\boldsymbol{\Theta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} & \mathbf{k} & \mathbf{b} & \mathbf{m} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \Theta_1 & \Theta_2 & \Theta_3 & \Theta_4 & \Theta_5 & \Theta_6 & \Theta_7 & \Theta_8 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — вектор неизвестных постоянных параметров.

*Доказательство.* Рассмотрим уравнение ошибки вида

$$\mathbf{e}(t) = \boldsymbol{\xi}(t) + \boldsymbol{\eta}(t)\mathbf{k} + \boldsymbol{\zeta}(t)\mathbf{b} + \boldsymbol{\rho}(t)\mathbf{m} - \mathbf{x}(t). \tag{8}$$

Производная ошибки $\dot{\mathbf{e}}(t)$ имеет вид:

$$\dot{\mathbf{e}}(t)=\dot{\xi}(t)+\dot{\boldsymbol{\eta}}(t)\mathbf{k}+\dot{\zeta}(t)\mathbf{b}+\dot{\boldsymbol{\rho}}(t)\mathbf{m}-\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}_0(t)\xi(t)+\mathbf{L}(t)y(t)+$$

$$+\mathbf{A}_0(t)\boldsymbol{\eta}(t)k+\mathbf{I}y(t)\mathbf{k}+\mathbf{A}_0(t)\zeta(t)\mathbf{b}+\mathbf{I}u(t)\mathbf{b}+\mathbf{A}_0(t)\boldsymbol{\rho}(t)\mathbf{m}+\mathbf{I}f(y)\mathbf{m}-$$

$$-\left(\mathbf{A}_0(t)+\mathbf{L}(t)\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\right)\mathbf{x}(t)-\mathbf{k}\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{x}(t)-\mathbf{b}u(t)-\mathbf{m}f(y)=$$

$$=\mathbf{A}_0(t)\left(\xi(t)+\boldsymbol{\eta}(t)\mathbf{k}+\zeta(t)\mathbf{b}+\boldsymbol{\rho}(t)\mathbf{m}\right)-\mathbf{A}_0(t)\mathbf{x}(t)=\mathbf{A}_0\mathbf{e}(t).$$

Решением полученного дифференциального уравнения является функция:

$$\mathbf{e}(t)=\boldsymbol{\Phi}(t)\boldsymbol{\theta}, \tag{9}$$

где $\boldsymbol{\theta}=\mathbf{e}(0)$ — начальные условия вектора $\mathbf{e}(t)$. При нулевых начальных условиях динамической системы (2)—(6):

$$\mathbf{e}(0)=-\mathbf{x}(0).$$

Выполнив подстановку (9) в (8), получим:

$$\mathbf{x}(t)-\xi(t)=\boldsymbol{\eta}(t)\mathbf{k}+\zeta(t)\mathbf{b}+\boldsymbol{\rho}(t)\mathbf{m}-\boldsymbol{\Phi}(t)\boldsymbol{\theta}. \tag{10}$$

Преобразуем полученное выражение, умножив обе части равенства (10) на $\mathbf{C}^{\mathrm{T}}(t)$. Полученное уравнение является линейной регрессионной моделью вида (7).

Для оценки неизвестных параметров линейной регрессии могут быть применены различные подходы: например, градиентный алгоритм идентификации [17], метод динамического расширения регрессора и смешивания [15, 16] и др. Стоит отметить, что большинство методов может быть применено, только если регрессия удовлетворяет условию неисчезающего возбуждения:

$$\alpha_2\mathbf{I}\le\int_{t_0}^{t_0+\delta}\boldsymbol{\Psi}(\tau)\boldsymbol{\Psi}^{\mathrm{T}}(\tau)d\tau\le\alpha_1\mathbf{I},\ \text{для всех } t_0>0,$$

где $\alpha_1$, $\alpha_2$ и $\delta$ — положительные константы.

В настоящей работе для оценки неизвестных параметров линейной регрессионной модели (7) выбран метод наименьших квадратов с фактором забывания (forgetting factor) [18, 19]:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\Theta}}}=\gamma\mathbf{F}(t)\boldsymbol{\Psi}^{\mathrm{T}}(t)\left(z(t)-\boldsymbol{\Psi}(t)\hat{\boldsymbol{\Theta}}\right),$$

$$\dot{\mathbf{F}}=\begin{cases}-\gamma\mathbf{F}(t)\boldsymbol{\Psi}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\Psi}(t)\mathbf{F}(t)+\beta\mathbf{F}(t), & \text{если } \mathbf{F}(t)\le\mathrm{M},\\ 0 & \text{если } \mathbf{F}(t)>\mathrm{M},\end{cases}$$

где $\mathbf{F}(0)=\dfrac{1}{f_0}\mathbf{I}$, где $\mathbf{I}$ — единичная матрица; $\gamma>0$, $\beta>0$, $f_0\ge0$, $\mathrm{M}>0$ — настраиваемые параметры, а вектор $\hat{\boldsymbol{\Theta}}=\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{\theta}} & \hat{\mathbf{k}} & \hat{\mathbf{b}} & \hat{\mathbf{m}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\hat{\Theta}_1 & \hat{\Theta}_2 & \hat{\Theta}_3 & \hat{\Theta}_4 & \hat{\Theta}_5 & \hat{\Theta}_6 & \hat{\Theta}_7 & \hat{\Theta}_8\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — оценка вектора неизвестных параметров $\boldsymbol{\Theta}$.

Оценив неизвестные постоянные параметры системы, оценку вектора состояния можно найти с помощью (10) в виде:

$$\hat{\mathbf{x}}(t)=\xi(t)-\mathbf{\Phi}(t)\begin{bmatrix}\hat{\Theta}_1\\ \hat{\Theta}_2\end{bmatrix}+\boldsymbol{\eta}(t)\begin{bmatrix}\hat{\Theta}_3\\ \hat{\Theta}_4\end{bmatrix}+\zeta(t)\begin{bmatrix}\hat{\Theta}_5\\ \hat{\Theta}_6\end{bmatrix}+\boldsymbol{\rho}(t)\begin{bmatrix}\hat{\Theta}_7\\ \hat{\Theta}_8\end{bmatrix}.$$

**Результаты моделирования.** При моделировании алгоритма использовалась система (1) со следующими параметрами:

$$\mathbf{A}(t)=\begin{bmatrix}2-\sin t & 1\\ -8+\cos t & 0\end{bmatrix},\ \mathbf{b}=\begin{bmatrix}1\\ 2\end{bmatrix},\ \mathbf{k}=\begin{bmatrix}-1\\ 3\end{bmatrix},\ \mathbf{C}(t)=\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{w}(y,t)=\mathbf{m}\sin y,$$

где $\mathbf{m}=\begin{bmatrix}-4\\ 4\end{bmatrix}$.

Используя вектор $\mathbf{L}(t)=\begin{bmatrix}2-\sin t\\ 1+\cos t\end{bmatrix}$, получим

$$\mathbf{A}_0(t)=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -9 & 0\end{bmatrix}.$$

Начальные условия вектора состояния при этом:

$$\mathbf{x}(0)=\begin{bmatrix}-3\\ -2\end{bmatrix}.$$

Для алгоритма оценки были выбраны следующие параметры: $\alpha=1000$, $\mathrm{M}=10^{12}$, $\beta=1$, $f_0=0{,}1$. На вход системы был подан синусоидальный сигнал: $u(t)=\sin t$.

На рис. 1 приведены переходные процессы оценки неизвестных параметров $\hat{\Theta}$. На рис. 2 представлены переходные процессы для ошибки оценивания по каждому из неизвестных параметров (*а* — $\hat{\Theta}_1-\Theta_1$; *б* — $\hat{\Theta}_2-\Theta_2$; *в* — $\hat{\Theta}_3-\Theta_3$; *г* — $\hat{\Theta}_4-\Theta_4$; *д* — $\hat{\Theta}_5-\Theta_5$; *е* — $\hat{\Theta}_6-\Theta_6$; *ж* — $\hat{\Theta}_7-\Theta_7$; *з* — $\hat{\Theta}_8-\Theta_8$).

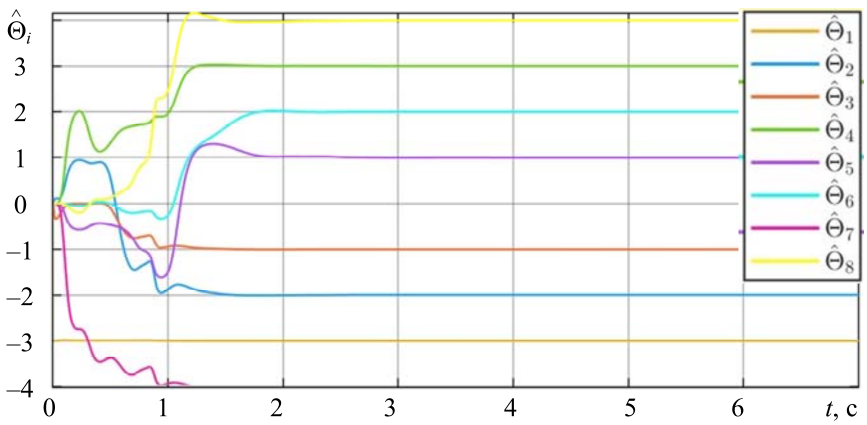


*Рис. 1*

Целью статьи была разработка наблюдателя состояния системы (1), обеспечивающего сходимость оценки неизвестных параметров и вектора состояния к реальным значениям, что означает сходимость ошибки оценивания к нулю. На представленных графиках видно, что ошибки оценивания всех параметров, а также компонентов вектора состояния сходятся к нулю, что полностью соответствует поставленной цели.

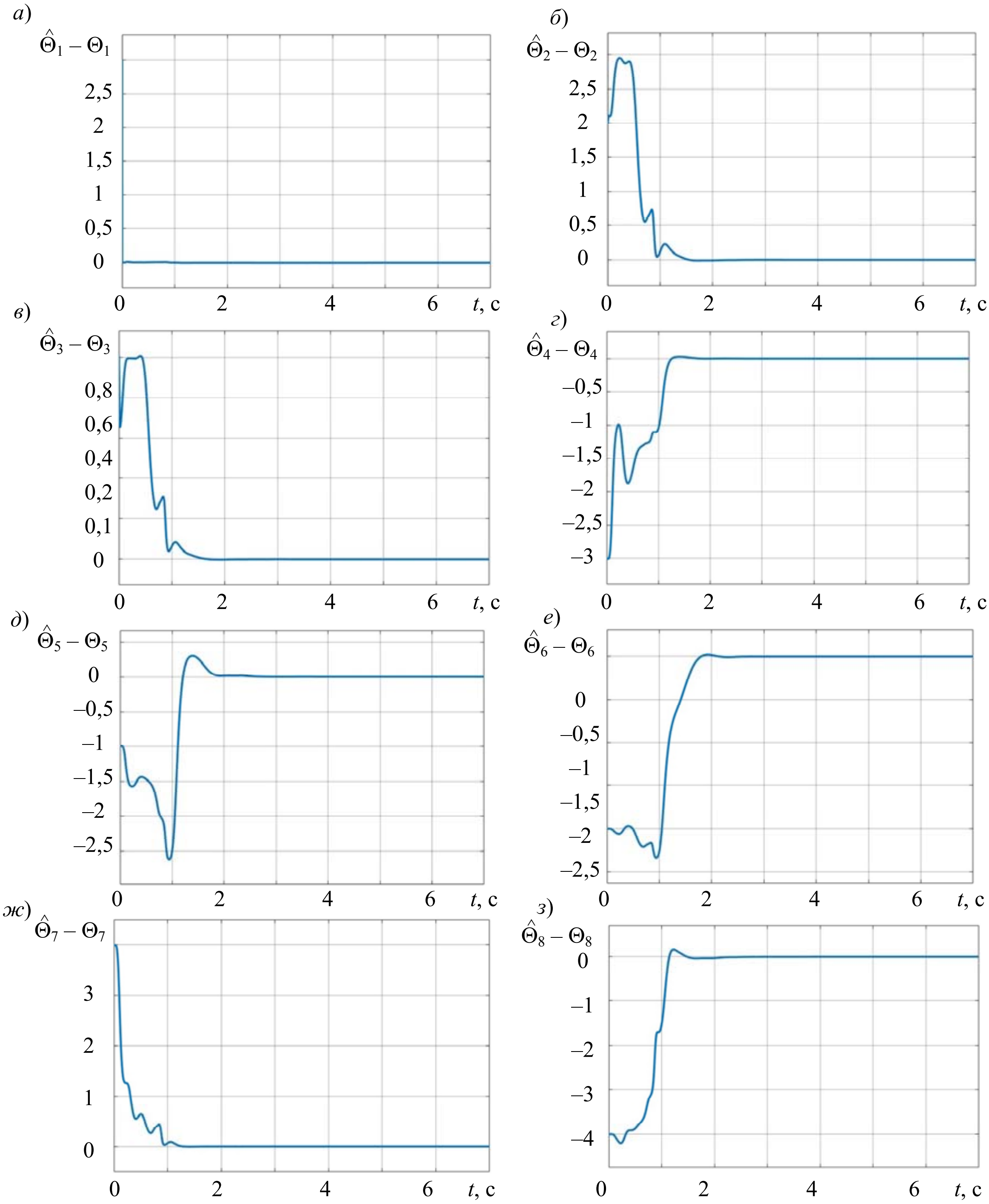


*Рис. 2*

На рис. 3 приведены переходные процессы для ошибки оценки компонентов вектора состояния исходной нелинейной нестационарной системы (*а* — $\hat{x}_1 - x_1$; *б* — $\hat{x}_2 - x_2$).

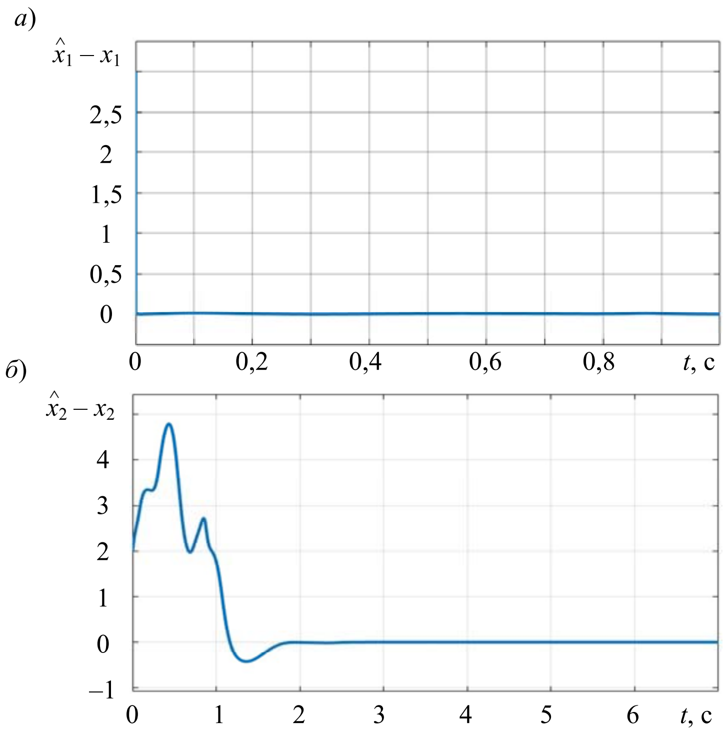


*Рис. 3*

Представленные на рисунках результаты моделирования демонстрируют работоспособность предложенного наблюдателя переменных состояния нелинейной нестационарной системы (1), содержащей неизвестные постоянные параметры.

**Заключение.** В работе предложен адаптивный наблюдатель состояния нелинейной нестационарной системы, параметры которой частично неизвестны. Неизвестные постоянные параметры содержатся в матрице (векторе) управления, а также в нелинейном компоненте. Измеряется только выходная переменная, входной сигнал полагается известным. Работоспособность предложенного алгоритма проиллюстрирована математическим моделированием.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каленова В. И., Морозов В. М.* Линейные нестационарные системы и их приложения к задачам механики: учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 208 с. ISBN 978-5-9221-1231-4.

2. *Баландин Д. В., Коган М. М.* Управление и оценивание в линейных нестационарных системах на основе эллипсоидальных множеств достижимости // Автоматика и телемеханика. 2020. № 8. С. 8—28.

3. *Haotian Xu, Shuai Liu, Shangwei Zhao, Jingcheng Wang*. Distributed control for a class of nonlinear systems based on distributed high-gain observer // ISA Transactions, 2023. Vol. 138, N 7. DOI:10.1016/j.isatra.2023.03.002.

4. *Venkateswaran S., Kravaris C.* Linear Unknown Input Observers for Sensor Fault Estimation in Nonlinear Systems // IFAC-PapersOnLine. 2023. Vol. 56, is. 1. P. 61—66.

5. *Bobtsov A., Ortega R., Yi B., Nikolaev N.* Adaptive state estimation of state-affine systems with unknown time-varying parameters // Intern. J. of Control. 2021. Vol. 95, N 9. P. 1—26. DOI:10.1080/00207179.2021.1913647.

6. *Glushchenko A., Lastochkin K.* Robust Time-Varying Parameters Estimation Based on I-DREM Procedure // arXiv preprint arXiv:2111.11716, 2021.

7. *Gao F., Jiang G., Zhang Z., Song J.* An adaptive observer for actuator and sensor fault diagnosis in linear time-varying systems // Proc. of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE, 2012. P. 3281—3285.

8. *Wang F., Zong M., Chen W.* Fault diagnosis of linear time-varying system based on high gain adaptive compensation sliding mode observer // 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2017. P. 1688—1691.

9. *Кочетков С. А.* Об одном алгоритме идентификации параметров в линейных нестационарных системах // Тр. IX Междунар. конф. „Идентификация систем и задачи управления“ SICPRO'12. 2012. С. 195—209.

10. *Bobtsov A., Nikolaev N., Slita O., Kozachek O., Oskina O.* Adaptive observer for a LTV system with partially unknown state matrix and delayed measurements // 14th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. ICUMT-2022. 2022. P. 165—170.

11. *Бобцов А. А., Николаев Н. А., Ортега Мартинес Р., Слита О. В., Козачёк О. А.* Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейной нестационарной системы с частично неизвестными параметрами матрицы состояния и вектора входа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 6. С. 283—288.

12. *Rugh W. J.* Linear system theory. Prentice-Hall, Inc., 1996.

13. *Tranninger M., Seeber R., Zhuk S., Steinberger M., and Horn M.* Detectability Analysis and Observer Design for Linear Time Varying Systems // IEEE Control Systems Letters. 2020. Vol. 4, N 2. P. 331—336.

14. *Tranninger M., Zhuk S., Steinberger M., Fridman L., Horn M.* Non-Uniform Stability, Detectability, and Sliding Mode Observer Design for Time Varying Systems with Unknown Inputs // arXiv preprint arXiv:1809.06460. 2018.

15. *Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., and Pyrkin A*. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2016. Vol. 62, N 7. P. 3546—3550.

16. *Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A.* Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing // 2016 American Control Conference (ACC). IEEE. 2016. P. 6971—6976.

17. *Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. М.: Наука, 2000. 549 с.

18. *Ljung L.* System identification // Signal analysis and prediction. Boston, MA: Birkhäuser, 1998. P. 163—173.

19. *Sastry S., Bodson M.* Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. New Jersey: Prentice-Hall, 1989.

**Сведения об авторах**

***Ольга Андреевна Козачёк*** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: oakozachek@itmo.ru

***Алексей Алексеевич Бобцов*** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; директор мегафакультета КТиУ; E-mail: bobtsov@mail.ru

***Николай Анатольевич Николаев*** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: nikona@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.03.23; одобрена после рецензирования 24.03.23; принята к публикации 22.06.23.

**REFERENCES**

1. Kalenova V.I., Morozov V.M. *Lineynyye nestatsionarnyye sistemy i ikh prilozheniya k zadacham mekhaniki* (Linear Nonstationary Systems and Their Applications to Problems in Mechanics), Moscow, 2010, 208 p. (in Russ.)
2. Balandin D.V., Kogan M.M. *Automation and Remote Control*, 2020, no. 8(81), pp. 1367–1384.
3. Haotian Xu, Shuai Liu, Shangwei Zhao, Jingcheng Wang, *ISA Transactions*, 2023, no. 7(138), DOI:10.1016/j.isatra.2023.03.002.
4. Venkateswaran S., Kravaris C. *IFAC-PapersOnLine*, 2023, no. 1(56), pp. 61–66.
5. Bobtsov A., Ortega R., Yi B., Nikolaev N. *International Journal of Control*, 2021, no. 9(95), pp. 1–26, DOI:10.1080/00207179.2021.1913647.
6. Glushchenko A., Lastochkin K. *arXiv preprint arXiv*:2111.11716, 2021.
7. Gao F., Jiang G., Zhang Z., Song J. *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, IEEE, 2012, pp. 3281–3285.
8. Wang F., Zong M., *Chen W. 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC),* IEEE, 2017, pp. 1688–1691.
9. Kochetkov S.A. *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya, SICPRO'12 (System Identification and Control Problems" SICPRO'12), Proceedings of the IX International Conference,* 2012, pp. 195–209. (in Russ.)
10. Bobtsov A., Nikolaev N., Slita O., Kozachek O., Oskina O. *14th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT* 2022, 2022, pp. 165–170.
11. Bobtsov A.A., Nikolaev N.A., Ortega R., Slita O.V., Kozachek O.A. *Mechatronics, Automation, Control,* 2022, no. 6(23), pp. 283–288. (in Russ.)
12. Rugh W.J. *Linear system theory,* Prentice-Hall, Inc., 1996.
13. Tranninger M., Seeber R., Zhuk S., Steinberger M. and Horn M. *IEEE Control Systems Letters,* 2020, no. 2(4), pp. 331–336.

14. Tranninger M., Zhuk S., Steinberger M., Fridman L., Horn M. *arXiv preprint arXiv:1809.06460*, 2018.
15. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., and Pyrkin A. *IEEE Transactions on Automatic Control,* 2016, no. 7(62), pp. 3546–3550.
16. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. *2016 American Control Conference (ACC), IEEE,* 2016, pp. 6971–6976.
17. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelineynoye i adaptivnoye upravleniye slozhnymi dinamicheskimi sistemami* (Nonlinear and Adaptive Control of Complex Dynamic Systems), Moscow, 2000, 549 p. (in Russ.)
18. Ljung L. *Signal analysis and prediction,* Boston, MA, Birkhäuser, 1998, pp. 163–173.
19. Sastry S., Bodson M. *Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness*, New Jersey, Prentice-Hall, 1989.

***Data on authors***

***Olga A. Kozachek*** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: oakozachek@itmo.ru

***Alexey A. Bobtsov*** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Director of Mega-faculty of Computer Technologies and Control; E-mail: bobtsov@mail.ru

***Nikolay A. Nikolaev*** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: nikona@yandex.ru

Received 15.03.23; approved after reviewing 24.03.23; accepted for publication 22.06.23.