УДК 681.51 DOI: 10.17587/mau.21.387-393

Дат Во Куок, аспирант, cuoi.di.em89@gmail.com,
А. А. Бобцов, д-р техн. наук, ведущий профессор, проф., bobtsov@mail.ru,
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

Управление по выходу линейными нестационарными системами с использованием методов параметрической идентификации

Рассматривается задача управления линейными нестационарными системами по выходу, т. е. без измерения вектора переменных состояния или производных выходного сигнала. Для синтеза стабилизирующего управления выбирается хорошо зарекомендовавшая себя онлайн процедура решения матричного дифференциального уравнения Риккати. Данная процедура предусматривает синтез линейных статических обратных связей по переменным состояния в случае полностью известных параметров объекта управления. Если переменные состояния не измеряются, то для синтеза наблюдателя с помощью матричного дифференциального уравнения Риккати можно воспользоваться дуальной схемой, предусматривающей транспонирование матрицы состояния и замену матрицы входа на матрицу выхода. Хорошо известно, что наблюдатель переменных состояния построенный на базе решения матричного дифференциального уравнения Риккати, обеспечивает экспоненциальную устойчивость замкнутой системы в случае ее равномерной наблюдаемости. Несмотря на тот факт, что данный тип наблюдателей можно отнести к классу универсальных, они имеют ряд существенных недостатков. Основной проблемой подобных наблюдателей является необходимость точного знания параметров и требование равномерной наблюдаемости, которые на практике не всегда можно реализовать. Таким образом, проблема синтеза новых методов построения наблюдателей переменных состояния линейных нестационарных систем до сих пор остается актуальной. Некоторое время назад был предложен ряд методов синтеза адаптивных наблюдателей переменных состояния для нелинейных систем. Основная идея синтеза наблюдателей базировалась на преобразовании исходной динамической системы к линейной регрессионной модели, содержащей неизвестные параметры, которые, в свою очередь, являлись функциями от начальных условий переменных состояния объекта управления. Такой подход в англоязычной литературе получил название PEBO (parameter estimation based observer), что дословно можно перевести как "наблюдатель, основанный на оценивании параметров". В данной статье на базе метода PEBO предлагается новый подход к синтезу наблюдателей переменных состояния для нестационарных систем. Данный подход обеспечивает возможность получения монотонных оценок сходимости с регулированием времени переходного процесса.

Ключевые слова: *нестационарные системы, наблюдатели переменных состояния, идентификация параметров*

Введение

Проблема управления линейными стационарными системами является классической и хорошо изученной проблемой современной теории управления. За последние несколько десятилетий для специальных математических структур объектов управления были предложены разные оригинальные методы (см., например, работы [1—10]). Так, в классе адаптивных и робастных методов управления по выходу широко представлены регуляторы с сильной обратной связью (см., например, статьи [1, 2]) допускающие, что линейная стационарная система представлена в некоторой специальной форме вида

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + \eta(t)y(t) + bu(t),\; y(t) = h^{\mathrm{T}}x(t),$$

где вектор $x(t)$ не измеряется; F, b и h — неизвестные постоянные матрицы; $\eta(t)$ — вектор неизвестных переменных параметров; $y(t)$ — выходная переменная системы, которая подлежит измерениям.

В статьях [1, 2] в предположении, что передаточная функция для тройки матриц F, b и h является минимально-фазовой, был синтезирован регулятор, обеспечивающий для достаточно больших коэффициентов обратной связи стабилизацию линейного нестационарного объекта. Аналогично статьям [1, 2] в работах [3—10] представлены регуляторы, позволяющие стабилизировать линейные нестационарные системы, на которые наложены некоторые структурные ограничения. Однако насколько известно авторам данной статьи, не существует общих методов, кроме классического подхода — решения в реальном масштабе времени матричного дифференциального уравнения Риккати. Иными словами, в данной статье рассматривается задача стабилизации полностью управляемого и наблюдаемого линейного нестационарного объекта управления, представленного в форме вход—состояние—выход:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \qquad (1)$$

$$y(t) = C(t)x(t), \qquad (2)$$

где $x(t) \in R^n$ — неизмеряемый вектор переменных состояния; $A(t)$, $B(t)$ и $C(t)$ —нестационарные матрицы с известными коэффициентами; $u(t)$ — сигнал управления.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим полностью управляемый и наблюдаемый нестационарный одноканальный объект управления (1), (2). Предполагая, что все параметры модели (1), (2) являются известными (т. е. коэффициенты матриц $A(t)$, $B(t)$ и $C(t)$ — известные функции времени), но вектор переменных состояния $x(t)$ не измеряется, требуется синтезировать закон управления $u(t)$, обеспечивающий асимптотическую устойчивость положения равновесия $x = 0$.

Синтез закона управления

В данном разделе рассмотрим решение задачи синтеза закона управления при допущениях, рассмотренных в разделе "Математическая постановка задачи". Решение задачи синтеза закона управления будет проведена в два этапа. На первом этапе будем допускать, что вектор переменных состояния $x(t)$ измеряется. Для решения данной задачи будем использовать онлайн процедуру решения матричного дифференциального уравнения Риккати (см., например, работы [11, 12]). На втором этапе рассмотрим новый метод синтеза наблюдателя переменных состояния $x(t)$ и далее, на базе полученных оценок, еще раз воспользуемся процедурой решения уравнения Риккати.

Этап 1. Рассмотрим модель (1), (2) в предположении, что вектор переменных состояния $x(t)$ измеряется. Выберем закон управления в следующем виде:

$$u(t) = -B^{\mathrm{T}}Px(t), \qquad (3)$$

где нестационарная матрица P находится из решения дифференциального уравнения Риккати

$$\dot{P} + A^{\mathrm{T}}P + PA - PBB^{\mathrm{T}}P = -2\alpha P - Q, \qquad (4)$$

где число $\alpha > 0$ и стационарная матрица $Q = Q^{\mathrm{T}} > 0$.

Покажем, что при использовании закона управления (3) для объекта (1), (2) можно получить экспоненциальную сходимость вектора переменных состояния $x(t)$ к нулю. Для этого рассмотрим функцию Ляпунова вида

$$V = x^{\mathrm{T}}Px. \qquad (5)$$

Дифференцируя (5) с учетом уравнений (1)—(4), имеем

$$\dot{V} = -2\alpha x^{\mathrm{T}}Px - x^{\mathrm{T}}Qx \leqslant -2\alpha V. \qquad (6)$$

Из неравенства (6) следует экспоненциальная сходимость вектора $x(t)$ к нулю.

Для иллюстрации работоспособности закона управления (3), (4) представим результаты компьютерного моделирования. Пусть параметры матриц $A(t)$, $B(t)$ имеют следующий вид:

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_1(t) & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \ B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$a_1(t) = \begin{cases} -0,2t \text{ при } t < 5; \\ -1 \text{ при } t \geqslant 5. \end{cases}$$

Проведем компьютерное моделирование для единичной матрицы $Q = Q^{\mathrm{T}} > 0$ и различных значений коэффициента $\alpha > 0$. График переходного процесса при $u(t) = 0$ представлен на рис. 1. На рис. 2, 3 и 4, 5 представлены, соответственно, графики переходных процессов для $\alpha = 1$ и $\alpha = 10$.

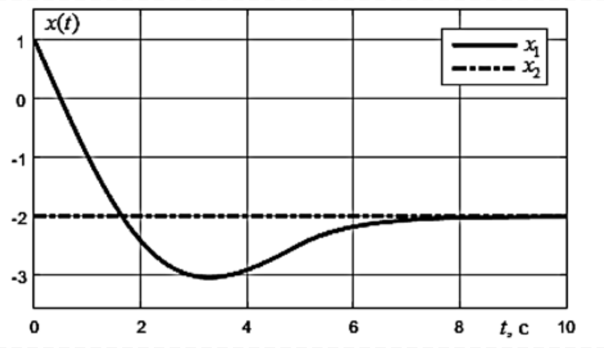

Рис. 1. Переходные процессы для вектора переменных состояния $x(t)$ при $u(t) = 0$

Fig. 1. Transients for the vector of state variables $x(t)$ for $u(t) = 0$

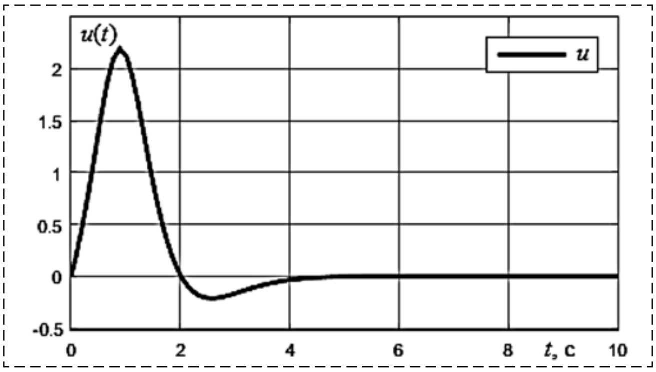

Рис.2. График переходного процесса для функции *u*(*t*) при α = 1

Fig. 2. Graph of transient for function *u*(*t*) for α = 1

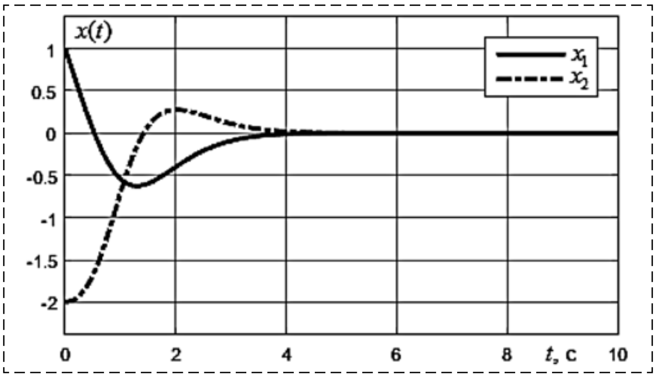

Рис. 3. Переходные процессы для вектора переменных состояния *x*(*t*) при α = 1

Fig. 3. Transients for the vector of state variables *x*(*t*) for α = 1

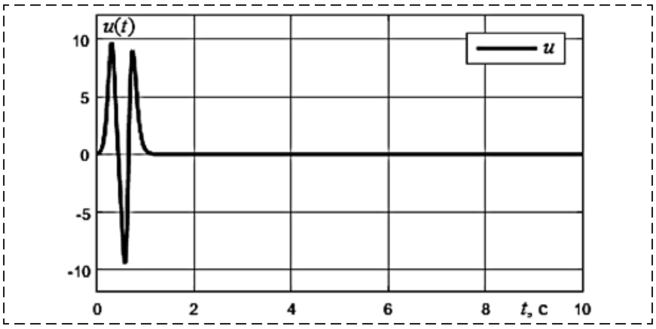

Рис. 4. График переходного процесса для функции *u*(*t*) при α = 10

Fig. 4. Graph of transient for function *u*(*t*) for α = 10

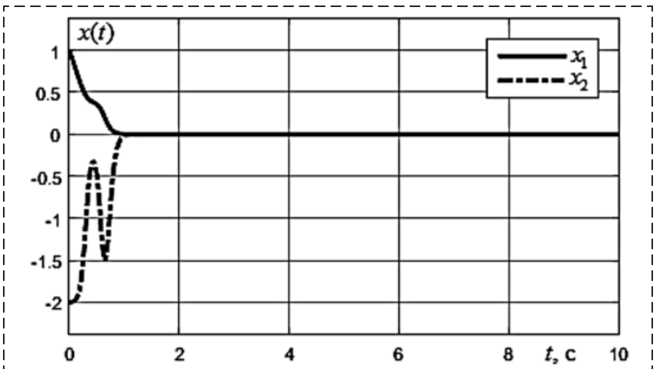

Рис. 5. Переходные процессы для вектора переменных состояния *x*(*t*) при α = 10

Fig. 5. Transients for the vector of state variables *x*(*t*) for α = 10

Из графиков переходных процессов можно видеть, что увеличение значений коэффициента α позволяет ускорять процессы сходимости переменных состояния системы (1)—(3) к нулю.

Этап 2. На данном этапе рассмотрим новый метод синтеза наблюдателя для объекта управления (1), (2). Для синтеза наблюдателя будем использовать идеи, предусматривающие использование методов параметрической идентификации, опубликованные в работах [13, 14]. Для этого рассмотрим динамическую систему, полностью эквивалентную (1), т. е.

$$\dot{z}(t) = A(t)z(t) + B(t)u(t). \tag{7}$$

Рассмотрим вектор

$$e(t) = z(t) - x(t). \tag{8}$$

Дифференцируя соотношение (8), получаем

$$\dot{e}(t) = A(t)e(t). \tag{9}$$

Сформируем фундаментальную матрицу решения уравнения (9)

$$\dot{\Phi}(t) = A(t)\Phi(t),$$

где для простоты выберем Ф(0) = 1.

Хорошо известно (см., например, работу [15]), что

$$e(t) = \Phi(t)\theta,$$

где $\theta = z(0) - x(0)$.

Тогда из уравнения (8) следует

$$x(t) = z(t) - e(t) = z(t) - \Phi(t)\theta,$$

откуда легко видеть, что задача оценивания вектора $x(t)$ может быть сведена к идентификации вектора неизвестных параметров θ, т. е.

$$\hat{x}(t) = z(t) - \Phi(t)\hat{\theta}. \tag{10}$$

Для идентификации вектора неизвестных параметров θ воспользуемся уравнением (2):

$$y(t) = C(t)z(t) - C(t)\Phi(t)\theta. \tag{11}$$

Из уравнения (11) получаем классическую регрессионную модель вида

$$q = \omega^{\mathrm{T}}\theta, \tag{12}$$

где скаляр $q = y(t) - C(t)z(t)$ и вектор $\omega^{\mathrm{T}} = C(t)\Phi(t)$.

Для идентификации вектора неизвестных параметров θ можно воспользоваться стандартными процедурами, например, градиентным алгоритмом:

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = -k\omega\omega^{\mathrm{T}}\hat{\theta} + k\omega q, \tag{13}$$

где $k > 0$ — коэффициент настройки.

Однако хорошо известно, что в случае градиентного алгоритма (13) вектор $\hat{\theta}$ сходится к θ при условии незатухающего возбуждения (см. подробнее работы [16—18]). Более того, алгоритм (13) не дает возможности существенного ускорения процессов идентификации за счет выбора коэффициента настройки $k > 0$. Для обеспечения высокого быстродействия оценивания параметров, а также монотонности их переходных процессов воспользуемся методом DREM (см., например, статью [16]). Следуя работе [16], пропустим известные элементы регрессионной модели (12) через блоки запаздывания $[\mathrm{H}(\cdot)](t) = (\cdot)(t - \tau)$, где $\tau \in R_+$. Тогда для модели (12) имеем

$$q_{f_i} = \omega_{f_i}^{\mathrm{T}}\theta. \tag{14}$$

Сформулируем на основе исходой регрессионной модели (12) и новой отфильтрованной регрессионной модели (14) расширенную регрессионную модель

$$q_e = A_e\theta, \tag{15}$$

где $q_e = \begin{bmatrix} q \\ q_{f_1} \\ \vdots \\ q_{f_{n-1}} \end{bmatrix}, A_e = \begin{bmatrix} \omega^{\mathrm{T}} \\ \omega_{f_1}^{\mathrm{T}} \\ \vdots \\ \omega_{f_{n-1}}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}$.

Умножая уравнение (15) на алгебраическое дополнение A_e, получаем

$$Y = adjA_e q_e = \Delta\theta,$$

откуда получаем скалярную модель вида

$$Y_i = \Delta\theta_i,$$

где $\Delta = \det\{A_e\}$ — определитель матрицы A_e.

Оценку θ_i будем осуществлять по формуле, аналогичной (13), с тем лишь отличием, что рассмотрению подлежит скалярное уравнение

$$d\hat{\theta}_i/dt = -k_i\Delta(\Delta\hat{\theta}_i - Y_i), \tag{16}$$

где k_i — положительное число, увеличивая которое, можно добиваться ускорения процессов сходимости неизвестных параметров к истинным значениям.

Легко показать, что для ошибки оценивания параметра $\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i$ справедливо

$$\dot{\tilde{\theta}}_i = -k_i\Delta^2\tilde{\theta}_i, \tag{17}$$

откуда легко показать, что за счет увеличения числа k_i можно добиваться увеличения скорости сходимости $\tilde{\theta}_i$.

С учетом наблюдателя (7), (10), (16) запишем закон управления (3) следующим образом:

$$u(t) = -B^{\mathrm{T}}P\hat{x}(t). \tag{18}$$

Возникает резонный вопрос относительно преимуществ используемого метода синтеза наблюдателя по отношению к достаточно очевидному подходу, предусматривающему решение матричного дифференциального уравнения Риккати (см, например, [11, 12]). Суть этого подхода заключается в синтезе наблюдателя вида

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - HC^{\mathrm{T}}(C\hat{x} - y),$$

где матрица H является решением матричного уравнения

$$\dot{H} = HA^{\mathrm{T}} + AH - HC^{\mathrm{T}}CH + Q.$$

Хорошо известно (см., например, работы [11, 12]), что данный наблюдатель обеспечивает экспоненциальную сходимость, если система является равномерно наблюдаемой, т. е. существуют положительные числа T_0, δ_1 и δ_2 такие, что для любого момента времени t выполняется неравенство

$$\delta_1 I \leqslant \int_t^{t+T_0} \Phi^{\mathrm{T}}(t,\tau)C^{\mathrm{T}}C\Phi(t,\tau)d\tau \leqslant \delta_2 I,$$

где $\Phi(\cdot,\ \cdot)$ — переходная матрица системы (1).

Однако реализация подобных наблюдателей имеет ряд недостатков. Прежде всего это вычисление матрицы H, требующее решения онлайн n дифференциальных уравнений с квадратичными членами, которые могут быть чувствительны к численным методам. Еще одним существенным недостатком является точное знание всех параметров объекта управления (1). В частности, при $C = rC_0$, где r — неизвестное число, а C_0 — известная матрица, предлагаемый подход не работает, но метод (7), (10), (16) может быть успешно применен с небольшим усложнением в настройке параметров. В самом деле, если принять $C = rC_0$, где r — неизвестное число, а C_0 — известная матрица, то из уравнения (11) получим

$$y(t) = rC_0 z(t) - rC_0 \Phi(t)\theta,$$

откуда по описанной ранее процедуре можно найти параметры r и θ.

Для иллюстрации работоспособности предлагаемого подхода к синтезу наблюдателя проведем компьютерное моделирование. Примем, как и в предыдущем примере, следующие параметры объекта управления:

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_1(t) & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};\ B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$a_1(t) = \begin{cases} -0,2t \text{ при } t < 5; \\ -1 \text{ при } t \geqslant 5. \end{cases}$$

Зададим τ = 0,01, k_i = 500 и $z(0)$ = 0 и промоделируем наблюдатель (7), (10), (16) совместно с законом управления (18). Выберем, как и ранее, единичную матрицу $Q = Q^{\mathrm{T}} > 0$ и промоделируем замкнутую систему для различных значений коэффициента $\alpha > 0$. На рис. 6—8

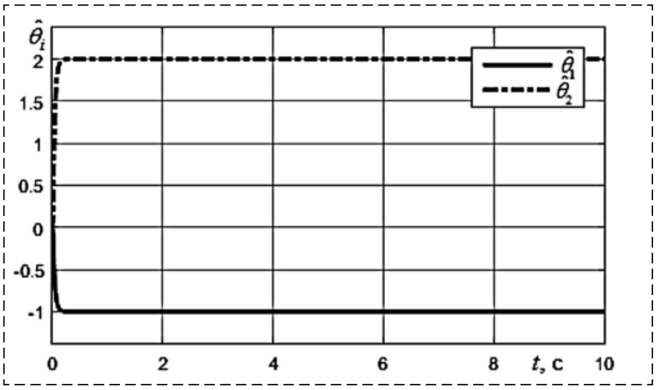

Рис. 6. Графики оценок параметров $\hat{\theta}_i$ (τ = 0,01, $Q = I$, α = 1)
Fig. 6. Graphs of parameter estimations $\hat{\theta}_i$ (τ = 0,01, $Q = I$, α = 1)

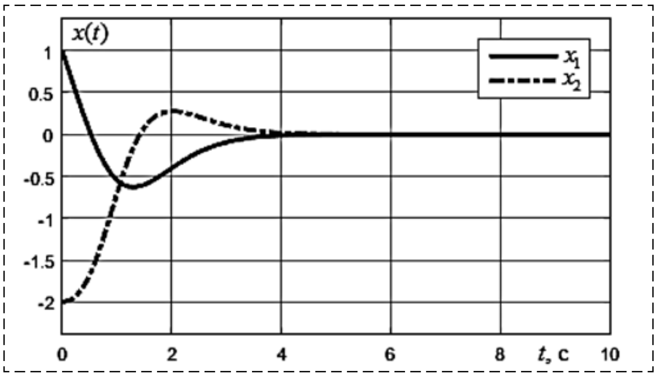

Рис. 7. Графики сигналов x ($Q = I$, α = 1)
Fig. 7. Graphs of signals x ($Q = I$, α = 1)

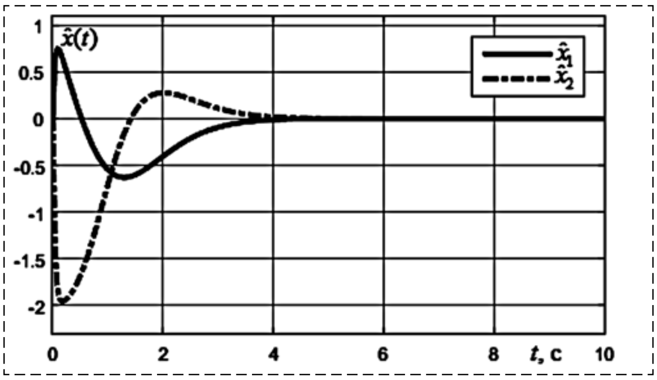

Рис. 8. Графики оценок сигналов $\hat{x}$ (τ = 0,01, $Q = I$, α = 1)
Fig. 8. Graphs of estimations $\hat{x}$ (τ = 0,01, $Q = I$, α = 1)

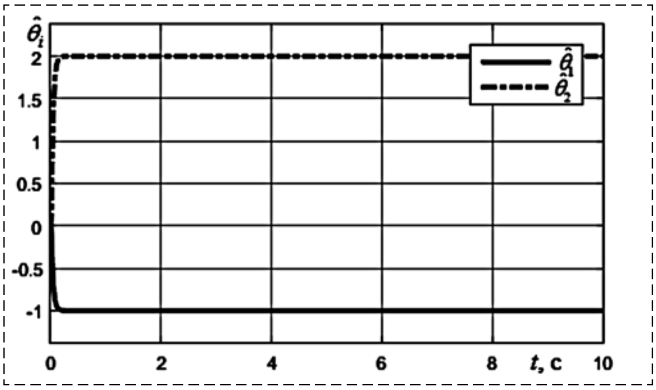

Рис. 9. Графики оценок параметров $\hat{\theta}_i$ (τ = 0,01, $Q = I$, α = 10)
Fig. 9. Graphs of parameter estimations $\hat{\theta}_i$ (τ = 0,01, $Q = I$, α = 10)

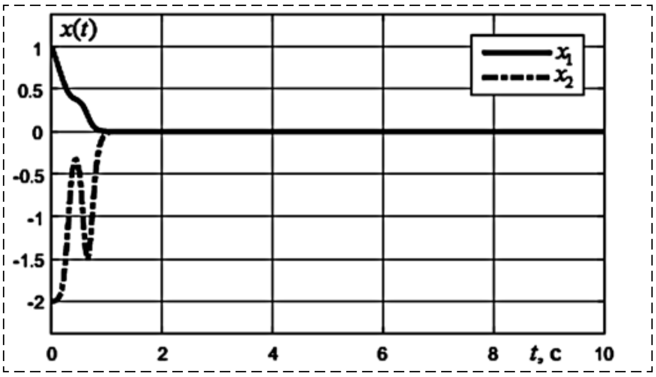

Рис. 10. Графики сигналов x ($Q = I$, α = 10)
Fig. 10. Graphs of signals x ($Q = I$, α = 10)

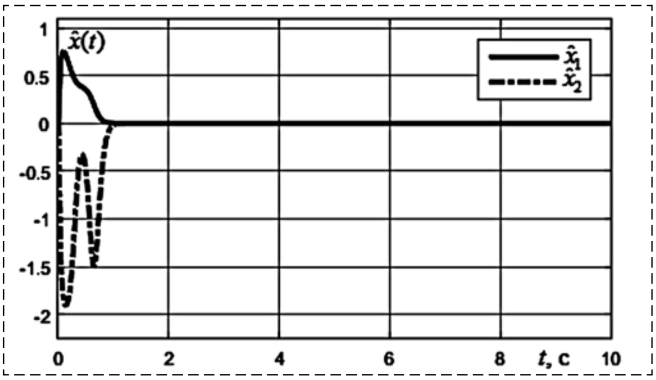

Рис. 11. Графики оценок сигналов $\hat{x}$ (τ = 0,01, $Q = I$, α = 10)
Fig. 11. Graphs of estimations $\hat{x}$ (τ = 0,01, $Q = I$, α = 10)

и 9—11 представлены, соответственно, графики переходных процессов для коэффициентов $\alpha = 1$ и $\alpha = 10$.

Заключение

В статье был рассмотрен новый метод синтеза закона управления по выходу для системы (1), (2). Был синтезирован наблюдатель переменных состояния вида (7), (10), (16), обеспечивающий асимптотическую сходимость настраиваемых оценок к истинным значениям объекта управления. Для синтеза наблюдателя был использован новый подход, предусматривающий преобразование исходной модели объекта управления к линейной регрессионной модели вида (12). Представленные в статье результаты компьютерного моделирования иллюстрируют работоспособность предложенного подхода, а также демонстрируют хорошее качество переходных процессов.

В качестве перспектив развития рассмотренного подхода, видится его расширение на класс систем с неизвестными параметрами, а также в условиях возмущающих воздействий.

Список литературы

1. **Бобцов А. А., Наговицина А. Г.** Адаптивное управление по выходу линейными нестационарными объектами // Автоматика и телемеханика. 2006. № 12. С. 163—174.
2. **Бобцов А. А., Григорьев В. В., Наговицина А. Г.** Алгоритм адаптивного управления нестационарным объектом в условиях возмущения и запаздывания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 1. С. 8—14.
3. **Цыкунов А. М.** Робастное управление нестационарными объектами // АиТ. 1996. № 2. С. 117—125.
4. **Бобцов А. А., Лямин А. В., Сергеев К. А.** Синтез закона адаптивного управления для стабилизации не точно заданных нестационарных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. № 3. С. 3—7.
5. **Никифоров В. О.** Робастная следящая система // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. № 7. С. 13—18.
6. **Барабанов Н. Е.** О стабилизации линейных нестационарных систем с неопределенностью в коэффициентах // АиТ. 1990. № 10.
7. **Tsakalis K. S., Ioannou P. A.** Adaptive control of linear time-varying plants // Automatica. 1987. Vol. 23, № 4. P. 459—468.
8. **Tsakalis K. S., Ioannou P. A.** Linear time varying systems: control and adaptation. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1993.
9. **Zhang Y., Fidan B., Ioannou P. A.** Backstepping control of linear time-varying systems with known and unknown parameters // IEEE Trans. Automat. Contr. 2003. Vol. 48, № 11. P. 1908—1925.
10. **Юркевич В. Д.** Синтез нелинейных нестационарных систем управления с разнотемповыми процессами. СПб: Наука, 2000.
11. **Wilson J. Rugh.** Linear system theory. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
12. **Juan Rueda-Escobedo, Rosane Ushirobira, Denis Efimov, Jaime Moreno.** Gramian-based uniform convergent observer for stable ltv systems with delayed measurements // International Journal of Control, 2019.
13. **Romeo Ortega, Alexey Bobtsov, Anton Pyrkin, Stanislav Aranovskiy.** A parameter estimation approach to state observation of nonlinear systems // Systems & Control Letters. November 2015. Vol. 85. P. 84—94.
14. **Romeo Ortega, Alexey Bobtsov, Denis Dochain, Nikolay Nikolaev.** State observers for reaction systems with improved convergence rates // Journal of Process Control. November 2019. Vol. 83. P. 53—62.
15. **Демидович Б. П.** Лекции по математической теории устойчивости. М.:Наука, 1967. 472 с.
16. **Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A.** Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing // IEEE Trans. Automat. Control. 2016. Vol. 62, N. 7. P. 3546—3550.
17. **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
18. **Sastry S., Bodson M.** Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. Courier Dover Publications, 2011. 400 p.

Output Control by Linear Time-Varying Systems using Parametric Identification Methods

V. Q. Dat, cuoi.di.em89@gmail.com, **A. A. Bobtsov**, bobtsov@mail.ru,
ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: **Bobtsov Alexey A.**, Dr. Sci. Tech., Professor,
ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation,
e-mail: bobtsov@mail.ru

Accepted on April 15, 2020

Abstract

In this paper the problem of control for time-varying linear systems by the output (i.e. without measuring the vector of state variables or derivatives of the output signal) was considered. For the control design, the well-known online procedure for solving the Riccati matrix differential equation is chosen. This procedure involves the synthesis of linear static feedbacks on state variables in the case of known parameters of the plant. If state variables are not measured, then for the observer design using the matrix Riccati differential equation, using the dual scheme, which provides for the transposition of the state *matrix and the replacement of the input matrix by the output matrix. It is well known that an observer of state variables built on the basis of a solution of the Riccati matrix differential equation ensures the exponential stability of a closed loop system in the case of uniform observability. Despite the fact that this type of observer can be classified as universal, its have a number of significant drawbacks. The main problem of such observers is the need for accurate knowledge of the parameters and the requirement for uniform observability, which in practice cannot always be realized. Thus, the problem of the new methods design for constructing observers of state variables of linear non-stationary systems is still relevant. Some time ago, a number of methods for the adaptive observers design of state variables for nonlinear systems were proposed. The main idea of the synthesis of observers was based on the transformation of the original dynamic system to a linear regression model containing unknown parameters, which in turn were functions of the initial conditions of the state variables of the control object. This approach in the English language literature is called PEBO. This paper, based on the PEBO method, proposes a new approach for the observers design of state for non-stationary systems. This approach provides the possibility of obtaining monotonic convergence estimates with transient time tuning.*

Keywords: *linear time-varying systems, state observers, parameters identification*

For citation:

Dat V. Q., Bobtsov A. A. Output Control by Linear Time-Varying Systems using Parametric Identification Methods, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2020, vol. 21, no. 7, pp. 387—393.

DOI: 10.17587/mau.21.387-393

References

1. **Bobtsov A. A., Nagovitsina A. G.** Adaptive control of linear nonstationary objects output, *Avtomatika i Telemehanika*, 2006, no. 12, pp. 163—174 (in Russian).
2. **Bobtsov A. A., Grigoryev V. V., Nagovitsina A. G.** Adaptive control algorithm by nonstationary object in terms of disturbance and delay time, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2007, no. 1, pp. 8—14 (in Russian).
3. **Cykunov A. M.** Robust control of nonstationary objects, *Avtomatika i Telemehanika,* 1996, no. 2, pp. 117—125 (in Russian).
4. **Bobtsov A. A., Ljamin A. V., Sergeev K. A.** Synthesis of the law of adaptive control for stabilization of not exactly specified non-stationary objects, *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2001, no. 3, pp. 3—7 (in Russian).
5. **Nikiforov V. O.** Robust tracking system, *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 1998, no. 7, pp. 13—18 (in Russian).
6. **Barabanov N. E.** On stabilization of linear nonstationary systems with uncertainty in coefficients, *Avtomatika i Telemehanika*, 1990, no. 10 (in Russian).
7. **Tsakalis K. S., Ioannou P. A.** Adaptive control of linear time-varying plants, *Automatica*, 1987, vol. 23, no. 4, pp. 459—468.
8. **Tsakalis K. S., Ioannou P. A.** Linear time varying systems: control and adaptation, Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 1993.
9. **Zhang Y., Fidan B., Ioannou P. A.** Backstepping control of linear time-varying systems with known and unknown parameters, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2003, vol. 48, no. 11, pp. 1908—1925.
10. **Jurkevich V. D.** Synthesis of nonlinear nonstationary control systems with multi-tempo processes, *SPb, Nauka*, 2000 (in Russian).
11. **Wilson J. Rugh.** Linear system theory, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
12. **Juan Rueda-Escobedo, Rosane Ushirobira, Denis Efimov, Jaime Moreno.** Gramian-based uniform convergent observer for stable ltv systems with delayed measurements, *International Journal of Control*, 2019.
13. **Romeo Ortega, Alexey Bobtsov, Anton Pyrkin, Stanislav Aranovskiy.** A parameter estimation approach to state observation of nonlinear systems, *Systems & Control Letters*, November 2015, vol. 85, pp. 84—94.
14. **Romeo Ortega, Alexey Bobtsov, Denis Dochain, Nikolay Nikolaev.** State observers for reaction systems with improved convergence rates, *Journal of Process Control,* November 2019, vol. 83, Pages 53—62.
15. **Demidovich B. P.** Lectures on the mathematical theory of stability, Moscow, Nauka, 1967, 472 c. (in Russian).
16. **Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A.** Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing, *IEEE Trans. Automat. Control*, 2016, vol. 62, no. 7, pp. 3546—3550.
17. **Mirosnik I. V., Nikiphorov V. O., Phradkov V. O.** Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems, SPb: Nauka, 2000 (in Russian).
18. **Sastry S., Bodson M.** Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness, Courier Dover Publications, 2011, 400 p.

11 декабря 2020 г. в г. Новокузнецк
на базе Научно-исследовательского центра "МашиноСтроение" (НИЦ МС) состоится

IV Международная научно-практическая конференция "МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИКА И РОБОТОТЕХНИКА"

Секции конференции

- Роботы, мехатроника и робототехнические системы
- Методы и техника создания и исследования интеллектуальных машин
- Механика и управление движением машин
- Механизация, автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- Методы контроля и диагностики в машиностроении
- Информационно-измерительные и управляющие системы
- Математическое и программное обеспечение вычислительных машин и комплексов

По итогам конференции издается сборник трудов с присвоением УДК, ББК, ISSN. Сборник индексируется в базе данных РИНЦ. Всем публикациям постатейно присваивается цифровой идентификатор DOI.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
http://srcms.ru