doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1072-1077
УДК 519.71

Компенсация внешних возмущений по выходу для класса линейных систем с запаздыванием в канале управления

Ван Хуан Буй[1], Алексей Анатольевич Маргун[2]✉

[1,2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[2] Институт проблем машиностроения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

[1] buinguyenkhanh201095@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6563-1909
[2] alexeimargun@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594

Аннотация
Предмет исследования. Рассмотрена задача компенсации внешних неизвестных возмущений по выходу при неизмеримом векторе состояния для класса линейных систем с запаздыванием в канале управления. Предполагается, что возмущение является выходом автономного линейного генератора. **Метод.** Для оценки возмущения построен специальный наблюдатель. На основе оценок наблюдателя сформирована система с расширенным вектором состояния, для которой построен регулятор, обеспечивающий компенсацию возмущения. **Основные результаты.** Представлен метод компенсации по выходу внешних возмущений для класса линейных систем с входным запаздыванием. Предложенный подход не требует идентификации параметров возмущения. Работоспособность полученного результата подтверждена с использованием компьютерного моделирования в среде MATLAB Simulink. **Практическая значимость.** Разработанный алгоритм может быть эффективно применен для класса задач, связанных с компенсацией качки в корабельных системах, в управлении движением робототехнических комплексов различного вида и других.

Ключевые слова
внешнее возмущение, линейные системы, адаптивное управление, компенсация возмущений, запаздывание

Благодарности
Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 2019-0898.

Ссылка для цитирования: Буй В.Х., Маргун А.А. Компенсация внешних возмущений по выходу для класса линейных систем с запаздыванием в канале управления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1072–1077. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1072-1077

Compensation of output external disturbances for a class of linear systems with control delay

Van Huan Bui[1], Alexey A. Margun[2]✉

[1,2] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
[2] Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[1] buinguyenkhanh201095@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6563-1909
[2] alexeimargun@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594

Abstract
The paper considers the problem of the output external unknown disturbance compensation under unmeasurable state vector for a class of linear systems with the control channel delay. It is assumed that the disturbance is the output of an autonomous linear generator. A special observer was built to estimate the disturbance. A system with an extended state vector is formed on the base of the observer's estimates. A controller that provides disturbance compensation is

proposed. An algorithm for the output external disturbances compensation for a class of linear systems with input delay is presented. This method does not require identification of disturbance parameters. The performance of the proposed algorithm was confirmed using computer simulation in the MATLAB Simulink software. The developed algorithm can be effectively applied to a class of problems related to rocking compensation in ship systems, control of robotic complexes various kinds, etc.

Keywords
external disturbances, linear systems, adaptive control, disturbance compensation, delay

Acknowledgements
The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment No. 2019-0898.

For citation: Bui V.H., Margun A.A. Compensation of output external disturbances for a class of linear systems with control delay. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1072–1077 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1072-1077

Введение

В последние десятилетия с быстрым развитием науки и техники область применения систем автоматического управления становится все более и более широкой. Одна из важнейших задач при проектировании систем управления — задача компенсации возмущений, например, в робототехнических комплексах, беспилотных летательных аппаратах, космических аппаратах, гидравлических системах и т. д. [1–4]. Известен ряд подходов для решения данной задачи. Основные результаты исследований и разработок предполагают построение независимых алгоритмов идентификации, оценивающих фазы, частоты и амплитуды возмущений, представляемых в виде мультигармонических сигналов. Преимущество данных методов заключается в том, что работа идентификатора не зависит от регулятора, что позволяет применять различные методы управления и компенсации [5–8]. При этом на практике, при отсутствии незатухающего возбуждения регрессора, применение алгоритмов идентификации оказывается неэффективным [9]. С другой стороны, некоторые исследования используют подход прямой адаптивной компенсации [10–14]. Как правило, для этого строят наблюдатель внешних возмущений и блок регулятора, использующий оценку наблюдателя и вектор состояния объекта управления. Отметим, что часто вектор состояния недоступен для измерения, а установка дополнительных датчиков является дорогостоящей или невозможна из-за технологических ограничений.

В данной работе для решения описанной проблемы предложен метод адаптивного управления, обеспечивающий компенсацию внешних возмущений по измеримому выходу системы в условиях запаздывания в канале управления. Для оценки возмущения построен специальный наблюдатель. Компенсацию обеспечивает регулятор, использующий расширенную модель системы, и алгоритм адаптации.

Выполним построение наблюдателя внешних возмущений и синтез закона управления и алгоритма адаптации.

Для подтверждения работоспособности предложенного решения осуществим компьютерное моделирование с использованием программной среды MATLAB Simulink.

Постановка задачи

Рассмотрим класс линейных устойчивых возмущенных объектов управления вида:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t-\tau) + \mathbf{d}f(t), \\ y(t) = \mathbf{C}^T\mathbf{x}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ — неизмеримый вектор состояния объекта управления; $u(t-\tau) \in \mathbb{R}$ — сигнал управления с запаздыванием; $y(t) \in \mathbb{R}$ — измеряемый выход объекта управления; $f(t) \in \mathbb{R}$ — неизмеримое ограниченное внешнее возмущение; $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^n$ — известные постоянные матрицы; τ — известное постоянное запаздывание.

Предположим, что внешнее возмущение $f(t)$ представляет собой мультигармонический сигнал:

$$f(t) = \sum_{i=0}^{n} A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + A_{0i},$$

где неизвестные $A_1, \ldots, A_i$ — амплитуды; $\omega_1, \ldots, \omega_i$ — частоты; $\varphi_1, \ldots, \varphi_i$ — фазы; $A_{01}, \ldots, A_{0i}$ — смещения.

Требуется обеспечить компенсацию внешнего возмущения по выходу с учетом следующих допущений.

Допущение 1. Пары известных постоянных матриц ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$) и ($\mathbf{A}$, $\mathbf{C}$) управляемы и наблюдаемы соответственно. Матрица $\mathbf{A}$ — гурвицева.

Допущение 2. Значения вектора состояния объекта неизмеримы и доступны только сигналы $u(t)$ и $y(t)$.

Допущение 3. Внешнее возмущение $f(t)$ ограничено и может быть представлено как выход линейного автономного генератора с неизвестными параметрами [15]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{\Gamma}\mathbf{z}(t) \\ f(t) = \mathbf{h}^T\mathbf{z}(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{\xi}(t) = \mathbf{G}\xi(t) + \mathbf{L}f(t) \\ f(t) = \boldsymbol{\theta}^T\xi(t) \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mathbf{z}(t) \in \mathbb{R}^q$ — неизмеримый вектор состояния генератора возмущения; $\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{R}^{q\times q}$ — неизвестная постоянная матрица, собственные числа которой некратны и лежат на мнимой оси; $\mathbf{h}^T \in \mathbb{R}^{1\times q}$ — неизвестный постоянный вектор; $\xi(t)$ — регрессор; $\mathbf{G}$ — гурвицева матрица; $\mathbf{L}$ — постоянный вектор; $\boldsymbol{\theta}^T$ — вектор неизвестных постоянных параметров, зависящий от параметров возмущения. Без потери общности предположим, что пара ($\mathbf{\Gamma}$, $\mathbf{h}^T$) полностью наблюдаема и размерность автономного генератора q известна. $\mathbf{G}$ и $\mathbf{L}$ произвольно выбраны так, чтобы пара ($\mathbf{G}$, $\mathbf{L}$) являлась полностью управляемой.

Таким образом, внешнее возмущение может быть рассмотрено в качестве мультигармонического сигнала с неизвестными параметрами, но с известным ограниченным количеством гармоник.

Наблюдатель возмущения

Так как значение вектора состояния объекта недоступно, известны только значения сигнала управления $u(t - \tau)$ и выхода объекта $y(t)$, построим наблюдатель состояния Люенбергера полного порядка вида:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u(t-\tau) + \mathbf{K}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \mathbf{C}^T\hat{\mathbf{x}} \end{cases}, \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^n$ — оценка вектора состояния; $\hat{y} \in \mathbb{R}$ — оценка значения выхода; $\mathbf{K}$ — матрица наблюдателя, определяемая разработчиком.

Обозначим ошибку оценки состояния $\mathbf{e}_x = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$. Динамическая модель ошибки наблюдения имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_x = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \underbrace{(\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C}^T)}_{\mathbf{A}_e}\mathbf{e}_x + \mathbf{d}f \\ \varepsilon = y - \hat{y} = \mathbf{C}^T\mathbf{e}_x \end{cases},$$

где $\mathbf{A}_e = \mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C}^T$, матрица $\mathbf{K}$ выбрана таким образом, чтобы матрица $\mathbf{A}_e$ являлась гурвицевой (для обеспечения устойчивости наблюдателя). Из системы уравнений (1) и (3) получим

$$\varepsilon = \mathbf{W}_e(s)[f], \quad (4)$$

где ε — отфильтрованное согласованное возмущение; $\mathbf{W}_e(s) = \mathbf{C}^T(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_e)^{-1}\mathbf{d}$ — асимптотически устойчивая передаточная функция с гурвицевым знаменателем. В (2) показано, что возмущение может быть представлено в виде линейной регрессии $f(t) = \boldsymbol{\theta}^T\xi(t)$. Перепишем уравнение (4) в виде $\varepsilon = \mathbf{W}_e(s)[\boldsymbol{\theta}^T\xi]$ и вынесем матрицу $\boldsymbol{\theta}^T$ за скобки:

$$\varepsilon = \boldsymbol{\theta}^T\mathbf{W}_e(s)[\xi] = \boldsymbol{\theta}^T\xi_f, \quad (5)$$

где $\xi_f = \mathbf{W}_e(s)[\xi]$ или $\xi_f = \dfrac{\alpha(s)}{\beta(s)}[\xi]$; $\alpha(s)$, $\beta(s)$ — полиномы с известными постоянными коэффициентами. С другой стороны, $\dot{\xi} = \underbrace{(\mathbf{G} + \mathbf{L}\boldsymbol{\theta}^T)}_{\mathbf{Q}}\xi$ и $\dot{\xi}_f = \underbrace{(\mathbf{G} + \mathbf{L}\boldsymbol{\theta}^T)}_{\mathbf{Q}}\xi_f$. Используя преобразование Лапласа, получим $\begin{cases} s\hat{\xi} = \mathbf{Q}\hat{\xi} \\ s\hat{\xi}_f = \mathbf{Q}\hat{\xi}_f \end{cases}$ тогда $\begin{cases} \beta(s)[\ldots] = \beta(\mathbf{Q})[\ldots] \\ \alpha(s)[\ldots] = \alpha(\mathbf{Q})[\ldots] \end{cases}$. Откуда после ряда преобразований $\dfrac{\beta(s)}{\alpha(s)}\xi_f = \xi$. Обозначим $\bar{\mathbf{Q}}^{-1} = \dfrac{\beta(s)}{\alpha(s)}$, тогда:

$$\bar{\mathbf{Q}}^{-1}\xi_f = \xi. \quad (6)$$

С учетом системы уравнений (2) и выражения (5) сформируем следующий наблюдатель возмущения

$$\dot{\hat{\xi}}_f = \mathbf{G}\hat{\xi}_f = \mathbf{L}(y - \hat{y}), \quad (7)$$

где $\hat{\xi}_f$ — вектор состояния наблюдателя с произвольными начальными условиями.

Наблюдатель (7) может быть представлен в виде автономной модели:

$$\dot{\hat{\xi}}_f(t) = (\mathbf{G} + \mathbf{L}\boldsymbol{\theta}^T)\hat{\xi}_f(t). \quad (8)$$

Решая уравнение (8) [6], получим

$$\hat{\xi}_f(t - \tau) = \mathbf{P}^{-1}\hat{\xi}_f(t), \quad (9)$$

где $\mathbf{P} = e^{(\mathbf{G}+\mathbf{L}\boldsymbol{\theta}^T)\tau}$.

Далее требуется скомпенсировать внешнее возмущение одновременно устраняя негативное влияние эффекта запаздывания.

Синтез закона управления и алгоритма адаптации

Для компенсации внешних возмущений построим регулятор на основе работы [16]. Переведем координаты внешних возмущений в систему координат вектора состояния объекта, используя матрицу преобразования $\mathbf{M}$. Ошибка параметрического отслеживания состояния объекта примет вид

$$e(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{M}\xi(t). \quad (10)$$

Продифференцировав (10), получим

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + [\mathbf{A}\mathbf{M} - \mathbf{M}(\mathbf{G} + \mathbf{L}\boldsymbol{\theta}^T) + \mathbf{d}\boldsymbol{\theta}^T]\xi(t) + \mathbf{B}u(t - \tau).$$

Если спектры матриц $\mathbf{A}$ ($\mathrm{Re}\lambda_i < 0$) и $\bar{\mathbf{G}} = (\mathbf{G} + \mathbf{L}\boldsymbol{\theta}^T)$ ($\pm j\omega_i$) не пересекаются, то существует значение $\boldsymbol{\psi}$ такое, что

$$\mathbf{A}\mathbf{M} - \mathbf{M}(\mathbf{G} + \mathbf{L}\boldsymbol{\theta}^T) = \mathbf{B}\boldsymbol{\psi}^T - \mathbf{d}\boldsymbol{\theta}^T. \quad (11)$$

Выходной сигнал объекта управления имеет вид

$$y = \mathbf{C}^T\mathbf{e} + \mathbf{C}^T\mathbf{M}\xi(t). \quad (12)$$

Существуют матрицы $\mathbf{M}$ и $\boldsymbol{\psi}$, которые являются решениями уравнений (11)–(12) и называются уравнениями Франсиса или регулятора [12]. Следовательно, можно сделать вывод, что уравнения (11)–(12) имеют хотя бы одно решение, если спектры матриц $\mathbf{A}$ ($\mathrm{Re}\lambda_i < 0$) и $\bar{\mathbf{G}} = (\mathbf{G} + \mathbf{L}\boldsymbol{\theta}^T)(\pm j\omega_i)$ не пересекаются.

Получим модель ошибки

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B}[\boldsymbol{\psi}^T\xi(t) + u(t - \tau)] \\ y = \mathbf{C}^T\mathbf{e} \end{cases}. \quad (13)$$

С учетом уравнения (6) система уравнений (13) примет вид

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B}[\bar{\boldsymbol{\psi}}^T\xi_f(t) + u(t - \tau)] \\ y = \mathbf{C}^T\mathbf{e} \end{cases}, \quad (14)$$

где $\bar{\boldsymbol{\psi}}^T = \boldsymbol{\psi}^T\bar{\mathbf{Q}}^{-1}$.

Подставив выражение (9) в (14), получим

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B}[\boldsymbol{\eta}^T\xi_f(t - \tau) + u(t - \tau)] \\ y = \mathbf{C}^T\mathbf{e} \end{cases},$$

где $\boldsymbol{\eta}^T = \bar{\boldsymbol{\psi}}^T\mathbf{P}$. Выберем закон управления $u = -\hat{\boldsymbol{\eta}}^T\hat{\xi}_f$ и получим модель ошибки замкнутой системы:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{Ae} + \mathbf{B}\tilde{\boldsymbol{\eta}}^T(t-\tau)\hat{\boldsymbol{\xi}}_f(t-\tau) \\ y = \mathbf{C}^T\mathbf{e} \end{cases}, \qquad (15)$$

где $\tilde{\boldsymbol{\eta}}^T(t-\tau) = \boldsymbol{\eta}^T - \hat{\boldsymbol{\eta}}^T(t-\tau)$ — параметрическая ошибка.

Модель ошибки и синтез алгоритма адаптации

Для устранения негативного влияния запаздывания сформируем расширенный вектор состояния:

$$\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{e} + \boldsymbol{\chi}, \qquad (16)$$

где сигнал $\boldsymbol{\chi}$ определяется по формуле

$$\dot{\boldsymbol{\chi}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\chi} + \mathbf{B}(\hat{\boldsymbol{\eta}}^T(t-\tau) - \hat{\boldsymbol{\eta}}^T)\hat{\boldsymbol{\xi}}_f(t-\tau). \qquad (17)$$

Подставив систему уравнений (15) и выражение (17) в (16), после ряда преобразований получим

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{e}}} = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{e} + \mathbf{B}\tilde{\boldsymbol{\eta}}^T\hat{\boldsymbol{\xi}}_f(t-\tau)], \\ y = \mathbf{C}^T\hat{\mathbf{e}}. \end{cases} \qquad (18)$$

Воспользуемся методом расширенной ошибки. Перепишем (18) в виде

$$y = \mathbf{W}(s)[\tilde{\boldsymbol{\eta}}^T\hat{\boldsymbol{\xi}}_f(t-\tau)]\ ,$$

где $\mathbf{W}(s) = \mathbf{C}^T(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$.

$$\begin{gathered} \hat{y} = y - \tilde{y}, \\ \hat{y} = y - \hat{\boldsymbol{\eta}}^T\mathbf{W}(s)[\hat{\boldsymbol{\xi}}_f(t-\tau)] - \mathbf{W}(s)[u(t-\tau)] = \\ = \tilde{\boldsymbol{\eta}}^T\mathbf{W}(s)[\hat{\boldsymbol{\xi}}_f(t-\tau)]. \end{gathered} \qquad (19)$$

На основе уравнения (19) построим стандартный алгоритм адаптации:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}} = \gamma\mathbf{W}(s)[\tilde{\boldsymbol{\eta}}\hat{\boldsymbol{\xi}}_f(t-\tau)]\hat{y}.$$

В результате можно сделать вывод, что если внешние возмущения устойчивы, ограничены и известно число гармоник, то с выбором коэффициента адаптации $\gamma > 0$ следует обеспечение асимптотической сходимости вектора параметрических ошибок $\tilde{\boldsymbol{\eta}}(t)$ к нулю при $t \to \infty$.

Математическое моделирование

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного подхода выполним компьютерное моделирование с использованием программной среды MATLAB Simulink.

Рассмотрим объект управления второго порядка, имеющий вид:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{B}u(t-\tau) + \mathbf{d}f(t) \\ y(t) = \mathbf{C}^T\mathbf{x}(t) \end{cases}, \quad \boldsymbol{x}(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -4 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{C}^T = [1 \quad 0]$.

Пусть возмущающее воздействие имеет вид: $f(t) = 5\sin(t)$.

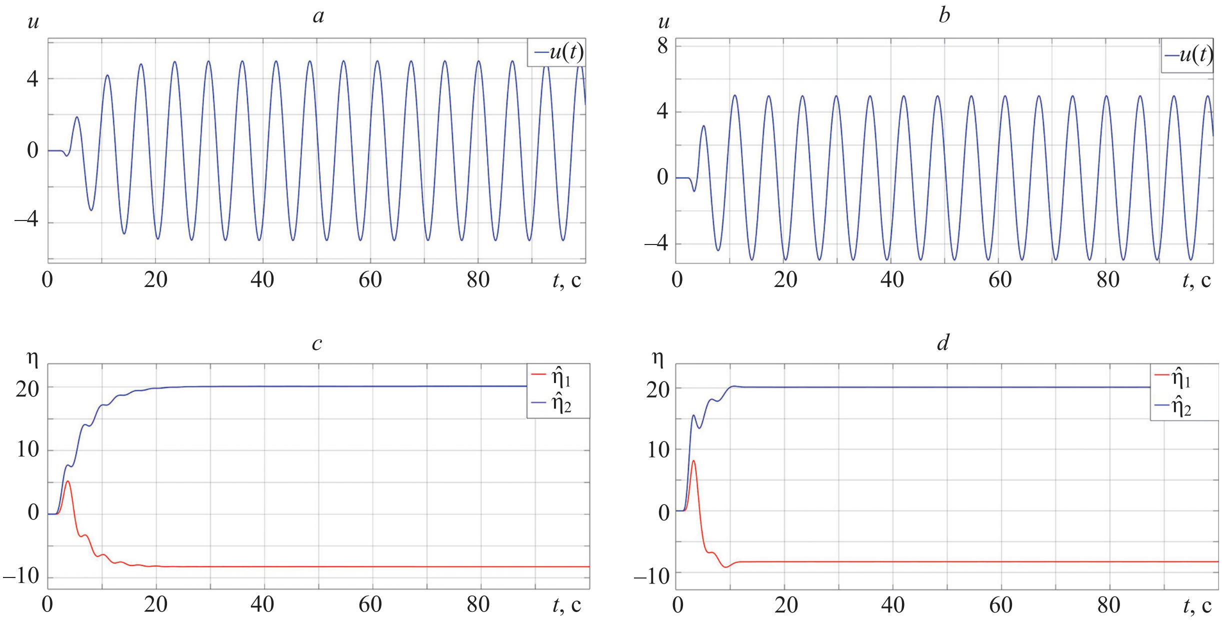
Построим наблюдатель Люенбергера (4) со следующей матрицей: $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -3 \\ 69 \end{bmatrix}$.

Зададим значения матрицы модели оценки состояния наблюдателя (8):

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -4 \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

На рисунке показаны переходные процессы в замкнутой системе при значении запаздывания τ = 1с при коэффициентах адаптации γ = 5 (рисунок, *a*, *c*, *e*) и γ = 15 (рисунок, *b*, *d*, *f*).

Представленные результаты моделирования демонстрируют эффективность и работоспособность предложенного решения. Данный подход обеспечивает асимптотическую сходимость выходного сигнала y к нулю при $t \to \infty$. Видно, что при увеличении коэффициента



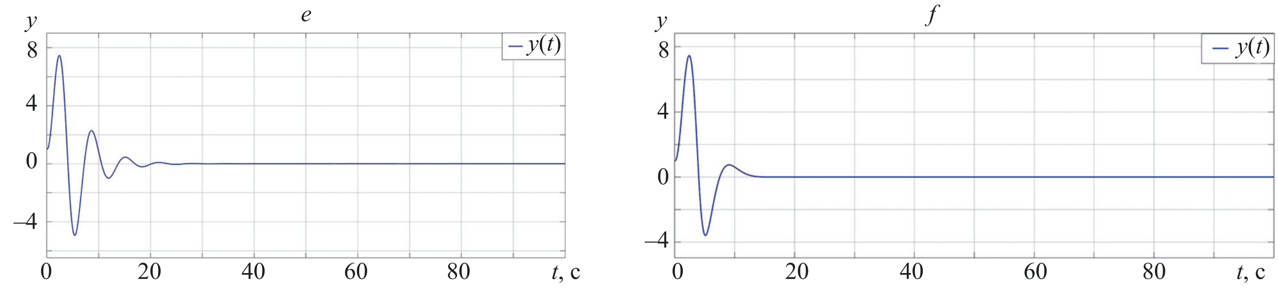


Рисунок. Графики переходных процессов при запаздывании $\tau = 1$с для коэффициентов адаптации $\gamma = 5$ и $\gamma = 15$: сигнала управления $u(t)$ (a, b); оценок $\hat{\boldsymbol{\eta}}_1$, $\hat{\boldsymbol{\eta}}_2$ (c, d); выходного сигнала $y(t)$ (e, f)

Figura. Transient processes with delay $\tau = 1$s for adaptation coefficients $\gamma = 5$ and $\gamma = 15$: control signal $u(t)$ (a, b); estimations $\hat{\boldsymbol{\eta}}_1$, $\hat{\boldsymbol{\eta}}_2$ (c, d); output signal $y(t)$ (e, f)

адаптации γ удалось достичь лучшего быстродействия в системе.

Заключение

В работе рассмотрена задача компенсации по выходу внешних неизвестных возмущений для класса линейных систем с произвольным запаздыванием на входе. Предложенный алгоритм обеспечивает ограниченность всех сигналов в системе и сходимость регулируемого выхода к нулю. Преимущество данного подхода заключается в том, что не требуется идентификация параметров возмущения. В дальнейшем рассмотренное решение может быть расширено на класс объектов с неизвестными параметрами и неизвестным запаздыванием.

Литература

1. Suulker C., Emirler M.T. Comparison of different time delay compensation methods for networked DC motor speed control // Proc. of the 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE). 2019. P. 225–229. https://doi.org/10.1109/ICEEE2019.2019.00050
2. Li K., Cai Z., Zhao J., Lou J., Wang J. Signal compensation control algorithm for quadrotor unmanned aerial vehicles // Proc. of the 36th Chinese Control Conference (CCC). 2017. P. 3266–3271. https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8027861
3. Zheng W., Chen M. Tracking control of manipulator based on high-order disturbance observer // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 26753–26764. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2834978
4. Richard J.P. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems // Automatica. 2003. V. 39. N 10. P. 1667–1694. https://doi.org/10.1016/S0005-1098(03)00167-5
5. Пыркин А.А., Бобцов А.А., Никифоров В.О., Колюбин С.А., Ведяков А.А., Борисов О.И., Громов В.С. Компенсация полигармонического возмущения, действующего на состояние и выход линейного объекта с запаздыванием в канале управления // Автоматика и телемеханика. 2015. № 12. С. 43–64.
6. Pyrkin A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M. Rejection of sinusoidal disturbance of unknown frequency for linear system with input delay // Proc. of the 20th American Control Conference (ACC). 2010. P. 5688–5693. https://doi.org/10.1109/ACC.2010.5531131
7. Бобцов А.А., Пыркин А.А. Адаптивное и робастное управление с компенсацией неопределенностей: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 135 с.
8. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Nikiforov V., Vedyakov A., Kolyubin S., Borisov O. Output control approach for delayed linear systems with adaptive rejection of multiharmonic disturbance // IFAC Proceedings Volumes. 2014. V. 47. N 3. P. 12110–12115. https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01787
9. Narendra K., Annaswamy A. Stable Adaptive Systems. New Jersey: Prentice Hall, 1989. 496 p.
10. Герасимов Д.Н., Парамонов А.В., Никифоров В.О. Алгоритм компенсации мультигармонических возмущений в линейных системах с произвольным запаздыванием: метод внутренней модели // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1023–1030. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-6-1023-1030

References

1. Suulker C., Emirler M.T. Comparison of different time delay compensation methods for networked DC motor speed control. *Proc. of the 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, 2019, pp. 225–229. https://doi.org/10.1109/ICEEE2019.2019.00050
2. Li K., Cai Z., Zhao J., Lou J., Wang J. Signal compensation control algorithm for quadrotor unmanned aerial vehicles. *Proc. of the 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 2017, pp. 3266–3271. https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8027861
3. Zheng W., Chen M. Tracking control of manipulator based on high-order disturbance observer. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 26753–26764. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2834978
4. Richard J.P. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems. *Automatica*, 2003, vol. 39, no. 10, pp. 1667–1694. https://doi.org/10.1016/S0005-1098(03)00167-5
5. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Nikiforov V.O., Kolyubin S.A., Vedyakov A.A., Borisov O.I., Gromov V.S. Compensation of polyharmonic disturbance of state and output of a linear plant with delay in the control channel. *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 12, pp. 2124–2142. https://doi.org/10.1134/S0005117915120036
6. Pyrkin A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M. Rejection of sinusoidal disturbance of unknown frequency for linear system with input delay. *Proc. of the 20th American Control Conference (ACC)*, 2010, pp. 5688–5693. https://doi.org/10.1109/ACC.2010.5531131
7. Bobtsov A.A., Pyrkin A.A. *Adaptive and Robust Control with Uncertainties Compensation*. St. Petersburg, NRU ITMO, 2013, 135 p. (in Russian)
8. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Nikiforov V., Vedyakov A., Kolyubin S., Borisov O. Output control approach for delayed linear systems with adaptive rejection of multiharmonic disturbance. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, vol. 47, no. 3, pp. 12110–12115. https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01787
9. Narendra K., Annaswamy A. *Stable Adaptive Systems*. New Jersey, Prentice Hall, 1989, 496 p.
10. Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O. Algorithm of multiharmonic disturbance compensation in linear systems with arbitrary delay: internal model approach. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016,

11. Bobtsov A., Kremlev A. Adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency // IFAC Proceedings Volumes. 2005. V. 38. N 1. P. 131–136. https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.00022
12. Marino R., Tomei P. Output regulation for linear systems via adaptive internal model // IEEE Transactions on Automatic Control. 2003. V. 48. N 12. P. 2199–2202. https://doi.org/10.1109/TAC.2003.820143
13. Парамонов А.В. Адаптивная робастная компенсация возмущений в линейных системах с запаздыванием // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 384–391. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-3-384-391
14. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб.: Наука, 2003. 282 с.
15. Никифоров В.О. Наблюдатели внешних возмущений. 1. Объекты с известными параметрами // Автоматика и телемеханика. 2004. № 10. С. 13–23.
16. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design. NY: John Wiley and Sons, Inc., 1995. 563 p.

vol. 16, no. 6, pp. 1023–1030. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-6-1023-1030

11. Bobtsov A., Kremlev A. Adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency. *IFAC Proceedings Volumes*, 2005, vol. 38, no. 1, pp. 131–136. https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.00022
12. Marino R., Tomei P. Output regulation for linear systems via adaptive internal model. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, vol. 48, no. 12, pp. 2199–2202. https://doi.org/10.1109/TAC.2003.820143
13. Paramonov A.V. Adaptive robust disturbance compensation in linear systems with delay. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 384–391. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-3-384-391
14. Nikiforov V.O. *Adaptive and Robust Control with Compensation of the Disturbances*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2003, 282 p. (in Russian)
15. Nikiforov V.O. Observers of external deterministic disturbances. I. Objects with known parameters. *Automation and Remote Control*, 2004, vol. 65, no. 10, pp. 1531–1541. https://doi.org/10.1023/B:AURC.0000044264.74470.48
16. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. *Nonlinear and Adaptive Control Design*. NY, John Wiley and Sons, Inc., 1995, 563 p.

Авторы

Буй Ван Хуан — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-6563-1909, buinguyenkhanh201095@gmail.com

Маргун Алексей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; научный сотрудник, Институт проблем машиностроения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, 55521791600, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594, alexeimargun@gmail.com

Authors

Van Huan Bui — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-6563-1909, buinguyenkhanh201095@gmail.com

Alexey A. Margun — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Scientific Researcher, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, 55521791600, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594, alexeimargun@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14.06.2022
Одобрена после рецензирования 10.10.2022
Принята к печати 27.11.2022

Received 14.06.2022
Approved after reviewing 10.10.2022
Accepted 27.11.2022