УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
нотябрь–декабрь 2016 Том 16 № 6 ISSN 2226-1494 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
November–December 2016 Vol. 16 No 6 ISSN 2226-1494 http://ntv.ifmo.ru/en

УДК 519.71

АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ МУЛЬТИГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ: МЕТОД ВНУТРЕННЕЙ МОДЕЛИ

Д.Н. Герасимов[a], А.В. Парамонов[a], В.О. Никифоров[a]

[a] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: gerasimovdn@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию 12.09.16, принята к печати 20.10.16
doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1023-1030
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: 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. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1023-1030

Аннотация

Предмет исследования. Рассматривается задача компенсации мультигармонического возмущения для класса линейных стационарных объектов с известными параметрами и запаздыванием. **Метод.** Возмущение представляется как неизмеряемый выход линейной автономной модели (экзосистемы) с известным порядком и неизвестными параметрами. Для решения задачи с помощью наблюдателя вектора состояния экзосистемы и предиктора этого вектора формируется параметризованное представление возмущения, которое позволяет применить метод непосредственной компенсации. В целях устранения негативного влияния запаздывания строится модифицированный алгоритм адаптации, который на основе расширенного вектора состояния генерирует настройки регулятора с упреждением. В отличие от распространенных подходов, алгоритм не требует идентификации параметров возмущения и позволяет исключить ограничения в виде критического коэффициента адаптации или запаздывания. **Основные результаты.** В целях демонстрации работы предлагаемого подхода приводятся результаты моделирования в среде MATLAB/Simulink. Результаты иллюстрируют ограниченность всех сигналов в системе управления и полную компенсацию гармонического возмущения. Показано, что предлагаемый подход позволяет увеличивать коэффициент адаптации при разных значениях запаздывания без потери устойчивости в системе. **Практическая значимость.** Алгоритм адаптивной компенсации рекомендуется использовать в задачах управления различными устройствами активной виброзащиты, где возможно выделение доминирующих гармоник из спектра вибрационного сигнала; в задачах управления робототехническими комплексами при наличии периодических (повторяющихся) движений; в задачах компенсации качки в корабельных системах; в задачах стабилизации космических объектов при наличии неконтролируемого вращения и т.д.

Ключевые слова
адаптивное управление, компенсация возмущений, система с запаздыванием, внутренняя модель

Благодарности
Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031) и гранта Президента Российской Федерации №14.Y3116.9281-НШ.

ALGORITHM OF MULTIHARMONIC DISTURBANCE COMPENSATION IN LINEAR SYSTEMS WITH ARBITRARY DELAY: INTERNAL MODEL APPROACH

D.N. Gerasimov[a], A.V. Paramonov[a], V.O. Nikiforov[a]

[a] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: gerasimovdn@mail.ru

Article info
Received 12.09.16, accepted 20.10.16
doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1023-1030
Article in Russian

For citation: 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, vol. 16, no. 6, pp. 1023–1030. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1023-1030

Abstract

Subject of Research. The problem of multiharmonic disturbance compensation for the class of linear time-invariant plants with known parameters and delay is considered. **Method.** The disturbance is presented as unmeasurable output of linear autonomous model (exosystem) with known order and unknown parameters. The problem is resolved with the use of parametrized representation of disturbance designed by means of exosystem state observer and predictor of this state that finally enables applying certainty equivalence principle. In order to remove undesirable influence of delay a modified adaptation algorithm is created. The algorithm is based on augmentation of the plant state vector and generates advanced adjustable parameters for control. As distinct from widespread approaches, the proposed algorithm does not require identification of disturbance parameters and gives the possibility to remove such restrictions as adaptation gain margin and time delay margin. **Main Results.** Simulation results obtained in MATLAB/Simulink environment are presented to demonstrate the performance of proposed approach. Results illustrate the boundness of all signals in the closed-loop system and complete compensation of harmonic signal. It is shown that the proposed idea makes it possible to increase the adaptation gain for different delays without system stability loss. **Practical Relevance.** The algorithm of adaptive compensation is recommended for the use in such problems as: the problem of control for active vibration protection devices wherein several dominating harmonics can be taken from the spectrum of vibration signal; the problems of control of robotics systems with periodical behavior; the problems of ship roll compensation; the problems of space plants control in the presence of uncontrollable rotation.

Keywords

adaptive control, disturbance compensation, delayed system, internal model

Acknowledgements

This work was partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01), the Russian Ministry of Education and Science (project 14.Z50.31.0031) and the Russian Federation President Grant No.14.Y3116.9281-НШ.

Введение

В статье рассматривается задача адаптивной компенсации мультисинусоидального возмущения в линейных системах с запаздыванием.

Задача компенсации возмущений является предметом интенсивных исследований за последние тридцать–сорок лет и в той или иной степени решена для линейных систем с известными и неизвестными параметрами [1–4], равно как и для определенных классов нелинейных систем [5–8]. Большинство предложенных решений основано на принципе внутренней модели [9, 10], который предполагает представление возмущения как выхода автономной модели (экзосистемы) и использование параметров этой модели или их оценок в компенсирующем законе управления.

Принцип внутренней модели также является фундаментальным для решения многих задач компенсации возмущений в системах с неопределенностями и запаздыванием (см., например, [11–14]). Как правило, в этом случае прибегают к построению независимых блоков идентификации, которые оценивают частоты, фазы и амплитуды гармоник и обеспечивают информационную поддержку регулятору [11, 12, 15]. Распространенность идентификационного подхода объясняется, прежде всего, независимостью работы идентификатора от работы регулятора, что снижает взаимное влияние этих блоков друг на друга, особенно при действии возмущений. Однако практическая реализация этого подхода имеет ограничения, связанные с низкой скоростью оценивания, которая, в свою очередь, зависит от обеспечения условий так называемого «неисчезающего возбуждения».

Попытки избежать процедуры идентификации были предприняты в [14, 16] за счет методов прямого адаптивного управления. Однако при наличии запаздывания в объекте возникает необходимость в расчете критического значения коэффициента адаптации (по сути, составляющего коэффициента разомкнутого контура) или критического запаздывания, при котором сохраняется устойчивость системы. Наличие критических порогов не позволяет произвольно менять параметры закона управления, что ограничивает его применение.

В статье предлагается схема прямого адаптивного управления, компенсирующая неизвестное мультисинусоидальное возмущение. Схема представляет собой модификацию стандартного градиентного алгоритма адаптации и не требует как построения идентификаторов, так и нахождения пороговых значений коэффициентов адаптации и запаздывания.

Статья организована следующим образом. Формулируется задача компенсации. Производится параметризация возмущения с помощью внутренней модели и синтезируется настраиваемый закон управления. Предлагается схема модифицированного алгоритма адаптации. Для демонстрации работы предлагаемого подхода рассматриваются и анализируются результаты моделирования, полученные в MATLAB.

Постановка задачи

Рассмотрим линейный объект с постоянными параметрами и запаздыванием по входу:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}(u(t-\tau) + \delta), \qquad (1)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ – измеряемый вектор состояния; u – управление; $\mathbf{A}$ и $\mathbf{b}$ – известная матрица и вектор-столбец соответствующих размерностей; τ – известное постоянное запаздывание; δ – неизмеряемое и ограниченное возмущение.

Будем считать выполненными следующие допущения.

Допущение 1. Известная матрица $\mathbf{A}$ – гурвицева.

Допущение 2. Внешнее возмущение δ может быть представлено как выход линейной автономной системы (модели среды):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{\Gamma z}, \ \mathbf{z}(0), \\ \delta = \mathbf{h}^T \mathbf{z}, \end{cases} \tag{2}$$

где $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^m$ – неизмеряемый вектор состояния; $\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – постоянная матрица, собственные числа которой некратны и лежат на мнимой оси; $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^m$ – постоянный вектор. Без потери общности будем считать, что пара $(\mathbf{h}^T, \mathbf{\Gamma})$ полностью наблюдаема.

Другими словами, допущение 2 подразумевает, что возмущение относится к классу мультигармонических сигналов со смещением. Данный тип возмущения часто рассматривается в таких инженерных задачах, как задача активной компенсации вибраций, где из спектра вибрационного сигнала выделяется несколько доминирующих гармоник; задача управления робототехническими системами и комплексами, где имеют место повторяющиеся движения; задача управления морскими судами, где в первом приближении возмущающий сигнал качки представляется в виде нескольких периодических функций; задача стабилизации космических объектов в условиях неконтролируемого вращения.

Допущение 3. Размерность модели внешней среды (2) m известна, параметры матрицы $\mathbf{\Gamma}$ и вектора $\mathbf{h}$ неизвестны.

Допущение 3 может быть интерпретировано как выделение только части гармоник из всего спектра возмущения, т.е. формирование так называемой регулярной составляющей возмущения. Оставшаяся компонента, называемая нерегулярной, не подлежит компенсации и, как правило, подавляется за счет введения робастных обратных связей.

Цель задачи заключается в формировании управления, обеспечивающего ограниченность сигналов в замкнутой системе и сходимость нормы вектора $\mathbf{x}$ к нулю:

$$\lim_{t \to \infty} \|\mathbf{x}(t)\| = 0 . \tag{3}$$

Замечание 1. Допущение 1 сделано из методологических соображений с целью сфокусировать внимание читателя на задаче адаптивной компенсации возмущения в системе при наличии запаздывания. Проблемы стабилизации систем с запаздыванием широко освещены в литературе (см., например, обзор [17]) и в данной статье опущены. Таким образом, результат, предложенный в данной статье, может быть распространен на случай неустойчивых объектов.

Задача решается в четыре этапа. На первом этапе производится параметризация возмущающего воздействия в целях применения метода непосредственной компенсации. На втором этапе строится предиктор возмущения. Далее, на третьем и четвертом этапах, формируется настраиваемый регулятор и предлагается модификация алгоритма адаптации, позволяющая обойти проблему негативного влияния на устойчивость большого коэффициента разомкнутого контура системы управления или большого запаздывания.

Параметризация возмущения

Возмущение параметризуется известным способом, при помощи динамического фильтра [6, 8, 18] (виртуального наблюдателя возмущения):

$$\dot{\xi} = \mathbf{G}\xi + \mathbf{l}\delta , \tag{4}$$

где $\xi \in \mathbb{R}^m$ – регрессор; $\mathbf{G}$ – произвольная назначаемая при формировании фильтра гурвицева матрица; $\mathbf{l}$ – постоянный вектор, выбираемый из условия, что пара $(\mathbf{G}, \mathbf{l})$ является полностью управляемой. Тогда возмущение может быть представлено в виде

$$\delta = \mathbf{\theta}^T \xi + \varsigma , \tag{5}$$

где ς – экспоненциально затухающая функция времени; $\mathbf{\theta} \in \mathbb{R}^m$ – вектор неизвестных постоянных параметров, зависящих от параметров матрицы $\mathbf{\Gamma}$ и вектора $\mathbf{h}$ (в конечном итоге – от частот, амплитуд и фаз мультигармонического сигнала).

Замечание 2. Слагаемое ς не влияет на устойчивость замкнутой системы и окончательный результат компенсации. В связи с этим здесь и далее это слагаемое опускается.

Подставим (5) в (4) и получим каноническую модель виртуального наблюдателя возмущения:

$$\dot{\xi} = \left(\mathbf{G} + \mathbf{l}\mathbf{\theta}^T\right)\xi . \tag{6}$$

Так как наблюдатель (4) включает в себя неизмеряемый сигнал δ (уравнение (6) содержит неизвестный вектор $\boldsymbol{\theta}$), то он практически не реализуем. В связи с этим формируется оценка $\hat{\xi}$ на базе физически реализуемого наблюдателя [6, 8]:

$$\hat{\xi} = \boldsymbol{\eta} + \mathbf{N}\mathbf{x}, \quad \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{G}\boldsymbol{\eta} + (\mathbf{GN} - \mathbf{NA})\mathbf{x} - \mathbf{Nb}u(t-\tau), \tag{7}$$

где $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^m$ – сигнал расширения; $\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{m\times n}$ – произвольная матрица, удовлетворяющая условию $\mathbf{Nb} = \mathbf{l}$. Путем введения ошибки $\mathbf{e}_\xi = \xi - \hat{\xi}$ и дифференцирования ее по времени с учетом (1), (5) и (7) можно доказать экспоненциальную сходимость оценки $\hat{\xi}$ к величине ξ. Как следствие, возмущение (2) может быть представлено в параметризованной форме $\delta = \boldsymbol{\theta}^T\hat{\xi}$, где $\hat{\xi}$ генерируется наблюдателем (7).

В целях компенсации влияния запаздывания возникает необходимость в предсказании возмущения. В связи с этим сформулируем следующую лемму.

Лемма. Справедливо следующее соотношение:

$$\xi(t-\tau) = \mathbf{R}\xi,$$

где $\mathbf{R}=\mathbf{e}^{-(\mathbf{G}+\mathbf{l}\boldsymbol{\theta}^T)\tau}$ – матричная экспонента. Лемма доказывается с помощью фундаментального решения уравнения (6) (формула Арштейна, см., например, [17]).

Заменим в последнем выражении ξ на оценку $\hat{\xi}$:

$$\hat{\xi}(t-\tau) = \mathbf{R}\hat{\xi}. \tag{8}$$

В итоге получим параметризованное представление возмущения:

$$\hat{\delta} = \boldsymbol{\theta}^T\hat{\xi} = \boldsymbol{\psi}^T\hat{\xi}(t-\tau), \tag{9}$$

где $\boldsymbol{\psi}^T = \boldsymbol{\theta}^T\mathbf{R}^{-1}$ – новый вектор неизвестных параметров.

После подстановки в (1) выражения (9) и применения принципа непосредственной компенсации настраиваемый регулятор примет вид

$$u = -\hat{\boldsymbol{\psi}}^T\hat{\xi}, \tag{10}$$

где $\hat{\boldsymbol{\psi}}^T = \hat{\boldsymbol{\theta}}^T\hat{\mathbf{R}}^{-1}$ – настраиваемый параметр, $\hat{\mathbf{R}}=\mathbf{e}^{-(\mathbf{G}+\mathbf{l}\hat{\boldsymbol{\theta}}^T)\tau}$.

Модель ошибки и алгоритмы адаптации

Подстановка (10) и (9) в (1) дает стандартную модель ошибки в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{b}\tilde{\boldsymbol{\psi}}^T(t-\tau)\hat{\xi}(t-\tau), \tag{11}$$

где $\tilde{\boldsymbol{\psi}}(t-\tau) = \boldsymbol{\psi} - \hat{\boldsymbol{\psi}}(t-\tau)$ – параметрическая ошибка. Модель (11) совместно с функцией Ляпунова $V = 0,5\mathbf{x}^T P\mathbf{x} + 0,5\tilde{\boldsymbol{\psi}}(t-\tau)^T\tilde{\boldsymbol{\psi}}(t-\tau)/\gamma$ ($\mathbf{P} = \mathbf{P}^T \succ 0$ – решение уравнения Ляпунова $A^TP + PA = -Q$ с $Q = Q^T \succ 0$, $\gamma>0$) позволяет получить стандартный алгоритм адаптации $\dot{\hat{\boldsymbol{\psi}}}(t-\tau) = \gamma\hat{\xi}(t-\tau)\mathbf{b}^T\mathbf{Px}$. Однако данный алгоритм формирует оценки с запаздыванием, в то время как закон управления (10) требует подстановки текущих оценок.

В случае прямой подстановки в (10) вектора $\hat{\boldsymbol{\psi}}(t-\tau)$ вместо $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ появляются ограничения на применимость алгоритма, а именно, потребуется расчет докритических значений γ или τ, при которых сохраняется устойчивость замкнутой системы [14]. Как следствие, возникает необходимость в построении модифицированного алгоритма адаптации, генерирующего текущую оценку $\hat{\boldsymbol{\psi}}$.

Сформируем расширенный вектор состояния:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + \boldsymbol{\varphi},$$

где сигнал $\boldsymbol{\varphi}$ генерируется фильтром вида

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varphi} + \mathbf{b}(\hat{\boldsymbol{\psi}}^T(t-\tau) - \hat{\boldsymbol{\psi}}^T)\hat{\xi}(t-\tau). \tag{12}$$

Дифференцируя $\hat{\mathbf{x}}$ с учетом (11) и (12), после ряда преобразований получаем

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{b}\tilde{\boldsymbol{\psi}}^T\hat{\xi}(t-\tau). \tag{13}$$

Таким образом, модель (13), в отличие от модели ошибки (11), содержит текущие (не задержанные) значения параметрической ошибки $\tilde{\boldsymbol{\psi}}$, что позволяет использовать стандартный алгоритм вида

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\psi}}} = \gamma\hat{\xi}(t-\tau)\mathbf{b}^T\mathbf{P}\hat{\mathbf{x}} . \qquad (14)$$

Рассмотрим следующее утверждение.

Утверждение. Настраиваемый регулятор (10), совместно с наблюдателем (7), фильтром (12) и алгоритмом адаптации (14) обеспечивает в замкнутой системе с объектом управления (1) выполнение следующих свойств:

1. $\|\mathbf{x}\| \in L_\infty$, $\|\hat{\mathbf{x}}\| \in L_\infty$, $\|\tilde{\boldsymbol{\psi}}\| \in L_\infty$;
2. $\|\hat{\mathbf{x}}\| \to 0$ при $t \to \infty$;
3. $\|\tilde{\boldsymbol{\psi}}\| - \|\tilde{\boldsymbol{\psi}}(t+r)\| \le 0$ при любом t, $r \ge 0$ (функция $\|\tilde{\boldsymbol{\psi}}\|$ невозрастающая);
4. $\|\mathbf{x}\| \to 0$ при $t \to \infty$.

Утверждение доказывается с помощью функции Ляпунова

$$V = 0,5\hat{\mathbf{x}}^T\mathbf{P}\hat{\mathbf{x}} + 0,5\tilde{\boldsymbol{\psi}}^T\tilde{\boldsymbol{\psi}}/\gamma$$

и ее производной, которая после ряда преобразований представляется в форме

$$\dot{V} = -0,5\hat{\mathbf{x}}^T Q\hat{\mathbf{x}} < 0 .$$

Таким образом, идея предложенного подхода состоит во введении дополнительного члена $\boldsymbol{\varphi}$ в модель ошибки (11), что позволяет «поглотить» запаздывание в этой модели и сгенерировать текущие настройки регулятора $\hat{\boldsymbol{\psi}}$.

Моделирование

Рассмотрим модель второго порядка

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\big(u(t-\tau)+\delta\big), \quad \mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}^T ,$$

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x}$$

с матрицами

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -1 & -2\end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix}3 & 4\end{bmatrix}$$

и возмущением $\delta = 5\sin(2t)$.

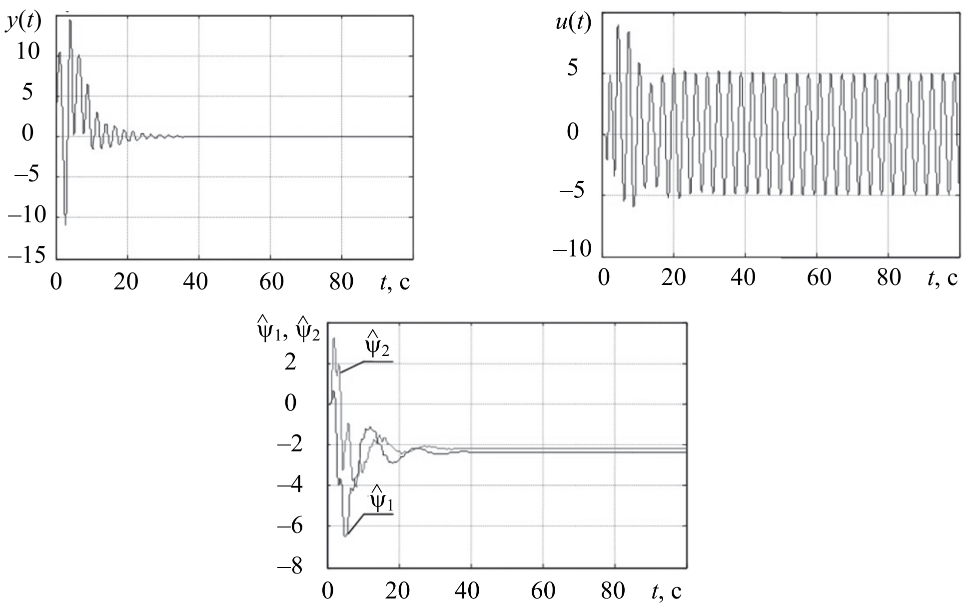

Рис. 1. Переходные процессы в адаптивной системе компенсации при наличии запаздывания $\tau = 1$ с . Коэффициент адаптации $\gamma = 5$

В управлении (11) величина $\hat{\xi}$ генерируется наблюдателем (7) с матрицами

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -1 & -2\end{bmatrix}, \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}.$$

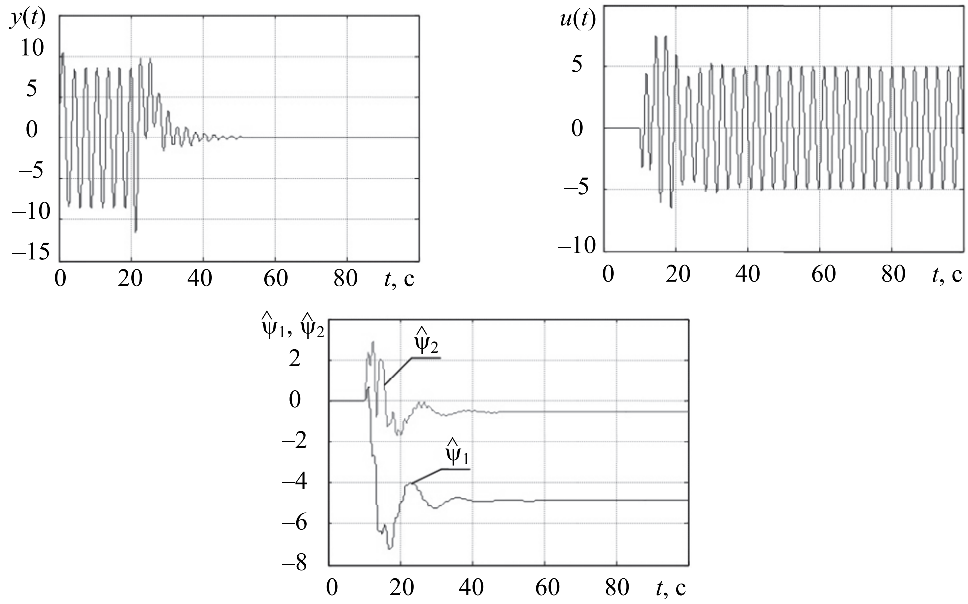

Рис. 2. Переходные процессы в адаптивной системе компенсации при наличии запаздывания $\tau = 10$ с. Коэффициент адаптации $\gamma = 5$

Вектор $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ генерируется алгоритмом адаптации (14) с фильтром (12) и матрицей

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1,75 & 1 \\ 1 & 0,75 \end{bmatrix}.$$

Результаты моделирования для различных значений запаздываний $\tau = 1$ с и $\tau = 10$ с приведены на рис. 1 и 2 соответственно. Коэффициент адаптации в экспериментах принят равным $\gamma = 5$. Из результатов видно, что при увеличении запаздывания система сохраняет устойчивость и полностью компенсирует возмущение. При этом значение запаздывания практически не влияет на скорость сходимости алгоритма по истечению 2τ с – времени получения всей доступной информации об объекте, возмущении и значений оценок $\hat{\boldsymbol{\psi}}(t-\tau)$.

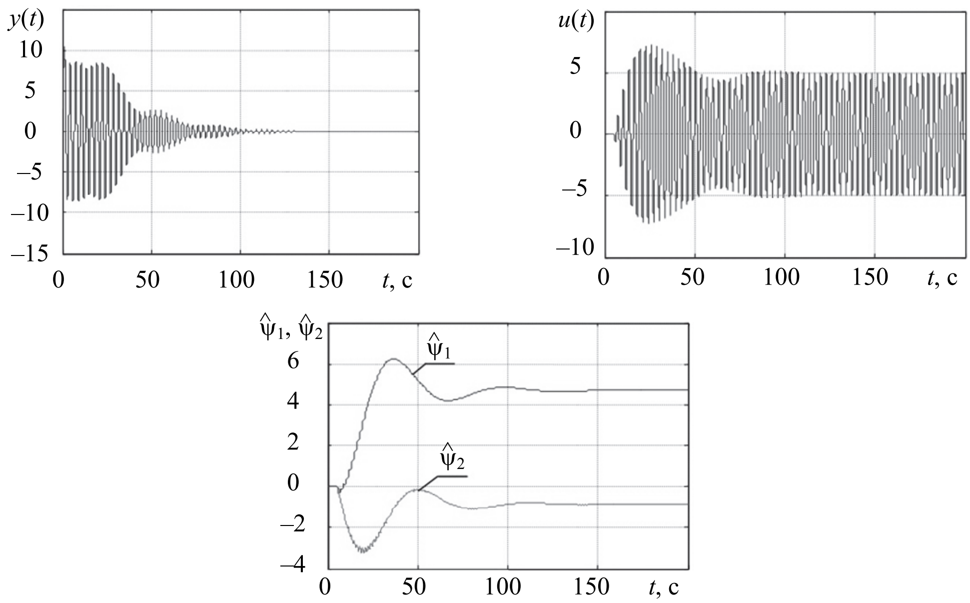

Рис. 3. Переходные процессы в адаптивной системе компенсации при наличии запаздывания $\tau = 5$ с. Коэффициент адаптации $\gamma = 1$

Результаты моделирования для различных значений коэффициентов адаптации $\gamma = 1$ и $\gamma = 10$ приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Результаты показывают независимость свойства устойчивости системы от значений γ. При увеличении коэффициента удается достичь лучшего быстродействия в системе.

Таким образом, результаты моделирования показали независимость работы компенсатора от степени усиления коэффициента прямой связи или задержки в контуре управления, что позволяет исключить проблему поиска критических значений γ и τ.

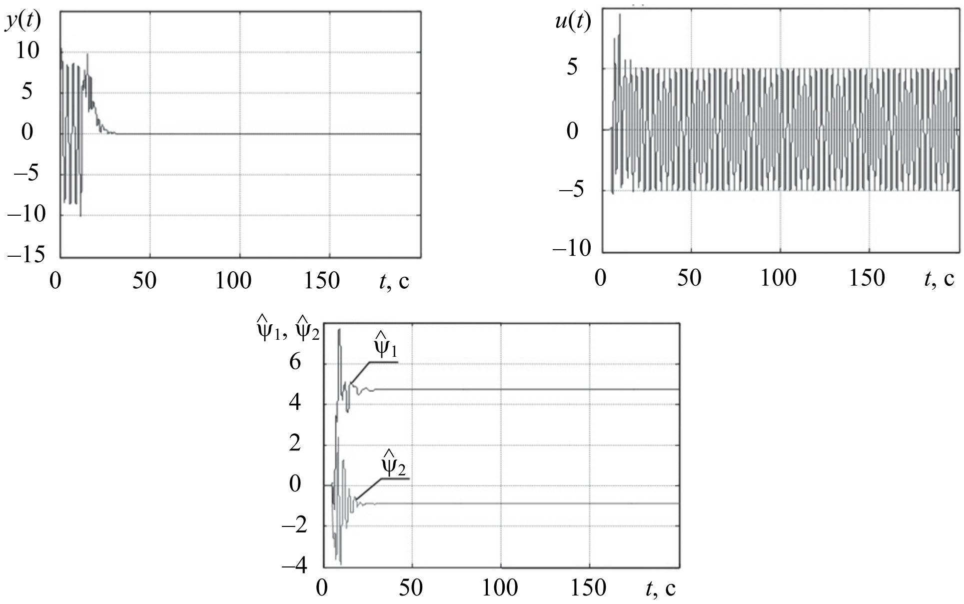

Рис. 4. Переходные процессы в адаптивной системе компенсации при наличии запаздывания $\tau = 5$ с. Коэффициент адаптации $\gamma = 10$

Заключение

Таким образом, в работе предлагается алгоритм адаптивной компенсации мультигармонического возмущения в линейной системе с запаздыванием по входу. Алгоритм не требует идентификации параметров возмущения и обеспечивает цель управления (3) независимо от величины коэффициента адаптации (коэффициента разомкнутого контура системы) и величины запаздывания.

Предлагаемая идея может быть расширена на случай неустойчивого объекта или объекта с неизмеряемым вектором состояния и неизвестными параметрами, что предлагается в качестве направления дальнейших исследований авторов.

Литература

1. Basturk H.I., Krstic M. State derivative feedback for adaptive cancellation of unmatched disturbances in unknown strict-feedback LTI systems // Automatica. 2014. V. 50. N 10. P. 2539–2545. doi: 10.1016/j.automatica.2014.08.002
2. Bodson M., Douglas S.C. Adaptive algorithms for the rejection of sinusoidal disturbances with unknown frequencies // Automatica. 1997. V. 33. P. 2213–2221. doi: 10.1016/S0005-1098(97)00149-0
3. Marino R., Santosuosso G.L., Tomei P. Robust adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency // Automatica. 2003. V. 39. N 10. P. 1755–1761. doi: 10.1016/S0005-1098(03)00170-5
4. Nikiforov V.O. Adaptive servocompensation of input disturbances // Proc. 13th IFAC World Congress. San-Francisco, USA, 1996. P. 175–180.
5. Nikiforov V.O. Nonlinear control system with compensation of external deterministic perturbations // Journal of Computer and Systems Sciences International. 1997. V. 36. N 4. P. 564–568.
6. Nikiforov V.O. Nonlinear servocompensation of unknown external disturbances // Automatica. 2001. V. 37. N 10. P. 1647–1653. doi: 10.1016/S0005-1098(01)00117-0
7. Nikiforov V.O. Adaptive non-linear tracking with complete compensation of unknown disturbances // European Journal of Control. 1998. V. 4. N 2. P. 132–139. doi: 10.1016/S0947-3580(98)70107-4
8. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с

References

1. Basturk H.I., Krstic M. State derivative feedback for adaptive cancellation of unmatched disturbances in unknown strict-feedback LTI systems. *Automatica*, 2014, vol. 50, no. 10, pp. 2539–2545. doi: 10.1016/j.automatica.2014.08.002
2. Bodson M., Douglas S.C. Adaptive algorithms for the rejection of sinusoidal disturbances with unknown frequencies. *Automatica*, 1997, vol. 33, pp. 2213–2221. doi: 10.1016/S0005-1098(97)00149-0
3. Marino R., Santosuosso G.L., Tomei P. Robust adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency. *Automatica*, 2003, vol. 39, no. 10, pp. 1755–1761. doi: 10.1016/S0005-1098(03)00170-5
4. Nikiforov V.O. Adaptive servocompensation of input disturbances. *Proc. 13th IFAC World Congress*. San-Francisco, USA, 1996, pp. 175–180.
5. Nikiforov V.O. Nonlinear control system with compensation of external deterministic perturbations. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1997, vol. 36, no. 4, pp. 564–568.
6. Nikiforov V.O. Nonlinear servocompensation of unknown external disturbances. *Automatica*, 2001, vol. 37, no. 10, pp. 1647–1653. doi: 10.1016/S0005-1098(01)00117-0
7. Nikiforov V.O. Adaptive non-linear tracking with complete compensation of unknown disturbances. *European Journal of Control*, 1998, vol. 4, no. 2, pp. 132–139. doi: 10.1016/S0947-3580(98)70107-4

компенсацией внешних возмущений. СПб.: Наука, 2003. 282 с.

9. Francis D.A., Wonham W.N. The internal model principle for linear multivariable regulators // Applied Mathematics and Optimization. 1975. V. 2. N 4. P. 170–194. doi: 10.1007/BF01447855
10. Johnson C.D. Accommodation of external disturbances in linear regulator and servomechanism problems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1971. V. 16. N 6. P. 635–644. doi: 10.1109/TAC.1971.1099830
11. Pyrkin A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M. Rejection of sinusoidal disturbance of unknown frequency for linear system with input delay // American Control Conference. Baltimore, USA, 2010. P. 5688–5693.
12. Basturk H.I., Krstic M. Adaptive sinusoidal disturbance cancellation for unknown LTI systems despite input delay // Automatica. 2015. V. 58. P. 131–138. doi: 10.1016/j.automatica.2015.05.013
13. Бобцов А.А., Пыркин А.А. Компенсация гармонического возмущения в условиях запаздывания по управлению // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 19–23.
14. Gerasimov D.N., Nikiforov V.O., Paramonov A.V. Adaptive disturbance compensation in delayed linear systems: internal model approach // Proc. IEEE Conference on Control Applications. Sydney, Australia, 2015. P. 1692–1696. doi: 10.1109/CCA.2015.7320853
15. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A. Adaptive controller for linear system with input delay and output disturbance // IEEE Transactions on Automatic Control. 2015. Art. 7358095. doi: 10.1109/TAC.2015.2509428
16. Annaswamy A., Jang J., Lavretsky E. Stability margins for adaptive controllers in the presence of time-delay // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Honolulu, Hawaii, 2008. Art. 2008-6659. doi: 10.2514/6.2008-6659
17. Richard J.-P. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems // Automatica. 2003. V. 39. N 10. P. 1667–1694. doi: 10.1016/S0005-1098(03)00167-5
18. Nikiforov V.O. Observers of external deterministic disturbances. I. Objects with known parameters // Automation and Remote Control. 2004. V. 65. N 10. P. 1531–1541. doi: 10.1023/B:AURC.0000044264.74470.48

8. Nikiforov V.O. *Adaptivnoe i Robastnoe Upravlenie s Kompensatsiei Vozmushchenii* [Adaptive and Robust Control with Perturbations Compensation]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2003, 282 p.
9. Francis D.A., Wonham W.N. The internal model principle for linear multivariable regulators. *Applied Mathematics and Optimization*, 1975, vol. 2, no. 4, pp. 170–194. doi: 10.1007/BF01447855
10. Johnson C.D. Accommodation of external disturbances in linear regulator and servomechanism problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, vol. 16, no. 6, pp. 635–644. doi: 10.1109/TAC.1971.1099830
11. Pyrkin A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M. Rejection of sinusoidal disturbance of unknown frequency for linear system with input delay. *American Control Conference*. Baltimore, USA, 2010, pp. 5688–5693.
12. Basturk H.I., Krstic M. Adaptive sinusoidal disturbance cancellation for unknown LTI systems despite input delay. *Automatica*, 2015, vol. 58, pp. 131–138. doi: 10.1016/j.automatica.2015.05.013
13. Bobtsov A.A., Pyrkin A.A. The compensation of a harmonic perturbation under conditions of a delay in control. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2008, vol. 47, no. 4, pp. 513–517. doi: 10.1134/S1064230708040035
14. Gerasimov D.N., Nikiforov V.O., Paramonov A.V. Adaptive disturbance compensation in delayed linear systems: internal model approach. *Proc. IEEE Conference on Control Applications*. Sydney, Australia, 2015, pp. 1692–1696. doi: 10.1109/CCA.2015.7320853
15. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A. Adaptive controller for linear system with input delay and output disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, art. 7358095. doi: 10.1109/TAC.2015.2509428
16. Annaswamy A., Jang J., Lavretsky E. Stability margins for adaptive controllers in the presence of time-delay. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Honolulu, Hawaii, 2008, art. 2008-6659. doi: 10.2514/6.2008-6659
17. Richard J.-P. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems. *Automatica*, 2003, vol. 39, no. 10, pp. 1667–1694. doi: 10.1016/S0005-1098(03)00167-5
18. 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. doi: 10.1023/B:AURC.0000044264.74470.48

Авторы

Герасимов Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, gerasimovdn@mail.ru

Парамонов Алексей Владимирович – аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, avp.atrax@gmail.com

Никифоров Владимир Олегович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nikiforov@mail.ifmo.ru

Authors

Dmitry N. Gerasimov – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, gerasimovdn@mail.ru

Aleksei V. Paramonov – postgraduate student, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, avp.atrax@gmail.com

Vladimir O. Nikiforov – D.Sc., Professor, Vice Rector for Research, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nikiforov@mail.ifmo.ru