НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2018 Том 18 № 3 ISSN 2226-1494 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2018 Vol. 18 No 3 ISSN 2226-1494 http://ntv.ifmo.ru/en

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

УДК 519.71

АДАПТИВНАЯ РОБАСТНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

А.В. Парамонов[a]

[a] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: avp.atrax@gmail.com

Информация о статье
Поступила в редакцию 06.03.18, принята к печати 10.04.18
doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-384-391
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: 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. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-384-391

Аннотация
Предмет исследования. Рассмотрена задача компенсации внешнего возмущения для класса линейных стационарных объектов с известными параметрами и запаздыванием. **Метод.** Возмущение представлено как сумма нерегулярной и регулярной составляющих. Нерегулярная составляющая возмущения рассмотрена в качестве неизвестной ограниченной функции времени. Регулярная составляющая возмущения может быть представлена 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. Для сохранения устойчивости замкнутой системы при наличии в возмущении нерегулярной составляющей в алгоритме адаптации используется робастная модификация. В отличие от распространенных подходов алгоритм не требует идентификации параметров возмущения и позволяет исключить из системы управления ограничения в виде критического коэффициента адаптации или запаздывания. **Основные результаты.** В целях демонстрации работы предлагаемого подхода приведены результаты моделирования в среде MATLAB/Simulink. Результаты проиллюстрировали ограниченность всех сигналов в системе управления в условиях внешнего возмущения. Показано, что предлагаемый поход позволяет сохранить устойчивость в системе при разных значениях входного запаздывания. **Практическая значимость.** Алгоритм адаптивной компенсации рекомендуется использовать в: задачах управления различными устройствами активной виброзащиты, где возможно выделение доминирующих гармоник и спектра вибрационного сигнала; задачах управления робототехническими комплексами при наличии периодических (повторяющихся) движений; задачах компенсации качки в корабельных системах; задачах стабилизации космических объектов при наличии неконтролируемого вращения и т.д.

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

Благодарности
Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031).

ADAPTIVE ROBUST DISTURBANCE COMPENSATION IN LINEAR SYSTEMS WITH DELAY

A.V. Paramonov[a]

[a] ITMO University, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation
Corresponding author: avp.atrax@gmail.com

Article info
Received 06.03.18, accepted 10.04.18
doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-384-391
Article in Russian
For citation: 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). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-384-391

Abstract
Subject of Research. The paper considers the problem of disturbance compensation for the class of linear time-invariant plants with known parameters and delay. **Method.** The disturbance is presented as a sum of irregular and regular

components. An irregular component is treated as an unknown bounded time function. A regular component is described 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 allows 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. Robust modification of adaptive algorithm is used for keeping stability of closed-loop system in the presence of irregular disturbance. As distinct from widespread approaches the proposed algorithm does not require identification of disturbance parameters and gives the possibility to discard from the control system 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 the proposed approach. The results illustrate the boundedness of all signals in the closed-loop system in the presence of external disturbance. It is shown that the proposed idea enables keeping system stability for different values of input delay. **Practical Relevance.** The algorithm of adaptive compensation is recommended for application 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, control problems of robotic systems with periodical behavior, the problems of ship roll compensation, control problems of space plants in the presence of uncontrollable rotation.

Keywords
adaptive robust 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).

Введение

В работе рассматривается задача адаптивной робастной компенсации внешнего возмущения в линейных стационарных системах с запаздыванием.

Задача компенсации внешних возмущений относится к фундаментальным проблемам современной теории автоматического управления. На настоящий момент времени существует большое количество решений для линейных систем с известными и неизвестными параметрами [1–4] и для определенных классов нелинейных систем [5–8]. Большое количество предложенных алгоритмов основано на принципе внутренней модели [9, 10]. В соответствии с данным принципом внешнее возмущение может быть представлено как выход линейной динамической модели (экзосистемы), и параметры этой модели или их оценки применяются в синтезе компенсирующего закона управления.

Принцип внутренней модели также лежит в основе решений задач компенсации возмущений для систем с неопределенностями и запаздыванием (см., например, [11–14]). В этом случае нередко применяется идентификационный подход, при котором оцениваются параметры внешнего возмущения [11, 12, 15]. Но практическая реализация подобного подхода может быть осложнена в силу низкой скорости оценивания, которая, в свою очередь, зависит от выполнения условий наличия неисчезающего возбуждения [16].

Метод прямого адаптивного управления дает возможность компенсации внешнего возмущения без проведения процедуры идентификации параметров возмущения [14, 17]. Но в условиях входного запаздывания в объекте замкнутая система может стать неустойчивой. Чтобы сохранить устойчивость системы, необходимо рассчитать критические значения коэффициента адаптации и входного запаздывания. Модифицированная схема прямой адаптивной компенсации внешнего возмущения [18, 19] позволяет сохранить работоспособность замкнутой системы для произвольных значений коэффициента адаптации и входного запаздывания. Однако алгоритмы адаптивного управления, описанные в [14, 18, 19], способны обеспечить компенсацию только мультигармонического возмущения. Если в возмущении, помимо мультигармонического сигнала, присутствуют компоненты, которые могут быть описаны как неизвестные ограниченные функции времени, то в системе может возникнуть неограниченный параметрический дрейф [8]. Чтобы этого избежать, применяются различные робастные модификации алгоритмов адаптации [20].

В настоящей работе предлагается схема прямого адаптивного робастного управления, компенсирующая неизвестное внешнее возмущение. Схема представляет собой робастную модификацию стандартного градиентного алгоритма адаптации, которая не требует использования идентификаторов и нахождения пороговых значений коэффициентов адаптации и запаздывания.

Постановка задачи

Рассматривается линейный стационарный объект управления с внешним возмущением и входным запаздыванием

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

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

Свойства объекта управления и внешнего возмущения определяются следующими допущениями.

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

Допущение 1 сделано с целью уделить основное внимание проблеме адаптивной робастной компенсации возмущений в условиях входного запаздывания. Различные методы управления неустойчивыми системами с запаздыванием представлены в литературе [21]. Задача стабилизации системы в настоящей работе не рассматривается, но полученный результат может быть распространен для неустойчивых объектов.

Допущение 2. Внешнее возмущение δ может быть представлено как

$$\delta = \Delta + \nu, \tag{2}$$

где Δ – нерегулярная составляющая возмущения, представляющая собой неизвестную ограниченную функцию времени; ν – регулярная составляющая возмущения.

Регулярная составляющая возмущения может быть представлена как выход линейного генератора (внутренняя модель):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{\Gamma}\mathbf{z},\ \mathbf{z}(0), \\ \nu = \mathbf{h}^T\mathbf{z}, \end{cases} \tag{3}$$

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.

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

В соответствии с допущениями 2 и 3 регулярная составляющая возмущения может быть рассмотрена в качестве мультигармонического сигнала с неизвестными параметрами, но с известным количеством гармоник.

Цель задачи заключается в формировании управления, обеспечивающего ограниченность всех сигналов в замкнутой системе и сходимость вектора $\mathbf{x}$ к предельному множеству, а также дополнительную сходимость нормы вектора $\mathbf{x}$ к нулю при отсутствии в возмущении нерегулярной составляющей:

$$\lim_{t\to\infty}\|\mathbf{x}(t)\| = 0, \quad \forall\Delta \equiv 0\,. \tag{4}$$

Параметризация возмущения

Начнем решение задачи с построения наблюдателя регулярной составляющей возмущения, представляющего его в специальной параметризованной форме в виде линейной регрессионной модели. Введем в рассмотрение вспомогательный фильтр вида [6, 8, 22]

$$\dot{\xi} = \mathbf{G}\xi + \mathbf{l}\nu\,, \tag{5}$$

где $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{m\times m}$ – произвольная гурвицева матрица, образующая с вектором $\mathbf{l} \in \mathbb{R}^m$ полностью управляемую пару. Тогда можно показать, что регулярная составляющая возмущения ν может быть представлена в следующем виде:

$$\nu = \boldsymbol{\theta}^T\xi\,, \tag{6}$$

где $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^m$ – вектор неизвестных постоянных коэффициентов, зависящих от параметров матрицы $\mathbf{\Gamma}$ и вектора $\mathbf{h}$; вектор состояния $\xi \in \mathbb{R}^m$ формируется фильтром (5).

С помощью подстановки (6) в (5) получаем эквивалентную модель возмущения:

$$\dot{\xi} = \left(\mathbf{G} + \mathbf{l}\boldsymbol{\theta}^T\right)\xi\,. \tag{7}$$

Однако фильтр (5) физически нереализуем, так как использует в качестве входного сигнала неизмеряемую переменную ν. Исходя из этого, будем рассматривать (5) в качестве виртуального наблюдателя возмущения и поставим задачу восстановления вектора ξ по измерениям $\mathbf{x}$. Для этого необходимо учесть структуру объекта управления (1). Для синтеза наблюдателя возмущения δ сформируем оценку $\hat{\xi}$ вектора состояния ξ виртуального наблюдателя возмущения (5)–(6) с помощью следующего физически реализуемого наблюдателя возмущения [6, 8]:

$$\begin{aligned} \hat{\xi} &= \boldsymbol{\eta} + \mathbf{N}\mathbf{x}, \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{G}\boldsymbol{\eta} + (\mathbf{G}\mathbf{N} - \mathbf{N}\mathbf{A})\mathbf{x} - \mathbf{N}\mathbf{b}u(t-\tau), \end{aligned} \tag{8}$$

где $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^m$ – сигнал расширения; $\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{m\times n}$ – произвольная матрица, удовлетворяющая условию $\mathbf{N}\mathbf{b} = \mathbf{l}$.

Путем замены неизвестного вектора ξ на его оценку $\hat{\xi}$ наблюдатель (8) позволяет представить внешнее возмущающее воздействие (2) в параметризованном виде:

$$\hat{\delta} = \boldsymbol{\theta}^T \hat{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{e}_{\xi} + \Delta\ , \qquad (9)$$

где $\hat{\boldsymbol{\xi}}$ формируется наблюдателем (8); $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^m$ – вектор неизвестных постоянных коэффициентов; вектор-функция $\mathbf{e}_{\xi} = \boldsymbol{\xi} - \hat{\boldsymbol{\xi}}$ представляет собой ошибку наблюдения и является решением дифференциального уравнения

$$\dot{\mathbf{e}}_{\xi} = \mathbf{G}\mathbf{e}_{\xi} - \mathbf{l}\Delta\ .$$

При отсутствии нерегулярной составляющей внешнего возмущения Δ наблюдатель (8) строит асимптотическую оценку возмущения δ. Наличие нерегулярной составляющей Δ не влечет за собой потерю устойчивости наблюдателя.

Объект, подверженный воздействию внешнего возмущения (2)–(3), может быть представлен параметризованной моделью путем подстановки параметризованного возмущения (9) в уравнение состояния объекта (1):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}(u(t-\tau) + \boldsymbol{\theta}^T \hat{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{e}_{\xi} + \Delta)\ .$$

Поскольку объект работает в условиях запаздывания по управлению, то для компенсации возмущения необходимо получить оценку упреждающего значения регулярной составляющей возмущения. С использованием фундаментального решения (7) строится предиктор:

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

где выражение $\mathbf{R} = \exp\left\{(\mathbf{G} + \mathbf{l}\boldsymbol{\theta}^T)\tau\right\}$ обозначает матричную экспоненту. Так как вектор $\boldsymbol{\theta}$ неизвестен, значение $\boldsymbol{\xi}(t+\tau)$ не реализуемо. Поэтому осуществляется замена вектора $\boldsymbol{\xi}$ его оценкой $\hat{\boldsymbol{\xi}}$:

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}(t+\tau) = \mathbf{R}\hat{\boldsymbol{\xi}}(t)\ . \qquad (10)$$

Выражение (10) позволяет построить оценку упреждающего значения регулярной составляющей параметризованного возмущения (9):

$$\hat{\nu}(t+\tau) = \boldsymbol{\theta}^T \hat{\boldsymbol{\xi}}(t+\tau)\ . \qquad (11)$$

Теперь введем в рассмотрение вектор неизвестных постоянных параметров $\boldsymbol{\psi}^T = \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{R}$ и с учетом (10) перепишем выражение (11) в следующем виде:

$$\hat{\nu}(t+\tau) = \boldsymbol{\psi}^T \hat{\boldsymbol{\xi}}(t)\ . \qquad (12)$$

Тогда параметризованная модель объекта может быть записана как

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}(u(t-\tau) + \boldsymbol{\psi}^T \hat{\boldsymbol{\xi}}(t-\tau) + \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{e}_{\xi} + \Delta)\ . \qquad (13)$$

Таким образом, параметризованное представление регулярной составляющей внешнего возмущения (12) и объекта управления (13) позволяют построить желаемый закон управления на основе принципа непосредственной компенсации, т.е.

$$u = -\hat{\boldsymbol{\psi}}^T \hat{\boldsymbol{\xi}}\ , \qquad (14)$$

где $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ – вектор настраиваемых параметров алгоритма компенсации возмущения. Настройка данных параметров должна осуществляться соответствующими алгоритмами адаптации.

Настраиваемая модель ошибки и алгоритм адаптации

Алгоритм адаптации обеспечивает непосредственную настройку параметров $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ с целью обеспечения работы желаемого закона управления. Для синтеза алгоритма адаптации сформируем модель ошибки, подставив закон управления (14) в уравнение (13):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}(\tilde{\boldsymbol{\psi}}^T (t-\tau)\hat{\boldsymbol{\xi}}(t-\tau) + \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{e}_{\xi} + \Delta)\ . \qquad (15)$$

где $\tilde{\boldsymbol{\psi}}(t-\tau) = \boldsymbol{\psi} - \hat{\boldsymbol{\psi}}(t-\tau)$ – вектор параметрических ошибок с запаздыванием.

В случае прямой подстановки в (14) вектора $\tilde{\boldsymbol{\psi}}(t-\tau)$ вместо $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ появляются ограничения на применимость алгоритма, а именно, потребуется расчет критических значений γ или τ, при которых сохраняется устойчивость замкнутой системы [14]. Как следствие, возникает необходимость в построении модифицированного алгоритма адаптации, генерирующего текущую оценку $\hat{\boldsymbol{\psi}}$. Чтобы преодолеть эту проблему, используем метод расширенной ошибки и сформируем расширенный вектор состояния [18, 19]:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + \boldsymbol{\varphi}\ , \qquad (16)$$

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

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varphi} + \mathbf{b}(\hat{\boldsymbol{\psi}}^T (t-\tau) - \hat{\boldsymbol{\psi}}^T)\hat{\boldsymbol{\xi}}(t-\tau)\ . \qquad (17)$$

Дифференцируя $\hat{\mathbf{x}}$ с учетом (15)–(17), получаем настраиваемую модель ошибки:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{b}(\tilde{\boldsymbol{\psi}}^T \hat{\xi}(t-\tau) + \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{e}_\xi + \Delta) . \qquad (18)$$

Анализ модели (18) позволяет использовать алгоритм адаптации с хорошо известной структурой [4, 8]:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\psi}}} = \gamma\hat{\xi}(t-\tau)\mathbf{b}^T \mathbf{P}\hat{\mathbf{x}} - \sigma(\hat{\boldsymbol{\psi}})\hat{\boldsymbol{\psi}} , \qquad (19)$$

где $\gamma > 0$ – коэффициент адаптации, симметрическая положительно определенная матрица $\mathbf{P}$ является решением уравнения $\overline{\mathbf{A}}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\overline{\mathbf{A}} = -2\mathbf{I}$, функция $\sigma(\hat{\boldsymbol{\psi}})$ определяется следующими выражениями:

$$\sigma(\hat{\boldsymbol{\psi}}) = \begin{cases} 0, & \|\hat{\boldsymbol{\psi}}\| < \psi^* \\ \|\hat{\boldsymbol{\psi}}\|/\psi^* - 1, & \psi^* \le \|\hat{\boldsymbol{\psi}}\| \le 2\psi^* \\ 1, & \|\hat{\boldsymbol{\psi}}\| > 2\psi^* \end{cases} \qquad (20)$$

с произвольной положительной константой ψ^*.

Свойства замкнутой системы определяются следующим утверждением.

Утверждение. Настраиваемый регулятор (14) совместно с наблюдателем (8), фильтром (17) и алгоритмом адаптации (19) при любых положительных γ, τ и ψ^* обеспечивает в замкнутой системе с объектом управления (1) выполнение следующих свойств:

1. сигналы $\|\mathbf{x}\|$, $\|\hat{\mathbf{x}}\|$, $\|\tilde{\boldsymbol{\psi}}\|$ в системе ограничены;
2. $\hat{\mathbf{x}}$ и $\tilde{\boldsymbol{\psi}}$ сходятся к установившемуся множеству

   $D_\Sigma = \{\hat{\mathbf{x}}, \tilde{\boldsymbol{\psi}} : V \le fR\}$,

где $f = \max\{0{,}5\overline{\lambda}\{\mathbf{P}\}, 1/\gamma\}$; $R = \max\left\{D, \gamma D, \left(\|\boldsymbol{\psi}\| + 2\psi^*\right)^2\right\}$, $D = \|\boldsymbol{\theta}^T\mathbf{e}_\xi + \Delta\|_\infty \|\mathbf{b}^T\mathbf{P}\|^2 + \|\boldsymbol{\psi}\|^2/\gamma$, $\overline{\lambda}\{\mathbf{P}\}$ – максимальное собственное число матрицы $\mathbf{P}$;

3. $\|\mathbf{x}\| \to \|\hat{\mathbf{x}}\|$ при $t \to \infty$;
4. при $\Delta \equiv 0$ и $\psi^* > \|\boldsymbol{\psi}\|$ алгоритм адаптации (19) обеспечивает асимптотическую сходимость величин $\|\hat{\mathbf{x}}\|$ и $\|\dot{\hat{\boldsymbol{\psi}}}\|$ к нулю и выполнение целевого условия (4).

Доказательство утверждения базируется на основе выбора функции Ляпунова вида

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

для которой производная по времени будет удовлетворять неравенству

$$\dot{V} \le -0{,}5\|\hat{\mathbf{x}}\|^2 - 0{,}5\sigma\|\tilde{\boldsymbol{\psi}}\|^2/\gamma + 0{,}5D .$$

Если выполнены условия, прописанные в свойстве 4, то производная функции Ляпунова удовлетворяет следующему неравенству:

$$\dot{V} \le -0{,}5\|\hat{\mathbf{x}}\|^2 .$$

Параметрическая обратная связь $-\sigma(\hat{\boldsymbol{\psi}})\hat{\boldsymbol{\psi}}$ в алгоритме адаптации (19) позволяет сохранять робастность замкнутой системы при $\Delta \ne 0$ и избежать возникновения неограниченного параметрического дрейфа. При этом, чтобы алгоритм адаптации (19) обеспечивал сходимость установившихся ошибок к нулю при отсутствии нерегулярной составляющей, была введена σ-модификация (20) [20].

Построенная система адаптивной компенсации внешних возмущений для линейных объектов с запаздыванием по входу обеспечивает ограниченность всех сигналов в системе и сходимость вектора состояния $\mathbf{x}$ к предельному множеству. Использование настраиваемой модели ошибки позволяет сохранять устойчивость системы для произвольных значений коэффициента адаптации и входного запаздывания.

Моделирование

Продемонстрируем работу замкнутой системы адаптивного управления с помощь цифрового моделирования, выполненного в программной среде MATLAB/Simulink.

Рассмотрим модель второго порядка

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

с матрицами

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

и возмущением $\delta = 5\sin(2t) + \Delta$, где $|\Delta| \le 1$.

Оценка $\hat{\xi}$ является состоянием наблюдателя (8) со следующими параметрами:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -5 \end{bmatrix},\ \mathbf{l} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Вектор настраиваемых параметров $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ генерируется алгоритмом адаптации (19)–(20) со следующими параметрами:

$$\gamma = 10\,,\ \psi^* = 9{,}5\,,\ \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

На рис. 1 и 2 продемонстрированы результаты моделирования переходных процессов в замкнутой системе в условиях внешнего возмущения для входных запаздываний $\tau = 2\,\text{с}$ и $\tau = 10\,\text{с}$ соответственно. Анализ графиков показывает, что использование алгоритма адаптации с робастной модификацией обеспечивает сходимость всех сигналов в системе к ограниченному множеству при наличии нерегулярной составляющей внешнего возмущения. Система также остается устойчивой для произвольных значений коэффициента адаптации и входного запаздывания. При отсутствии нерегулярной составляющей возмущения норма вектора состояния объекта сходится к нулю (рис. 3).

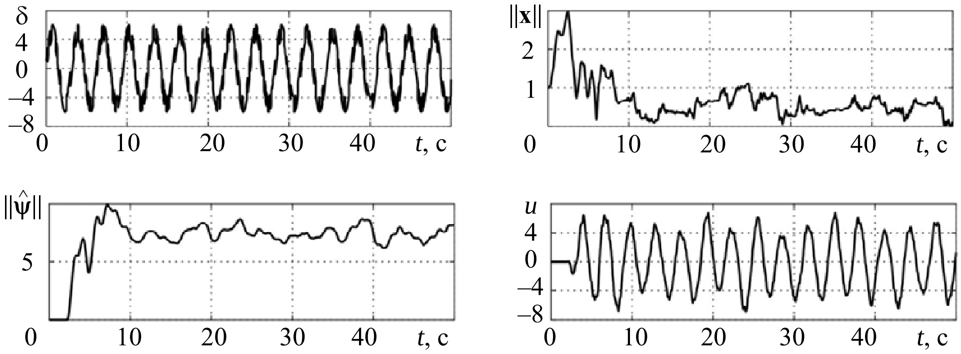

Рис. 1. Переходные процессы в замкнутой системе адаптивной робастной компенсации при наличии запаздывания $\tau = 2\,\text{с}$

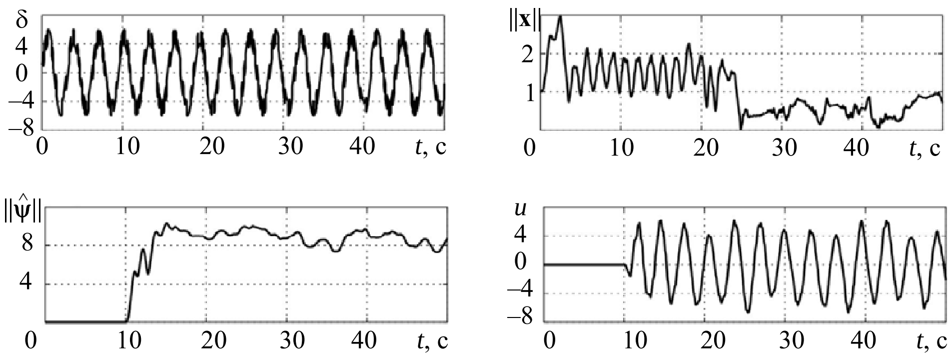

Рис. 2. Переходные процессы в замкнутой системе адаптивной робастной компенсации при наличии запаздывания $\tau = 10\,\text{с}$

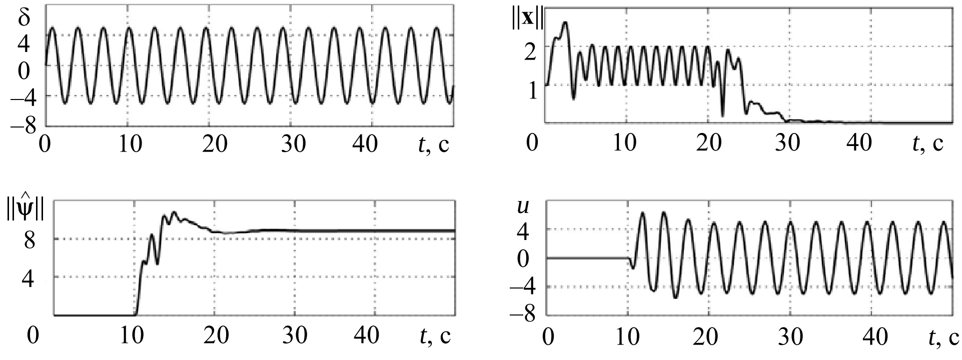

Рис. 3. Переходные процессы в замкнутой системе адаптивной робастной компенсации при наличии запаздывания $\tau = 10\,\text{с}$ и отсутствии нерегулярной составляющей возмущения $\Delta \equiv 0$

Заключение

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

Предлагаемое решение может быть расширено на случай неустойчивого объекта или объекта с неизмеряемым вектором состояния и неизвестными параметрами.

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 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. Narendra K.S., Annaswamy A.M. Stable Adaptive Systems. Prentice-Hall, 1989. 494 p.
17. 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.

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
8. Nikiforov V.O. *Adaptive and Robust Control with Perturbations Compensation*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2003, 282 p. (in Russian)
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. Narendra K.S., Annaswamy A.M. *Stable Adaptive Systems*. Prentice-Hall, 1989, 494 p.
17. Annaswamy A., Jang J., Lavretsky E. Stability margins for

Honolulu, Hawaii, 2008. Art. 2008-6659. doi: 10.2514/6.2008-6659
18. 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(106). С. 1023–1030. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1023-1030
19. Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O. Adaptive disturbance compensation in linear systems with input arbitrary delay: internal model approach // Proc. 8th Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Lisbon, Portugal, 2016. P. 304–309. doi: 10.1109/ICUMT.2016.7765376
20. Ioannou P.A., Kokotovic P.V. Instability analysis and improvement of robustness of adaptive control // Automatica. 1984. V. 20. N 5. P. 583–594. doi: 10.1016/0005-1098(84)90009-8
21. 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
22. 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

Авторы

Парамонов Алексей Владимирович – аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57188966696, ORCID ID: 0000-0002-6355-0670, avp.atrax@gmail.com

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
18. 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. (in Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1023-1030
19. Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O. Adaptive disturbance compensation in linear systems with input arbitrary delay: internal model approach. *Proc. 8th Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT*. Lisbon, Portugal, 2016, pp. 304–309. doi: 10.1109/ICUMT.2016.7765376
20. Ioannou P.A., Kokotovic P.V. Instability analysis and improvement of robustness of adaptive control. *Automatica*, 1984, vol. 20, no. 5, pp. 583–594. doi: 10.1016/0005-1098(84)90009-8
21. 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
22. 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

Authors

Alexey V. Paramonov – postgraduate, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57188966696, ORCID ID: 0000-0002-6355-0670, avp.atrax@gmail.com