

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-172-178

УДК 681.51.015

Улучшение параметрической сходимости в задачах компенсации мультисинусоидальных возмущений

Марина Михайловна Коротина¹, Станислав Владимирович Арановский²,
 Алексей Алексеевич Бобцов³, Андрей Владимирович Лямин⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ korotina.marina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5716-9662>

² s.aranovskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2151-5594>

³ bobtsov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1854-6717>

⁴ lyamin@itmo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7387-0694>

Аннотация

Предмет исследования. В работе представлен метод улучшения параметрической сходимости и повышения качества переходных процессов в задаче прямой адаптивной компенсации мультисинусоидальных возмущений. Предложенный метод улучшает качество функционирования существующих алгоритмов и обеспечивает монотонность переходных процессов. **Метод.** Для оценивания параметров возмущения использовалась процедура динамического расширения регрессора с последующим применением дискретного градиентного алгоритма. **Основные результаты.** Доказана применимость схемы Крейссельмейера как алгоритма расширения в процедуре динамического расширения регрессора. Приведены результаты численного моделирования, иллюстрирующие улучшение переходных процессов оценивания параметров неизменяемого возмущения при использовании процедуры динамического расширения регрессора. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть востребованы при решении практических задач в областях обработки и оценивания гармонических и мультigarмонических сигналов, в частности при компенсации вибраций в электромеханических системах.

Ключевые слова

процедура динамического расширения регрессора, схема Крейссельмейера, свойство не исчезающего возбуждения, дискретные системы, сходимость, идентификация параметров, возмущение, компенсация возмущений

Ссылка для цитирования: Коротина М.М., Арановский С.В., Бобцов А.А., Лямин А.В. Улучшение параметрической сходимости в задачах компенсации мультисинусоидальных возмущений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 172–178. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-172-178

The parametric convergence performance improvement in the direct adaptive multi-sinusoidal disturbance compensation problem

Marina M. Korotina¹, Stanislav V. Aranovskiy², Alexey A. Bobtsov³, Andrey V. Lyamin⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ korotina.marina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5716-9662>

² s.aranovskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2151-5594>

³ bobtsov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1854-6717>

⁴ lyamin@itmo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7387-0694>

Abstract

The paper presents an approach to the parametric convergence performance improvement applied to the direct adaptive multi-sinusoidal disturbance compensation problem. The proposed method improves the performance of the existing solutions and ensures the transient monotonicity. The Dynamic Regressor Extension and Mixing (DREM) procedure

© Коротина М.М., Арановский С.В., Бобцов А.А., Лямин А.В., 2021

followed by the discrete gradient estimator is applied for disturbance parameters estimation. The paper proves the applicability of Kreisselmeier's scheme as an extension of the algorithm in procedure dynamic regressor extension. A numerical simulation is presented to illustrate the improvement of the transient processes of estimating the parameters of an unmeasured perturbation using the DREM procedure. The work can be used in solving practical problems in the fields of processing and evaluating harmonic and multi-harmonic signals, e.g., to suppress vibrations in electromechanical systems.

Keywords

dynamic regressor extension and mixing, Kreisselmeier's scheme, persistent excitation condition, discrete systems, convergence, parameters identification, disturbance, disturbance compensation

For citation: Korotina M.M., Aranovskiy S.V., Bobtsov A.A., Lyamin A.V. The parametric convergence performance improvement in the direct adaptive multi-sinusoidal disturbance compensation problem. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 172–178 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-172-178

Введение

Проблема компенсации мультисинусоидальных возмущений играет важную роль в различных технических задачах [1, 2]. К примеру, в задачах управления морскими судами [3, 4], защиты от вибраций [5, 6], обнаружения неисправностей [7] и других [8]. Существующие подходы решения задачи компенсации можно условно отнести к двум классам:

- 1) подходы, основанные на компенсации действующего возмущения с использованием принципа внутренней модели [9];
- 2) подходы, основанные на сведении выхода возмущенной системы в некоторую ограниченную и достаточно малую область.

Если возмущение возможно представить как выход некоторого детерминированного линейного генератора (в случае синусоидальных и мультисинусоидальных воздействий на систему), более предпочтительными считаются компенсационные подходы, которые позволяют подавить возмущение за счет знания о структуре системы, как показано в работе [2]. При использовании метода внутренней модели параметры синтезируемого регулятора могут рассчитываться на основе полученной информации об известных параметрах генератора возмущения, таких как частоты мультисинусоидального сигнала или другие. Однако на практике в большинстве случаев параметры возмущения считаются неизвестными, и в таком случае задача компенсации решается с использованием методов адаптивного управления. Следует отметить, что в прямых адаптивных алгоритмах компенсации [10, 11] осуществляется адаптивная настройка непосредственно коэффициентов выбранного регулятора, а не идентификация параметров возмущения.

В настоящей работе для компенсации синусоидального и мультисинусоидального возмущений на выходе дискретной модели используется метод прямой адаптивной компенсации возмущений, основанный на представлении помех в виде линейной комбинации выходов некоторых устойчивых звеньев. Улучшение переходных процессов при оценивании параметров регулятора достигнуто за счет использования модифицированной процедуры динамического расширения регрессора. Доказано и проиллюстрировано сохранение свойства исчезающего возбуждения для дискретных систем при использовании схемы Крейссельмейера для процедуры динамического расширения.

Постановка задачи

В работе рассматривается управление объектом в дискретном времени, и для произвольного сигнала (функции времени) x запись $x(h)$ является сокращенной формой записи $x(hT)$, где h — целое неотрицательное число, а $T > 0$ — интервал дискретизации.

В работе представлен метод улучшения параметрической сходимости в задаче компенсации мультисинусоидального сигнала для дискретного объекта вида [1]

$$y(h) = P(q^{-1})u(h) = \rho(h), \tag{1}$$

где $P(q^{-1}) = P_B(q^{-1})/P_A(q^{-1})$, $P_A(q^{-1})$ и $P_B(q^{-1})$ — известные полиномы. Оператор запаздывания (обратного сдвига) q^{-1} определяется следующим образом: $q^{-1}y(h) = y(h - 1)$. Сигнал $y(h)$ — измеряемый сигнал выхода системы, $u(h)$ — сигнал входного воздействия, $\rho(h)$ представляет собой неизмеримое возмущение, сформированное как сумма N синусоидальных сигналов

$$\rho(h) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i h + \varphi_i). \tag{2}$$

Параметры возмущения $A_i > 0$, $\omega_i > 0$, φ_i и точное количество синусоидальных сигналов N неизвестны, но известна верхняя граница количества сигналов N_{\max} , $N \leq N_{\max}$.

Цель работы — компенсация возмущения на выходе системы, т. е. формирование такого сигнала управления $u(h)$ чтобы выходной сигнал (1) стремился к нулю:

$$\lim_{h \rightarrow \infty} y(h) \rightarrow 0. \tag{3}$$

Декомпозиция возмущения

Приведение возмущения $\rho(h)$ к виду линейной регрессии подробно представлено в работе [1]. Предполагая наличие точной модели, т. е. $\hat{P}(q^{-1}) = P(q^{-1})$, оценка возмущения (1) может быть получена как

$$\hat{\rho}(h) = \rho(h) + \epsilon_p(h),$$

где $\epsilon_p(h)$ — экспоненциально затухающий член из-за $\hat{\rho}(0) \neq \rho(0)$, поэтому $\hat{\rho}(h)$ асимптотически стремится к $\rho(h)$.

Согласно [1] выбран банк устойчивых фильтров $F_j(q^{-1})$ и сформирован набор сигналов $x_j(h) = \hat{P}(q^{-1})F_j(q^{-1})\hat{\rho}(h)$. Подробно вопрос выбора банка фильтров рассмотрен в [1], где приводится Лемма, дающая достаточные условия для функционирования

такого банка. В частности, банк фильтров может быть выбран в соответствии с априорной информацией о полосе частот возмущения. Тогда оценка возмущения представлена как линейная комбинация

$$\hat{\rho}(h) = \sum_{j=1}^{2N_{\max}} k_j x_j(h), \quad (4)$$

где k_j — неизвестный коэффициент; $x_j(h)$ — сигнал возмущения $\hat{\rho}(h)$, пропущенный через блок устойчивых фильтров параллельного соединения. В таком случае для компенсации мультисинусоидального возмущения (2) дискретной модели (1) необходимо найти значения вектора коэффициентов $\mathbf{k} = \{k_j\}_{j=1}^{2N_{\max}}$ линейной регрессии (4), а затем сформировать управляющий сигнал

$$u(h) = - \sum_{j=1}^{2N_{\max}} k_j \bar{x}_j(h), \quad (5)$$

где $\bar{x}_j(h) = F_j(q^{-1})\hat{\rho}(h)$. В результате после завершения переходных процессов в системе (1) будет обеспечиваться выполнение условия (3).

Процедура динамического расширения регрессора

Процедура динамического расширения и декомпозиции (процедура ДРД) была подробно описана в работах [12–14]. Процедура ДРД состоит из двух этапов.

На первом этапе с использованием некоторого алгоритма динамического расширения формируется расширенное уравнение линейной регрессии вида

$$\mathbf{Y}(h) = \mathbf{\Phi}(h)\mathbf{k}, \quad (6)$$

где $\mathbf{Y}(h) \in \mathbb{R}^n$; $\mathbf{\Phi}(h) \in \mathbb{R}^{n \times n}$; $n = 2N_{\max}$; $\mathbf{k} \in \mathbb{R}^n$.

На втором этапе происходит декомпозиция расширенного уравнения, что позволяет преобразовать исходную линейную регрессию (4) к набору из n скалярных уравнений

$$Y_j(h) = \Delta(h)k_j,$$

где $j \in \overline{1, n}$ — скалярная функция; $\Delta(h)$ — определитель расширенной матрицы $\mathbf{\Phi}(h)$; $\mathbf{Y}(h) := \text{adj}\{\mathbf{\Phi}(h)\}\mathbf{Y}(h)$ — расширенная матрица выходного сигнала, $\text{adj}\{\mathbf{\Phi}(h)\}$ — союзная матрица от расширенной $\mathbf{\Phi}(h)$.

Для идентификации вектора неизвестных параметров \mathbf{k} применяются стандартные алгоритмы оценивания к набору полученных уравнений линейной регрессии (6). Преимущество новой линейной регрессии (6) перед исходной (4) состоит в том, что можно оценивать конкретные параметры k_j , а не весь вектор целиком. К тому же сходимость оценок \hat{k}_j к исходным значениям будет монотонной после завершения переходных процессов в системе.

Стандартные алгоритмы оценивания параметров экспоненциально устойчивы тогда и только тогда, если выполняется условие неистощающего возбуждения для исходного регрессора, записанное для дискретных систем как

$$\sum_{i=h}^{h+l-1} \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i) \geq \mu \mathbf{I}_n, \quad (7)$$

где $l \geq n$, $\mu > 0$, и соотношение (7) выполняется для всех $h \geq 1$; \mathbf{x}^T — транспонированная матрица \mathbf{x} ; \mathbf{I}_n — единичная матрица размерности n .

Выполнение условия неистощающего возбуждения в дальнейшем будет обозначаться как $x \in \text{PE}$ (англ. Persistent Excitation). Выполнение условия неистощающего возбуждения во многом зависит от выбора алгоритма расширения исходной линейной регрессии (4) до вида (6), при котором гарантируется сохранение свойства $\Delta(h) \in \text{PE}$ при $x \in \text{PE}$. В настоящей работе в качестве такого расширения предлагается схема Крейссельмейера, подробно описанная в работе [15]. Доказательство сохранения свойства неистощающего возбуждения при использовании схемы Крейссельмейера в процедуре ДРД для непрерывных систем приведено в [16], однако не было показано, сохраняется ли такое свойство для дискретных систем. Вопрос применимости схемы Крейссельмейера в процедуре ДРД для дискретных систем рассмотрен в следующем разделе работы.

Схема Крейссельмейера для дискретных систем

После применения схемы Крейссельмейера к (6) дискретная система примет форму:

$$\mathbf{\Phi}(h+1) = \lambda \mathbf{\Phi}(h) + (1-\lambda)m_p^2 \mathbf{x}(h)\mathbf{x}^T(h),$$

$$\mathbf{Y}(h+1) = \lambda \mathbf{Y}(h) + (1-\lambda)m_p \mathbf{x}(h)\hat{\rho}(h), \quad (8)$$

где $1 > \lambda = e^{-aT} > 0$, $a > 0$; T — шаг дискретизации; $m_p \in \mathbb{R}_+$ — масштабирующий коэффициент.

Решением для $\mathbf{\Phi}(h+1)$ из (8) будет

$$\mathbf{\Phi}(h) = \lambda^h \mathbf{\Phi}(0) + \sum_{i=0}^{h-1} \boldsymbol{\psi}(i),$$

$$\boldsymbol{\psi}(i) = \lambda^{h-i-1} m_p^2 (1-\lambda) \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i). \quad (9)$$

Для получения нижней границы $\Phi(h)$ необходимо расписать сумму $\boldsymbol{\psi}$ с конца до начала, используя $q:h = ql + v$, где $v \geq 0$ — остаток от деления. Получим, что в интервале $[1, \dots, h]$ помещается q выборок l и остаток v , который меньше промежутка l :

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{h-1} \boldsymbol{\psi}(i) &= \sum_{i=h-l}^{h-1} \boldsymbol{\psi}(i) + \sum_{i=h-2l}^{h-1-l} \boldsymbol{\psi}(i) + \dots + \\ &+ \sum_{i=h-ql-v}^{h-1-(q-1)l} \boldsymbol{\psi}(i) + \sum_{i=0}^{v-1} \boldsymbol{\psi}(i). \end{aligned} \quad (10)$$

Для первого члена правой части уравнения (10) получим:

$$\begin{aligned} \sum_{i=h-l}^{h-1} \boldsymbol{\psi}(i) &= \sum_{i=h-l}^{h-1} \lambda^{h-i-1} m_p^2 (1-\lambda) \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i) \geq \\ &\geq \lambda^{l-1} m_p^2 (1-\lambda) \sum_{i=h-l}^{h-1} \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i) \geq \lambda^{l-1} m_p^2 (1-\lambda) \mu \mathbf{I}_n. \end{aligned}$$

Так как $\lambda \in (0 \dots 1)$, а $l \geq n$, то $\lambda^{l-1} \leq 1$. Соответственно, меньшее значение будет при $i = h-l$.

Аналогично, для ql -го члена правой части уравнения (10), кроме последнего, запишем:

$$\begin{aligned} \sum_{i=h-ql}^{h-1-(q-1)l} \Psi(i) &= \lambda^{h-h+ql-1} m_p^2 (1-\lambda) \mathbf{x}_{h-ql} \mathbf{x}_{h-ql}^T + \dots \\ &+ \lambda^{h-h+1+(q-1)l-1} m_p^2 (1-\lambda) \mathbf{x}_{h-1-(q-1)l} \mathbf{x}_{h-1-(q-1)l}^T \geq \\ &\geq \lambda^{ql-1} m_p^2 (1-\lambda) \sum_{i=h-ql}^{h-1-(q-1)l} \mathbf{x}(i) \mathbf{x}^T(i) \geq \lambda^{ql-1} m_p^2 (1-\lambda) \mu \mathbf{I}_n. \end{aligned}$$

Последний член суммы выражения (10) можно расписать как:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{\nu-1} \Psi(i) &= \lambda^{h-0-1} m_p^2 (1-\lambda) \mathbf{x}_0 \mathbf{x}_0^T + \dots + \\ &+ \lambda^{h-\nu} m_p^2 (1-\lambda) \mathbf{x}_{\nu-1} \mathbf{x}_{\nu-1}^T \geq \lambda^{h-1} m_p^2 (1-\lambda) \sum_{i=0}^{\nu-1} \mathbf{x}(i) \mathbf{x}^T(i). \end{aligned}$$

Тогда решение (9) представим неравенством

$$\begin{aligned} \Phi(h) &\geq \lambda^h \Phi(0) + \mu m_p^2 (1-\lambda) \sum_{i=1}^q \lambda^{il-1} \mathbf{I}_n + \\ &+ \lambda^{h-1} m_p^2 (1-\lambda) \sum_{i=0}^{\nu-1} \mathbf{x}(i) \mathbf{x}^T(i). \end{aligned} \quad (11)$$

Для $\Phi(0) \geq \mathbf{O}_n$ сумма первого и последнего членов уравнения (11) — положительно полуопределенная матрица:

$$\Phi(h) \geq \lambda^h \Phi(0) + \lambda^{h-1} m_p^2 (1-\lambda) \sum_{i=0}^{\nu-1} \mathbf{x}(i) \mathbf{x}^T(i) \geq \mathbf{O}.$$

Граница определителя матрицы $\Phi(h)$ будет равна для всех $h \geq ql$

$$\Delta(h) \geq \mu^n m_p^{2n} (1-\lambda)^n \left(\sum_{i=1}^q \lambda^{il-1} \right)^n. \quad (12)$$

Сумму в выражении (12) перепишем:

$$\sum_{i=1}^q \lambda^{il-1} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^q (\lambda^l)^i.$$

Чтобы найти асимптотическую границу, используем формулу суммы бесконечно убывающей геометрической прогрессии:

$$S = \frac{b_1}{1-p} = \frac{\lambda^l}{1-\lambda^l},$$

где b_1 — первый член; $p = b_{n+1}/b_n$ — знаменатель прогрессии. Тогда окончательно асимптотическая нижняя граница будет иметь вид

$$a_s = \left(\frac{\mu m_p^2 (1-\lambda)}{\lambda} \frac{\lambda^l}{1-\lambda^l} \right)^n. \quad (13)$$

Моделирование

Рассмотрим сравнение работы метода прямой адаптивной компенсации с использованием градиентного алгоритма настройки параметров и процедуры динамического расширения регрессора. Для моделирования выбрана дискретная система вида (1), передаточная функция которой задана как

$$P(z^{-1}) = \frac{P_B(z^{-1})}{P_A(z^{-1})} = \frac{b_3 z^3 - b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{a_4 z^4 + a_3 z^3 - a_2 z^2 + a_1 z + a_0} =$$

$$= \frac{-8,5z^3 - 3,25z^2 + 1,97z + 0,096}{z^4 + 0,3z^3 - 0,42z^2 + 0,008z + 0,0192}.$$

На исходную систему (1) действует возмущение, представленное суммой двух синусоид:

$$\rho(h) = A \sin(\omega_1 h T) + A \sin(\omega_2 h T),$$

где $A = 0,5$; $\omega_1 = 50$ рад/с; $\omega_2 = 60$ рад/с; $T = 0,01$ с. Для формирования блока фильтров использован фильтр с конечной импульсной характеристикой, состоящий из $2N - 1$ блоков запаздывания с временной задержкой равной T .

Для расширения регрессионной модели (4) параметры схемы Крейссельмейера (8) выбраны следующими: $a = 2,02$, $\lambda = 0,98$. Коэффициент масштабирования при действии возмущения $m_p = 5$.

Идентификация неизвестных параметров регулятора для дискретной регрессионной модели производится с использованием дискретного градиентного алгоритма вида:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{k}}(h) &= \hat{\mathbf{k}}(h-1) + \\ &+ \frac{\Gamma \mathbf{x}(h)}{1 + \mathbf{x}^T(h) \Gamma \mathbf{x}(h)} [\rho(h) - \mathbf{x}^T(h) \hat{\mathbf{k}}(h-1)], \end{aligned} \quad (14)$$

где $\Gamma = \gamma_1 \mathbf{I}_{2N}$, $\gamma_1 = 10^7$.

Для идентификации неизвестных параметров вектора \mathbf{k} после процедуры ДРД использован дискретный градиентный алгоритм, основанный на (14):

$$\begin{aligned} \hat{k}_i(h) &= \hat{k}_i(h-1) + \\ &+ \frac{\gamma_i \Delta(h)}{1 + \gamma_i \Delta^2(h)} [Y_i(h) - \Delta(h) \hat{k}_i(h-1)], \end{aligned} \quad (15)$$

где $\gamma_1 = \gamma_2 = 10^9$.

Для иллюстрации улучшенных переходных процессов при оценивании параметров и отделении их от переходных процессов в самом объекте управления, алгоритм компенсации применяется с момента $t = 0,5$ с после завершения переходных процессов в самой модели (1).

Как видно на рис. 1, применяя градиентный алгоритм (14) к исходной регрессионной модели (4) без предварительного расширения, коэффициенты сходятся неравномерно. Если сначала произвести процедуру ДРД и применить дискретный градиентный алгоритм (15) к новой регрессии (6) (рис. 2), то сходимость оцениваемых параметров будет монотонна и параметры сходятся заметно быстрее.

На рис. 3 показано, что при использовании расширения исходной модели с помощью процедуры ДРД цель управления (3) достигается значительно быстрее обычного оценивания градиентным алгоритмом.

Нижняя граница, асимптотическая нижняя граница, а также сам график поведения определителя $\Delta(h)$ при действии возмущения $\rho(h)$ представлены на рис. 4. Значение μ для нахождения нижних границ вычисляется как наименьшее собственное число матрицы суммированных $\mathbf{x}(i) \mathbf{x}^T(i)$ на промежутке измерений $\{1, \dots, l\}$:

$$\mu = \text{eig}_{\min} \left\{ \sum_{i=1}^l \mathbf{x}(i) \mathbf{x}^T(i) \right\}.$$

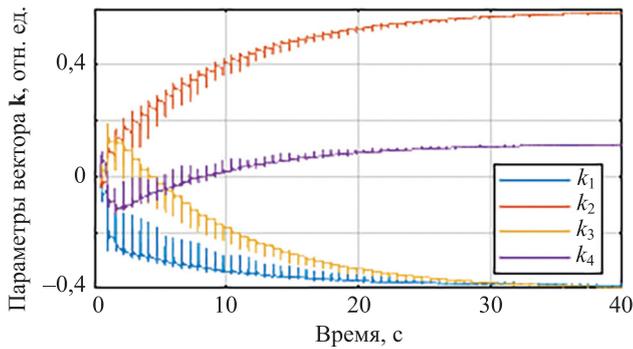


Рис. 1. Оценка параметров вектора \mathbf{k} , сформированная используя дискретный градиентный алгоритм (14)

Fig. 1. Parameters estimation of the vector \mathbf{k} , generated using the discrete gradient algorithm (14)

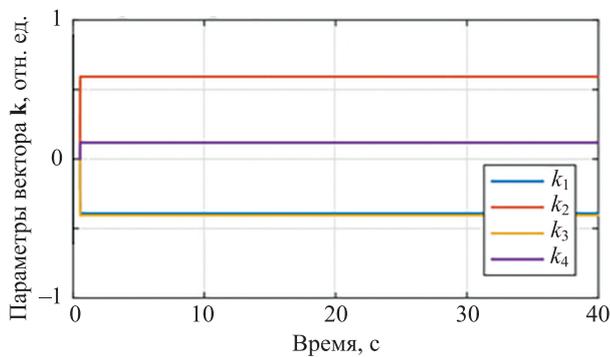


Рис. 2. Оценка параметров вектора \mathbf{k} , сформированная используя дискретный градиентный алгоритм (15)

Fig. 2. Parameters estimation of the vector \mathbf{k} , generated using the discrete gradient algorithm (15)

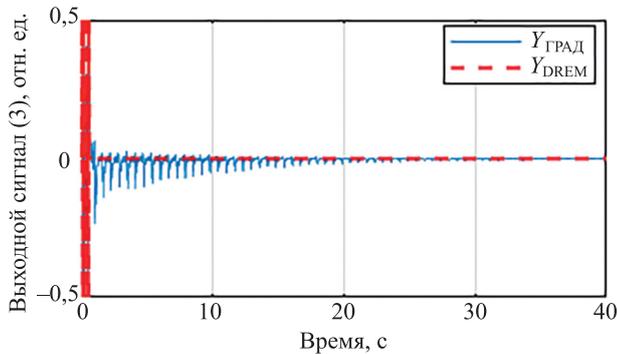


Рис. 3. Выходной сигнал $y(h)$ при компенсации возмущения $\rho(h)$ с использованием градиентного алгоритма (14) ($Y_{\text{ГРАД}}$) и алгоритма (15) с использованием процедуры ДРД ($Y_{\text{ДРД}}$)

Fig. 3. Output signal $y(h)$ for disturbance compensation $\rho(h)$ using the gradient algorithm (14) ($Y_{\text{ГРАД}}$) and the algorithm (15) using the DREM procedure ($Y_{\text{ДРД}}$)

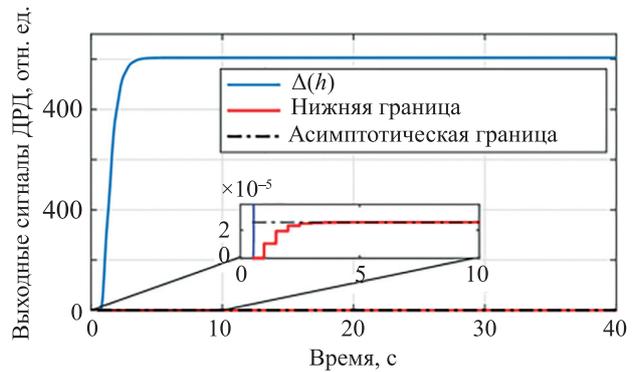


Рис. 4. Новый регрессор $\Delta(h)$, нижняя граница (12) и асимптотическая нижняя граница (13) при действии возмущения $\rho(h)$

Fig. 4. New regressor $\Delta(h)$, lower bound (12) and asymptotic lower bound (13) under disturbance $\rho(h)$

При $l = 40$ $\mu = 0,049$. Для наглядности в центре рис. 4 показано поведение нижней границы детерминанта, стремящейся к значению асимптотической границы.

Обсуждение результатов моделирования. Сопоставления рис. 1 и 2, а также выходных сигналов на рис. 3 иллюстрируют, что использование процедуры ДРД с поэлементным алгоритмом (15) (рис. 2) существенно улучшает качество переходных процессов по сравнению со стандартным градиентным алгоритмом настройки (14) (рис. 1), что позволяет повысить общее качество компенсации возмущений (рис. 3). В свою очередь, рис. 4 показывает справедливость полученных нижних оценок (12) и (13) для сигнала регрессора $\Delta(h)$ при применении схемы Крейссельмейера (8).

Заключение

В работе представлен метод улучшения параметрической сходимости при прямой адаптивной компенсации возмущения для дискретной системы (1). Улучшение заключается в монотонности оценивания неизвестных параметров регулятора управления по сравнению с использованием градиентного метода идентификации (14).

При выборе оператора для процедуры динамического расширения предложена схема Крейссельмейера (8) с доказательством сохранения свойства неисчезающего возбуждения в дискретных системах. Показано, что для алгоритма компенсации (5), построенного в соответствии с работой [1], обеспечивается существенное улучшение качества функционирования и обеспечение монотонности переходных процессов.

Литература

1. Aranovskiy S., Freidovich L. Adaptive compensation of disturbances formed as sums of sinusoidal signals with application to an active vibration control benchmark // *European Journal of Control*. 2013. V. 19. N 4. P. 253–265. doi: 10.1016/j.ejcon.2013.05.008
2. Ван Ц., Арановский С.В., Бобцов А.А., Пыркин А.А. Компенсация мультисинусоидального возмущения на основе параметризации Юлы–Кучеры // *Автоматика и телемеханика*. 2017. N 9. P. 19–33.
3. Veremey E., Sotnikova M. Optimal filtering correction for marine dynamical positioning control system // *Journal of Marine Science and Application*. 2016. V. 15. N 4. P. 452–462. doi: 10.1007/s11804-016-1370-x
4. Belleter D.J., Breu D.A., Fossen T.I., Nijmeijer H. A globally K-exponentially stable nonlinear observer for the wave encounter frequency // *IFAC Proceedings Volumes*. 2013. V. 46. N 33. P. 209–214. doi: 10.3182/20130918-4-JP-3022.00016
5. Chen X., Tomizuka M. A minimum parameter adaptive approach for rejecting multiple narrow-band disturbances with application to hard disk drives // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2012. V. 20. N 2. P. 408–415. doi: 10.1109/TCST.2011.2178025
6. Silva A.C. Feedback adaptive compensation for active vibration control in the presence of plant parameter uncertainties: These pour obtenir le grade de docteur de L'Universite de Grenoble. 2014.
7. Alcorta-Garcia E., Zolghadri A., Goupil P. A nonlinear observer-based strategy for aircraft oscillatory failure detection: A380 case study // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2011. V. 47. N 4. P. 2792–2806. doi: 10.1109/TAES.2011.6034665
8. Landau I.D., Alma M., Constantinescu A., Martinez J.J., Noë M. Adaptive regulation-Rejection of unknown multiple narrow band disturbances (a review on algorithms and applications) // *Control Engineering Practice*. 2011. V. 19. N 10. P. 1168–1181. doi: 10.1016/j.conengprac.2011.06.005
9. Francis B., Wonham M. The internal model principle of control theory // *Automatica*. 1976. V. 12. N 5. P. 457–465. doi: 10.1016/0005-1098(76)90006-6
10. Арановский С.В., Бобцов А.А., Никифоров В.О. Синтез наблюдателя для нелинейного объекта в условиях гармонического возмущения, приложенного к выходной переменной // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2010. № 3(67). С. 32–38.
11. 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
12. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkina A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. V. 62. N 7. P. 3546–3550. doi: 10.1109/TAC.2016.2614889
13. Belov A., Aranovskiy S., Ortega R., Barabanov N., Bobtsov A. Enhanced parameter convergence for linear systems identification: the DREM approach // *Proc. 16th European Control Conference, ECC*. 2018. P. 2794–2799. doi: 10.23919/ECC.2018.8550338
14. Ortega R., Praly L., Aranovskiy S., Yi B., Zhang W. On dynamic regressor extension and mixing parameter estimators: Two Luenberger observers interpretations // *Automatica*. 2018. V. 95. P. 548–551. doi: 10.1016/j.automatica.2018.06.011
15. Kreisselmeier G. Adaptive observers with exponential rate of convergence // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1977. V. 22. N 1. P. 2–8. doi: 10.1109/TAC.1977.1101401
16. Korotina M., Aranovskiy S., Ushirobira R., Vedyakov A. On parameter tuning and convergence properties of the DREM procedure // *Proc. 18th European Control Conference, ECC*. 2020. P. 53–58. doi: 10.23919/ECC51009.2020.9143808

Авторы

Коротина Марина Михайловна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5716-9662>, korotina.marina@gmail.com
Арановский Станислав Владимирович — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 36240341000](https://orcid.org/0000-0002-2151-5594), [s.aranovskiy@gmail.com](https://orcid.org/0000-0002-2151-5594)

References

1. Aranovskiy S., Freidovich L. Adaptive compensation of disturbances formed as sums of sinusoidal signals with application to an active vibration control benchmark // *European Journal of Control*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 253–265. doi: 10.1016/j.ejcon.2013.05.008
2. Wang J., Aranovskiy S.V., Bobtsov A.A., Pyrkina A.A. Compensating for a multisinusoidal disturbance based on Youla–Kucera parametrization. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, no. 9, pp. 1559–1571. doi: 10.1134/S0005117917090028
3. Veremey E., Sotnikova M. Optimal filtering correction for marine dynamical positioning control system. *Journal of Marine Science and Application*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 452–462. doi: 10.1007/s11804-016-1370-x
4. Belleter D.J., Breu D.A., Fossen T.I., Nijmeijer H. A globally K-exponentially stable nonlinear observer for the wave encounter frequency. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, vol. 46, no. 33, pp. 209–214. doi: 10.3182/20130918-4-JP-3022.00016
5. Chen X., Tomizuka M. A minimum parameter adaptive approach for rejecting multiple narrow-band disturbances with application to hard disk drives. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, vol. 20, no. 2, pp. 408–415. doi: 10.1109/TCST.2011.2178025
6. Silva A.C. *Feedback adaptive compensation for active vibration control in the presence of plant parameter uncertainties*. These pour obtenir le grade de docteur de L'Universite de Grenoble, 2014.
7. Alcorta-Garcia E., Zolghadri A., Goupil P. A nonlinear observer-based strategy for aircraft oscillatory failure detection: A380 case study. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, vol. 47, no. 4, pp. 2792–2806. doi: 10.1109/TAES.2011.6034665
8. Landau I.D., Alma M., Constantinescu A., Martinez J.J., Noë M. Adaptive regulation-Rejection of unknown multiple narrow band disturbances (a review on algorithms and applications). *Control Engineering Practice*, 2011, vol. 19, no. 10, pp. 1168–1181. doi: 10.1016/j.conengprac.2011.06.005
9. Francis B., Wonham M. The internal model principle of control theory. *Automatica*, 1976, vol. 12, no. 5, pp. 457–465. doi: 10.1016/0005-1098(76)90006-6
10. Aranovskiy S., Bobtsov A., Nikiforov V. Observer design of an unknown sinusoidal output disturbance for nonlinear plant. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 3(67), pp. 32–38. (in Russian)
11. 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
12. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkina A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, vol. 62, no. 7, pp. 3546–3550. doi: 10.1109/TAC.2016.2614889
13. Belov A., Aranovskiy S., Ortega R., Barabanov N., Bobtsov A. Enhanced parameter convergence for linear systems identification: the DREM approach. *Proc. 16th European Control Conference, ECC*, 2018, pp. 2794–2799. doi: 10.23919/ECC.2018.8550338
14. Ortega R., Praly L., Aranovskiy S., Yi B., Zhang W. On dynamic regressor extension and mixing parameter estimators: Two Luenberger observers interpretations. *Automatica*, 2018, vol. 95, pp. 548–551. doi: 10.1016/j.automatica.2018.06.011
15. Kreisselmeier G. Adaptive observers with exponential rate of convergence. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1977, vol. 22, no. 1, pp. 2–8. doi: 10.1109/TAC.1977.1101401
16. Korotina M., Aranovskiy S., Ushirobira R., Vedyakov A. On parameter tuning and convergence properties of the DREM procedure. *Proc. 18th European Control Conference, ECC*, 2020, pp. 53–58. doi: 10.23919/ECC51009.2020.9143808

Authors

Marina M. Korotina — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5716-9662>, korotina.marina@gmail.com
Stanislav V. Aranovskiy — D.Sc., Leading Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 36240341000](https://orcid.org/0000-0002-2151-5594), [s.aranovskiy@gmail.com](https://orcid.org/0000-0002-2151-5594)

Бобцов Алексей Алексеевич — доктор технических наук, профессор, директор мегафакультета, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация,  8046819200, <https://orcid.org/0000-0003-1854-6717>, bobtsov@mail.ru

Лямин Андрей Владимирович — доктор технических наук, доцент, начальник департамента, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация,  55425887500, <http://orcid.org/0000-0002-7387-0694>, lyamin@itmo.ru

Alexey A. Bobtsov — D.Sc., Professor, Director of School of Computer Technologies and Control, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation,  8046819200, <https://orcid.org/0000-0003-1854-6717>, bobtsov@mail.ru

Andrey V. Lyamin — D.Sc., Associate Professor, Head of the Department, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation,  55425887500, <http://orcid.org/0000-0002-7387-0694>, lyamin@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 28.01.2021

Одобрена после рецензирования 27.02.2021

Принята к печати 16.03.2021

Received 28.01.2021

Approved after reviewing 27.02.2021

Accepted 16.03.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»