



Нго Данг Хиен

# Адаптивное управление системами с переменными параметрами

Специальность: 2.3.1

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Научный руководитель:

Герасимов Дмитрий Николаевич, доцент, к.т.н

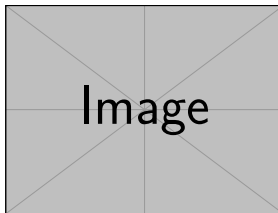
Санкт-Петербург, 30 ноября 2024 г.

- 1 Актуальность исследования
- 2 Обзор существующих методов
- 3 Задача 1
- 4 Задача 1
- 5 Задача 2
- 6 Задача 3
- 7 Заключение
- 8 Полученные научные результаты

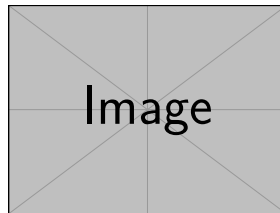
Современные технические системы наиболее точно могут быть описаны нестационарными математическими моделями, в которых параметры могут изменяться во времени.



(a) Модель асинхронного двигателя



(b) Системы позиционирования судна



(c) Модель динамики манипулятора

Примеры систем с переменными параметрами

**Цель исследования.** Целью диссертационной работы является синтез законов адаптивного управления для класса нестационарных систем в условиях параметрической неопределенности постоянной матрицы состояния и переменной матрицы входов.

## Задачи.

- 1 Синтез закона адаптивного управления по выходу для линейного нестационарного объекта, модель которого содержит переменные параметры, описываемые управляемым генератором с известной матрицей состояния.
- 2 Синтез адаптивного наблюдателя производных выходной регулируемой переменной для нестационарного объекта с параметрически неопределенной моделью переменных элементов матрицы входа.
- 3 Синтез алгоритма адаптивного управления по выходу для класса нестационарных систем в условиях параметрической неопределенности с приложением для асинхронного двигателя с неизвестными сопротивлением, индуктивностью и моментом нагрузки.

Ortega R., Loria A., Nicklasson P. J., Sira-Ramirez H. Generalized AC motor // Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications. — London : Springer London, 1998. — С. 265—309.	Параметрическая <b>определенность</b> модели, Матрица входов – <b>обратная функция</b>
Данг Б. [др]. Метод синтеза адаптивных наблюдателей для нестационарных систем с полиномиальными параметрами [10.2021]	Собственные числа матрицы состояния генератора параметров <b>известны</b> и <b>все равны 0</b>
Низовцев С.И., Адаптивные наблюдатели линейных нестационарных систем в условиях неизмеряемых возмущений [12.2021] Pyrkin A., Bobtsov A., Ortega R., Isidori A. An adaptive observer for uncertain linear time-varying systems with unknown additive perturbations//Automatica, 2023, Vol. 147, pp. 110677	Собственные числа матрицы состояния генератора параметров могут иметь <b>произвольные</b> значения, но <b>известны</b>
Gerasimov D., Popov A., Hien N.D., Nikiforov V. Adaptive control of LTV systems with uncertain periodic coefficients //IFAC-PapersOnLine, 2023, Vol. 56, No. 2, pp. 9185-9190	Матрица состояния <b>переменная</b> , матрица входов <b>постоянная</b> , <b>доступен измерению</b> <b>вектор состояния</b>

## Научная новизна

- Разработка новых алгоритмов управления по выходу для класса нестационарных моделей на основе адаптивного наблюдателя переменных параметров, описываемых автономным или управляемым генератором с неизвестными начальными условиями и матрицей состояния.
- Разработка нового метода параметризации модели генератора к виду линейного регрессионного соотношения, в котором вектор неизвестных параметров соответствует параметрам генератора.
- Синтез закона управления по выходу для нестационарного объекта с неизвестными параметрами, предполагающий включение в контур управления цепочки интеграторов и гарантирующий асимптотическую устойчивость замкнутой системы.

Рассматривается неафинный по входу объект управления

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(t)u(t), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (2)$$

где  $x(t) \in \mathbb{R}^k$  — вектор переменных состояния,  $y(t) \in \mathbb{R}^m$  — измеримый вектор выходных регулируемых переменных,  $u(t) \in \mathbb{R}^\ell$  — управляющих воздействий, элементы матрицы  $A$  могут быть неизвестны,  $B(\xi(t), u) : \mathbb{R}^{k \times \ell}$  — матрица входов с переменными и неизвестными параметрами,  $\xi(t) \in \mathbb{R}^n$  — вектор переменных состояния входной динамики, описываемой соотношением

$$B(t) = B_0 H(\xi(t)), \quad (3)$$

$$\dot{\xi}(t) = \Gamma \xi(t) + Gu(t), \quad (4)$$

где элементы матрицы  $\Gamma$  могут быть неизвестны,  $B_0 \in \mathbb{R}^{k \times r}$  — известная матрица,  $H(\xi(t)) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{r \times \ell}$

Желаемое поведение выходной переменной  $y^*(t)$  задано в виде выхода линейного генератора с состоянием  $\xi_y(t) \in \mathbb{R}^q$  и заданными параметрами  $h_y \in \mathbb{R}^{q \times m}$ ,  $\Gamma_y \in \mathbb{R}^{q \times q}$ ,  $\xi_y(0) \in \mathbb{R}^q$ :

$$\dot{\xi}_y(t) = \Gamma_y \xi_y(t), \quad (5)$$

$$y^*(t) = h_y^\top \xi_y(t). \quad (6)$$

Требуется синтезировать закон управления  $u(t)$  по выходу, гарантирующий ограниченность всех переменных состояния, а также асимптотическое слежение регулируемой переменной  $y(t)$  за задающим воздействием  $y^*$ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (A - \hat{A}(t)) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (B(t) - \hat{B}(t)) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - y^*(t)) = 0. \quad (7)$$



Задача 1: Синтез закона адаптивного управления по выходу для линейного нестационарного объекта с управляемым генератором переменных параметров с известной матрицей состояния.

Рассматривается объект управления

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(t)u(t), \quad (8)$$

$$y(t) = C^\top x(t), \quad (9)$$

$B(t) = B(\xi(t), u)$  — матрица входов с переменными параметрами, описываемой соотношением

$$B(t) = B_0 \xi^\top(t) H, \quad (10)$$

$$\dot{\xi}(t) = \Gamma \xi(t) + Gu(t), \quad (11)$$

с тем же управляющим входом  $u(t)$ , известными матрицами  $\Gamma, G$  соответствующих размерностей и неизвестными начальными условиями  $\xi(0)$ , с некоторым известным вектором  $B_0 \in \mathbb{R}^k$  и матрицей  $H \in \mathbb{R}^{n \times \ell}$ .

## Допущение 1

Функция  $B(t)$  такая, что матрица  $B_0$  известна, пара  $(A, B_0)$  является полностью управляемой, а также существует псевдообратное отображение  $H^L(\xi, \tau) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}^\ell$ , удовлетворяющее соотношению

$$H(\xi) H^L(\xi, \tau) = \tau$$

для некоторой переменной  $\tau \in \mathbb{R}^r$  и  $\forall \xi$ .

## Допущение 2

Пара матриц  $(A, C)$  является полностью наблюдаемой.

Задача 1: Синтез закона адаптивного управления по выходу для линейного нестационарного объекта с управляемым генератором переменных параметров с известной матрицей состояния.

Рассматривается объект управления

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(t)u(t), \quad (12)$$

$$y(t) = C^\top x(t), \quad (13)$$

где  $x(t) \in \mathbb{R}^k$ ,  $y(t) \in \mathbb{R}^m$ ,  $u(t) \in \mathbb{R}^\ell$ ,

$B(t) = B(\xi(t))$  — матрица входов с переменными параметрами

$$B(t) = B_0 \xi^\top(t) H, \quad (14)$$

$$\dot{\xi}(t) = \Gamma \xi(t) + Gu(t), \quad (15)$$

где  $\xi(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $\xi(0)$  — неизвестны, матрицы  $\Gamma, G, B_0 \in \mathbb{R}^k$ ,  $H \in \mathbb{R}^{n \times \ell}$  — известны.

Требуется синтезировать закон управления  $u(t)$ , обеспечивающий ограниченность всех переменных состояния и выполнение целевого условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - y^*(t)) = 0. \quad (16)$$

## Утверждение 1

*Закон управления вида*

$$u(t) = H^\top \xi_d V(t) + K_1^\top \xi(t), \quad (17)$$

$$\dot{\xi}_d(t) = (\Gamma + GK_1^\top) \xi_d(t) + GH^\top \xi_d(t) V(t), \quad (18)$$

$$V(t) = (\xi_d^\top(t) H H^\top \xi_d(t))^{-1} (\tau(t) - \xi_d^\top(t) H K_1^\top \xi_d(t)), \quad (19)$$

где начальные условия  $\xi_d(0)$  выбраны так, что  $\|\xi_d(t)\| \in \mathcal{L}_\infty$  и  $H^\top \xi_d(t) \neq 0$ , с входным сигналом

$$\tau(t) = K_2^\top (\hat{x}(t) - x^*(t)) + h_y^\top \Gamma_y^k \xi_y(t), \quad (20)$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B_0 \tau(t) + L(y(t) - C^\top \hat{x}(t)), \quad (21)$$

где  $x^*(t) = \begin{bmatrix} h_y^\top \\ \vdots \\ h_y^\top \Gamma_y^{k-1} \end{bmatrix} \xi_y(t)$ , обеспечивает ограниченность всех переменных состояния и выполнение цели

Продифференцируем (13)  $k$  раз, перепишем в матричном виде, выразим вектор переменных  $x(t)$  и подставим в уравнение  $y^{(k)}(t)$ .

$$y^{(k)} = C^T A^k W_y^{-1} (\varphi - F_1(u)\xi - F_2(u)) + C^T A^{k-1} B_0 u^T H^T \xi + \dots + C^T B_0 \left( \frac{d}{dt} \right)^{k-2} [u^T H^T G u]. \quad (22)$$

Для исключения в выражении (22) неизмеряемой функции  $\xi(t)$  воспользуемся методом GREBO и рассмотрим фильтры вида

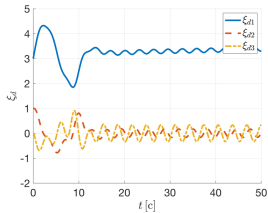
$$\dot{\sigma}_1 = \Gamma \sigma_1 + G u, \quad \sigma_1(0) = 0, \quad (23)$$

$$\dot{\sigma}_2 = \Gamma \sigma_2, \quad \sigma_2(0) = I. \quad (24)$$

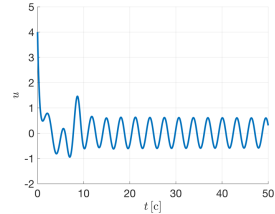
Заметим, что для невязки  $\tilde{\xi}(t) = \xi(t) - \sigma_1(t)$  имеем соотношение

$$\dot{\tilde{\xi}}(t) = \Gamma \tilde{\xi}(t), \quad \tilde{\xi}(0) = \xi(0),$$

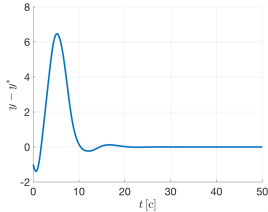
и  $\tilde{\xi}(t) = \sigma_2(t) \xi(0)$ .



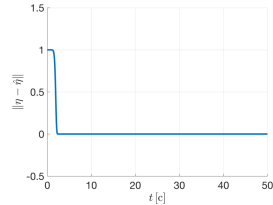
(a) Временная диаграмма  $\xi_d$ .



(b) Сигнал управления  $u(t)$ .



(c) Ошибка регулирования  $e(t) = y - y^*$ .



(d) Ошибка оценивания  $\eta = \tilde{\xi}(0)$ .



## Задача 2:

## Задача 3:

- Алгоритм управления по выходу для нестационарного объекта с переменной матрицей входа, параметры которой являются выходом управляемого генератора с известной матрицей состояния.
- Адаптивный наблюдатель производных выходной регулируемой переменной для нестационарного объекта с оцениванием мгновенных значений переменных элементов матрицы входа.
- Алгоритм управления по выходу для нестационарного объекта с переменной матрицей входа, параметры которой являются выходом управляемого генератора с неизвестными матрицами состояния и начальными условиями.



- ① The 22nd IFAC World Congress, Yokohama, Japan. 9—14 июля 2023 г.
- ② The 63rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC-2024), Milan, Italy. 16–19 декабря 2024 г.
- ③ XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024), Россия, Москва, ИПУ РАН. 17–20 июня 2024 г.

# Спасибо за внимание!

Контакты

E-mail: [hiennd@itmo.ru](mailto:hiennd@itmo.ru)

**it**MO *re than a*  
**UNIVERSITY**

● Слайд 1	● Слайд 11	● Слайд 21	● Слайд 31	● Слайд 41
● Слайд 2	● Слайд 12	● Слайд 22	● Слайд 32	● Слайд 42
● Слайд 3	● Слайд 13	● Слайд 23	● Слайд 33	● Слайд 43
● Слайд 4	● Слайд 14	● Слайд 24	● Слайд 34	● Слайд 44
● Слайд 5	● Слайд 15	● Слайд 25	● Слайд 35	● Слайд 45
● Слайд 6	● Слайд 16	● Слайд 26	● Слайд 36	● Слайд 46
● Слайд 7	● Слайд 17	● Слайд 27	● Слайд 37	● Слайд 47
● Слайд 8	● Слайд 18	● Слайд 28	● Слайд 38	● Слайд 48
● Слайд 9	● Слайд 19	● Слайд 29	● Слайд 39	● Слайд 49
● Слайд 10	● Слайд 20	● Слайд 30	● Слайд 40	● Слайд 50