Нго Данг Хиен

Адаптивное управление системами с переменными параметрами

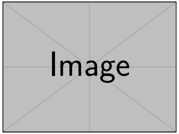
Специальность: 2.3.1
Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Научный руководитель:
Герасимов Дмитрий Николаевич, доцент, к.т.н

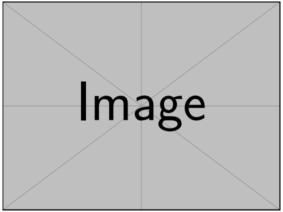
Санкт-Петербург, 1 декабря 2024 г.

Актуальность

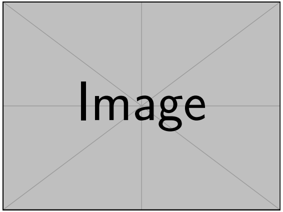
Современные технические системы наиболее точно могут быть описаны нестационарными математическими моделями, в которых параметры могут изменяться во времени.



(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. — C. 265—309.	Параметрическая определенность модели, Матрица входов – обратная функция
Данг Б. [др]. Метод синтеза адаптивных наблюдателей для нестационарных систем с полиномиальными параметрами [10.2021]	Собственные числа матрицы состояния генератора параметров известны и все равны 0
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 произвольные значения, но известны
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 переменная, матрица входов постоянная, доступен измерению вектор состояния

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

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

$$y(t) = Cx(t), \tag{2}$$

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

$$B(t) = B_0\, H(\xi(t)), \tag{3}$$

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

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

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

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

$$y^*(t) = h_y^\top \xi_y(t). \tag{6}$$

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^*:

$$\lim_{t \to \infty} \left(A - \hat{A}(t) \right) = 0, \ \lim_{t \to \infty} \left(B(t) - \hat{B}(t) \right) = 0, \ \lim_{t \to \infty} \left(y(t) - y^*(t) \right) = 0. \tag{7}$$

Допущение 1

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

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

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.

Постановка задачи

Рассматривается объект управления

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

$$y(t) = C^{\top}x(t), \tag{9}$$

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

$$B(t) = B_0\,\xi^{\top}(t)H, \tag{10}$$

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

где $\xi(t) \in \mathbb{R}^n$, $\xi(0)$ — неизвестны, матрицы Γ, 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

$$\lim_{t\to\infty}(y(t) - y^*(t)) = 0. \tag{12}$$

Утверждение 1

Закон управления вида

$$u(t) = H^\top \xi_d V(t) + K_1^\top \xi(t), \tag{13}$$

$$\dot{\xi}_d(t) = (\Gamma + GK_1^\top)\xi_d(t) + GH^\top \xi_d(t) V(t), \tag{14}$$

$$V(t) = (\xi_d^\top(t) H H^\top \xi_d(t))^{-1}(\tau(t) - \xi_d^\top(t) H K_1^\top \xi_d(t)), \tag{15}$$

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*

$$\tau(t) = K_2^\top \left(\hat{x}\left(t\right) - x^*\left(t\right)\right) + h_y^\top \Gamma_y^k \xi_y\left(t\right), \tag{16}$$

$$\dot{\hat{x}}\left(t\right) = A\hat{x}\left(t\right) + B_0 \tau\left(t\right) + L\left(y(t) - C^\top \hat{x}(t)\right), \tag{17}$$

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

Продифференцируем (9) k раз, перепишем в матричном виде, выразим вектор переменных $x(t)$ и подставим в уравнение $y^{(k)}(t)$.

$$y^{(k)} = C^\top A^k W_y^{-1} (\varphi - F_1(u)\xi - F_2(u)) + C^\top A^{k-1} B_0 u^\top H^\top \xi + \ldots + C^\top B_0 \left(\frac{d}{dt}\right)^{k-2} \left[u^\top H^\top G u\right]. \tag{18}$$

Для исключения в выражении (18) неизмеряемой функции $\xi(t)$ воспользуемся методом GPEBO и рассмотрим фильтры вида

$$\dot{\sigma}_1 = \Gamma\sigma_1 + Gu, \quad \sigma_1(0) = 0, \tag{19}$$

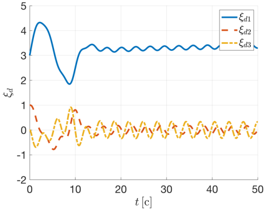
$$\dot{\sigma}_2 = \Gamma\sigma_2, \qquad \sigma_2(0) = I. \tag{20}$$

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

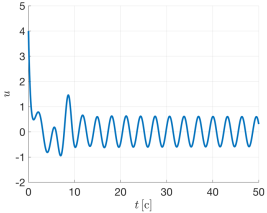
$$\dot{\tilde{\xi}}(t) = \Gamma\tilde{\xi}(t), \qquad \tilde{\xi}(0) = \xi(0),$$

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

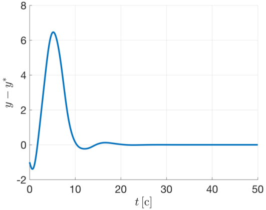
Пример численного моделирования 1



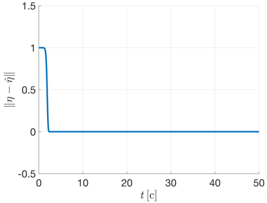
(a) Временная диаграмма ξ_d.



(b) Сигнал управления $u(t)$.



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



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

Задача 2:

Задача 3:

Заключение

- 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.

- Gerasimov D. N., Popov A., Hien N. D., Nikiforov V. O. — Adaptive control of LTV systems with uncertain periodic coefficients. — // IFAC-PapersOnLine. — 2023. — Т. 56, вып. 2, № 2. — С. 9185—9190.
- Gerasimov D. N., Ngo D. H., Nikiforov V. O. — Direct Adaptive Control of LTV Discrete-time Systems with Uncertain Periodic Coefficients. — // 2024 63nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC). — IEEE, 2024. — С. 00—00.
- Нго Д. Х. — Адаптивное управление дискретными системами с неопределёнными периодическими коэффициентами. — // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024). Т. xx. — 2024. — x—y.

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

Таблица слайдов

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