МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО»

ФАКУЛЬТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИКИ

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №8

по дисциплине

«АДАПТИВНОЕ И РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ»

на тему

«АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ ПО ВЫХОДУ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ С РАСШИРЕННОЙ ОШИБКОЙ»

Вариант 21

Выполнили: студенты

Дьячихин Д. Н., R3480

Румянцев А. А., R3441

Проверил: преподаватель

Парамонов А. В.

Санкт-Петербург

2025

Содержание

1. Цель работы

Освоение метода расширенной ошибки в задачах адаптивного управления по выходу.

2. Постановка задачи

Рассмотрим задачу слежения выходной переменной y за эталонным сигналом y_M, формируемым эталонной моделью вида:

$$y_M(t) = \frac{k_0}{K_M(s)}\left[g(t)\right], \tag{1}$$

где g – сигнал задания, $K_M(s)$ – гурвицевый полином, определяющий желаемую динамику замкнутой системы. Полином $K_M(s)$ строится на основе метода стандартных полиномов, исходя из заданных динамических характеристик.

Цель управления заключается в синтезе управления u, компенсирующего неопределенности объекта и обеспечивающего при условии ограниченности всех сигналов выполнение целевого равенства:

$$\lim_{t\to\infty}(y_M(t) - y(t)) = 0 \tag{2}$$

3. Теоретическая часть

Рассмотрим минимально-фазовую линейную модель объекта, представленную в форме «вход-выход»:

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + a_{n-2}y^{(n-2)} + ... + a_0y = b_mu^{(m)} + b_{m-1}u^{(m-1)} + ... + b_0u, \tag{3}$$

где $a_i, i = \overline{0, n-1}, b_j = \overline{0, m}$ – неизвестные параметры объекта. Предполагается, что знак величины b_m известен. Пусть в решаемой задаче $b_m \geq b_{\min} > 0, b_{\min}$ – известная величина.

Вместе с моделью рассмотрим динамические фильтры:

$$\dot{\nu}_1 = \Lambda\nu_1 + e_{n-1}u, \tag{4}$$
$$\dot{\nu}_2 = \Lambda\nu_2 + e_{n-1}y, \tag{5}$$

где $\nu_1, \nu_2 \in \mathbb{R}^{n-1}$ – векторы состояния фильтров, $e_{n-1} = \mathrm{col}(0, ..., 0, 1), e_{n-1} \in \mathbb{R}^{n-1}$,

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 1 & ... & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & ... & 1 \\ -k_0 & -k_1 & -k_2 & ... & -k_{n-2} \end{bmatrix}$$

Матрица Λ имеет сопровождающий полином:

$$K(s) = s^{n-1} + k_{n-2}s^{n-2} + k_{n-3}s^{n-3} + ... + k_0$$

Для любых нормированных устойчивых полиномов $K(s), K_M(s)$ степени $n-1, n-m$ соответственно существует единственный постоянный вектор $\Psi \in \mathbb{R}^{2n-1}$, зависящий от неизвестных параметров объекта, такой, что объект (3) может быть представлен в виде:

$$y(t) = \frac{1}{K_M(s)}\left[\Psi^T\omega(t) + b_m u(t)\right] + \delta(t), \tag{6}$$

где $\omega^T = \left[\nu_1^T, \nu_2^T, y\right]$, $\delta(t)$ – экспоненциально затухающая функция, определяемая ненулевыми начальными условиями.

Параметризованное представление (6) позволяет синтезировать управление, компенсирующее неопределенности модели, сосредоточенные в векторе Ψ.

Сформируем ошибку управления по выходу $\varepsilon = y_M - y$ и с учетом (6), (1), проведем простейшие преобразования:

$$\begin{aligned} \varepsilon =& \frac{k_0}{K_M(s)}[g] - \frac{1}{K_M(s)}\left[\Psi^T\omega + b_m u\right] = \\ &= \frac{1}{K_M(s)}\left[k_0 g - \Psi^T\omega - b_m u\right] = \frac{1}{K_M(s)}\left[k_0 g - \Psi^T\omega - b_m u\right] \end{aligned}$$

Окончательно имеем:

$$\varepsilon = \frac{1}{K_M(s)}\left[k_0 g - \Psi^T\omega - b_m u\right] \tag{7}$$

Выражение (7) позволяет сформировать компенсирующий закон управления вида:

$$u = \frac{1}{\hat{b}_m}\left(-\hat{\Psi}^T\omega + k_0 g\right), \tag{8}$$

где $\hat{\Psi}$ – вектор оценок Ψ, $\hat{b}_m$ – оценка b_m.

С целью предотвращения деления на ноль в законе управления (8) необходимо использовать алгоритм адаптации с добавлением оператора проекции.

Для формирования алгоритма адаптации, генерирующего оценки $\hat{\Psi}$ и $\hat{b}_m$, подставим (8) в (7) и получим динамическую модель ошибок с измеряемым выходом:

$$\varepsilon = \frac{1}{K_M(s)}\left[\tilde{\Psi}^T\omega - \tilde{b}_m u\right] = \frac{1}{K_M(s)}\left[\tilde{\Psi}_p^T\omega_p\right], \tag{9}$$

где $\tilde{\Psi} = \Psi - \hat{\Psi}$, $\tilde{b}_m = b_m - \hat{b}_m$ – параметрические ошибки, $\tilde{\Psi}_p^T = \left[\tilde{\Psi}^T, \tilde{b}_m\right]$, $\omega_p^T = \left[-\omega^T, -u\right]$.

В случае, если передаточная функция:

$$H(s) = \frac{1}{K_M(s)}$$

является строго положительно вещественной (СПВ), алгоритм адаптации для настройки регулятора (8) может быть представлен в следующей форме:

$$\dot{\hat{\Psi}}_p = \gamma\Gamma\omega_p\varepsilon, \tag{10}$$

где $\gamma > 0$ – коэффициент адаптации, $\hat{\Psi}_p^T = \left[\hat{\Psi}^T, \hat{b}_m\right]$,

$$\Gamma = \begin{cases} I_{2n}, & \hat{b}_m(t) \geq b_{\min}, \\ I_{2n} - \zeta_{2n}\zeta_{2n}^T, & \hat{b}_m(t) < b_{\min}, \end{cases} \tag{11}$$

где $\zeta_{2n} = [0, 0, ..., 0, 1]$ – координатный вектор размерности $2n$. Вторая строка в последнем выражении позволяет «остановить» функцию $\hat{b}_m(t)$ в момент пересечения границы $b_{\min}$ в целях избежать деление на ноль в (8).

С помощью выражений (10), (11) можно показать, что оценки $\hat{\Psi}$ и $\hat{b}_m$, необходимые для закона управления (8), генерируются согласно следующим правилам:

$$\dot{\hat{\Psi}} = -\gamma\omega\varepsilon, \tag{12}$$

$$\dot{\hat{b}}_m = \begin{cases} -\gamma u\varepsilon, & \hat{b}_m(t) \geq b_{\min}, \\ 0, & \hat{b}_m(t) < b_{\min} \end{cases} \tag{13}$$

Таким образом, закон адаптивного управления, построенный на основе параметризованного представления (6), состоит из эталонной модели (1), настраиваемого регулятора (8) и алгоритмов адаптации (12), (13). Закон управления формируется на основе измерения выходной переменной и не использует информацию о состоянии объекта, что является его отличительной особенностью.

Важно отметить, что начальное условие $\hat{b}_m(0)$ в алгоритме (13) выбирается из условия $\hat{b}_m(0) \geq b_{\min}$.

4. Экспериментальная часть

...

5. Вывод

...