

щении. ИНС была обучена с учетом только одного входного параметра – температуры. В дальнейшем планируется модифицировать ИНС так, чтобы появилась возможность использовать несколько параметров (радиационная температура, относительная влажность воздуха, ветер и т. д.).

Средние значения PMV смоделированные с использованием ИНС очень близки к тем, что были получены с помощью реализации формулы, приведенной в стандарте ИСО 7730, во время экспериментального исследования. Результаты показали, что обученная ИНС прогнозировать тепловое ощущение без проведения экспериментальных исследований с помощью вопросников или дорогих контрольно-измерительных приборов, что может позволить сохранить время и деньги.

#### Список литературы

1. Бильгаева Л. П., Власов К. Г. Прогнозирование продаж в среде Matlab // Естественные и математические науки в современном мире: сб. ст. по матер. XLIX междунар. науч.-практ. конф. № 12 (47). Новосибирск : СибАК, 2016. С. 64–76.
2. ГОСТ Р ИСО 7730-2009 7790-2009. Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD.
3. Маслосов Ю. П. Введение в Neural Network Toolbox» URL: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book2/11/newff.php> (дата обращения: 01.04.2017).
4. Сулин А. Б., Рябова Т. В., Рубцов А. К., Никитин А. А. Индексы теплового комфорта : учеб.-метод. пособие / под ред. А. Б. Сулина и Т. В. Рябовой. СПб. : Университет ИТМО, 2016. 36 с.
5. Atthajariyakul S., Leephakpreeda T., Neural computing thermal comfort index for HVAC systems // Energy Conversion and Management, 46 (2005). P. 2553–2565.
6. Buratti C., Vergoni M., Palladino D., Thermal comfort evaluation within non-residential environments: development of Artificial Neural Network by using the adaptive approach data, Energy Procedia 78 (2015). P. 287 –2880.
7. Fanger P. O. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering // Danish Technical Press. 1970. P. 244.
8. Henze G. P., Hindman R. E. Control of air-cooled chiller condenser fans using clustering neural networks, ASHRAE Transactions 108 (2002). P. 4574.
9. Weiwei Liu, Zhiwei Lian\*, Bo Zhao. A neural network evaluation model for individual thermal comfort // Energy and Buildings, 39 (2007). P. 1115–1122.

## **АНАЛИЗ УПРАВЛЕНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВОЗМУЩЕНИЙ МНОГОСВЯЗНЫМИ ОБЪЕКТАМИ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ВЫХОДЕ**

**Ю. А. Лежнина<sup>1</sup>, Ф. М. Кадиров<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Астраханский государственный*

*архитектурно-строительный университет*

*<sup>2</sup>Ташкентский университет информационных технологий (Узбекистан)*

В данной работе разработан закон робастного управления многосвязными объектами с неизвестными параметрами. Объекты управления находятся под воздействием внешних и параметрических неконтролируемых

возмущений. Причем ограниченные возмущения влияют на выход объекта, подобная ситуация возможна при получении информации с датчиков, имеющих погрешность измерения. Измерению доступны только скалярные входные и выходные сигналы. Для решения поставленной задачи предлагается использовать простой робастный алгоритм управления, позволяющий компенсировать данный класс неопределенностей с заданной точностью за конечное время. При этом для формирования управляющих воздействий используются только измеряемые переменные локальных подсистем, т. е. осуществляется полностью децентрализованное управление.

### Постановка задачи

Рассмотрим взаимосвязанную систему, динамические процессы в  $M$  локальных подсистемах которой описываются уравнениями

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + N_i f_i(t) + S_i \sum_{i \neq j}^M y_j(t) \\ y_i(t) = L_i x_i(t) + D_i \xi_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

где  $A_i \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  – матрица неизвестных параметров объекта;  $B_i \in \mathfrak{R}^n$ ,  $N_i \in \mathfrak{R}^n$ ,  $S_i \in \mathfrak{R}^n$ ,  $L_i \in \mathfrak{R}^n$ ,  $D_i \in \mathfrak{R}$ ;  $f_i(t)$  – неконтролируемые возмущения, действующие на объект,  $\xi_i(t)$  – ошибка измерения на выходе объекта;  $u_i(t)$  – скалярное управляющее воздействие;  $y_i(t)$  – скалярная регулируемая переменная  $i$ -ой подсистемы, доступная измерению. Децентрализованное управление для таких систем определяется как задача нахождения таких локальных блоков управления, каждому из которых доступна только текущая информация о системе. Необходимо спроектировать систему управления, для которой будет выполнено условие

$$|y_i(t)| < \delta \text{ при } t \geq T. \quad (2)$$

Здесь  $\delta$  – заданная точность стабилизации объекта;  $T$  – время, по истечении которого выход объекта не должен превышать заданного значения  $\delta$ . В поставленной задаче в локальных подсистемах управления не допускается использования измеряемых величин других подсистем. Решим поставленную задачу при выполнении следующих условий.

*Предположения:*

- 1) полином  $R_i(\lambda)$  – гурвицев;
- 2) неизвестны порядки полиномов  $\deg Q_i = n_i$ ;  $\deg R_{li} = m_i$ ;  $\deg R_{zi} = n_{ij}$ ;  $n_{ij} < n_i - 1$  и относительная степень локальных объектов управления  $\gamma_i = n_i - m_i > 1$ ;
- 3) коэффициенты дифференциальных операторов  $k_i(t)R_i(P)$ ,  $Q_i(P)$  зависят от вектора неизвестных параметров  $\psi \in \Xi$ , где  $\Xi$  – известное ограниченное множество;
- 4) внешние возмущающие воздействия  $f_i(t)$  и  $\xi_i(t)$  являются ограниченными функциями времени с неизвестным диапазоном изменения;
- 5) не допускается использовать производные сигналов  $y_i(t)$ ,  $u_i(t)$ .

Для вывода основного результата используем подход [5], который позволяет осуществлять компенсацию возмущающих воздействий. Выберем локальный закон управления в виде

$$u_i(t) = \alpha_i v_i(t). \quad (3)$$

Здесь  $\alpha_i > 0$ ;  $v_i(t)$  – дополнительное управляющее воздействие. Введем вспомогательный контур

$$Q_{mi}(P)\tilde{y}_i(t) = v_i(t) \quad (4)$$

В связи с тем, что по условию сформулированной задачи измерение производных недопустимо, то сформулируем локальный закон дополнительного управляющего воздействия  $v_i(t)$  в виде

$$v_i(t) = -g_{mi}^T \bar{\vartheta}_i(t), \quad (5)$$

где  $g_{mi}^T = [q_{m\gamma_{mi}}, \dots, q_{m1}, 1]$  – вектор, составленный из коэффициентов полинома  $Q_{mi}(\lambda) = \lambda^{\gamma_{mi}} + q_{m1}\lambda^{\gamma_{mi}-1} + \dots + q_{m\gamma_{mi}}$ ;  $\bar{\vartheta}_i(t) = \text{col}(\vartheta_i, \bar{\vartheta}_{i1}, \bar{\vartheta}_{i2}, \dots, \bar{\vartheta}_{i\gamma_i})$ ;  $\bar{\vartheta}_{ik}(t)$  является оценкой производных  $P^k \vartheta_i(t)$ , получаемых с фильтров [6]

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_i(t) &= F_{0i}\zeta_i(t) + H_i(\bar{\vartheta} - \vartheta), \\ \bar{\vartheta}_i &= L_{0i}\zeta_i, \quad i = \overline{1, M} \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $\zeta_i \in R^{\gamma_i}$ ;  $L_{0i} = [1, 0, \dots, 0]$ ;  $H_i^T = \left[ \frac{h_{1i}}{\mu}, \dots, \frac{h_{\gamma_i}}{\mu^{\gamma_i}} \right]$ ;  $F_{0i} = \begin{bmatrix} 0 & I_{\gamma_i-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ; вектор

$H_i$  выбирается так, чтобы матрица  $F_i = F_{0i} + \bar{H}_i L_i$  была гурвицевой, где  $\bar{H}_i^T = [-h_{1i}, \dots, -h_{\gamma_i}]$ ;  $\mu > 0$  – малое число. Очевидно, что теперь закон управления технически реализуем, так как содержит известные или измеряемые величины.

**Утверждение.** Если выполнены предположения, то существуют числа  $\mu_0 > 0$ ,  $T_0 > 0$  такие, что при  $\mu \leq \mu_0$ ,  $T \geq T_0$  алгоритм управления (3), (4), (6) обеспечивает выполнение целевого условия (2).

Следует отметить, что, выбирая величину  $\mu_i$  малой, можно добиться выполнения целевого условия (2).

### Пример.

Рассмотрим динамическую систему 6-го порядка, состоящую из двух подсистем

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 8 & 6 \end{bmatrix} x_1(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 15 \end{bmatrix} u_1(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix} f_1(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} y_2(t), & y_1 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} x_1(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi_1(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 & 3 & 4 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 20 \end{bmatrix} u_2(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} f_2(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_1(t), & y_2 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} \xi_2(t) \end{aligned}$$

где  $x_1$  и  $x_2$  векторы состояния подсистем,  $y_1$  и  $y_2$  доступные измерению скалярные выходы подсистем,  $u_1$  и  $u_2$  скалярные управляющие воздействия, закон изменения которых задается уравнением (5), и возмущающие воздействия.

$$f_1(t) = 3 + \sin 0,1t + \sin 10t, \quad f_2(t) = 2 + \sin 0,3t + \sin 10t$$

$$\xi_1(t) = 1 + \sin 0,2t, \quad \xi_2(t) = 1 + \sin 10t.$$

Уравнение вспомогательного контура имеет вид:

$$(P^2 + 2P + 1)\tilde{y}_i = v_i, \quad i=1,2.$$

Используется наблюдатель:

$$\dot{\zeta}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \zeta_i + \begin{bmatrix} 3 \\ \mu \\ 3 \\ \mu^2 \end{bmatrix} (\bar{\vartheta}_i(t) - \vartheta_i), \quad \bar{\vartheta}_i = [1 \quad 0] \zeta_i, \quad i=1,2.$$

$$u(t) = -\alpha(\zeta_1(t) + 2\zeta_2(t) + \zeta_3(t)).$$

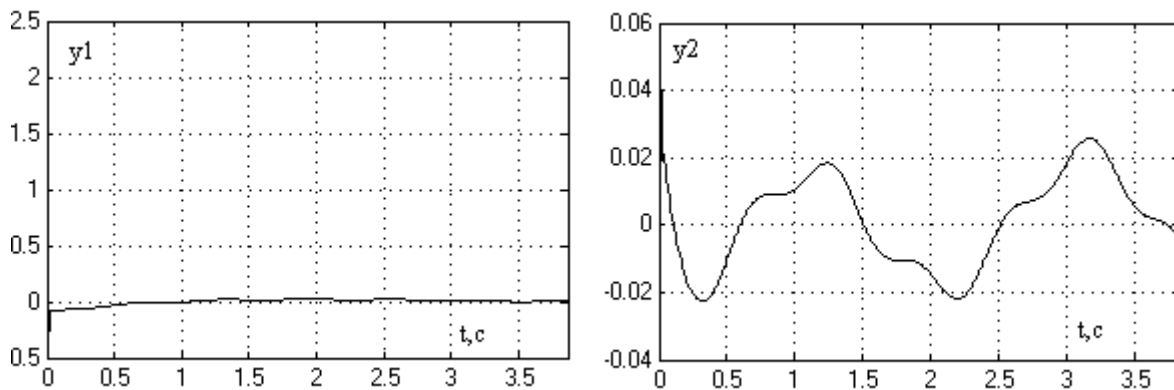


Рис. 1. Результаты моделирования системы стабилизации

На рис. 1 приведены результаты моделирования системы стабилизации при следующих исходных данных:

$$\alpha_i = k_m = 10, \quad \mu_i = 0.01, \quad i=1,2,$$

$$y_1(0) = \dot{y}_1(0) = \ddot{y}_1(0) = 2, \quad y_2(0) = \dot{y}_2(0) = \ddot{y}_2(0) = -1.$$

### Заключение

К недостаткам предлагаемого алгоритма следует отнести отсутствие аналитически обоснованного выбора параметров  $\mu$  и  $\alpha_i$ . Однако они легко подбираются на этапе проектирования при моделировании. На модели объекта (1) выставляются минимально возможные коэффициенты операторов  $k_i(t)R_i(P), Q_i(P), R_{zi}(P)$  и на вход подаются максимально возможные значения  $f_i(t), \xi_i(t)$ . Постоянные составляющие не играют роли. Подбираются числа  $\mu$  и  $\alpha_i$ , обеспечивающие заданную динамическую ошибку. Число  $\mu$  обычно колеблется в пределах 0.005 до 0.05. При других значениях параметров и внешних воздействий из заданного класса неопределенности, ошибка не будет превышать заданного значения.

### Список литературы

1. Паршева Е. А., Лежнина Ю. А. Робастное децентрализованное управление с компенсацией возмущений нелинейными многосвязными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 6. С. 2–7.

2. Лежнина Ю. А., Терновая Г. Н. Робастное децентрализованное управление с компенсацией возмущений нелинейными многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 47–55.

3. Лежнина Ю. А. Робастное управление многосвязными объектами с запаздывающим аргументом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 5. С. 12–16.

4. Паршева Е. А., Лежнина Ю. А. Робастное децентрализованное управление с эталонной моделью многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию с компенсацией возмущений // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 1. С. 69–76.

5. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // АиТ. 2007. № 7. С. 103–115.

6. Atassi A.N., Khalil H.H. A separation principle for the stabilization of a class of non-linear systems // IEEE Trans. on Automatic Control. 1999. Vol. 44. № 9. P. 1672–1687.

## СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ОДНО- И ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

*И. Х. Сиддиков, Х. Э. Хужаматов, И. М. Хонтураев*

*Ташкентский университет информационных технологий (Узбекистан)*

### Введение

Разработка комплексного подхода, обеспечивающего высокую точность и эффективность управления источниками электрической энергии, расширение функциональных возможностей, упрощение конструкции, уменьшение весогабаритных показателей, улучшение технологии изготовления, обеспечение бесконтактности измерительных процессов, преобразование тока на основе применения современных первичных измерительных преобразователей являются актуальными задачами управления процессами производства и потребления электрической энергии.

В настоящее время применение электромагнитных преобразователей тока с высокой точностью, линейностью выходных характеристик, унифицированными выходными величинами и расширенным спектром преобразуемых электрических величин ограничено из-за недостаточного формирования принципов построения, методов расчета и проектирования распределенных магнитных систем преобразователей.

Применяемые классические методы исследования магнитных цепей и систем преобразования не обеспечивают необходимую точность, особенно при несимметрии трехфазного первичного тока электрической сети, не обладают достаточной общностью, охватывая только величины и параметры цепей электрической и магнитной природы.

Востребованность исследования обоснована тем, что классические однофазные первичные измерительные преобразователи тока и напряжения не позволяют обеспечить устройства контроля и управления достоверной и одновременной информацией о величинах и параметрах электриче-