

М.В. БУРАКОВ, В.Ф. ШИШЛАКОВ  
**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ПРЕДИКТОР СМИТА ДЛЯ  
ОБЪЕКТА С ПЕРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКОЙ**

---

*Бураков М.В., Шишлаков В.Ф. Модифицированный предиктор Смита для объекта с переменной задержкой.*

**Аннотация.** При управлении системами с переменным временем задержки традиционный предиктор Смита обладает плохой устойчивостью. Предлагается разработка усовершенствованного адаптивного ПИД-Смит предиктора, который использует ПИД-регулятор в качестве основного контроллера и, кроме того, блок оценки неизвестного времени задержки. Цель исследования состоит в том, чтобы гарантировать стабильность работы системы и устойчивость к ошибкам моделирования.

Рассматриваются два варианта организации блока оценки: на базе нейронной сети и на базе нечеткого регулятора. В первом варианте генетический алгоритм применяется для поиска оптимальных параметров блока оценки в автономном режиме. Во втором варианте нечеткий регулятор типа Такаги — Сугено использует множество моделей с различным временем задержки. В каждый момент времени вычисляется ошибка выхода для каждой модели. Выходной сигнал блока оценки рассчитывается по правилу дефаззификации. Результаты моделирования показывают эффективность предложенного метода.

**Ключевые слова:** система с запаздыванием, предиктор Смита, адаптивное управление, нейронная сеть, генетический алгоритм, нечеткий логический регулятор Такаги — Сугено.

---

**1. Введение.** Объекты управления с запаздыванием часто встречаются в различных отраслях индустрии, в том числе в химической, металлургической промышленности и топливно-энергетическом комплексе.

Системы с запаздыванием образуют важный класс систем автоматического управления, поскольку звено запаздывания вносит отрицательный сдвиг фазы, способный привести к потере устойчивости. Для управления объектами с запаздыванием часто применяют предиктор Смита [1, 2], недостаток непосредственного использования которого заключается в необходимости точного знания всех параметров системы, что на практике часто невозможно. Кроме того, задержка на выходе системы может быть переменной, и это, в свою очередь, не позволяет однозначно настроить задержку модели [3]. Поэтому существующие классические подходы к управлению линейными системами с запаздыванием в последние годы совершенствуются на базе методов адаптивного управления [4, 5] с расширением на класс нелинейных систем [6, 7]. Перспективным является применение для управления системами с запаздыванием методов искусственного интеллекта. Так, например, в работах [8-13] представлены варианты улучшения робастности классического предиктора Смита на базе нечеткой логики и нейросетевой технологии. В [8] рассмотрена комбинация нечеткого регулятора ПИ-типа и предиктора Смита, позволяющая устранить пе-

ререгулирование и сократить время переходного процесса. В [9, 10] для достижения аналогичного эффекта использована искусственная нейронная сеть (НС), обучаемая с помощью алгоритма обратного пространства. В [11-13] использован нечеткий супервизор для управления коэффициентами ПИД-регулятора.

В настоящей работе рассмотрена задача управления линейным динамическим объектом с переменным запаздыванием. Анализируются варианты структур блока оценки запаздывания на базе НС и на основе нечеткого логического регулятора (НЛР). Предлагаются алгоритмы синтеза параметров блока оценки задержки, позволяющие обеспечить требуемое качество переходных процессов.

**2. Предиктор Смита и его модификация.** Линейной системе с запаздыванием, замкнутой единичной обратной связью, соответствует следующая передаточная функция (ПФ):

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{W_c(s)W(s)e^{-\tau s}}{1 + W_c(s)W(s)e^{-\tau s}}, \quad (1)$$

где  $Y(s)$  и  $R(s)$  — выход и вход системы,  $W_c(s)$  — ПФ регулятора,  $W(s)e^{-\tau s}$  — ПФ объекта управления.

Цель предиктора Смита — предсказать, какой сигнал должен появиться на выходе до того, как он там появится на самом деле. Обычно используется комбинация ПИД-регулятора и предиктора Смита [2]. Для предсказания используется модель объекта управления, состоящая из ПФ  $W_m(s)$  и транспортной задержки  $\tau_m$  (рисунок 1, где  $E(s)$  — ошибка управления,  $U(s)$  — сигнал управления).

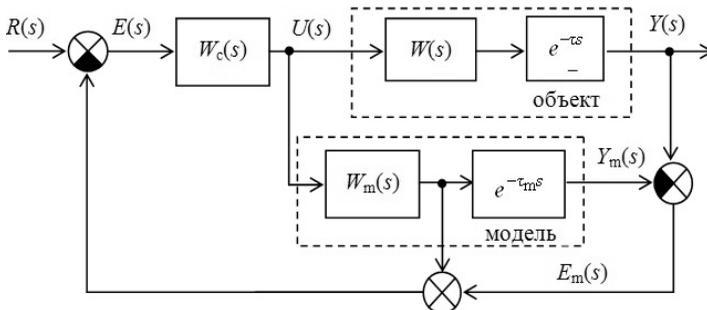


Рис. 1. Вариант описания предиктора Смита

При равенстве параметров объекта и модели ( $W_m(s) = W(s)$  и  $\tau_m = \tau$ ) выполняется условие:

$$E_m(s) = Y(s) - Y_m(s) = 0,$$

и ПФ системы с предиктором Смита приобретает вид:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{W_c(s)W(s)e^{-\tau s}}{1 + W_c(s)W(s)}. \quad (2)$$

Очевидно, что характеристический полином (2), в отличие от (1), не зависит от задержки. Однако для реального объекта величина задержки может быть неизвестной или изменяться во времени, что приводит к ухудшению качества управления или потере устойчивости.

Для объекта с переменной задержкой может быть рассмотрена модификация предиктора Смита, представленная на рисунке 2.

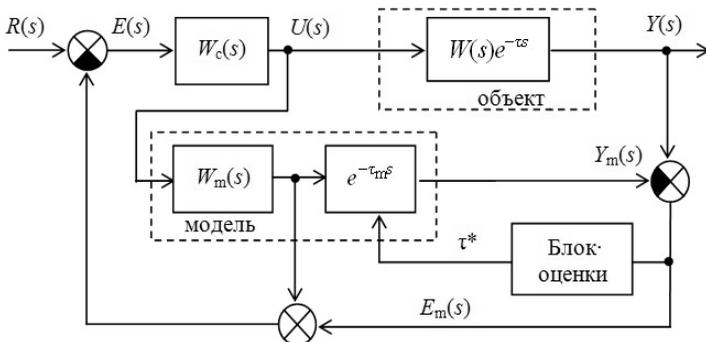


Рис. 2. Система с блоком оценки задержки

Таким образом, предиктор получает второй контур управления, использующий в качестве входной информации ошибку модели.

Возможны разные подходы к организации блока оценки, ниже рассматриваются два из них: на основе обучаемой нейросетевой структуры и на основе НЛР типа Такаги — Сугено.

Нейронная сеть прямого распространения является универсальным настраиваемым нелинейным элементом, однако при решении конкретной задачи существует неопределенность в выборе структуры такой НС. Простейшим вариантом здесь является использование линейного ПИД-нейрона. Большие возможности дает использование настраиваемых нелинейностей в каждом канале НС, что соответствует нейросетевой реализации нечеткого регулятора ПИД-типа [14].

Нечеткий регулятор Такаги — Сугено связывает с каждой выделенной областью пространства состояний объекта некоторую функцию входных переменных или константу. В рассматриваемой задаче такой константой является время задержки. Проблема заключается в описании способа анализа состояния объекта.

**3. Нейросетевая реализация блока оценки задержки.** При оценке изменения задержки важно учитывать не только текущее значение ошибки, но и ее динамику, поэтому:

$$\dot{\tau} = f(e_m, \dot{e}_m, \int e_m dt) \Rightarrow \tau = \int f(e_m, \dot{e}_m, \int e_m dt) dt + \tau_0, \quad (3)$$

где  $\tau_0$  — начальная оценка задержки.

В качестве оператора  $f$  в (3) может быть использована взвешенная сумма (линейный ПИД-нейрон) или нелинейное преобразование, реализуемое с помощью искусственной нейронной сети (ИНС). Варианты блока оценки с блоком ограничения на выходе представлены на рисунках 3 и 4, оба они могут трактоваться как варианты ИНС.

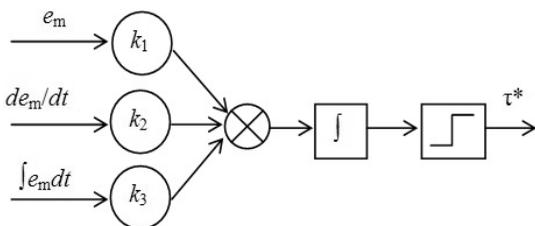


Рис. 3. Блок оценки на основе линейного ПИД-нейрона

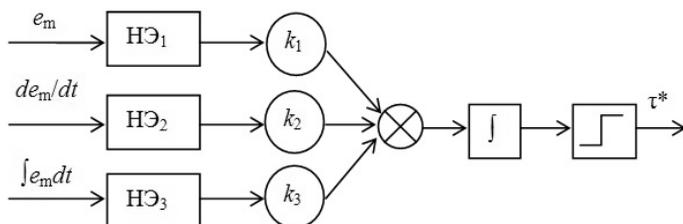


Рис. 4. Блок оценки на основе нелинейной структуры

Нелинейные элементы (НЭ), использованные в структуре блока оценки на рисунке 4, позволяют описать более сложный закон управления, который соответствует нечеткому регулятору ПИД-типа [14, 15]. Блоки НЭ<sub>1</sub>–НЭ<sub>3</sub> представляют собой нечетко-симметричные нелинейности, которые описываются с помощью кусочно-линейной аппроксимации.

Для оптимизации параметров блока оценки используется генетический алгоритм [16]. Целевая функция имеет вид:

$$P = \sum_{i=1}^N e_m(i) \rightarrow \min,$$

где  $i$  — количество шагов моделирования переходного процесса.

**4. Реализация блока оценки задержки на базе нечеткого регулятора Такаги — Сугено.** Нечеткий регулятор Такаги — Сугено впервые описан в работе [17]. В отличие от НЛР типа Мамдани, в которых заключения нечетких правил являются нечеткими множествами, в НЛР типа Такаги — Сугено правые части нечетких правил представляют собой линейные функции входных переменных.

Такая структура открывает широкие возможности как для конструирования НЛР для нелинейных объектов [18, 19], так и для моделирования нелинейных систем [20]. Иначе говоря, здесь рассматривается множество линейных моделей, каждая из которых соответствует нечеткой локальной области фазового пространства объекта. Положение этих локальных нечетких областей априори задано, так что можно вычислять соответствие текущего положения объекта различным областям, изменяя «вес» выхода соответствующих моделей. Общий выходной сигнал модели оказывается «смесью» выходных сигналов локальных моделей. Располагая множеством линейных моделей, можно синтезировать регулятор для каждой из них, а затем рассмотреть нелинейный закон управления, в котором выходные сигналы локальных регуляторов «смешиваются» аналогично выходам линейных моделей (рисунок 5, где  $\mu_i$  — степень соответствия состояния объекта  $X$  области действия  $i$ -го регулятора).

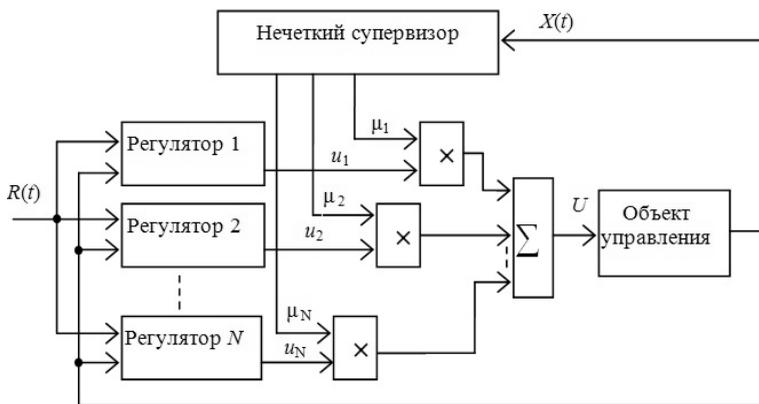


Рис. 5. Общая структура НЛР Такаги — Сугено

Выходной сигнал НЛР получается по формуле, которая соответствует дискретному варианту метода центра тяжести, применяемому для дефазификации:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i u_i(k)}{\sum_{i=1}^N \mu_i} \quad (4)$$

Рассмотрим, как может быть использована методика конструирования НЛР Такаги — Сугено применительно к данной задаче. Выходом НЛР здесь будет являться оценка задержки  $\tau^*$ , которая может изменяться в некоторых известных пределах:  $\tau^* \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ .

В схеме, показанной на рисунке 5, значение степени соответствия формируется как  $T$ -норма вида:

$$\mu_i = \min((A_1^i \cap x_1), (A_2^i \cap x_2) \dots (A_k^i \cap x_k)),$$

где  $x_j$  — компоненты вектора состояния  $X$ ,  $A_j$  — априорно заданные нечеткие множества, описывающие область действия  $i$ -й модели,  $k$  — размерность вектора состояния.

В задаче оценки задержки на выходе одномерной системы  $k = 1$ , но априорное описание состояния невозможно, поскольку соответствии выхода системы и значения задержки неоднозначно.

Для описания степени принадлежности  $\mu_i$  рассмотрим совокупность моделей систем с предиктором Смита, каждый из которых настроен на определенную задержку  $\tau_i$  таким образом, что:

$$\tau_i = i \cdot \Delta\tau, \quad i = \overline{1, N}, \quad (5)$$

где  $\Delta\tau$  — шаг изменения задержки,  $N$  — количество моделей.

В результате сравнения выхода каждой модели с выходом объекта получается ошибка выхода  $i$ -й модели. Интеграл этой ошибки может служить в качестве оценки соответствия модели объекту (рисунок 6).

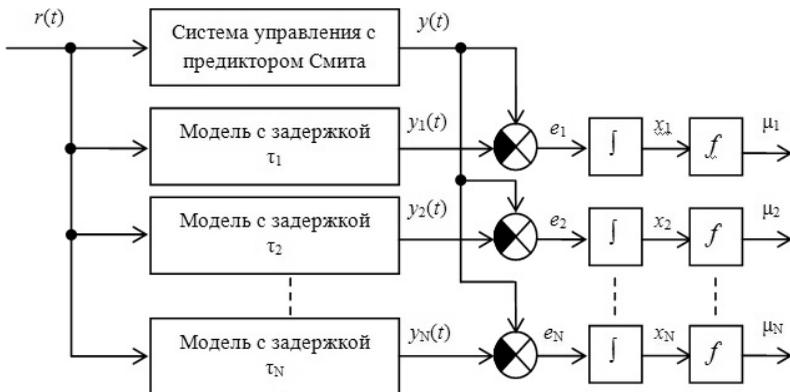


Рис. 6. Схема формирования значения принадлежности

Большие значения интеграла ошибки означают малое соответствие модели объекту, поэтому для описания степени соответствия может быть использована гауссова функция с центром в точке 0:

$$\mu_i = f(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где параметр  $\sigma$  подбирается экспериментально.

Таким образом обеспечивается условие:  $\mu_i \in [0, 1]$ .

Поскольку с каждой моделью связана определенная задержка  $\tau_i$ , выход блока оценки может быть получен в соответствии с (4):

$$\tau^* = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i}. \quad (6)$$

## 5. Пример моделирования.

**5.1. Классический предиктор Смита.** Рассмотрим в качестве примера систему управления с ПИД-регулятором (рисунок 7).

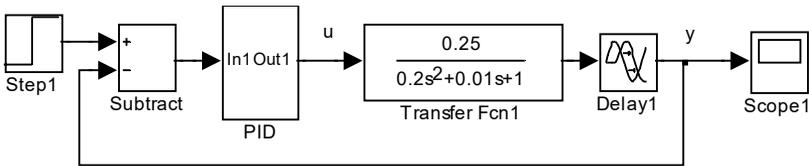


Рис. 7. Блок-схема системы управления в *MatLab*

На рисунке 8 приведены переходные процессы в системе, которая теряет устойчивость при  $\tau \geq 0.18$  с.

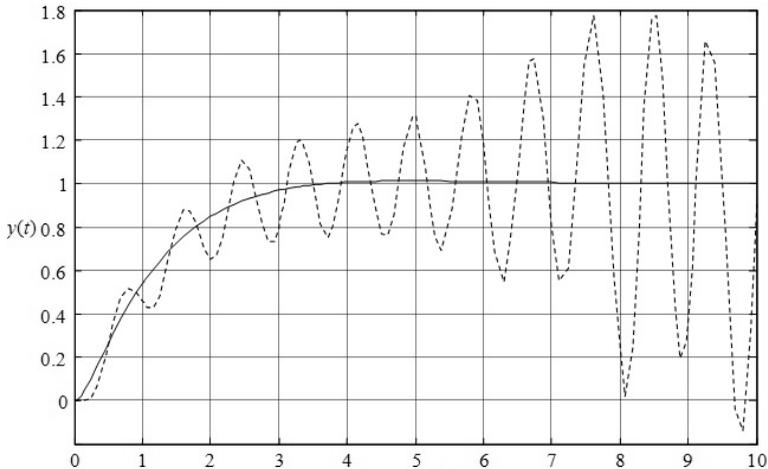


Рис. 8. Реакция системы на единичный скачок при  $\tau = 0$  (сплошная) и при  $\tau = 0.18$  с (пунктир)

Использование предиктора Смита (рисунок 9) позволяет сохранить вид переходного процесса.

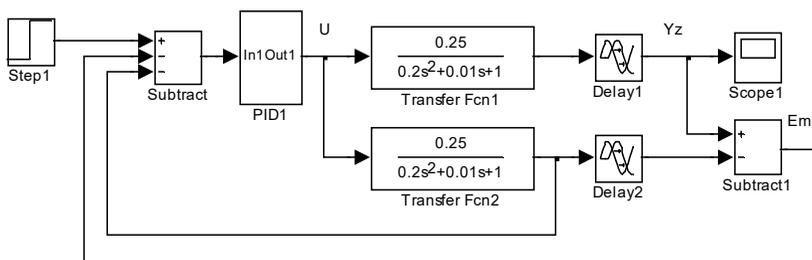


Рис. 9. Блок-схема системы с предиктором

Однако, как показывает рисунок 10, качество работы системы быстро ухудшается, если  $\text{Delay1} \neq \text{Delay2}$ .

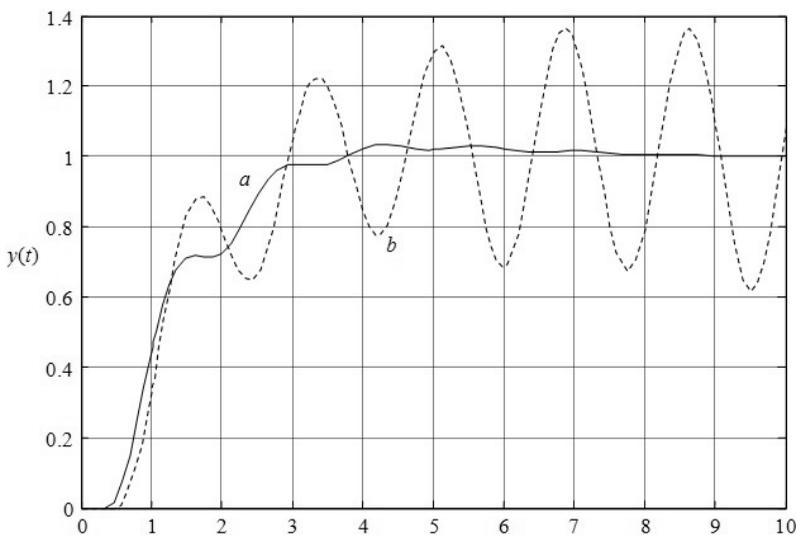


Рис. 10. Переходные процессы в схеме с предиктором:  $\text{Delay1} = 0.2\text{c}$ ,  $\text{Delay2} = 0.38\text{c}$ . (a) и  $\text{Delay1} = 0.2\text{c}$ ,  $\text{Delay2} = 0.5\text{c}$  (b)

Таким образом, классический предиктор Смита неработоспособен при наличии переменной задержки на выходе системы.

**5.2. Предиктор Смита с нейросетевым блоком оценки.** На рисунке 11 представлена схема предиктора с блоком оценки задержки на

базе, собранная в *Simulink MatLab* (блоки *Signal Builder* служат для формирования обучающей и тестовой последовательности изменения  $\tau$ ).

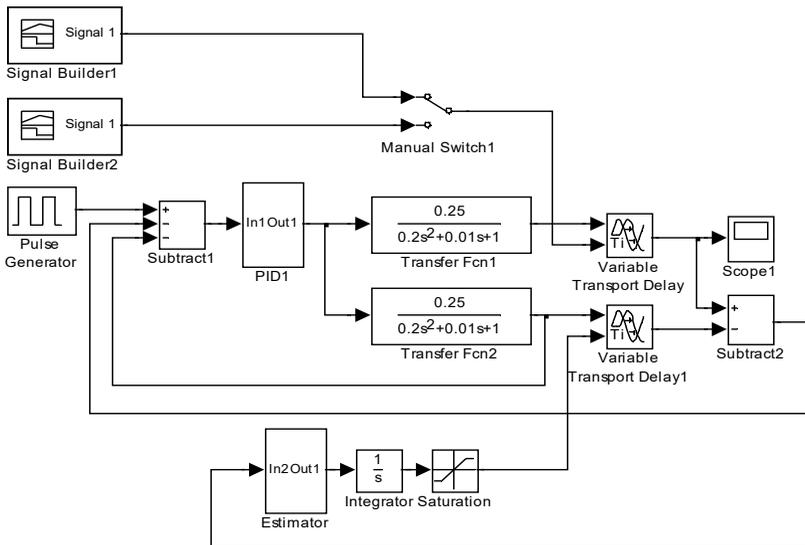


Рис. 11. Предиктор Смита с блоком оценки задержки

Оба варианта организации блока оценки (рисунки 3 и 4) показали хорошее качество генетического обучения (рисунки 12 и 13).

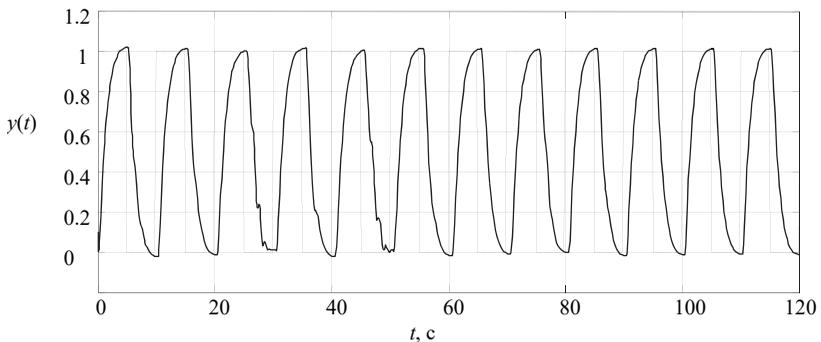


Рис. 12. Реакция модифицированного предиктора Смита (сплошная) на задающее воздействие (пунктир)

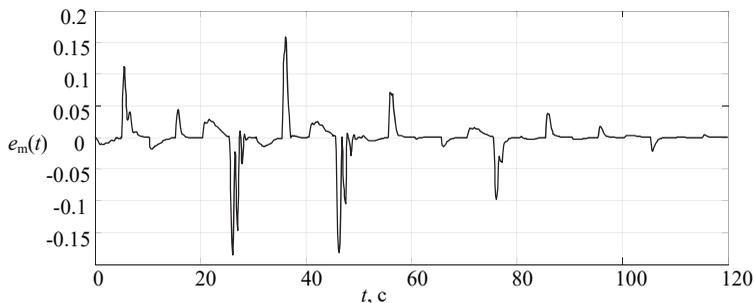


Рис. 13. Ошибка выхода модели

На рисунке 14 показан выходной сигнал блока оценки модели для блока оценки на базе линейной НС (система 1) и блока оценки на базе нелинейной НС (система 2).

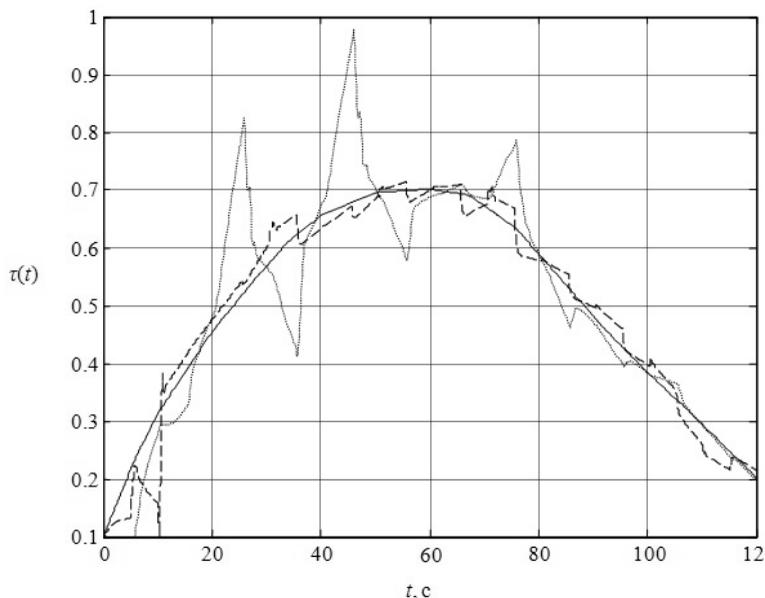


Рис. 14. Изменение значения задержки: задающее воздействие (сплошная), система 1 (точки), система 2 (тире)

Для системы 1 характерны резкие колебания значения  $\tau^*$ , поэтому после обучения система 1 не смогла справиться с тестовой задачей, которую решила система 2 (рисунки 15 и 16).

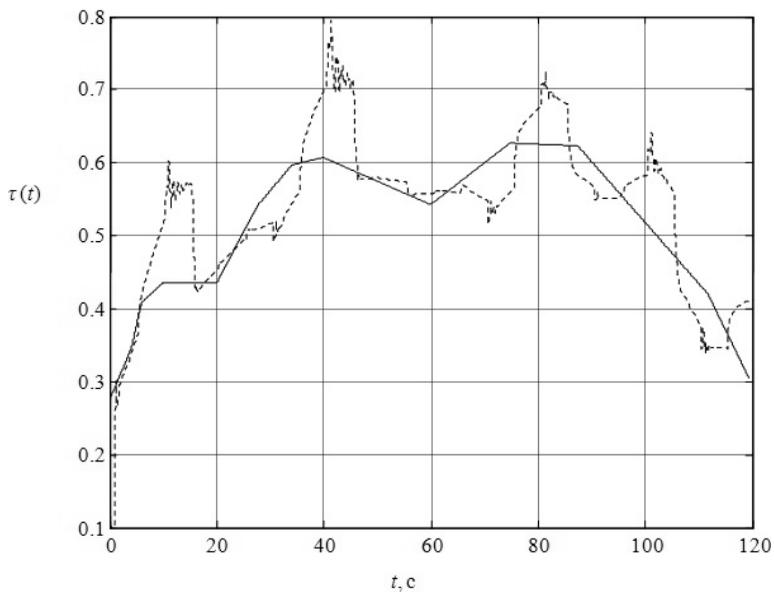


Рис. 15. Изменение значения задержки для тестового примера: задающее воздействие (сплошная), система 2 (тире)

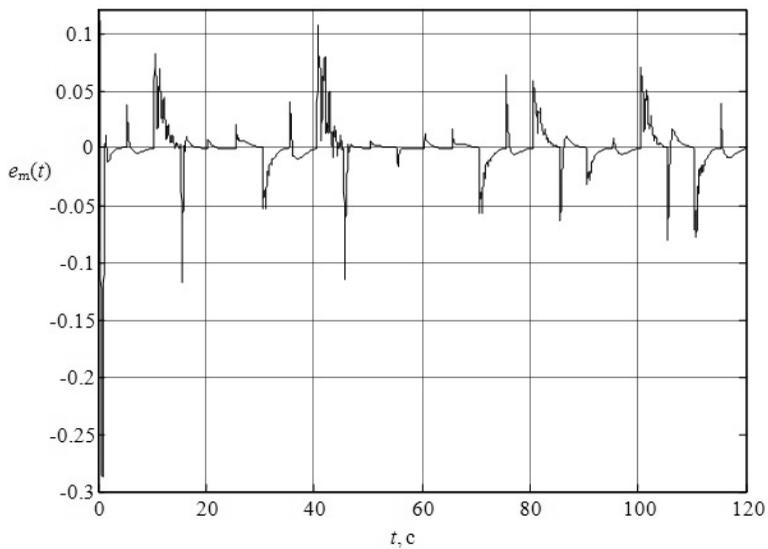


Рис. 16. Ошибка выхода модели для тестовой последовательности

На рисунке 17 представлены нелинейные элементы, полученные после генетического обучения системы 2.

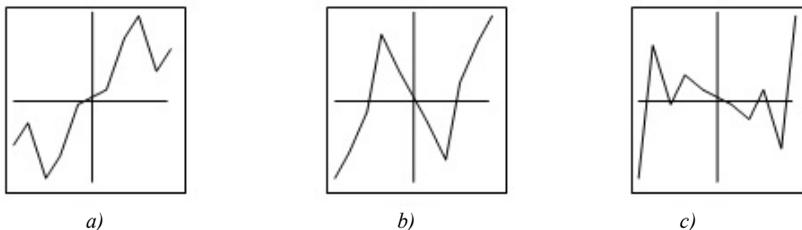


Рис. 17. Нелинейности: *a* — канал ошибки, *b* — канал производной, *c* — канал интеграла ошибки

### 5.3. Предиктор Смита с нечетким блоком оценки задержки.

На рисунке 18 представлен пример схемы предиктора с блоком оценки задержки на основе нечеткого регулятора Такаги — Сугено.

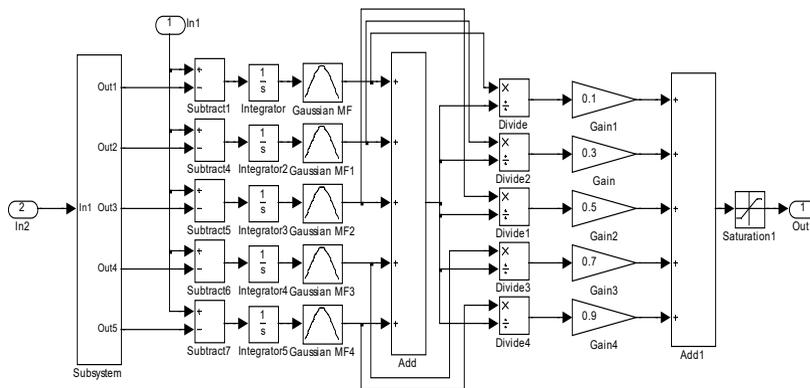


Рис. 18. Блок-схема предиктора на базе нечеткого регулятора

Блок Subsystem на рисунке 18 содержит набор из 5 схем с предиктором (рисунок 9), в которых задержка изменяется согласно (5) с шагом 0.2 с. Во всех схемах параметры ПИД-регулятора одинаковы. Вход In2 соответствует задающему воздействию, вход In1 — выходу объекта с переменной задержкой. Блок сумматоров вычисляет ошибку выхода каждой модели, ее интеграл и преобразование с помощью функции Гаусса (рисунок 6). Остальная часть схемы реализует (6). Таким образом, на рисунке 16  $\tau^* \in [0.1; 0.9]$ .

На рисунке 19 показана реакция предиктора Смита с нечетким блоком оценки задержки на синусоидальное входное воздействие, на рисунке 20 — ошибка выхода.

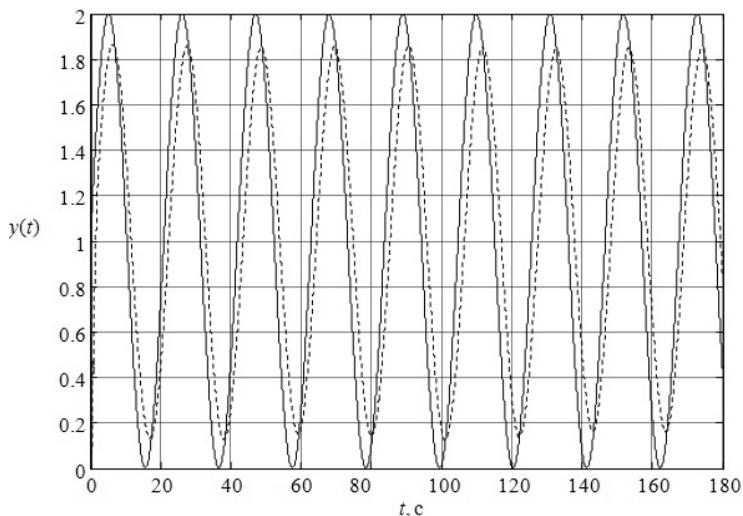


Рис. 19. Реакция предиктора Смита с нечетким блоком оценки (пунктир) на задающее воздействие (сплошная)

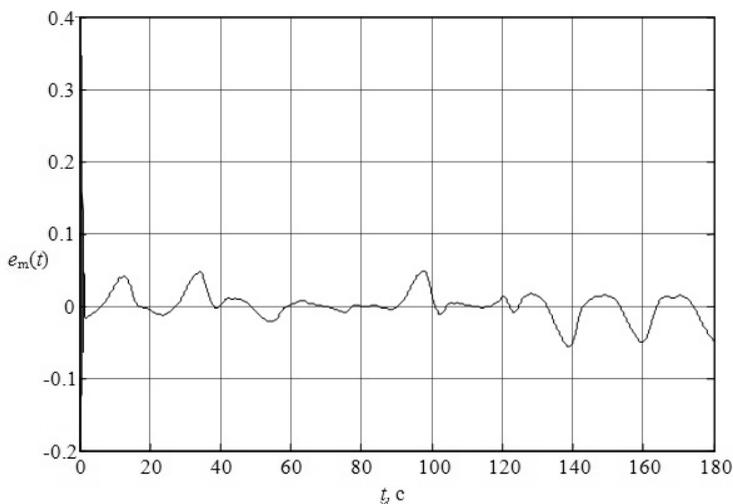


Рис. 20. Ошибка обработки синусоидального воздействия

На рисунке 21 представлен выходной сигнал нечеткого блока оценки задержки.

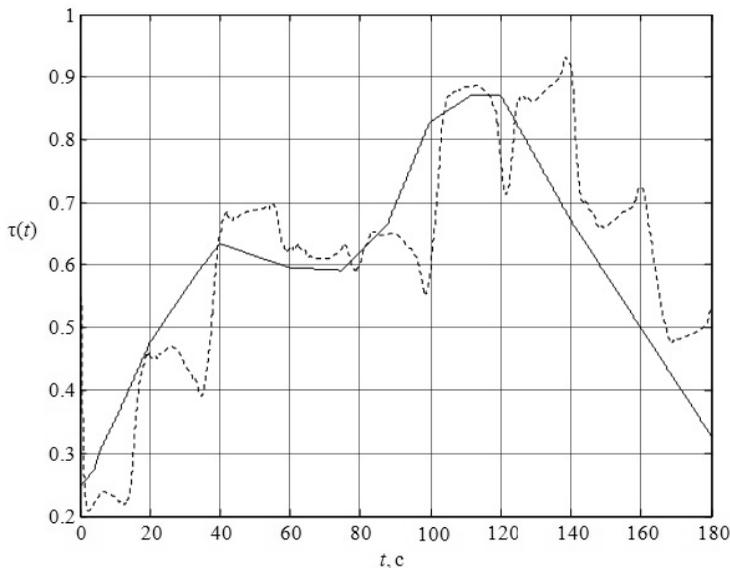


Рис. 21. Изменение значения задержки: задающее воздействие (сплошная), выход нечеткого блока оценки (тире)

Моделирование показало, что при увеличении количества моделей можно значительно повысить точность оценки времени задержки (уменьшение шага  $\Delta t$ ) или расширить диапазон возможных изменений задержки. Динамическая ошибка выхода системы на рисунке 19 зависит от параметров основного ПИД-регулятора. В целом схема на базе нечеткого блока оценки показала высокую робастность при обработке произвольных законов изменения задержки.

**6. Заключение.** Результаты проведенных экспериментов подтверждают практическую значимость предлагаемой схемы модификации предиктора Смита с помощью блока оценки задержки. Обеспечивается устойчивость и заданная форма переходного процесса при вариации задержки в достаточно широком диапазоне значений, что невозможно при использовании классического предиктора Смита.

Рассмотренные варианты реализации блока оценки задержки имеют свои достоинства и недостатки.

Вариант на базе рассмотренных линейной и нелинейной НС отличается простотой реализации, однако требует достаточно трудоемкого этапа обучения. Линейный закон адаптации показал худшую ро-

бастность, чем нелинейный вариант. Качество генетического обучения сильно зависит от разнообразия обучающей выборки. Как показало моделирование, при обучении требуется использовать длительные временные интервалы, чтобы изменение задержки было достаточно плавным. При отработке ступенчатых импульсов ошибка выхода лишь в отдельные моменты превышала 10%, в то время как система с традиционным предиктором Смита оказывается неработоспособной.

Вариант блока оценки на базе нечеткого регулятора не требует обучения, обеспечивает высокую робастность и позволяет добиться регулирования качества оценки времени задержки. В проведенном эксперименте по отработке синусоидального входного сигнала ошибка выхода системы с переменным временем задержки не превышала 5%. Однако этот вариант опирается на использование множества моделей системы управления, что вызывает большие вычислительные затраты при работе в реальном времени.

Выбор того или иного варианта модификации предиктора Смита должен происходить с учетом специфики решаемой задачи.

Таким образом, рассмотренный подход может быть полезен при разработке систем управления широким классом динамических объектов с запаздыванием.

## Литература

1. *Smith O.J.M.* Close Control of Loops with Dead Time // *Chemical Engineering Progress*. 1957. vol. 53. pp. 217–235.
2. *Гурецкий Х.* Анализ и синтез систем управления с запаздыванием // М.: Машиностроение. 1973. 328 с.
3. *Вундер Н.А., Ушаков А.В.* Анализ чувствительности к вариации запаздывания систем с последовательным компенсатором, включённым по схеме Смита // *Автоматрия*. 2016. № 3. С. 71–78.
4. *Фуртат И.Б., Цыкунов А.М.* Адаптивное управление объектами с запаздыванием по выходу // *Известия ВУЗов. Приборостроение*. 2005. № 7. С. 15–19.
5. *Kamali M., Askari J., Sheikholeslam F.* An Output-feedback adaptive actuator failure compensation controller for systems with unknown state delays // *J. Nonlinear Dyn.* 2012. vol. 64. no. 4. pp. 2397–2410.
6. *Бобцов А.А.* Стабилизация нелинейных систем по выходу в условиях запаздывания // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2008. № 2. С. 21–28.
7. *Бобцов А.А., Пыркин А.А.* Адаптивное и робастное управление с компенсацией неопределенностей // СПб: НИУ ИТМО. 2013. 135 с.
8. *Wei Q., Wang W.* Research on fuzzy self-adaptive PI-Smith control in long time-delay system // *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*. 2011. vol. 18(5). pp. 114–117.
9. *Wang P.G., Feng H.P., Zong X.P.* Smith predictive control based on NN // *Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Guangzhou. 2005. pp. 4179–4183.
10. *Chen H., Zouaoui Z., Chen Z.* A modified Smith predictive scheme based back-propagation neural network approach for FOPDT processes control // *Journal of Process Control*. 2013. vol. 23(9). pp. 1261–1269.

11. *Padhan D.G., Majhi S.* Modified Smith predictor based cascade control of unstable time delay processes // *ISA Transactions*. 2012. vol. 51. no. 1. pp. 95–104.
12. *Ren H., Cao X., Guo J.* Modified Smith Predictor Design and Its Applications to Long Time Delay Systems // *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*. 2015. vol. 8. no. 5. pp. 151–160.
13. *Abuzaid O.M., Emheisen M.A., Ammar A.A.* Design of Fuzzy Self-adaptive PI-Smith Predictor Process Controller // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016. vol. 31. no. 1. pp. 18–21.
14. *Бураков М.В., Курпичников А.П.* Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т.18. № 4. С. 242–244.
15. *Burakov M.V., Kurbanov V.G.* Fuzzy PID controller for nonlinear plant // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. vol. 11. no. 9. pp. 5745–5748.
16. *Бураков М.В., Коновалов А.С., Яковец О.Б.* Эволюционный синтез нечетких регуляторов // *Информационно-управляющие системы*. 2015. № 6. С. 28–33.
17. *Takagi T., Sugeno M.* Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // *IEEE Trans. Systems Man Cybernet*. 1985. vol. 15. no. 116. pp. 116–132.
18. *Gao Q., Feng G., Wang Y.* Universal fuzzy controllers based on generalized T–S fuzzy models // *Fuzzy Sets and Systems*. 2012. vol. 201. pp. 55–70.
19. *Klug M., Castelan E.B., Leite V.J., Silva L.F.* Fuzzy dynamic output feedback control through nonlinear Takagi–Sugeno models // *Fuzzy Sets and Systems*. 2015. vol. 263. pp. 92–111.
20. *Бураков М.В., Брунов М.С.* Структурная идентификация нечеткой модели // *Труды СПИИРАН*. 2014. Вып. 3 (34). С. 232–246.

**Бураков Михаил Владимирович** — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры управления в технических системах института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП). Область научных интересов: адаптивные и нечеткие системы, нейронные сети, генетические алгоритмы. Число научных публикаций — 150. [bmV@sknt.ru](mailto:bmV@sknt.ru); ул. Б. Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000; р.т.: +7(812)4947031.

**Шихлаков Владислав Федорович** — д-р техн. наук, профессор, директор института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике, заведующий кафедрой управления в технических системах института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП). Область научных интересов: методы синтеза нелинейных систем управления, электроэнергетические комплексы, сверхпроводимость, энергоэффективность. Число научных публикаций — 170. [svfmail@yandex.ru](mailto:svfmail@yandex.ru); ул. Б. Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000; р.т.: +7(812)4947031.

M.V. BURAKOV, V.F. SHYSHLAKOV  
**A MODIFIED SMITH PREDICTOR FOR THE CONTROL OF SYSTEMS WITH TIME-VARYING DELAY**

*Burakov M.V., Shyshlakov V.F. A Modified Smith Predictor for the Control of Systems with Time-Varying Delay.*

**Abstract.** A conventional Smith predictor presents poor stability when controlling systems with time-varying delay. In this paper, an improved adaptive PID-Smith predictor is proposed. It uses a PID controller as the primary controller as well as the estimator for unknown time delay. The goal is to ensure system stability and resistance to modeling errors.

This article discusses two structures of the estimator unit - based on a neural network and on a fuzzy controller. In the first variant, the genetic algorithm is used to find the optimal parameters of the estimator in the autonomous mode. In the second variant, the fuzzy controller of the Takagi – Sugeno type uses a variety of models with different delay time. At each time point the error of output is calculated for all models. The output signal of the estimator is formed by the rule of defuzzification. Simulation results show the effectiveness of the proposed modification of the Smith predictor.

**Keywords:** Time-delayed systems, Smith predictor, adaptive control, neural network, genetic algorithm, Takagi – Sugeno fuzzy logic controller.

**Burakov Mikhail Vladimirovich** — Ph.D., associate professor, associate professor of control in technical systems department of Institute of Innovative Technologies in Electromechanics and Robotics, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI). Research interests: adaptive and fuzzy systems, neural net, genetic algorithm. The number of publications — 150. [bmvmv@sknt.ru](mailto:bmvmv@sknt.ru); 67, Bolshaya Morskaya str., St. Petersburg, 190000; office phone: +7(812)4947031.

**Shyshlakov Vladislav Fedorovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of control in technical systems department of Institute of Innovative Technologies in Electromechanics and Robotics, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI). Research interests: methods of synthesis of nonlinear control systems, power-engineering complexes, superconductivity, ergo-efficiency. The number of publications — 170. [svfmail@yandex.ru](mailto:svfmail@yandex.ru); 67, Bolshaya Morskaya str., St. Petersburg, 190000; office phone: +7(812)4947031.

### References

1. Smith O.J.M. Close Control of Loops with Dead Time. *Chemical Engineering Progress*. 1957. vol. 53. pp. 217–235.
2. Guretskij Kh. *Analiz i sintez sistem upravleniya s zapazdyvaniem* [Analysis and synthesis of control systems with delay]. M.: Mashinostroenie. 1973. 328 p. (In Russ.).
3. Vunder N.A., Ushakov A.B. [A sensitivity analysis to variations in delay systems with serial compensator included on the Smith chart]. *Aviometriya – Autometry*. 2016. vol. 3. pp. 71–78. (In Russ.).
4. Furtat I.B., Tsykunov A.M. [Adaptive control of plants with delayed output]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institutions: Instrumentation*. 2005. vol. 7. pp. 15–19. (In Russ.).
5. Kamali M., Askari J., Sheikholeslam F. An Output-feedback adaptive actuator failure compensation controller for systems with unknown state delays. *Journal of Nonlinear Dynamics*. 2012. vol. 64. no. 4. pp. 2397–2410.

6. Bobtsov A.A. [Stabilization of nonlinear systems by output in terms of delay]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya – Journal of computer and systems sciences international*. 2008. vol. 2. pp. 21–28. (In Russ.).
7. Bobtsov A.A., Pyrkin A.A. *Adaptivnoe i robustnoe upravlenie s kompensatsiyey neopredelennostey* [Adaptive and robust control with uncertainties compensation]. SPb: NIU ITMO. 2013. 135 p. (In Russ.).
8. Wei Q., Wang W. Research on fuzzy self-adaptive PI-Smith control in long time-delay system. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*. 2011. vol. 18(5). pp. 114–117.
9. Wang P. G., Feng H. P., Zong X. P. Smith predictive control based on NN. Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou. 2005. pp. 4179–4183.
10. Chen H., Zouaoui Z., Chen Z. A modified Smith predictive scheme based back-propagation neural network approach for FOPDT processes control. *Journal of Process Control*. 2013. vol. 23. pp. 1261–1269.
11. Padhan D.G., Majhi S. Modified Smith predictor based cascade control of unstable time delay processes. *ISA Transactions*. 2012. vol. 51. no 1. pp. 95–104.
12. Ren H., Cao X., Guo J. Modified Smith Predictor Design and Its Applications to Long Time Delay Systems. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*. 2015. vol. 8. no. 5. pp. 151–160.
13. Abuzaid O.M., Emheisen M.A., Ammar A.A. Design of Fuzzy Self-adaptive PI-Smith Predictor Process Controller. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016. vol. 31 no 1. pp. 18–21.
14. Burakov M.V., Kirpichnikov A.P. [Fuzzy PID controller for nonlinear plant]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of Kazan Technological University*. 2015. vol. 18. no 4. pp. 242–244. (In Russ.).
15. Burakov M.V., Kurbanov V.G. Fuzzy PID controller for nonlinear plant. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. vol. 11. no. 9. pp. 5745–5748.
16. Burakov M. V., Konovalov A.S., Yakovets O.B. [Evolutionary design of Fuzzy controllers]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2016. pp. 28–33. (In Russ.).
17. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet*. 1985. vol. 15. no. 116. pp. 116–132.
18. Gao Q., Feng G., Wang Y. Universal fuzzy controllers based on generalized T–S fuzzy models. *Fuzzy Sets and Systems*. 2012. vol. 201. pp. 55–70.
19. Klug M., Castelan E.B., Leite V.J., Silva L.F. Fuzzy dynamic output feedback control through nonlinear Takagi–Sugeno models. *Fuzzy Sets and Systems*. 2015. vol. 263. pp. 92–111.
20. Burakov M.V., Brunov M.S. [Structural identification of fuzzy model]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2014. vol. 3(34). pp. 232–246.