

УДК 519.4

DOI 10.24412/2413-7383-2025-4-39-183-193

П.В. Васильев<sup>1</sup>, О.В. Даринцев<sup>2</sup>, Р.А. Мунасыпов<sup>2</sup><sup>1</sup>Института механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

450054 Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, Проспект Октября, 71

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

450076, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

## ПРИМЕНЕНИЕ АССОЦИАТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМ МОДУЛЕМ\*

P.V. Vasilev<sup>1</sup>, O.V. Darintsev<sup>2</sup>, R.A. Munasypov<sup>2</sup><sup>1</sup>Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov UFIC RAS

450054 Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, 71 Oktyabrya Av.

<sup>2</sup>Ufa University of Science and Technology

450076, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, 32 Zaki Validi str.

## APPLICATION OF AN ASSOCIATIVE CONTROLLER IN THE CONTROL CIRCUIT OF A MECHATRONIC MODULE

В статье рассматривается актуальная задача повышения эффективности систем управления мехатронными модулями в контексте концепции "Индустрия 4.0". Проводится сравнительный анализ четырех различных методов применения ассоциативного регулятора на базе нейронной сети *СМАС* (*Cerebellar Model Articulation Controller*) для улучшения качества работы классического ПИД-регулятора. Рассматриваются следующие архитектуры: параллельная работа ПИД-регулятора и ассоциативного регулятора для компенсации возмущений, динамическая настройка коэффициентов ПИД-регулятора с помощью ассоциативной памяти, гибридный метод, сочетающий оба подхода, а также полная замена ПИД-регулятора ассоциативным. Анализ проводится на примере модели сервопривода в среде *Matlab/Simulink*. В работе оценивается эффективность предложенных методов по таким показателям, как быстродействие и перерегулирование, и демонстрируются преимущества гибридных интеллектуальных систем управления.

**Ключевые слова:** ПИД-регулятор, ассоциативная память, настройка регулятора, *СМАС*.

The article discusses the urgent task of improving the efficiency of mechatronic module control systems in the context of the "Industry 4.0" concept. A comparative analysis of four different methods of using an associative controller based on the CMAC neural network (Cerebellar Model Articulation Controller) is carried out to improve the quality of the classic PID controller. The following architectures are considered: parallel operation of a PID controller and an associative controller to compensate for disturbances, dynamic adjustment of the coefficients of the PID controller using associative memory, a hybrid method combining both approaches, as well as the complete replacement of the PID controller with an associative one. The analysis is carried out using the example of a servo drive model in the Matlab/Simulink environment. The paper evaluates the effectiveness of the proposed methods in terms of performance and overshoot, and demonstrates the advantages of hybrid intelligent control systems.

**Key words:** PID controller, associative memory, adjustment of the controller, CMAC.

---

\* Работа посвящена исследованию эффективности применения ассоциативного регулятора (АР) для улучшения качества управления мехатронными модулями.

## Введение

В современных реалиях искусственный интеллект (ИИ) [1-3] становится неотъемлемой частью промышленной автоматизации, позволяя создавать "умные" производства, управляемые взаимосвязанными системами и аналитикой на основе данных. Интеграция интеллектуальных технологий в системы управления технологическим оборудованием позволяет в режиме реального времени осуществлять текущий контроль и выполнять коррекцию параметров работы оборудования. Наиболее известны успешные решения задач управления сложными динамическими объектами с использованием таких методов ИИ, как нейронные сети и нечеткая логика [4-11], позволяющие получать компактные решения для систем при отсутствии точных математических моделей [12]. Несмотря на успешность таких подходов для решения задач управления, наличие существенных недостатков: сложность настройки, объемные обучающие выборки, длительность обучения и т.д. отсутствие дообучения в режиме реального времени, - потребовали провести исследования по оценке эффективности применения альтернативных методик ИИ.

**Цель работы** - оценить перспективы использования ассоциативной памяти (АП).

**Постановка задачи.** Принимая во внимание специфику работы АП, которая позволяет осуществлять доступ к данным не по адресу, а по их содержанию [13], восстанавливать информацию по ее фрагменту или зашумленной копии [14-16], необходимо на ее базе:

1. Разработать архитектуру ассоциативного регулятора (АР);
2. Провести предварительный синтез адаптивных систем управления мехатронными модулями, обладающие способностью эффективного функционирования в условиях неопределенности и запоминания новых состояний без полного переобучения всей системы.

Эффективность предлагаемого решения будет оценена по результатам сравнительного анализа основных схем применения АР в системах управления мехатронными модулями.

## Методология

В данной работе для реализации АР была выбрана нейронная сеть *СМАС* (*Cerebellar Model Articulation Controller*) в качестве главного элемента АП. Выбор в пользу *СМАС* обусловлен рядом ее ключевых преимуществ по сравнению с другими нейросетевыми архитектурами и методами нечеткой логики:

– Быстрое обучение: В отличие от сетей с полносвязной структурой, требующих обновления всех весовых коэффициентов на каждой итерации, *СМАС* обладает локальной обобщающей способностью. Это означает, что при подаче входного сигнала активируется и корректируется лишь небольшая группа нейронов, что значительно ускоряет процесс обучения. Данное свойство *СМАС* создает явные предпосылки для ее применения в системах управления, функционирующих в режиме реального времени.

– Простота вычислений: Алгоритм работы *СМАС* основан на простых операциях чтения из таблицы и суммирования, что снижает вычислительную нагрузку по сравнению со сложными вычислениями функций активации или принадлежности в многослойных перцептронах или нечетких системах.

– Хорошая способность к обобщению: Структура *СМАС* позволяет ей формировать схожие выходные сигналы для близких по значению входных векторов. Это достигается за счет того, что близкие входные сигналы активируют пересекающиеся наборы ячеек памяти, обеспечивая плавное изменение управляющего воздействия.

– Меньшая потребность в априорных знаниях: По сравнению с системами на нечеткой логике, *СМАС* не требует формирования сложной базы правил "если-то", что упрощает ее первоначальную настройку и адаптацию.

Для сравнительного анализа были выбраны четыре возможных архитектуры системы управления [12], которые различаются способом взаимодействия АР и ПИД-регулятора [17-21].

В работах [17], [19-22] описывается работа АР, *СМАС* преобразует многомерный входной сигнал, это могут быть ошибка  $e(t)$  и ее производная  $\Delta e(t)$ , в набор адресов в нескольких таблицах весов с помощью специального механизма отображения (меток). Выходным сигналом регулятора является сумма весов, хранящихся по этим адресам, что позволяет локально настраивать реакцию системы для разных режимов работы, например, для переходного и стационарного состояний. Принцип работы и структура *СМАС* представлены в соответствии с рисунком 1.

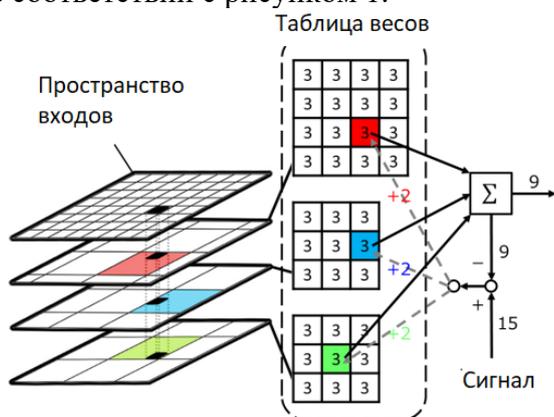


Рисунок 1 – Принцип работы и структура *СМАС*

В первом варианте архитектуры в соответствии с рисунком 2, ПИД-регулятор и АР работают параллельно. ПИД-регулятор обеспечивает базовое управление, а АР выполняет роль компенсирующего элемента. На вход АР подаются данные о состоянии системы, а ее выходной сигнал суммируется с выходным сигналом ПИД-регулятора. Основная задача АР в этой схеме — компенсировать нелинейности объекта управления и внешние возмущения, которые не могут быть эффективно обработаны линейным ПИД-регулятором.

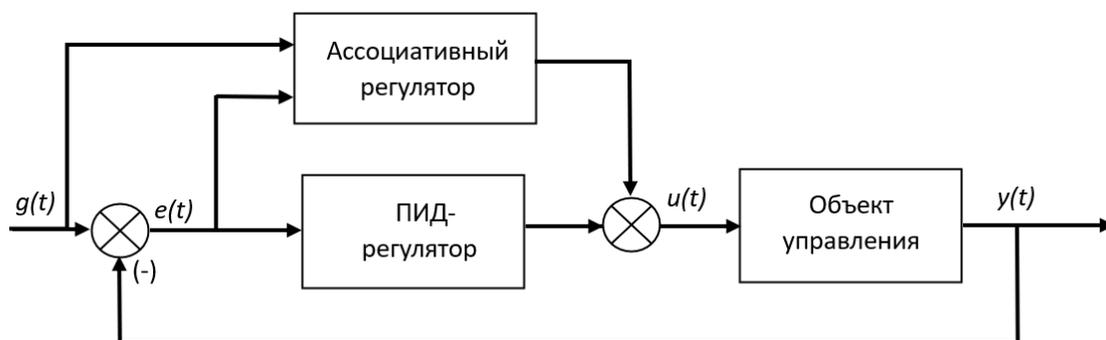


Рисунок 2 – Первый вариант архитектуры

Во втором варианте архитектуры АР в соответствии с рисунком 3, применяется в качестве "настройщика" параметров ПИД-регулятора. В отличие от систем с фиксированными коэффициентами, здесь АР динамически изменяет коэффициенты

ПИД-регулятора в зависимости от текущего режима работы системы. На вход сети подаются параметры, характеризующие динамику процесса, а на выходе нейросетью формируются значения коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$ , для обучения которой использовался предварительно рассчитанный датасет на полном диапазоне входных сигналов.

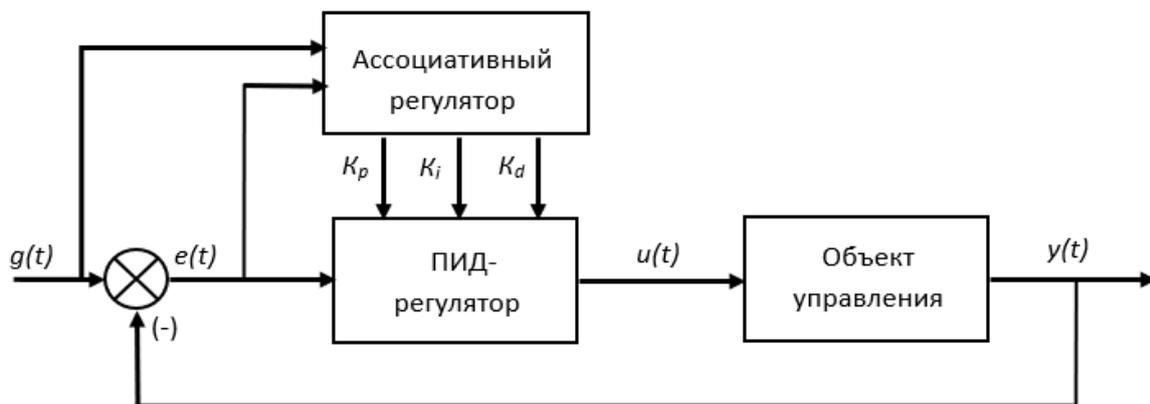


Рисунок 3 – Второй вариант архитектуры

Третий вариант архитектуры — это комбинация двух предыдущих подходов в соответствии с рисунком 4. В данном варианте системы одна сеть АР используется для динамической настройки коэффициентов ПИД-регулятора, в то же время второй АР работает параллельно основному контуру управления и корректирует его итоговый выходной сигнал.

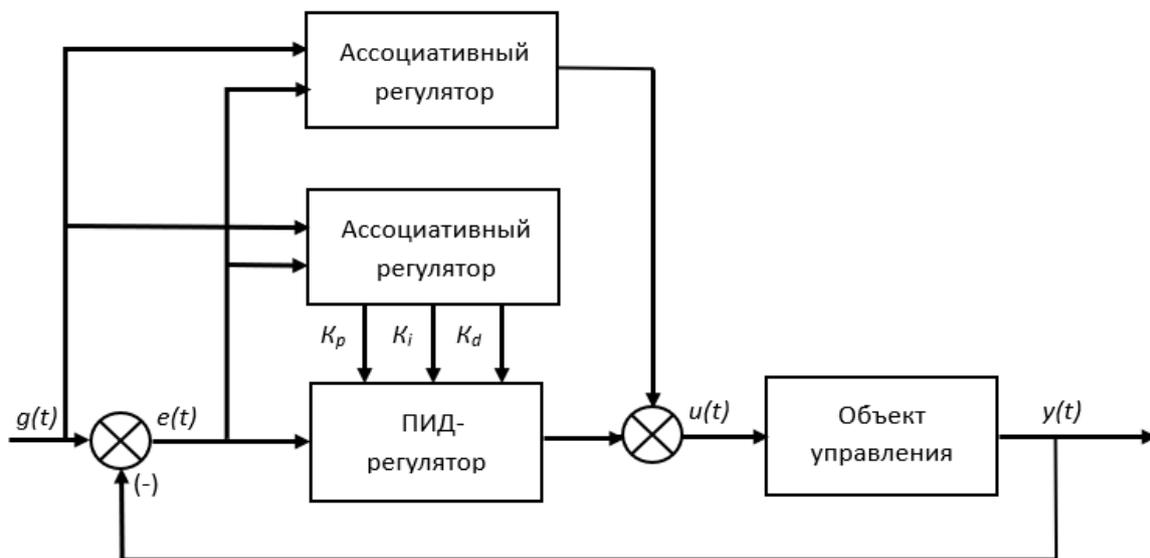


Рисунок 4 – Третий вариант архитектуры

В четвертом варианте архитектуры АР полностью заменяет собой классический ПИД-регулятор в соответствии с рисунком 5. Входными сигналами для АР служат ошибка регулирования  $e(t)$ , ее интеграл  $\int e(t)dt$  и производная  $de(t)/dt$ , что функционально соответствует трем составляющим ПИД-закона. Обучение сети направлено на то, чтобы она научилась формировать управляющий сигнал, минимизирующий ошибку. Преимущество такого подхода заключается в способности АР реализовывать аппроксимированную сложную нелинейную зависимость между входами и выходом, что теоретически позволяет добиться более высокого качества управления для нелинейных объектов по сравнению с классическим линейным ПИД-регулятором.

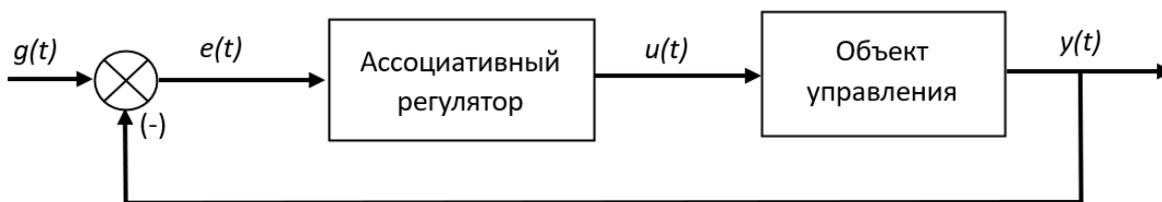


Рисунок 5 – Четвертый вариант архитектуры

## Результаты

Перед тем как проводить эксперименты на реальном объекте проведем численное моделирование. Для примера моделирования возьмем модель сервопривода, описываемого колебательным звеном:

$$W(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2},$$

где  $\omega_n$  - собственная частота равная 7,5 рад/с,  $\xi$  - коэффициент демпфирования равный 0,5. Моделирование проводится с использованием ПО *Matlab/Simulink*.

Результат моделирования системы с ПИД-регулятором в соответствии с рисунком 6 и коэффициентами:  $K_p=3,4$ ,  $K_i=13,2$ ,  $K_d=0,22$ . Как видно из графика ПИД-регулятор не может полностью компенсировать перерегулирование возникающие при управлении сервоприводом, что неблагоприятно сказывается на работе системы, в частности, наблюдаются снижение точности и повторяемости позиционирования, повышение механического износа и т.д.

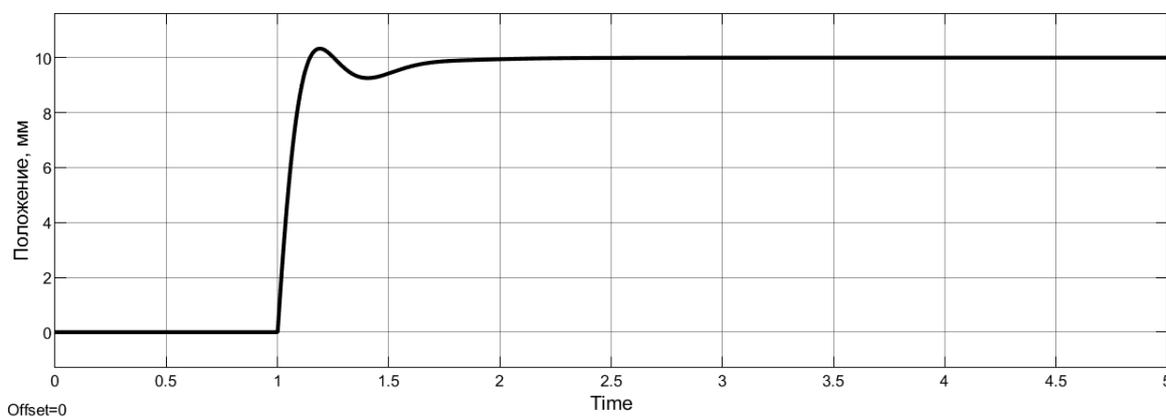


Рисунок 6 – Результат моделирования работы ПИД-регулятора

Далее согласно предложенным методам в систему управления был добавлен АР. Для работы АР было проведено его обучение в соответствии с рисунком 7, в ходе которого выполнены настройки диапазонов работы, настройка параметров квантования сигналов и коэффициентов регулятора для получения более качественных результатов.

В результате обучения наименьшую среднеквадратичную ошибку показала гибридная система управления. После обучения графики переходных процессов для разных вариантов систем управления представлены в соответствии с рисунком 8 и в таблице 1.

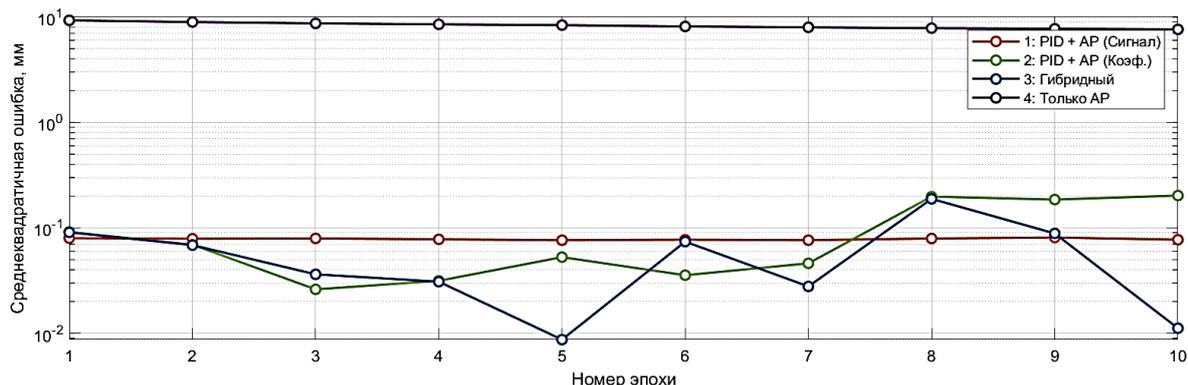


Рисунок 7 – Процесс обучения АП

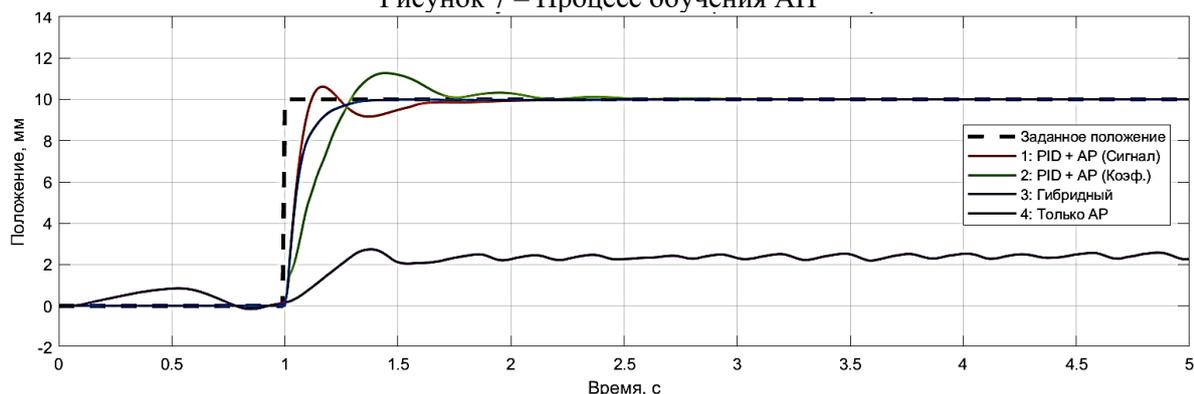


Рисунок 8 – Графики переходных процессов на последней эпохе

В таблице 1 приведены параметры для оценки качества переходного процесса, обучения AP, и оценки вычислительной мощности. Средняя квадратичная ошибка показывает, насколько качественно AP справляется с работой. Среднее время генерации команды управления показывает типичную вычислительную нагрузку при реализации алгоритма управления на протяжении всей симуляции. Максимальное время генерации команды управления показывает самое большое время, которое потребовалось на генерацию команды управления в один период управления. В ходе проведенного моделирования было принято, что длительность одного периода составляет 10 000 мкс. Параметр максимального времени генерации команды управления важен поскольку мехатронные системы могут применяться в системах реального времени, что, согласно теореме Котельникова, требует, чтобы AP работал с частотой как минимум в два раза выше собственной частоты системы.

Таблица 1 – Результаты моделирования (последняя эпоха)

№	Параметр	ПИД-регулятор	ПИД+AP Вариант 1	ПИД+AP Вариант 2	Гибридный Вариант 3	AP Вариант 4
1.	Перерегулирование, %	3,30	6,10	12,70	0	6,80
2.	Время регулирования, с	0,51	0,50	0,64	0,21	0,77
3.	Средняя квадратичная ошибка	-	0,7721	0,20251	0,01117	7,63059
4.	Среднее время генерации команды управления, мкс	-	2,57	5,93	7,46	2,01
5.	Максимальное время генерации команды управления, мкс	-	42,2	18,00	40,40	5,00

Как видно по результатам моделирования лучший результат переходного процесса показал гибридный метод, но при этом у него самые большие значения в других показателях - среднее время генерации команды управления, максимальное время генерации команды управления. Самый худший результат по данному критерию имеет система управления, где применяется только АР, что было ожидаемо, так как было реализовано недостаточное количество эпох обучения, а следовательно, недостаточно корректно была выполнена точная настройка параметров квантования.

## Выводы

В ходе обработки результатов математического моделирования новых архитектур систем управления мехатронным модулем был выполнен сравнительный анализ четырех способов интеграции ассоциативного регулятора на базе нейронной сети *СМАС*. В качестве объекта управления рассматривался сервопривод, для которого получены результаты применения классического ПИД-регулятора, показавшие ограниченные возможности уменьшения колебаний в системе.

Полученные результаты показали, что наилучшее качество управления по интегральному критерию — максимальное быстродействие при отсутствии перерегулирования — достигается при использовании гибридной архитектуры, сочетающей динамическую настройку коэффициентов ПИД-регулятора и одновременную коррекцию его выходного сигнала с помощью ассоциативной памяти. Архитектура, в которой была сделана попытка заменить ПИД-регулятор на ассоциативный регулятор, продемонстрировала наименее эффективный результат, что позволило сократить количество синтезируемых вариантов при проведении натурных экспериментов.

В ходе экспериментов также была подтверждена перспективность применения интеллектуальных подходов для синтеза контуров адаптации и повышения качества систем управления. Однако, перед практической реализацией исследованных архитектур и выбором направлений дальнейшего развития необходимо провести не один цикл исследований. В первую очередь, требуется разработать четкие методические указания по настройке параметров квантования входных и выходных сигналов *СМАС*, так как этот аспект оказывает существенное влияние на точность и стабильность регулирования. Не менее актуальным направлением является исследование методов интеграции априорных знаний об объекте управления в обучаемую модель для ускорения процесса обучения и повышения его эффективности.

## Список литературы

1. Денике Л.В. Зарубежный опыт цифровой трансформации предприятий за счет применения искусственного интеллекта // Прикладные экономические исследования. 2025. № 2. С. 249–255. doi: 10.47576/2949-1908.2025.2.2.028.
2. Айдосова А.А., Еремекбаева Д.Д. Роль искусственного интеллекта в цифровой модернизации экономики // Universum: экономика и юриспруденция: электрон. научн. журн. 2025. 6(128).
3. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Муравьев Д.С. Интеллектуальные системы управления качеством технологических процессов и оборудования наукоёмкого производства // Искусственный интеллект: теоретические аспекты, практическое применение: материалы Донецкого международного научного круглого стола, Донецк, 28 мая 2025 года. Донецк: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Институт проблем искусственного интеллекта", 2025. С. 163–165. EDN CRMCLC.
4. Бураков М. В., Коновалов А. С. Нечеткий супервизор ПИД-регулятора. Информационно-управляющие системы, 2018, № 5, с. 13–21. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.
5. Жилев Р.А. Постройка ПИД-регулятора с использованием нейронных сетей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 5 (109). С. 38–47. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-38-47

6. Чибисов А.В., Попов А.Г., Мозговой Н.А., Пиджаков В.А., Пиджаков В.А. Автоматическая настройка ПИД-регулятора с применением машинного обучения для обеспечения стабильной работы автономных электронных систем при термоциклировании // Труды МФТИ. 2024. №2 (62).
7. Воевода А.А., Романников Д.О. Метод синтеза регуляторов для многоканальных систем с использованием нейронных сетей. Вычислительные технологии. 2020; № 25(3): С. 111–118.
8. S. Kumar Krishnamoorthy, N. Das, P. Gudimetla and K. Emami, "Enhanced Speed Control for BLDC Motors Using WOA-Integrated PID Controller Optimization," in IEEE Access, vol. 12, pp. 162465-162475, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3480349.
9. R. -M. Motorga et al., "Adaptive FOPID Controller with AI Techniques for the Driving Motors Driving the Furnance Hearth," 2022 10th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), Belval, Luxembourg, 2022, pp. 122-128, doi: 10.1109/ICCMA56665.2022.10011614.
10. V. Revathi, Y. P. Rangaiyah, A. Dutt, A. A. Hameed, R. V. S. S. Nagini and D. K. Yadav, "Design of Small UAV Autopilot Systems Using Adaptive Controllers, PID Controllers, and AI," 2025 International Conference on Next Generation Communication & Information Processing (INCIP), Bangalore, India, 2025, pp. 20-25, doi: 10.1109/INCIP64058.2025.11020391.
11. R. Priyadarsini, A. Nayak and A. Kumar Barisal, "Frequency regulation of multi area interconnected system by using artificial intelligence based controller," 2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC), Gunupur, Odisha, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/iSSSC56467.2022.10051434.
12. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. – М.: Радиотехника, 2009. 392 с.
13. Огнев И.В., Борисов В.В., Сутула Н.А. Ассоциативные память, среды, системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2016. 420 с.: ил. ISBN 978-5-9912- 0602-9.
14. Степченков Ю.А., Морозов Н.В., Дьяченко Ю.Г., Хилько Д. В., Степченков Д.Ю., Шикунев Ю.И. Аппаратная реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов в рекуррентном потоковом процессоре на ПЛИС // Известия вузов. Электроника. 2022. №3.
15. Титенко Е.А., Щитов А.Н. Метод и однородное устройство матричного поиска простого и составного образцов // Т-Comm. 2021. №8.
16. Соловьев Д.С. Разработка метода, критерия и алгоритма оптимизации функционирования интеллектуальной системы управления с ассоциативной памятью // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2024. №1 (65).
17. Yuntao LIAO, Takuya KINOSHITA, Kazushige KOIWA, Toru YAMAMOTO, Design of a Performance-Driven CMAC PID Controller, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2017, Volume E100.A, Issue 12, Pages 2963-2971, Released on J-STAGE December 01, 2017, <https://doi.org/10.1587/transfun.E100.A.2963>.
18. Декин, С. В. Интеллектуализация системы управления технологическим процессом на базе ассоциативной нейронной сети CMAC / С. В. Декин, А. А. Евдокимов // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2021. – № 10-8(78). – С. 55-58. – EDN BZEUKU.
19. Moosavi, V. High-resolution soil moisture mapping using PSO-based optimized cerebellar model articulation controller (CMAC) / V. Moosavi, A. Karami, R. Aliramaee // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 857. P. 159493. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.159493. EDN MRNNLG.
20. CMAC-PID Composite Control for the Position Control of a Fully Variable Valve System / Q. Zhou, L. Liu, L. Jiang, Zh. Xu // International Journal of Automotive Technology. 2023. Vol. 24, No. 3. P. 681-691. DOI 10.1007/s12239-023-0057-y. EDN WXUCVM.
21. Two model-free schemes for solving kinematic tracking control of redundant manipulators using CMAC networks / N. Tan, Ch. Li, P. Yu, F. Ni // Applied Soft Computing. 2022. Vol. 126. P. 109267. DOI 10.1016/j.asoc.2022.109267. EDN RELEDY.

## References

1. Denike L.V. Foreign experience of digital transformation of enterprises through the use of artificial intelligence // Applied economic research. – 2025. – No. 2. – pp. 249-255. doi: 10.47576/2949-1908.2025.2.2.028.
2. Aidosova A.A., Ermekbayeva D.D. The role of artificial intelligence in the digital modernization of the economy // Universum: economics and jurisprudence: electron. scientific journal. 2025. 6(128).
3. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Muravyev D.S. Intelligent quality management systems for technological processes and equipment of high-tech production // Artificial intelligence: theoretical aspects, practical

- application: materials of the Donetsk International Scientific Round Table, Donetsk, May 28, 2025. Donetsk: Federal State Budgetary Scientific Institution "Institute of Artificial Intelligence Problems", 2025. pp. 163-165. – EDN CRMCLC.
4. Burakov M. V., Kononov A. C. Fuzzy supervisor of the PID controller. *Information and Control Systems*, 2018, No. 5, pp. 13-21. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.
  5. Zhilov R.A. Building a PID controller using neural networks // *Proceedings of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022. No. 5 (109). pp. 38-47. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-38-47
  6. Chibisov A.V., Popov A.G., Mozgovoy N.A., Pidzhakov V.A., Pidzhakov V.A. Automatic adjustment of the PID controller using machine learning to ensure stable operation of autonomous electronic systems during thermal cycling // *Proceedings of MIPT*. 2024. №2 (62).
  7. Voivode A.A., Romannikov D.O. Method of synthesis of regulators for multichannel systems using neural networks. *Computing technologies*. 2020; No. 25(3): pp. 111-118.
  8. S. Kumar Krishnamoorthy, N. Das, P. Gudimetla and K. Emami, "Enhanced Speed Control for BLDC Motors Using WOA-Integrated PID Controller Optimization," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 162465-162475, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3480349.
  9. R. -M. Motorga et al., "Adaptive FOPID Controller with AI Techniques for the Driving Motors Driving the Furnace Hearth," 2022 10th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), Belval, Luxembourg, 2022, pp. 122-128, doi: 10.1109/ICCMA56665.2022.10011614.
  10. V. Revathi, Y. P. Rangaiyah, A. Dutt, A. A. Hameed, R. V. S. S. S. Nagini and D. K. Yadav, "Design of Small UAV Autopilot Systems Using Adaptive Controllers, PID Controllers, and AI," 2025 International Conference on Next Generation Communication & Information Processing (INCIP), Bangalore, India, 2025, pp. 20-25, doi: 10.1109/INCIP64058.2025.11020391.
  11. R. Priyadarsini, A. Nayak and A. Kumar Barisal, "Frequency regulation of multi area interconnected system by using artificial intelligence-based controller" 2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC), Gunupur, Odisha, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/iSSSC56467.2022.10051434.
  12. Vasiliev V.I., Ilyasov B.G. *Intelligent control systems. Theory and practice: a textbook*. Moscow: Radio Engineering, 2009. 392 p.
  13. Ognev I.V., Borisov V.V., Sutula N.A. *Associative memory, environments, systems*. Moscow: Hotline-Telecom, 2016. 420 p.: ill. ISBN 978-5-9912- 0602-9.
  14. Stepchenkov Yu.A., Morozov N.V., Dyachenko Yu.G., Khilko D. V., Stepchenkov D.Yu., Shikunov Yu.I. Hardware implementation of digital signal processing algorithms in a recurrent FPGA stream processor // *Izvestiya vuzov. Electronics*. 2022. No.3.
  15. Titenko E.A., Shchitov A.N. Method and homogeneous device for matrix search of simple and composite samples // *T-Comm*. 2021. No. 8.
  16. Solovyov D.S. Development of a method, criterion and algorithm for optimizing the functioning of an intelligent control system with associative memory // *Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2024. №1 (65).
  17. Yuntao LIAO, Takuya KINOSHITA, Kazushige KOIWAI, Toru YAMAMOTO, Design of a Performance-Driven CMAC PID Controller, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2017, Volume E100.A, Issue 12, Pages 2963-2971, Released on J-STAGE December 01, 2017, <https://doi.org/10.1587/transfun.E100.A.2963>.
  18. Dekin, S. V. Intellectualization of the technological process control system based on the associative neural network SMAS / S. V. Dekin, A. A. Evdokimov // *Actual scientific research in the modern world*. – 2021. № 10-8(78). Pp. 55-58. EDN BZEUKU.
  19. Moosavi, V. High-resolution soil moisture mapping using PSO-based optimized cerebellar model articulation controller (CMAC) / V. Moosavi, A. Karami, R. Aliramaee // *Science of the Total Environment*. – 2023. – Vol. 857. – P. 159493. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.159493. – EDN MRNNLG.
  20. CMAC-PID Composite Control for the Position Control of a Fully Variable Valve System / Q. Zhou, L. Liu, L. Jiang, Zh. Xu // *International Journal of Automotive Technology*. – 2023. – Vol. 24, No. 3. – P. 681-691. – DOI 10.1007/s12239-023-0057-y. – EDN WXUCVM.
  21. Two model-free schemes for solving kinematic tracking control of redundant manipulators using CMAC networks / N. Tan, Ch. Li, P. Yu, F. Ni // *Applied Soft Computing*. – 2022. – Vol. 126. – P. 109267. – DOI 10.1016/j.asoc.2022.109267. – EDN RELEDY.
  22. Li, Z. Application of a Database-Driven PID Controller Using a CMAC Memory in a Hydraulic System/ Z. Li, K. Hiraoka, T. Yamamoto // *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, 2023. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/IECON51785.2023.10311646.

## RESUME

*P.V. Vasilev, O.V. Darintsev, R.A. Munasypov*

### *Application of an associative controller in the control circuit of a mechatronic module*

The CMAC (Cerebellar Model Articulation Controller) neural network was chosen as the basis for the associative controller due to its high performance, ease of computation, and good generalizing ability. To evaluate the effectiveness, a simulation was performed in the Matlab/Simulink environment using the example of a servo drive model (oscillating link). A comparative analysis was carried out for four different control system architectures: 1) the associative controller (AR) adjusts the output signal of the PID controller; 2) AR dynamically adjusts the coefficients of the PID controller; 3) a hybrid method combining the first two approaches; 4) AR completely replaces the PID controller.

The simulation showed that the standard PID controller is not able to fully compensate for damping in the system. Among the studied methods, the hybrid control system (method 3) demonstrated the best performance, which provided the highest performance and complete absence of overshoot in the transition process. Systems where the AP adjusted the output signal or coefficients (methods 1 and 2) also showed improvement, but with overshoot. The method with a complete replacement of the PID controller with an associative one turned out to be the least effective, which is probably due to insufficient training or suboptimal adjustment of its internal parameters.

The study confirmed the high efficiency of using hybrid control systems combining a classic PID controller and an associative controller based on CMAC to improve the quality of control of mechatronic modules. However, additional research is required for the practical implementation of the technology. It is necessary to develop guidelines for setting the quantization parameters of the CMAC network, as they critically affect the quality of regulation. Another promising area is the study of ways to introduce a priori knowledge about the control object into the learning model to accelerate the learning process and increase its robustness.

## РЕЗЮМЕ

*П.В. Васильев, О.В. Даринцев, Р.А. Мунасыпов*

### *Применение ассоциативного регулятора в контуре управления мехатронным модулем*

В качестве основы для ассоциативного регулятора была выбрана нейронная сеть СМАС (Cerebellar Model Articulation Controller) из-за ее высокого быстродействия, простоты вычислений и хорошей обобщающей способности. Для оценки эффективности было проведено моделирование в среде Matlab/Simulink на примере модели сервопривода (колебательное звено). Сравнительный анализ проводился для четырех различных архитектур системы управления: 1) ассоциативный регулятор (АР) корректирует выходной сигнал ПИД-регулятора; 2) АР динамически настраивает коэффициенты ПИД-регулятора; 3) гибридный метод, комбинирующий первые два подхода; 4) АР полностью заменяет ПИД-регулятор.

Моделирование показало, что стандартный ПИД-регулятор не способен полностью компенсировать демпфирование в системе. Среди исследованных методов наилучшие показатели продемонстрировала гибридная система управления (метод 3), которая обеспечила самое высокое быстродействие и полное отсутствие перерегулирования в переходном процессе. Системы, где АР корректировал выходной сигнал или

коэффициенты (методы 1 и 2), также показали улучшение, но с наличием перерегулирования. Наименее эффективным оказался метод с полной заменой ПИД-регулятора на ассоциативный, что, вероятно, связано с недостаточным объемом обучения или неоптимальной настройкой его внутренних параметров.

Исследование подтвердило высокую эффективность применения гибридных систем управления, сочетающих классический ПИД-регулятор и ассоциативный регулятор на базе СМАС, для повышения качества управления мехатронными модулями. Однако для практического внедрения технологии требуется проведение дополнительных исследований. Необходимо разработать методические указания по настройке параметров квантования сети СМАС, так как они критически влияют на качество регулирования. Также перспективным направлением является изучение способов внедрения априорных знаний об объекте управления в обучаемую модель для ускорения процесса обучения и повышения его робастности.

**Васильев П.В.** – аспирант, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, 283001, 450054, г. Уфа, Проспект Октября, 71, +7(937)-345-09-88, [pavel-vasilev-99@bk.ru](mailto:pavel-vasilev-99@bk.ru). *Область научных интересов:* робототехника, автоматическое управление, искусственный интеллект, моделирование технических систем.

**Даринцев О.В.** – д.т.н., доцент ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», кафедра Механики и цифрового проектирования, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, тел +7(908)-350-23-04, [oleg\\_sam@mail.ru](mailto:oleg_sam@mail.ru). *Область научных интересов:* робототехника, автоматическое управление, искусственный интеллект.

**Мунасыпов Р.А.** – д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», кафедра Автоматизации технологических процессов, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, тел +7(908)-350-21-76, [rust40@mail.ru](mailto:rust40@mail.ru). *Область научных интересов:* робототехника, автоматическое управление, архитектура систем управления, аппаратное обеспечение.

Статья поступила в редакцию 20.08.2025.