

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АДАПТАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

В.С. Смородин, В.А. Прохоренко

*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины*

## INTELLECTUAL ADAPTIVE CONTROL SYSTEM WITH FEEDBACK CONNECTIONS

V.S. Smorodin, V.A. Prokhorenko

*Francisk Skorina Gomel State University*

**Аннотация.** Предложен метод адаптации управления на основе многоуровневого сопряжения нейрорегуляторов и имитационных моделей технологических операций для адаптированного управления технологическим циклом с обратными связями по управлению. Изложены принципы создания, разработаны алгоритмы и представлена процедура построения интеллектуальной компьютерной системы адаптации управления нового поколения на основе открытых семантических технологий проектирования интеллектуальных систем (OSTIS).

**Ключевые слова:** интегрированная среда OSTIS, блок обработки событий, база знаний, контроллер системы управления, модели нейрорегуляторов, синтез обратных связей, компьютерная система адаптации.

**Для цитирования:** Смородин, В.С. Интеллектуальная система адаптации управления с обратными связями / В.С. Смородин, В.А. Прохоренко // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 1 (58). – С. 93–98. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_1\\_58\\_93](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_93). – EDN: CSOCYZ

**Abstract.** A method for control adaptation is proposed based on multi-level coupling of neuroregulators and simulation models of technological operations for adaptive control of the technological cycle with control feedback. A new-generation intellectual system based on open semantic technologies for intelligent systems (OSTIS) is described alongside with the principles of its creation, implemented algorithms and construction procedure.

**Keywords:** OSTIS integrated environment, event processing unit, knowledge base, control system, models of neuroregulators, feedback synthesis, computer adaptation system.

**For citation:** Smorodin, V.S. Intellectual adaptive control system with feedback connections / V.S. Smorodin, V.A. Prokhorenko // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 1 (58). – P. 93–98. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_1\\_58\\_93](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_93) (in Russian). – EDN: CSOCYZ

### Введение

Эффективность функционирования создаваемых автоматизированных систем управления реальными объектами в значительной степени зависит от качества и адекватности математических моделей объекта исследования, которые используются на стадии проектирования системы управления [1]. При этом нелинейность исследуемых процессов и нестационарность характеристик поведения управляемых параметров моделируемых объектов, как и отсутствие достаточной полной информации об условиях изменения текущих параметров в режиме реального времени, затрудняют построение адекватных математических моделей, требуют уточнения параметров состояния автоматизированной системы управления и выполнения динамической корректировки алгоритмов синтеза управляющих воздействий в режиме реального времени [2].

Вместе с тем ориентация технологий моделирования управляемыми производственными системами на способы формализации вероятностных

технологических процессов существенно ограничивает возможности решения фундаментальных вопросов, связанных с синтезом оптимальной структуры объектов исследования и стабилизацией параметров функционирования технологических операций (ТО).

Наиболее существенными научными результатами в области исследования функционирования автоматизированных производственных систем и систем управления по этой причине являются разработка эффективных алгоритмов адаптивного управления автоматизированными производствами на основе новых методов нейросетевого моделирования объекта исследования [3].

В рамках предложенного авторами настоящей статьи подхода к многоуровневому моделированию объектов исследования представлен способ построения интеллектуальной системы адаптации управления для автоматизированных производственных систем, при наличии внешних управляющих воздействий и случайных возмущений, с обратными связями по управлению.

## 1 Проблемы управления технологическими системами с вероятностными параметрами технологических операций

Проблема определения оптимальных параметров управления технологическими системами в режиме реального времени является актуальной задачей управления производством в условиях наличия внешних управляющих воздействий при выполнении технологических операций и случайных возмущений, связанных с конструктивными и надежностными характеристиками функционирования оборудования.

В настоящей работе предлагается решение задачи адаптации управления автоматизированной технологической системой на основе создания интеллектуальной компьютерной системы нового поколения, способной обеспечить стабилизацию параметров технологического цикла при наличии внешних возмущений в режиме реального времени.

Создание интеллектуальной компьютерной системы нового поколения предполагает следующие этапы разработки:

- методики формализации технологического процесса производства на основе использования онтологии предметной области «технологические процессы производства с вероятностными характеристиками»;
- схемы функционирования гибридной интеллектуальной компьютерной системы, обеспечивающей возможность семантической совместимости и совместного использования с другими решениями на промышленных предприятиях в контексте концепции Industry 4.0;
- алгоритмов синтеза обратных связей по управлению на основе применения нейрорегуляторов;
- метода адаптивного управления системами автоматизированного производства при наличии внешних управляющих воздействий.
- программных средств поддержки интеллектуальных систем на базе алгоритмов адаптации и предложенного метода в режиме реального времени.

## 2 Формализация компонентов интеллектуальной компьютерной системы адаптивного управления

Оптимизация параметров технологического цикла автоматизированного производства требует разработки эффективных алгоритмов адаптации управления и методов построения нейрорегуляторов, стабилизирующих параметры технологических операций с учетом текущей информации о функционировании объекта исследования, случайных возмущениях и внешних управляющих воздействиях, которые фиксируются в процессе работы контроллера системы управления и хранятся на стойке управления автоматизированной системы управления (АСУ) технологическим процессом (ТП).

Структурная блок-схема взаимодействия компонентов интеллектуальной системы адаптации управления представлена на рисунке 2.1. Формальное описание объекта управления проводится на основе использования онтологии предметной области «вероятностные технологические процессы производства». При реализации данного подхода используются формализованные знания для описания технологических процессов с вероятностными характеристиками технологических операций и моделирования технологических процессов.

Применяемая формализация базируется на научных разработках авторов в области имитационного моделирования сложных технических систем и подразумевает использование интегрированных в экосистему OSTIS библиотек агрегатов-имитаторов технологических операций на принципах семантической совместимости [4].

При высокой степени нестационарности характеристик технологических операций объекта управления для построения многоуровневых математических моделей применяются имитационные модели, нейрорегуляторы и многошаговые алгоритмы обучения, обладающие лучшими динамическими свойствами.

Как следует из схемы взаимодействия компонентов системы, формирование обратных связей по управлению сводится к поиску адаптации управления, удовлетворяющей заданным пользователем критериям, осуществляемому по принципу замкнутого контура, в котором на базе собранных статистик функционирования АСУ ТП и коллекции имитационных моделей производится построение моделей нейрорегуляторов. Система принятия решений, функционирующая с использованием построенных нейрорегуляторов, в реальном времени осуществляет формирование корректирующих воздействий на контроллер АСУ ТП.

Внедрение концепции Industry 4.0 на промышленных предприятиях сопровождается созданием цифрового двойника предприятия и построением единой онтологической модели производства, которая является ядром комплексного информационного обслуживания предприятия. Одним из этапов построения модели цифрового двойника предприятия является встраивание данных о низких уровнях производства, таких как технологические процессы производства и оборудование [2].

Для того чтобы обеспечить возможность применения интеллектуальной системы адаптации управления, знания о технологическом процессе предприятия должны быть записаны на формальном языке представления знаний. Источниками таких знаний могут служить существующие описания работы предприятий в рамках принятых международных стандартов (таких как ISA 5.1, ISA-88) [5]. Так, в рамках стандарта ISA-88 технологический цикл называется процедурой

(procedure), а технологическая операция – фазой (phase).

При наличии известного состава устройств оборудования и ТО технологического цикла, а также статистических данных об их функционировании, возможно перейти к имитационному моделированию технологического процесса путем замены в вероятностном сетевом графике (ВСГР), описывающем цикл, устройств оборудования на агрегаты-имитаторы функционирования устройств оборудования общего и индивидуального пользования, а сами операции на ИМ ВСГР представить в имитационной модели набором агрегатов-имитаторов событий и агрегатов-имитаторов технологических операций [1]. На базе

имитационных моделей технологического цикла, базирующихся на актуальных статистиках функционирования, возможно построение нейрорегуляторов, осуществляющих коррекции управляющих воздействий контроллера.

При таком подходе адаптивной системе управления требуется минимальный объем исходной информации о поступающем сигнале, а описанная формализация дает возможность синтеза баз знаний о промышленном предприятии и его технологических процессах на основе онтологии предметной области в рамках концепции Industry 4.0 автоматизации промышленных предприятий.

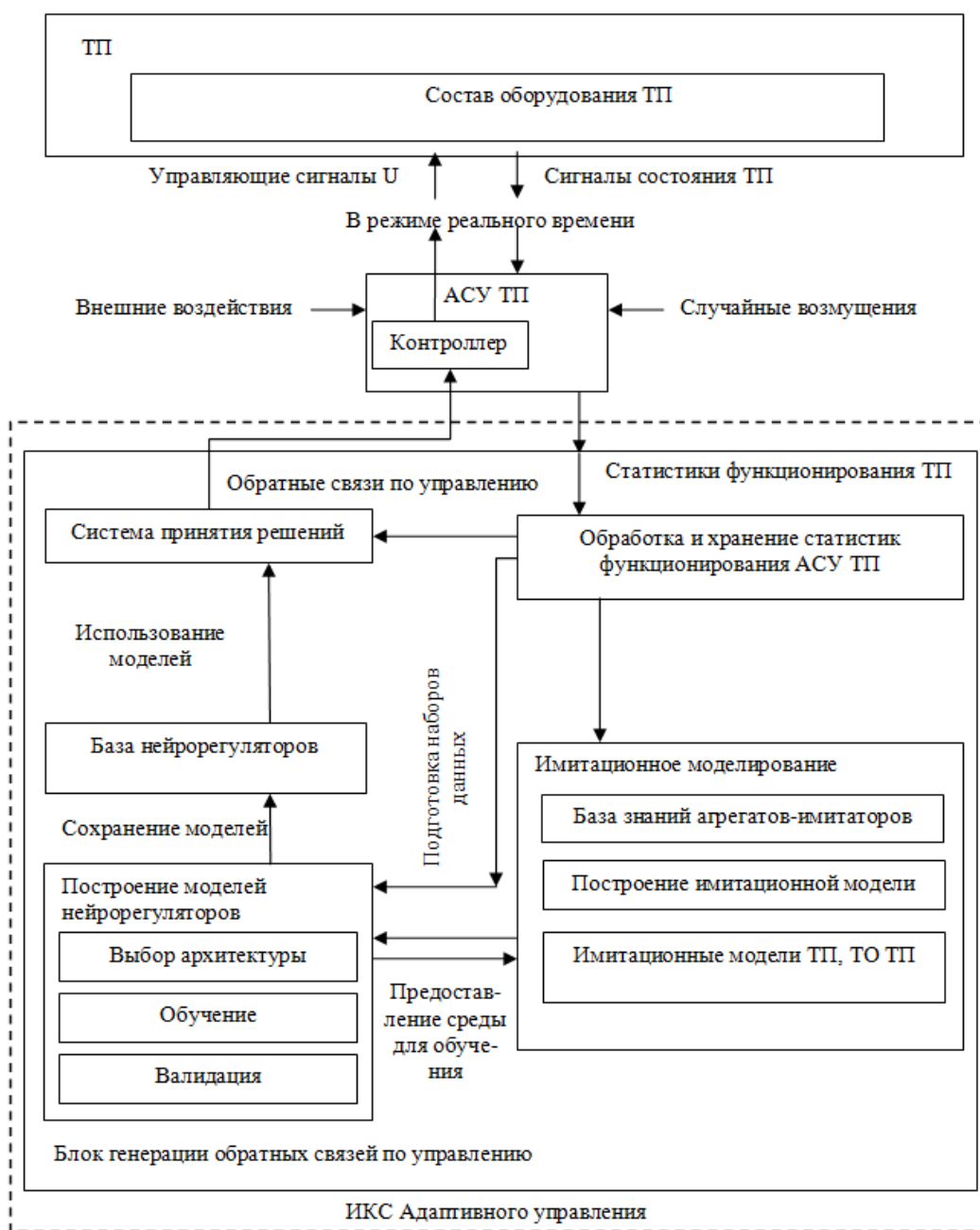


Рисунок 2.1 – Схема взаимодействия компонентов системы адаптивного управления

### 3 Методика построения гибридной интеллектуальной системы адаптации управления

Основу создания гибридной интеллектуальной системы адаптации управления составляет идея разработки многоуровневых имитационных моделей и математических моделей нейросетевых регуляторов для решения задач оптимизации управления, построения алгоритмов синтеза обратных связей по управлению технологическим циклом в зависимости от изменения параметров функционирования объекта управления.

Гибридная интеллектуальная система адаптации управления включает в себя следующие компоненты: 1) подсистему обработки и хранения статистик функционирования АСУ ТП; 2) подсистему имитационного моделирования; 3) подсистему построения моделей нейрорегуляторов; 4) базу построенных нейрорегуляторов; 5) подсистему принятия решений.

Статистики функционирования ТП включают в себя значения сигналов, описывающих состояние устройств оборудования ТП, а также значения управляющих сигналов. Подсистема обработки и хранения статистик отвечает за сохранение исторических значений данных сигналов.

Подсистема имитационного моделирования позволяет строить и выполнять имитационные модели ТП и его системы управления на основе онтологической модели производства и описанной формализации. В качестве исходных данных используются сохраненные подсистемой обработки и хранения статистик функционирования исторические значения. На их основании строятся функции распределения для ресурсов, потребляемых технологическими операциями и надежных характеристик оборудования, сохраняемые в базу знаний. Агрегаты-имитаторы функционирования устройств оборудования общего и индивидуального пользования являются основой для создания ИМ ТП.

Подсистема построения моделей нейрорегуляторов реализует алгоритмы нейросетевого моделирования для поиска оптимальной стратегии адаптации управления. При условии наличия известных целевых значений сигналов коррекций (например, в случае ручной разметки данных, либо наличия существующего качественно регулятора контроллера системы), нейрорегулятор может быть построен с использованием собранных статистик функционирования ТП и АСУ [3], [6]. В случае отсутствия прототипа регулятора применяются алгоритмы поиска оптимальной политики выбора действий в среде, построенной на базе подсистемы имитационного моделирования ТП [4]. Осуществляется подбор оптимальной архитектуры нейронной сети и валидация модели после обучения. Модели нейрорегуляторов сохраняются в базу для дальнейшего использования либо дообучения с учетом обновленных статистик.

Подсистема принятия решений осуществляет формирование корректирующих воздействий на контроллер АСУ ТП посредством построенных моделей нейрорегуляторов.

При условии наличия соответствующих средств программно-аппаратного сопряжения, возможна реализация адаптации управления в автоматизированном режиме, либо формирование рекомендательной системы, используемой персоналом, обслуживающим технологический цикл.

Таким образом, при решении задачи стабилизации параметров технологических операций в режиме реального времени использованы многоуровневые математические модели, включая нейросетевые и имитационные, а также реализована гибридная интеллектуальная компьютерная система адаптивного управления нового поколения, созданная на основе открытых семантических технологий проектирования интеллектуальных систем [2].

### 4 Алгоритмы построения обратных связей по управлению компьютерной системы адаптивного управления

При решении задач адаптации реализованы следующие возможности нейросетевого моделирования для построения обратных связей по управлению: 1) нейросетевое моделирование динамики существующего регулятора; 2) нейросетевой синтез оптимальной стратегии адаптации управления; 3) поиск оптимальной структуры нейронной сети.

Нейросетевое моделирование существующего регулятора эффективно в тех случаях, когда существует качественный регулятор контроллера системы, либо понятны правила его синтеза. Нейронная сеть при этом выступает в роли аппроксиматора его функции и обучается на выборке известных пар данных вида «стимул-реакция» моделировать воздействия нейрорегулятора на АСУ ТП [3]. На рисунке 4.1 показана схема алгоритма построения и валидации подражающего нейрорегулятора.

Нейросетевой синтез оптимальной стратегии адаптации управления осуществляется методами обучения с подкреплением в условиях задания пользователем системы критериев оценки качества политики выбора действий нейрорегулятором, которые применяются для построения целевой функции алгоритма [4]. Алгоритмы такого типа могут содержать в себе элементы исследования пространства решений [7], что делает их применение перспективным в условиях решения трудноформализуемой и неоднозначной задачи выбора оптимальной стратегии адаптации. В качестве среды для обучения и валидации нейрорегуляторов используется имитационная модель ТП. На рисунке 4.2 показаны схема алгоритма построения нейрорегулятора при синтезе оптимальной стратегии адаптации управления.

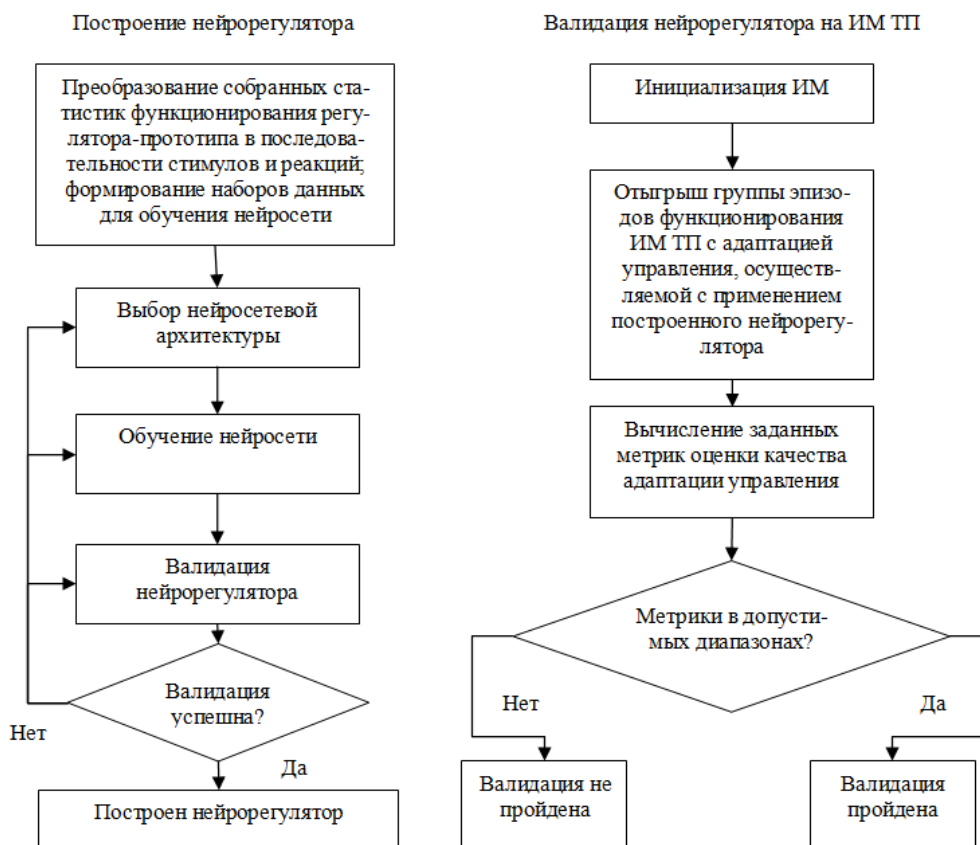


Рисунок 4.1 – Схемы алгоритмов построения (слева) и валидации подражающего нейрорегулятора при моделировании динамики существующего регулятора с использованием ИМ ТП

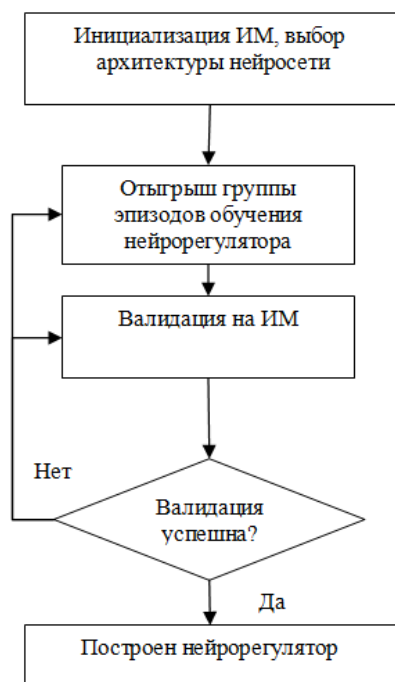


Рисунок 4.2 – Общая схема алгоритма построения нейрорегулятора с использованием обучения с подкреплением

На рисунке 4.3 показан пример использования синтеза оптимальной стратегии адаптации управления ТП в соответствии с выбранным пользователем критерием качества адаптации (снижение затрат).

При решении задач методами нейросетевого моделирования важным вопросом является выбор архитектуры нейронной сети с адекватной сложностью для решения задачи. Реализованы [8] алгоритмы автоматического подбора оптимальной архитектуры нейронной сети с использованием простого перебора и генетического алгоритма на основе алгоритма NEAT [9].

Описанные алгоритмы нейросетевого моделирования позволяют решать задачи адаптации управления и стабилизации параметров функционирования ТП в соответствии с заданными пользователем системы критериями.

### Заключение

В работе предложен способ построения интеллектуальной компьютерной системы нового поколения для адаптации управления технологическим циклом автоматизированного производства с обратными связями по управлению при наличии случайных возмущений и внешних управляющих воздействий в интегрированной среде открытых семантических технологий проектирования интеллектуальных систем OSTIS.

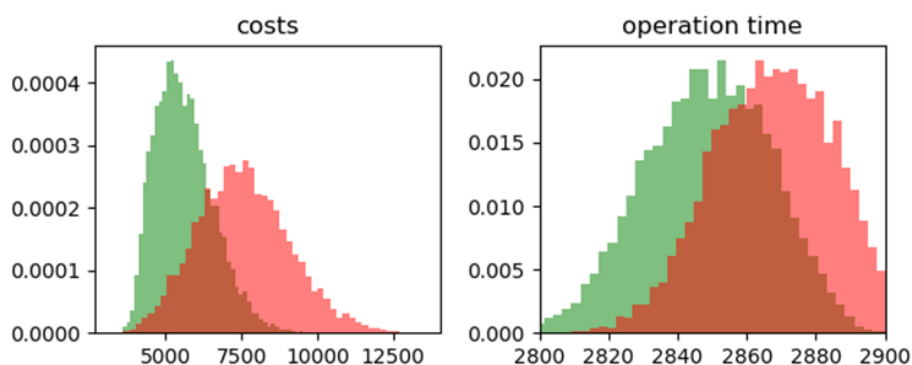


Рисунок 4.3 – Гистограммы распределений параметров ТП (затрат – слева и времени нормальной работы цикла – справа) при имитации функционирования ТП с адаптацией управления (зеленый) и без нее (красный).

Обратные связи по управлению формируются на основании поступающей информации о работе оборудования при изменении стандартных параметров физического контроллера автоматизированной системы управления для обработки событий возникновения случайных возмущений и внешних управляющих воздействий в режиме реального времени. Реализованы фундаментальные конструкции метаязыка OSTIS построения базы знаний для формализации вероятностных технологических процессов производства различной архитектуры с изменяющейся топологией.

При решении задачи синтеза оптимальной структуры технологической системы с произвольной организацией технологического процесса производства и стабилизации параметров технологических операций реализованы алгоритмы построения обратных связей по управлению на основе генетических алгоритмов и моделей искусственных нейронных сетей. Адаптация управления осуществляется в рамках решения многокритериальной задачи оценки качества выполнения технологического процесса при минимизации затрат на выполнение замкнутого технологического цикла производства на основе эффективных нейросетевых алгоритмов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смородин, В.С. Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства: монография / В.С. Смородин, И.В. Максимей; М-во образования РБ, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 369 с.
2. Автоматизация производственной деятельности в рамках Экосистемы OSTIS // Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения: монография / В.А. Прохоренко [и др.]; под общ. ред. В.В. Голенкова. – Минск, БГУИР 2023. – Гл. 7.7. – С. 805–830.

3. Smorodin, V. Application of Neuro-Controller Models for Adaptive Control / V. Smorodin, V. Prokhorenko // Recent Developments in Data Science and Intelligent Analysis of Information. ICDSIAI 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing; ed. O.Chertov [et al]. – Springer, Cham, 2018. – Vol. 836, iss. 7. – P. 30–38.

4. Smorodin, V. Software-Technological Complex For Adaptive Control Of A Production Cycle Of Robotic Manufacturing / V. Smorodin, V. Prokhorenko // Open semantic technologies for intelligent systems. – 2022. – iss. 6 – P. 401–404.

5. Adaptive Control System for Technological Process within OSTIS Ecosystem / D. Ivaniuk, V. Taberko, V. Smorodin, V. Prokhorenko // Open semantic technologies for intelligent systems. – 2023. – iss. 7. – P. 291–298.

6. Smorodin, V. Control Of A Technological Cycle Of Production Process Based On A Neuro-Controller Model / V. Smorodin, V. Prokhorenko // Open semantic technologies for intelligent systems – 2019. – iss. 3 – P. 251–256.

7. Exploration in deep reinforcement learning: A survey / P. Ladosz, L. Weng, M. Kim, H. Oh // Information Fusion. – 2022. – № 85. – P. 1–22.

8. Никитюк, Ю.В. Многокритериальная оптимизация параметров лазерной резки кварцевого стекла с применением нейросетевого моделирования и генетического алгоритма / Ю.В. Никитюк, В.А. Прохоренко, А.И. Кулыба // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3 (56). – С. 26–31.

9. Stanley, K.O. Evolving Neural Networks Through Augmenting Topologies / K.O. Stanley, R. Miikkulainen // Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 10 (2). – P. 99–127.

Поступила в редакцию 22.12.2023.

#### Информация об авторах

Смородин Виктор Сергеевич – д.т.н., профессор  
 Прохоренко Владислав Александрович – старший преподаватель