

УДК 004.896

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_83

EDN: ZEKWIK

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ

В.С. Смородин, В.А. Прохоренко

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

STABILIZATION OF TECHNOLOGICAL CYCLE PARAMETERS WHEN CONSTRUCTING FEEDBACK CONTROL

V.S. Smorodin, V.A. Prokhorenko

Francisk Skorina Gomel State University

Аннотация. Предлагается подход к решению задачи стабилизации параметров функционирования технологического цикла на основе использования нейросетевых методов моделирования управляемых параметров технологических операций. Рассмотрены современные подходы к реализации решений подобных задач, показана процедура создания гибридной интеллектуальной системы адаптивного управления. Предложенный подход позволяет автоматизировать процессы создания и использования гибридных интеллектуальных компьютерных систем при реализации инновационных решений в сфере управления транспортными потоками, автоматизации наиболее развитых отраслей промышленности и сельского хозяйства.

Ключевые слова: *нейросетевые методы, стабилизация параметров, адаптивное управление, модели нейрорегуляторов.*

Для цитирования: Смородин, В.С. Стабилизация параметров технологического цикла при построении обратных связей по управлению / В.С. Смородин, В.А. Прохоренко // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 2 (55). – С. 83–88. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_83. – EDN: ZEKWIK

Abstract. An approach for solving problem of stabilization of technological cycle operation parameters is proposed. The approach is based on applying the methods of neural network modeling of controlled parameters of technological operations. Modern approaches for solving such problems are considered; the procedure of hybrid intellectual adaptive control system creation is demonstrated. The proposed approach allows automating processes of development and operation of hybrid intellectual computer systems when implementing innovative solutions in the field of traffic flows control, automation in the most advanced branches of industry and agriculture.

Keywords: *neural network methods, parameters stabilization, adaptive control, neuroregulator models.*

For citation: Smorodin, V.S. Stabilization of technological cycle parameters when constructing feedback control / V.S. Smorodin, V.A. Prokhorenko // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 2 (55). – P. 83–88. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_83 (in Russian). – EDN: ZEKWIK

Введение

Интеллектуальные информационные технологии в настоящее время представляют собой одну из наиболее перспективных и быстро развивающихся научных областей прикладной математики. Основное внимание при этом уделяется вопросам дальнейшего развития прикладных научных исследований производственной направленности, которые основываются на использовании моделей искусственных нейронных сетей и разработке нейросетевых методов для решения задач оптимизации управления автоматизированными технологическими комплексами.

Необходимо подчеркнуть, что современные достижения в области цифровизации технологических процессов и цифровой трансформации производственной деятельности обеспечивает мощный импульс для интенсивного развития современных технологий, включая продвижение искусственного интеллекта и нейросетевого

моделирования в области выполнения актуальных разработок и создания интеллектуальных компьютерных систем оптимизации управления нового поколения.

На современном этапе развития автоматизированных систем управления на передний план выходит совершенствование проектирования и проектного моделирования устройств управления технологическим циклом производства, разработка гибких алгоритмов учета дестабилизирующих факторов в режиме реального времени для систем принятия управляющих решений, рекомендательных и экспертных систем.

Поэтому заслуживает особого внимания проблема разработки интеллектуальных систем управления, способных обеспечить существенное снижение чувствительности параметров технологического цикла к воздействию дестабилизирующих факторов, в том числе случайных внешних возмущений и управляющих воздействий.

Вопросы стабилизации параметров технологического процесса при управлении автоматизированным производством связаны, как известно, с проблемой адаптации управления на подобные дестабилизирующие факторы.

В связи с происходящим в настоящее время переходом от теоретических разработок к конкретному практическому применению систем с искусственным интеллектом, а также развитием фундаментальных и прикладных аспектов их использования, разработка интеллектуальных компьютерных систем адаптации управления и построение алгоритмов обратных связей, стабилизирующих параметры технологического цикла в режиме реального времени, является актуальной.

1 Стабилизация параметров функционирования технологического цикла

Одной из основных задач оперативного управления технологическим циклом (ТЦ) производства в режиме реального времени является автоматический контроль параметров технологического процесса (ТП) с целью выработки управляющих воздействий, предотвращающих переход системы в критическое состояние. Таким является выход управляемых параметров технологической операции за пределы допустимых значений, а также сбои и отказы используемого оборудования.

Одной из основных причин неустойчивости управляемых параметров технологического цикла является наличие случайных внешних возмущений и управляющих воздействий в процессе его реализации, в связи с чем возникает задача разделения множества состояний технологических операций на состояния, характеризующие нормальное течение процесса, и состояния, требующие вмешательства для стабилизации «возмущенных» состояний.

Для стабилизации переменных параметров управления, зависящих от состояния оборудования в условиях случайных возмущений, необходимо автоматизировать их регулирование, обеспечить расчет и построение оптимального графика проведения профилактических работ. В зависимости от методов стабилизации параметров и их качественных характеристик могут быть использованы различные подходы к решению задачи стабилизации состояний технологического цикла.

Основные способы стабилизации параметров технологических операций с точки зрения обеспечения эффективного решения реальных производственных задач управления широко известны [1]. Однако рост научных исследований в области использования нейронных сетей при управлении технологическим процессом производства требует новых решений, объединяющих существующие современные подходы к решению практических задач стабилизации параметров и адаптации управления.

2 Особенности стабилизации параметров функционирования технологических операций

Соблюдение заданных технологических параметров функционирования производственного процесса является основой выпуска качественно готового продукта, в связи с чем возникает задача стабилизации параметров функционирования технологических операций, то есть определения состояний, в котором характеристики технологических операций, образующих данный процесс, остаются нечувствительными к воздействию дестабилизирующих факторов.

Направление конвергенции работ в области создания интеллектуальных систем в настоящее время требует разработки соответствующего программного обеспечения с элементами когнитивных способностей на основе семантически совместимых технологий искусственного интеллекта. Концепция Industry 4.0 предполагает построение единой онтологической модели предприятия, включающей в себя описание оборудования и технологических процессов производства. Существующие интеллектуальные технологии предоставляют средства для построения таких моделей, обеспечивают возможность построения «цифрового двойника» предприятия на основе формализованного описания соответствующей предметной области. Полученная онтологическая модель, таким образом, может выступать основой интеграции востребованных интеллектуальных решений по автоматизации и информационному обеспечению производственной деятельности.

Рассматривается новый подход к построению системы адаптивного управления технологическим процессом производства в виде реализации алгоритмов соответствующих регуляторов на основе онтологии предметной области «технологические процессы производства с вероятностными характеристиками».

В основу функционирования предлагаемой системы положено применение нейрорегуляторов. Формализация контура управления и математические модели объекта исследования основываются на результатах научных разработок авторов в области имитационного моделирования сложных технических систем [2].

Такая реализация позволяет обеспечить возможность интеграции предлагаемого решения с другими разработками, программными средствами предприятия для обеспечения построения интеллектуальных систем автоматизированного управления, рекомендательных систем и систем поддержки принятия решений, систем информационного обеспечения персонала предприятия.

3 Стабилизация управляемых параметров на основе нейросетевых методов

При осуществлении процессов управления технологическим циклом производства часто

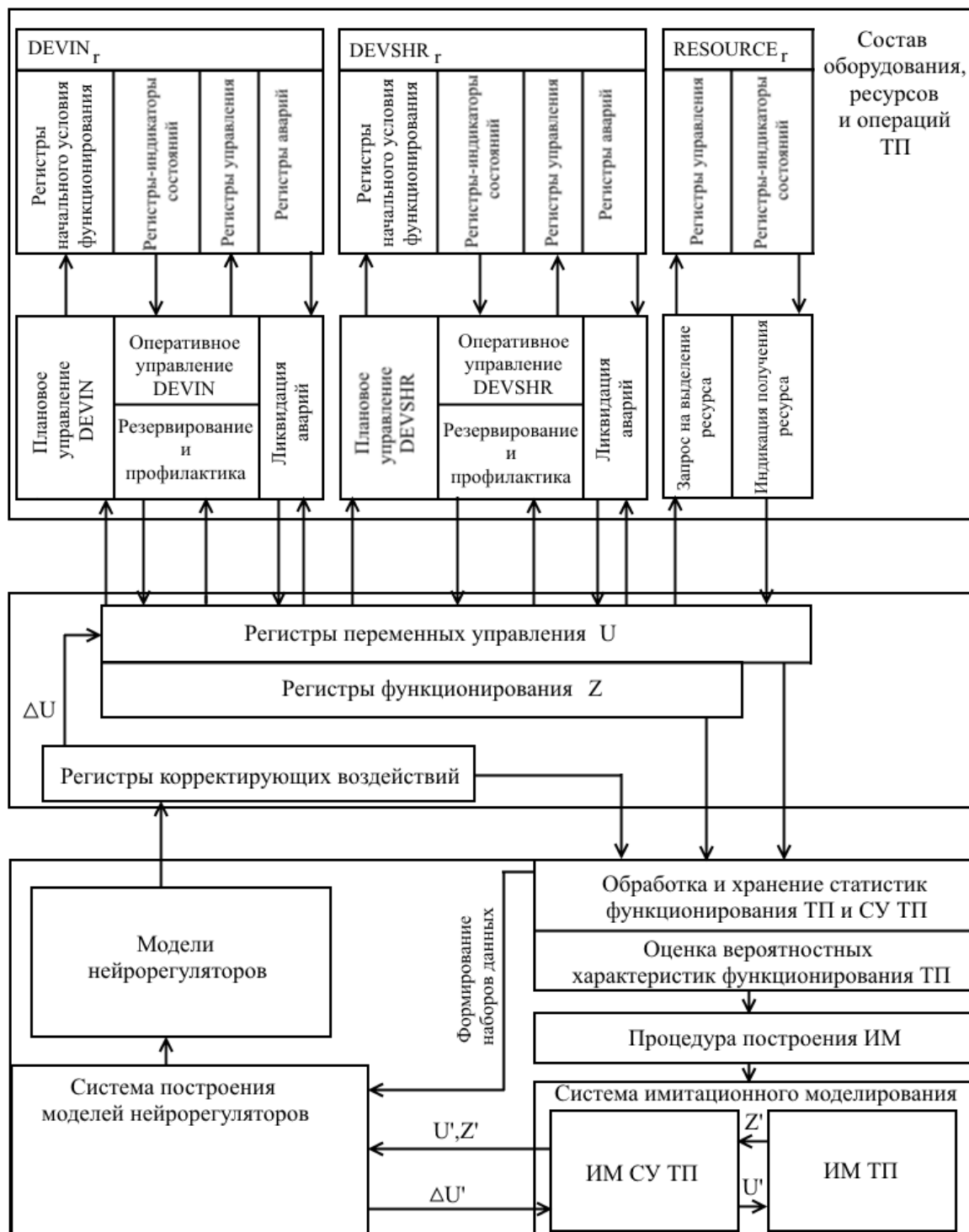


Рисунок 3.1 – Схема взаимодействия компонентов компьютерной системы адаптивного управления

возникает потребность комплексного учета многообразия факторов воздействия на технологический процесс случайных сбоев используемого оборудования, а также воздействий внешней среды, включая и человеческий фактор. В этой связи является актуальной реализация адаптивного управления процессом производства (с обратными связями по управлению) в составе технических средств управления технологическим

циклом и программного обеспечения адаптации процесса управления на случайные внешние возмущения в ходе его реализации. Адаптивное управление технологическим циклом понимается как способность системы управления адекватно реагировать на внешние возмущения и штатные управляющие воздействия изменением соответствующих параметров управления в процессе функционирования системы. Под оптимальными

управлением понимается формализованная нейронной сетью структура адаптивного управления технологическим циклом, построенная в опорных узлах вероятностной сетевой графовой структуры (СГС) или модели полумарковской сети (ПМС) в рамках заданного критерия качества.

Формализация процесса управления технологическим циклом производства с вероятностными характеристиками основана на использовании в структуре контура управления специальных сигналов и стандартных элементов, которые в дальнейшем участвуют в формировании регулирующих воздействий непосредственно на используемое оборудование либо выдачи рекомендаций по выполнению определенных действий операторами-людьми. Данные, регулирующие воздействия (исполнение данных рекомендаций) могут приводить к изменениям параметров функционирования системы. Воздействия формируются в моменты изменения состояния ТЦ. Необходимость оперативного изменения параметров функционирования системы возникает вследствие наличия внешних факторов; человеческого фактора, существования возможности возникновения отказов оборудования и аварий. Система управления ТП связана с оборудованием ТП посредством средств программно-аппаратного сопряжения и в процессе реализации ТП получает сигналы о его состоянии. Изменение состояния ТП приводит к изменению состояния системы управления. Для построения контроллера системы управления могут быть использованы статистические данные функционирования ТЦ, собранные с применением соответствующих средств аппаратно-программного сопряжения, либо может быть осуществлено использование имитационного моделирования функционирования ТЦ на базе модели ТЦ, построенной в соответствии с изложенной онтологией для технологических процессов с вероятностной природой (ВТП).

На рисунке 3.1 показана структура связей системы управления с обратными связями при наличии регуляторов, которая стабилизирует параметры управляемых переменных в заданных диапазонах значений.

Регуляторы системы адаптивного управления строятся на основе нейросетевых методов. Построение моделей нейрорегуляторов осуществляется на базе алгоритмов, использующих собранные статистики функционирования ТП и его системы управления, а также систему имитационного моделирования ТП и СУ ТП.

Современный анализ состояния разработок в области исследования управляемых производственных систем показывает, что проблема определения параметров функционирования подобных объектов исследования в режиме реального времени возникает прежде всего при необходимости производства сложных технических

изделий, требующих точности их изготовления и высокой производительности труда.

При этом в рамках решения многокритериальной задачи оптимизации управления предъявляются строгие требования к качеству и алгоритму выполнения производственного процесса, минимизации влияния человеческого фактора на качество реализации технологического цикла производства, исключению возникновения аварийных ситуаций техногенного характера. Подобная ситуация характерна для роботизированных производственных систем, работающих под управлением программно-аппаратного контроллера, который администрирует работу системы управления технологическим циклом в соответствии с заложенными программами.

4 Разработка моделей нейрорегуляторов для решения задач адаптивного управления

В области нейросетевых методов предложены различные схемы решения задач управления динамическими объектами [3]–[5]. Среди них можно отметить схемы управления с эталонной моделью, подразумевающие построение нейрорегулятора на базе существующего прототипа; схемы инверсного управления, в рамках которых нейрорегулятор обучается моделированию инверсной динамики объекта управления; адаптивно-критические схемы, в рамках которых нейрорегулятор обучается на основе некоторого функционала оценки качества управления.

Состояния объекта управления (системы управления ТП) описываются набором переменных управления $\{U\}$ и набором переменных $\{Z\}$, описывающих состояния ВТП. При рассмотрении задач адаптации управления возможен переход к геометрической интерпретации: осуществление адаптации управления приводит к построению некоторой траектории в фазовом пространстве состояний системы управления. Таким образом можно осуществить переход к задаче поиска оптимальной в некотором (геометрическом) смысле траектории [6] с целью оптимизации политики выбора адаптации управления. На рисунке 4.1 показан пример фазового пространства (фазовой плоскости) системы управления, характеризуемой сигналом управления U_1 и состоянием объекта управления Z_1 , с реализацией трех траекторий во время осуществления управления.

С целью обеспечения совместимости и возможности интеграции разработанного метода с другими средствами, может быть использована формализация контура управления на базе многоагентного подхода в рамках применения современных технологий [1].

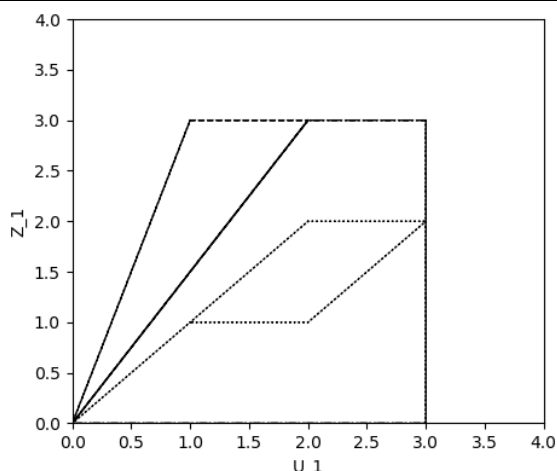


Рисунок 4.1 – Пример траекторий на фазовой плоскости состояний системы управления

5 Примеры реализации систем адаптации управления

Примером решения задачи адаптации управления технологическим процессом может служить задача поиска оптимальной стратегии обслуживания устройств оборудования ТП [7]. Построение нейрорегулятора происходит с использованием адаптивно-критической схемы.

В качестве среды для обучения модели нейрорегулятора в данном случае задействуется система имитационного моделирования, которая позволяет на основании собранных статистик функционирования ТП и его системы управления построить соответствующие имитационные модели.

Для моделирования функционирования устройств оборудования ТП используются следующие характеристики [1]:

- распределение времени $\Phi_{1r}(\tau_{Nor})$ безотказного функционирования устройства r ;
- распределение времени $\Phi_{2r}(\tau_{RO})$ восстановления работоспособности после простого отказа устройства r ;
- распределение времени $\Phi_{3r}(\tau_{em1})$ ликвидации аварии 1-го типа на устройстве r ;
- распределение времени $\Phi_{3r}(\tau_{em2})$ ликвидации аварии 2-го типа на устройстве r ;
- распределение стоимости $\Phi_{4r}(C_{em1})$ ликвидации аварии 1-го типа на устройстве r ;
- распределение стоимости $\Phi_{6r}(C_{em2})$ ликвидации аварии 2-го типа на устройстве r ;
- вероятность (P_{em1}) возникновения аварий 1-го типа при отказе устройства;
- вероятность (P_{em2}) возникновения аварий 2-го типа при отказе устройства.

Процедура построения нейрорегулятора, осуществляющего воздействия на систему управления, которые приводят к принятию решений о профилактике устройств оборудования

ТП, базируется на алгоритмах обучения с подкреплением (таких как Q-learning [8] и policy gradient [7]). Поскольку при решении задачи требуется принять во внимание динамическую природу объекта управления, в качестве регулятора используется рекуррентная нейронная сеть.

При реализации алгоритмов обучения с подкреплением на базе функционирования имитационных моделей ТП и системы управления нейрорегулятор получает доступ к наблюдению регистров функционирования ($\{Z'\}$) и регистров переменных управления ($\{U'\}$), формируя на основе их анализа корректирующие воздействия ($\{\Delta U'\}$). Целевая функция алгоритмов обучения с подкреплением (функция вознаграждения) включает в себя стабилизируемые параметры (метрики) функционирования ТП, такие как время непрерывной работы цикла (R_{nop}), суммарный объём затрат на обслуживание и ликвидацию отказов и аварий оборудования (R_{cost}), суммарное число отказов оборудования (R_f), в том числе, приведшее к аварии (R_{fe}), суммарное число профилактик за цикл (R_{rep}). В соответствии с требованиями, предъявляемыми к процессу оптимизации адаптации управления ТП, строится целевая функция на базе этих компонентов:

$$R = \alpha_1 R_{nop} + \alpha_2 R_{cost} + \alpha_3 R_f + \alpha_4 R_{fe} + \alpha_5 R_{rep}. \quad (5.1)$$

В качестве примера решения задачи адаптивного управления на базе схемы применения нейрорегуляторов можно также рассмотреть задачу стабилизации температуры в процессе функционирования пластинчатой пастеризационно-охладительной установки (ПОУ) [9]. Для решения задач управления ПОУ применяются пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) контроллеры.

Построение нейрорегулятора при этом происходит в рамках схемы инверсного управления. В качестве архитектуры нейронной сети используется трехслойный персептрон.

Нейрорегулятор в данном случае используется в качестве настройщика ПИД и осуществляет стабилизационные корректирующие воздействия, которые в соответствии со схемой управления ПОУ представлены пропорциональным (K_p), интегральным (K_i) и дифференциальным (K_d) коэффициентами, формируемыми на основании наблюдений за сигналами управления и состояниями управляемого объекта.

Обучение может быть осуществлено на основе собранных статистик функционирования системы управления (на базе промышленного контроллера).

Заключение

В настоящей статье разработан новый подход к процедуре синтеза обратных связей по управлению технологическим циклом автоматизированного производства и представлен метод адаптации управления на основе онтологии предметной области «технологические процессы производства с вероятностными характеристиками».

Новые разработки в области прикладного системного анализа и оптимального управления являются важным этапом перехода к конкретному практическому применению систем с искусственным интеллектом в современных теоретических разработках, развитием фундаментальных и прикладных аспектов их использования.

Результаты, представленные в данной работе, позволяют обеспечивать решение широкого класса задач адаптации управления автоматизированными технологическими системами при наличии случайных внешних возмущений и управляющих воздействий на основе интеллектуальных компьютерных систем нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Автоматизация производственной деятельности в рамках Экосистемы OSTIS* / В.А. Прохоренко [и др.] // Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения: монография; под общ. ред. В.В. Голенкова. – Минск, БГУИР. – 2023. – Гл. 7.7. – С. 805–830.

2. *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.

3. *Omidvar, O.* Neural Systems for Control / O. Omidvar, D.L. Elliott eds. // Academic Press, New York, 1997. – 358 с.

4. *White, D.A.* Handbook of Intelligent Control. Neural, Fuzzy, and Adaptive Approaches / D.A. White, D.A. Sofge. – Van Nostrand Reinhold, 1992.

5. *Hagan, M.T.* Neural networks for control / M.T. Hagan, H.B. Demuth // Proceedings of the American Control Conference. – 1999. – Vol. 3. – P. 1642–1656.

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. *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.

8. *Smorodin, V.* Adaptive Control Of Robotic Production Systems / V. Smorodin, V. Prokhorenko // Open semantic technologies for intelligent systems. – 2020. – iss. 4. – P. 161–166.

9. *Иванюк, Д.С.* Нейро-ПИД-регулятор ПОУ / Д.С. Иванюк // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 5. – С. 35–40.

Поступила в редакцию 05.05.2023.

Информация об авторах

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