

## *Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования*

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.056.55

doi:10.30987/2658-6436-2022-1-24-32

### **РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ В АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

**Наталья Вячеславовна Суханова**

Федеральное государственное автономное учреждение науки Институт конструкторско-технологической информатики РАН, г. Москва, Россия

n\_v\_sukhanova@mail.ru

**Аннотация.** Разработаны модели оборудования и технологических процессов на базе нейронных сетей с коммутаторной структурой. Предложено использовать нейросетевые модели в автоматизированных системах управления (АСУ). Нейросетевые модели позволяют реализовать АСУ с гибкой программируемой коммутаторной структурой, оперативно подключать и отключать новое технологическое оборудование, изменять порядок операций в технологических процессах, адаптировать систему к изменению условий и внешней среды. Объект исследования – АСУ. Метод – моделирование. Цель – сокращение затрат на разработку и применение АСУ.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, гибкая программируемая структура, искусственная нейронная сеть, коммутаторная структура, нейросетевая модель

**Для цитирования:** Суханова Н. В. Разработка и применение нейросетевых моделей в автоматизации управления оборудованием и технологическими процессами // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №1 (15). С. 24-32. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-24-32.

Original article

Open Access Article

### **DEVELOPING AND APPLYING NEURAL NETWORK MODELS IN AUTOMATING EQUIPMENT CONTROL AND TECHNOLOGICAL PROCESSES**

**Natalia V. Sukhanova**

Federal State Public Scientific Establishment Institute of Information Technology in Design and Engineering of the Russian Academy of Sciences

n\_v\_sukhanova@mail.ru

**Abstract.** Models of equipment and technological processes based on neural networks with a commutator structure are developed. The article proposes to use neural network models in automated control systems (ACS). Neural network models make it possible to implement automated control systems with a flexible programmable switching structure, quickly connect and disconnect new technological equipment, change the operation order in technological processes, and adapt the system to changing conditions and the external environment. The object of study is ACS. The method is modelling. The aim is to reduce the cost of developing and using automated control systems.

**Keywords:** automated control system, flexible programmable structure, artificial neural network, switching structure, neural network model

**For citation:** Sukhanova N. V. Developing and applying neural network models in automating equipment control and technological processes. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 1 (15). pp. 24-32. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-24-32.

## Введение

Развитие методов искусственного интеллекта является приоритетным направлением в фундаментальных и прикладных научных исследованиях. Методы искусственного интеллекта позволяют создавать сложные модели автоматизированных систем управления (АСУ). Активно развиваются научные исследования в области искусственных нейронных сетей. Применение искусственных нейронных сетей позволяет объединить новые технологии искусственного интеллекта с широкими возможностями моделирования объектов и процессов. Таким образом, создание моделей на основе искусственных нейронных сетей является важной и актуальной задачей.

Известны три основных способа создания искусственных нейронных сетей: аппаратный, программный и аппаратно-программный.

За основу был взят аппаратно-программный способ создания искусственных нейронных сетей, т.к. он объединяет возможности аппаратных средств и программного обеспечения.

Современные АСУ являются сложными техническими системами. Для реализации сложных нейросетевых моделей в АСУ требуются искусственные нейронные сети с большим количеством нейронов, а именно большие нейронные сети. Основным фактором, сдерживающим применение нейросетевых моделей в АСУ, является их высокая сложность, большие затраты времени и средств на разработку структуры, обучение и техническую реализацию больших нейронных сетей.

Ситуация на внутренних и внешних рынках продукции быстро меняется, что требует своевременного изменения в структуре АСУ и, соответственно, в интеллектуальных нейросетевых моделях. Требуется создание новых нейросетевых моделей с возможностью быстрой и эффективной адаптации к новым условиям работы и внешней среды.

### Актуальность, цели и задачи исследования

Специалистами советской, российской и зарубежных научных школ накоплен большой опыт в области разработки АСУ и создания гибких производственных систем [1].

В современных АСУ используются модели, различающиеся по сложности и выполняемым функциям – это модели подсистем, составных частей, компонентов и элементов, модели технологических процессов и оборудования, модели датчиков, управляющих устройств, программируемых логических контроллеров, промышленных и компьютерных сетей, персональных компьютеров, серверов, баз данных, экспертных систем и др. В настоящее время разрабатываются АСУ с использованием методов искусственного интеллекта [2 – 7].

К нейросетевым моделям АСУ предъявляются следующие требования:

- способность интеграции моделей в структуру АСУ, без остановки основных производственных процессов;
- способность обучаться, перестраивать структуру взаимных связей нейронов и адаптировать их к новым условиям работы, к новым технологиям производства продукции и методам управления производственными процессами;
- обеспечить сокращение затрат на разработку и применение моделей.

Перспективным направлением для создания моделей является применение методов искусственного интеллекта, в частности искусственных нейронных сетей.

Объект исследования – АСУ оборудованием и технологическими процессами.

Предмет исследования – модели АСУ.

Метод исследования – моделирование на нейронных сетях.

Цель исследования – сокращение затрат на разработку и применение нейросетевых моделей АСУ.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- анализ моделей, которые используются в АСУ;
- разработка аппаратно-программных средств для создания нейросетевых моделей;
- интеграция нейросетевых моделей в структуру АСУ;
- разработка способа адаптации нейросетевых моделей к изменениям условий и внешней среды.

### **Анализ моделей, которые используются в АСУ**

Современные АСУ имеет сложную многоуровневую структуру [5, 6]. Выделяют три основных уровня в структуре АСУ: верхний, промежуточный и нижний.

Был проведен анализ моделей, которые используются в разработке АСУ. Выделены три основных уровня в иерархии моделей, соответственно структуре современных АСУ.

На верхнем уровне АСУ использованы модели внешней и внутренней технологической среды, модели организационной структуры предприятия, модели подсистем управления, модели стратегии и тактики конкурентной борьбы за рынок сбыта продукции и др.

На среднем уровне АСУ использованы модели коммуникационных сетей, топологий сети и протоколов обмена данными.

На нижнем уровне АСУ использованы модели объектов управления (оборудования и технологических процессов), ПЛК, датчиков и исполнительных устройств.

Модели разных уровней различаются по своей сложности. Большое количество и разнообразие функций моделей разных уровней ставит задачу их эффективной взаимосвязи и интеграции этих моделей в существующую структуру АСУ. Для сокращения затрат на разработку и применение нейросетевых моделей требуется создание нейронных сетей с большим количеством нейронов и гибкой адаптивной структурой их взаимных связей. Таким образом, необходима разработка новых аппаратно-программных средств для нейросетевых моделей АСУ.

### **Разработка аппаратно-программных средств для создания нейросетевых моделей АСУ**

Анализ показал, что наиболее близкими по структуре к нейросетевым моделям АСУ являются гибкие производственные системы [1] и отказоустойчивые вычислительные системы (ВС) с реконфигурируемой структурой [4 – 7].

В гибких производственных системах имеется возможность использовать одно и то же технологическое оборудование для производства разных видов и объемов продукции. Гибкие производственные системы позволяют быстро перейти к производству новых видов продукции, изменять количество производимых изделий в зависимости от спроса.

В отказоустойчивых ВС имеются основные и избыточные резервные устройства. Схема соединения основных и резервных устройств реализована с возможностью реконфигурации и изменения их взаимных связей. Гибкие производственные системы и отказоустойчивые ВС взяты за основу для создания нейросетевых моделей АСУ.

Для сокращения затрат на разработку нейросетевых моделей предложена их аппаратно-программная реализация на базе модульной вычислительной системы [8, 9] и коммутаторных нейронных сетей.

### **Коммутаторные нейронные сети**

Модульная вычислительная система состоит из унифицированных модулей, которые содержат фрагменты искусственных нейронных сетей (ИНС) с особой коммутаторной структурой (рис. 1, 2).

Коммутатор содержит внутреннюю оперативную память, в которой записана таблица коэффициентов взаимных связей нейронов. Нейроны объединены в группы и подсоединены к коммутаторам по входам и выходам. Совокупность взаимосвязанных коммутаторов и

нейронов образует фрагмент сети. Коммутаторные нейронные сети состоят из фрагментов, которые взаимосвязаны с помощью коммутаторов (см. рис. 2). Коммутатор является программируемым устройством и реализует взаимные соединения входов и выходов на основе информации, записанной во внутреннюю оперативную память.

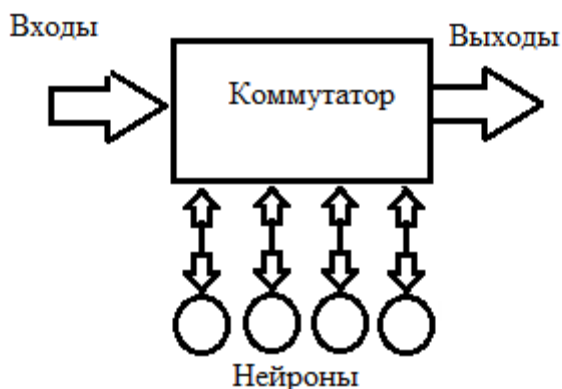


Рис. 1. Фрагмент искусственной нейронной сети с коммутаторной структурой  
 Fig. 1. Fragment of artificial neural network with commutator structure

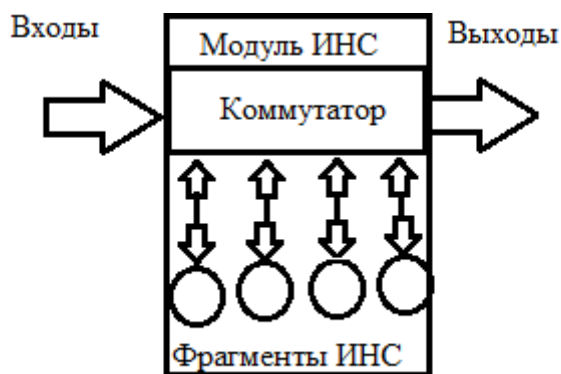


Рис. 2. Нейросетевой модуль вычислительной системы  
 Fig. 2. Computer system neural network module

Обучение коммутаторных нейронных сетей проводится по фрагментам. Обучение фрагмента может проводиться с помощью традиционных методов, например, методом обратного распространения ошибки, который был предложен А.И. Галушкиным [10]. В процессе обучения фрагмента нейронной сети формируются коэффициенты взаимных связей нейронов. Эти коэффициенты записывают в память коммутатора. Информация в памяти коммутатора программирует взаимные соединения его входов и выходов.

Таблицу коэффициентов взаимных связей нейронов можно записывать в память коммутатора, считывать и изменять значения коэффициентов. Результаты обучения фрагмента нейронной сети можно импортировать, экспортировать и тиражировать, без необходимости повторного обучения фрагмента нейронной сети с помощью традиционных методов. Возможность копирования и тиражирования обученных фрагментов сокращает затраты труда и средств на создание нейросетевых моделей.

За основу для создания нейросетевых моделей принята известная абстрактная кибернетическая модель «черного ящика» [11]. Эта модель выполняет преобразование входных сигналов в выходные сигналы. Для реализации «черного ящика» предложена нейронная сеть с коммутаторной структурой. Все входные сигналы группируются в классы эквивалентности. Каждому классу эквивалентности соответствует группа входов и группа выходов «черного ящика». Для каждого класса эквивалентности формируются заданные выходные сигналы. Коммутаторы позволяют переключаться между фрагментами нейронной

сети. Каждый фрагмент нейронной сети моделирует выходные сигналы для определенного класса эквивалентности.

Таким образом, работа модели «черного ящика» с большим количеством входов и выходов аналогична коммутатору. Когда требуется усложнить модель и добавить в нее новый класс эквивалентности, то этот класс эквивалентности моделируют с помощью дополнительного фрагмента нейронной сети и подсоединяют его к уже имеющейся нейросетевой модели с помощью коммутатора.

Сочетание модели «черного ящика» с коммутаторными нейронными сетями позволяет реализовать нейросетевые модели с разным уровнем сложности и разным набором функций и свойств. Нейросетевые модели можно изменять, адаптировать, усложнять, используя метод последовательного синтеза. Создание модели включает последовательность шагов. На очередном шаге производится изменение структуры модели, обучают и добавляют новые дополнительные фрагменты ИНС. С помощью коммутаторов избыточные фрагменты ИНС отсоединяют, переобучают и используют повторно.

Предложено использовать разработанные нейросетевые модели на разных уровнях АСУ. Нейросетевые модели позволяют реализовать АСУ с гибкой программируемой структурой, с возможностью оперативно подключать, отключать, изменять модели оборудования и технологических процессов.

### Модульная вычислительная система

Нейросетевые модели с разным уровнем сложности и разным набором функций и свойств предложено реализовать на наборе унифицированных модулей вычислительной системы (рис. 3) [8, 9].

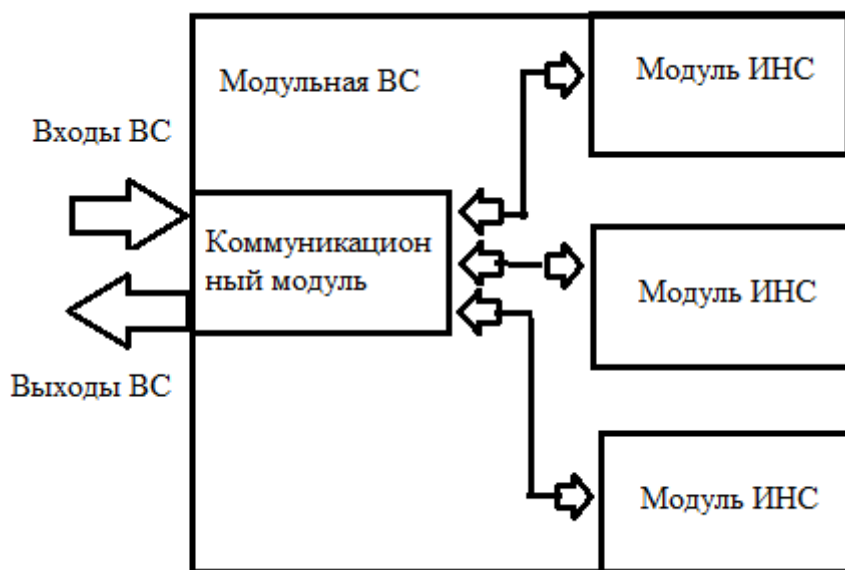


Рис. 3. Модульная вычислительная система  
*Fig. 3. Modular computing system*

Модульная вычислительная система позволяет изменять номенклатуру и количество модулей, задавать и изменять их взаимные связи, постепенно увеличивать количество модулей и сложность моделей АСУ. На одном аппаратно-программном комплексе можно реализовать модели различного уровня и различной сложности. Унификация модулей позволяет сократить затраты на создание нейросетевых моделей.

Вычислительная система [8, 9] включает коммуникационные модули и модули с программным и интеллектуальным управлением, в том числе модули ИНС. Коммуникационные модули реализуют соединения моделей всех уровней друг с другом,

ввод и вывод данных, соединения с внешними устройствами и сетями передачи данных. Вычислительная система имеет гибкую коммутаторную архитектуру и позволяет подсоединять и отключать модули, изменять их взаимные связи без коммутации контактов и перепайки проводов.

### Интеграция нейросетевых моделей в структуру АСУ

Структура модульных ВС обеспечивает интеграцию нейросетевых моделей (рис. 4).

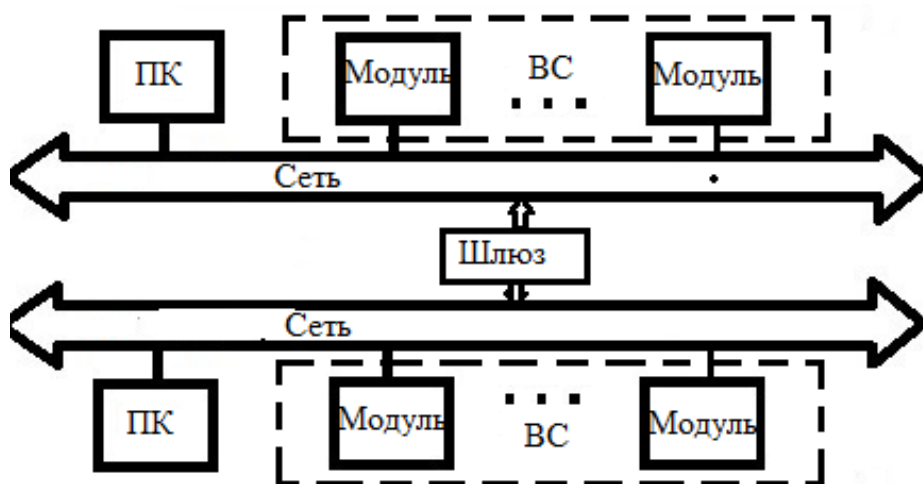


Рис. 4. Интеграция нейросетевых моделей  
*Fig. 4. Integration of neural network models*

На рис. 4 показана интеграция нейросетевых моделей на разных уровнях АСУ. Каждая из нейросетевых моделей содержит сеть передачи данных, модульную ВС и персональный компьютер (ПК) для визуализации результатов моделирования. Для обмена информацией по сети в ВС имеются коммуникационные модули с функциями реализации сетевых протоколов. Для преобразования форматов и протоколов обмена данными в сетях использован шлюз.

На верхнем уровне АСУ предложено использовать топологии и протоколы компьютерных сетей. На нижнем уровне АСУ предложено использовать топологии и протоколы промышленных сетей. На нижнем уровне АСУ обеспечивается надежная доставка информации за заданное время.

Нейросетевая структура модели обеспечивает открытость и масштабируемость, возможность подключения дополнительных модулей на всех уровнях.

### Адаптация нейросетевых моделей к новым условиям и внешней среде

Изменение условий и внешней среды может происходить случайным образом в заранее неизвестные моменты времени. Нейросетевая модель должна адаптироваться к изменениям условий и внешней среды.

В природе процесс адаптации живых организмов к внешней среде происходит на основе естественного отбора и генетических методов. Для реализации отбора требуется наличие большой начальной популяции. Использован принцип наследственности и изменчивости для сохранения и наследования информации в генах. Генетические алгоритмы зависят от начальной выборки, они медленно сходятся и не обеспечивают нахождения оптимального решения. Применение генетических алгоритмов для адаптации нейросетевых

моделей к новым условиям сопряжено с большими затратами времени и ресурсов. Требуется разработать быстрый и эффективный способ адаптации нейросетевых моделей.

Реализация нейросетевой модели во времени образует траекторию модели. Предлагается проводить адаптацию нейросетевых моделей путем моделирования разных параллельных во времени и конкурирующих между собой траекторий. Предлагается проводить отбор траекторий на множестве нейросетевых моделей.

Выбирают ту траекторию, которая обеспечивает лучший результат на множестве альтернативных моделей. Переход с одной траектории на другую и с одной нейросетевой модели на другую происходит с помощью коммутаторов.

Переключение между альтернативными траекториями должно происходить в течение заданного интервала времени, который определяют в зависимости от скорости изменения условий и внешней среды. Изменение условий и внешней среды приводит к изменению входных сигналов модели. Задают допуски для входных сигналов. При изменениях входных сигналов в пределах допусков адаптация не требуется. При выходе сигналов за установленные границы необходимо провести адаптацию модели и переключить коммутаторы на другую траекторию.

### **Нейросетевые модели жизненного цикла**

Жизненный процесс АСУ разделяют на итерации, циклы, этапы, процессы. В конце итерации, цикла, этапа, процесса оценивают и сравнивают результаты на множестве альтернативных траекторий и разных моделей функционирования АСУ. Принимают решение – сохранить или изменить траекторию. Если траектория неэффективна, надо переключить коммутаторы и перейти к другой модели, которая обеспечивает улучшение результата.

Нейросетевые модели позволяют реализовать разные модели жизненного цикла производства. Для описания жизненного цикла использованы итерационные и спиральные модели.

Нейросетевые модели позволяют реализовать разные состояния АСУ:

- нормальная нагрузка;
- перегрузка;
- недостаточная нагрузка;
- отказ, простой, ремонт;
- временная остановка, прекращение работы;
- возобновление работы и др.

По результатам моделирования АСУ принимается решение о сохранении или изменении структуры АСУ в зависимости от ее текущего состояния и уровня нагрузки:

- сохранить структуру АСУ, не менять взаимные связи элементов и конфигурацию оборудования;
- изменить структуру АСУ, подключить дополнительное или резервное оборудование;
- изменить структуру АСУ, временно отключить неиспользуемое оборудование, перевести его в резерв, отправить в ремонт, на склад, продать;
- сохранить структуру АСУ, но приобрести и подключить новое современное оборудование;
- сохранить структуру АСУ, перейти на производство другой продукции;
- сохранить структуру АСУ, внедрить новую технологию производства и т.д. и т.п.

Модели позволяют реализовать несколько траекторий производственных процессов и оперативно переключаться с одной траектории на другую.

### **Заключение**

Структура АСУ определяется на этапе разработки. Изменения в структуре АСУ

связаны с существенными затратами. Применение нейросетевых моделей позволяет сократить затраты на разработку и применение АСУ.

За основу для создания нейросетевых моделей принята известная модель «черного ящика» [11]. Модель «черного ящика» реализована на искусственной нейронной сети с особой коммутаторной структурой. Коммутаторы позволяют переключаться между фрагментами нейронной сети. Каждый фрагмент нейронной сети получает входные сигналы и моделирует выходные сигналы для определенного класса эквивалентности. Фрагменты нейронной сети реализованы аппаратно-программно в унифицированных модулях.

Предложено реализовать нейросетевые модели с разным уровнем сложности и разным набором функций и свойств на наборе унифицированных модулей вычислительной системы [8, 9]. Модульная вычислительная система позволяет изменять номенклатуру и количество модулей, задавать и изменять их взаимные связи, постепенно увеличивать количество модулей и сложность моделей АСУ.

Нейросетевые модели позволяют реализовать разные варианты структуры АСУ, провести их сравнительный анализ, выбрать лучший из возможных вариантов.

Нейросетевые модели интегрируются в структуру существующих АСУ и адаптируются к изменению внешних условий. На нейросетевых моделях реализованы альтернативные траектории функционирования АСУ. Выбирают траекторию, которая обеспечивает лучший результат.

В конце итерации, цикла, этапа, процесса жизненного цикла оценивают и сравнивают результаты на множестве альтернативных траекторий разных моделей функционирования АСУ. Принимают решение – сохранить или изменить траекторию. Если траектория неэффективна, надо переключить коммутаторы и перейти к другой модели, которая обеспечивает улучшение результата.

#### Список источников:

1. Соломенцев, Ю.М., Сосонкин, В.Л. Управление гибкими производственными системами / Ю. М. Соломенцев, В. Л. Сосонкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
2. Суханова, Н.В. Разработка требований к аппаратно-программному комплексу интеллектуальных систем управления в машиностроении // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – №12 (90). – С. 38-43.
3. Суханова, Н.В. Разработка интеллектуальных автоматизированных систем управления в машиностроении // Научные технологии в машиностроении. – 2018, № 11 (89). – С. 42-46.
4. Суханова, Н.В. Обеспечение безотказности интеллектуальных систем управления // Качество. Инновации. Образование, 2018. – №2 (153). – С. 23-29.
5. Суханова, Н.В. Разработка и исследование способа контроля работоспособности автоматизированных систем управления на базе искусственных нейронных сетей // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 7. – С. 91-98.
6. Суханова, Н.В. Обеспечение отказоустойчивости аппаратных средств автоматизированных систем управления // Вестник МГТУ "СТАНКИН". – 2017. – №2 (41). – С. 79-83.
7. Суханова, Н.В. Применение коммутаторной структуры при обеспечении отказоустойчивости аппаратных средств вычислительных систем // Вестник МГТУ "СТАНКИН". – 2017. – №3 (42). – С. 105-110.
8. Патент на полезную модель 75247 Российская Федерация МПК 7 G06F15/16 Модульная

#### References:

1. Solomentsev Yu.M., Sosonkin V.L. Flexible Manufacturing System Control. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 352 p.
2. Sukhanova N.V. Development of Requirements to Hardware-Software Complex of Intelligent Systems of Control in Mechanical Engineering. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2018, no. 12 (90), pp. 38-43.
3. Sukhanova N.V. Development of Intelligent Automated Control Systems in Mechanical Engineering. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2018, no. 11 (89), pp. 42-46.
4. Sukhanova N.V. Ensuring Fault Tolerance of Automated Control Systems. Quality. Innovation. Education, 2018, no. 2 (153), pp. 23-29.
5. Sukhanova N.V. Developing and Researching a Method for Monitoring the Automated Control System Performance Based on Artificial Neural Networks. Bulletin of Bryansk State Technical University, 2018, no. 7, pp. 91-98.
6. Sukhanova N.V. Ensuring Fault Tolerance of Automated Control System Hardware. Bulletin of MSTU "STANKIN", 2017, no. 2 (41), pp. 79-83.
7. Sukhanova N.V. Using a Commutator Structure in Ensuring Fault Tolerance of Computer System Hardware. Bulletin of MSTU "STANKIN", 2017, no. 3 (42), pp. 105-110.
8. Kabak I.S., Sukhanova N.V. Patent for Utility Model 75247 Russian Federation MPK 7 G06F15/16 Modular



вычислительная система / Кабак И.С., Суханова Н. В.: заявитель и патентообладатель Кабак И.С., Суханова Н.В. – № 2008106859; заявл. 26.02.2008; опубл. 27.07.2008, Бюл. № 21. – 2 с.: ил.

9. **Патент** на изобретение 2398281 Российская Федерация МПК 7 G06N 3/06 Многослойная модульная вычислительная система / Соломенцев Ю.М., Шептунов С.А., Кабак И.С., Суханова Н.В.: заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (ИКИ РАН). – № 2008143737; заявл. 07.11.2008; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24. – 8 с.: ил.

10. **Галушкин, А.И.** Синтез многослойных систем распознавания образов. – М.: «Энергия», 1974. – 367 с.

11. **Росс Эшби У.** Введение в кибернетику. An Introduction to Cybernetics. – Издательство иностранной литературы, 1959. – С. 127-169.

computer system. No. 2008106859; applied on 26th of February 2008; published on the 27th of July, 2008, Bull. No. 21. 2 p.

9. Solomentsev Yu.M., Sheptunov S.A., Kabak I.S., Sukhanova N.V. Patent for invention 2398281 Russian Federation MPK 7 G06N 3/06 Multilayer Modular Computer: Applicant and Patent Holder Federal State Public Scientific Establishment Institute of Information Technology in Design and Engineering of the Russian Academy of Sciences (IKTI RAS). No. 2008143737; applied on the 7th of November 2008; published on the 27th of August 2010, Bull. No. 24. 8 p.

10. Galushkin, A.I. Synthesis of Multilayer Image Recognition Systems. Moscow: Energiya, 1974. 367 p.

11. Ross Ashby W. An Introduction to Cybernetics. Foreign Languages Publishing House, 1959. pp. 127-169.

#### **Информация об авторах:**

##### **Наталья Вячеславовна Суханова**

доцент, кандидат технических наук, тел.: 8-963-723-81-62, Федеральное государственное автономное учреждение науки Институт конструкторско-технологической информатики РАН

#### **Information about authors:**

##### **Natalia Vyacheslavovna Sukhanova**

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, tel.: 8-963-723-81-62, Federal State Public Scientific Establishment Institute of Information Technology in Design and Engineering of the Russian Academy of Sciences

**Статья поступила в редакцию 14.02.2022; одобрена после рецензирования 18.02.2022; принята к публикации 19.02.2022.**

**The article was submitted 14.02.2022; approved after reviewing 18.02.2022; accepted for publication 19.02.2022.**

**Рецензент** – Аверченков А.В., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет, заместитель председателя редакционного совета журнала «Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении».

**Reviewer** – Averchenkov A.V., Doctor of Technical Sciences, Associate professor, Bryansk State Technical University, Deputy Chairman of Editorial Board Journal «Automation and modeling in design and management».