На правах рукописи

Гусев Кирилл Вячеславович

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена на кафедре «Математического обеспечения и стандартизации информационных технологий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

Научный руководитель – **Красников Степан Альбертович**
доктор технических наук, профессор кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет».

Официальные оппоненты – **Обухов Артём Дмитриевич**
доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ведущий научный сотрудник НИЛ «Лаборатория медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации» управления фундаментальных и прикладных исследований.

– **Гончаров Андрей Витальевич**
кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)», заведующий кафедрой систем автоматизированного управления.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Москва.

Защита диссертации состоится «17» января 2025 г. в 13 час 30 мин на заседании Диссертационного совета 24.2.287.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежского государственного университета инженерных технологий» и на сайте: https://vsuet.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19.

Автореферат разослан «16» ноября 2024 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета 24.2.287.01,
кандидат технических наук, доцент Иванов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Улучшение качества товаров нефтяной промышленности, а также повышение их конкурентоспособности на мировой арене являются ключевыми факторами для развития экономики страны и повышения безопасности использования нефтепродуктов. Модернизация технологий и процессов производства позволяет создавать нефтепродукты высокого качества и сохранять это качество на всех этапах производства. Это способствует укреплению позиций российских компаний на мировых рынках и повышению доверия потребителей к отечественной продукции.

Однако улучшение технологий неотделимо от совершенствования систем контроля качества как на этапе производства, так и в лабораторных условиях, с целью своевременного получения достоверных данных о качестве выпускаемой продукции. В процессе производства качество нефтепродуктов может изменяться, как и их значения физико-химических свойств. Этому способствует воздействие сторонних фактов. Возникает проблема минимизации таких изменений. Встаёт вопрос об автоматизации контроля качества нефтепродуктов, а также об актуальном и своевременном получении информации обо всех изменениях в процессе производства. Данную оперативную информацию можно получать, при непрерывном автоматизированном процессе контроля качества нефтепродуктов.

Анализ системы автоматизированного контроля качества нефтепродуктов на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в России выявил ряд недостатков, которые заключаются в:

• низком уровне автоматизации процессов контроля качества на этапах производства и использования нефтепродуктов;

• разрозненности процессов лабораторного, текущего и виртуального контроля качества нефтепродуктов на НПЗ, которая затрудняет его осуществление и точность проведения;

• неудовлетворительном уровне разработки и использования экспресс-методик тестирования нефтепродуктов на предприятиях НПЗ с применением поточных ИК-Фурье спектрометров.

Следовательно, вопрос комплексного улучшения контроля качества нефтепродуктов в процессе производства и использования имеет важное экономическое значение.

В решение круга проблем, связанных с разработкой систем технологического (операционного) контроля нефтепродуктов, в том числе интеллектуальных систем, используемых для автоматизированного регулирования технологических процессов, существенный вклад внесли: Алаторцев Е.И., Большаков О.В., Вагин В.А., Веретенников А.В., Егоров А.Ф., Жижин Г.Н., Краснов А.Е. Костогрызов А.И., Laurens van der Maaten и др.

На основании полученных данных были разработаны рекомендации по совершенствованию системы автоматизированного контроля качества автомобильного бензина и его компонентов. Эти рекомендации включают в

себя использование современных датчиков и приборов, а также разработку новых алгоритмов обработки данных.

Предложено внедрить в технологический процесс экспертно-нейросетевую систему (ЭНС), использующую нейронные сети, искусственный интеллект и вычислительные системы в реальном масштабе времени.

Данное решение даёт возможности:

– производить автоматизированный контроль качества нефтепродуктов во время всех этапов технологического процесса их производства; в результате на выходе автоматически определяется качество производимого продукта, сравнивая его показатели со стандартными и задаваемыми;

– соблюдать непрерывность производства;

– снизить процент получения некондиционных нефтепродуктов и уменьшить финансовые затраты в технологический процесс их производства, о чём свидетельствуют Акты об использовании ЭНС в автоматизированном процессе контроля качества нефтепродуктов.

В диссертации разработаны, совершенствованы и внедрены алгоритмы и способы функционирования ЭНС для осуществления автоматизированного контроля качества нефтепродуктов на примере автомобильного бензина.

В связи с тем, что предлагаемое решение позволяет устранить выявленные недостатки применяемых систем контроля качества нефтепродуктов, тема «Автоматизация контроля качества нефтепродуктов для обеспечения эффективного управления технологическим процессом» является актуальной по научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.3, а именно пунктам 2, 6, 11 и 12.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности управления технологическим процессом в части оперативности и достоверности автоматизированного контроля качества продуктов нефтеперерабатывающей промышленности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи.**

1. Провести анализ действующих систем контроля качества и технических средств управления технологическим процессом производства нефтепродуктов для определения области внедрения ЭНС в функциональную схему автоматизации.

2. Разработать метод построения интеллектуальной системы управления автоматизированным контролем качества продуктов нефтеперерабатывающей промышленности.

3. Адаптировать математические модели к параметрам показателей качества продуктов нефтеперерабатывающей промышленности.

4. Разработать на языке высокого уровня программное обеспечение ЭНС автоматизированного контроля качества нефтепродуктов.

5. Внедрить ЭНС в систему управления технологическим процессом для повышения эффективности в части оперативности и достоверности автоматизированного контроля качества автомобильных бензинов.

Объектом исследования является автоматизация контроля и испытания показателей качества продуктов нефтеперерабатывающей промышленности (автомобильных бензинов).

Предметом исследования является методика построения ЭНС идентификации больших данных, основанная на совокупности моделей взаимодействия экспертных и нейросетевых технологий для автоматизированной системы контроля качества управления технологическим процессом.

Методы и средства исследований. Научные исследования по применению ЭНС в автоматизированном контроле качества нефтепродуктов проводились инфракрасными (ИК) Фурье-спектрометрами АФ-3 и ПФС-1, с помощью которых были получены спектральные данные автомобильных бензинов для их анализа в ЭНС.

Для решения поставленных задач применяли методологию основ интеллектуальных систем управления, математические основы построения реляционных баз данных, искусственного интеллекта и нейронных систем. Программное обеспечение – Java. Графическая обработка выполнялась с применением табличного редактора. Численная обработка выполнялась с помощью методов математической статистики.

Научная новизна работы. В диссертационной работе впервые получены следующие научные результаты.

1. Модернизирована функциональная схема автоматизации производства автомобильного бензина с внедрением в неё ЭНС контроля качества.

2. Разработана методика построения ЭНС автоматизированного контроля качества нефтепродуктов на НПЗ по спектральным данным автомобильных бензинов с объединением экспертной и нейросетевой технологий идентификации больших данных в системе усовершенствованного управления технологическим процессом.

3. Разработана структура ЭНС идентификации больших данных в системе усовершенствования управления технологическим процессом.

4. Проведена адаптация математических моделей, содержащихся в базе знаний, по параметрам показателей качества автомобильных бензинов.

Теоретическая значимость результатов работы состоит в том, что разработанная методика построения ЭНС автоматизированного контроля качества нефтепродуктов по спектральным данным вносит существенный вклад в совершенствование (повышение оперативности и достоверности) систем управления технологическим процессом производства бензинов, в развитие их научно-методических и теоретических основ.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем.

1. Разработано программное обеспечение ЭНС идентификации больших данных автоматизированного контроля качества нефтепродуктов системы усовершенствованного управления технологическим процессом на НПЗ в части её серверной и клиентской реализаций.

2. Разработанная ЭНС идентификации больших данных автоматизированного контроля качества обеспечивает поддержку процессов производства нефтепродуктов на НПЗ, что способствует повышению эффективности производства в части оперативности и достоверности результатов технологического контроля качества производимых нефтепродуктов.

3. Предложена и апробирована технология реализации ЭНС, функционирующей на персональных компьютерах и клиент-серверных структурах.

Научные и практические результаты, полученные в диссертации, внедрены в:

– учебном процессе кафедры математического обеспечения и стандартизация информационных технологий института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», а именно в лекционных и практических занятиях по дисциплинам «Структуры и алгоритмы обработки данных», «Технология разработки программных приложений», «Системная и программная инженерия» программ высшего образования бакалавриата по направлениям 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, 09.03.03 Прикладная информатика, 09.03.04 Программная инженерия;

– ФГБУН Научно-технологическом центре уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН);

– ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН) – специализированное предприятие, выполняющее проектирование в области разработки высокоэффективных процессов и катализаторов нефте- и газохимии, глубокой переработки традиционного и возобновляемого углеродсодержащего сырья в ценные продукты, в том числе полимерные;

– АО ИНСТИТУТ НЕФТЕХИМПЕРЕРАБОТКИ (АО «ИНХП»);

– ООО «Славянск ЭКО».

Разработанное программное обеспечение ЭНС защищено свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023669036 от 07.09.2023 и № 2023669265 от 12.09.2023.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Способ модификации системы контроля качества продуктов нефтеперерабатывающей промышленности для усовершенствования управления технологическим процессом.

2. Методика построения ЭНС технологического контроля качества автомобильных бензинов по их спектральным характеристикам с объединением экспертной и нейросетевой технологий идентификации больших данных в системе усовершенствованного управления технологическим процессом.

3. Программное обеспечение ЭНС технологического контроля качества нефтепродуктов на примере автомобильных бензинов по их спектральным данным для системы усовершенствованного управления технологическим процессом.

Личный вклад автора.

Представленные результаты диссертации являются итогом исследования, проводимого лично автором в рамках поставленных цели и задач данной работы в период с 2021 по 2024 гг.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, являются персональным вкладом автора в опубликованные работы. Значительная часть опубликованных работ выполнена самостоятельно. Лично автором предложена методика построения ЭНС автоматизированного контроля качества нефтепродуктов по спектральным данным автомобильных бензинов с объединением экспертной и нейросетевой технологий идентификации больших данных. Автором написан программный код экспертно-нейронной системы для идентификации больших данных для серверной и клиентской части. Произведена апробация на действующем производстве в ООО «Славянск ЭКО».

Степень достоверности результатов исследования.

Достоверность научных положений и обоснованность представленных в диссертационной работе результатов научного исследования, сформулированных на их основе выводов и рекомендаций обеспечиваются проработкой моделей исследуемого технологического процесса и применением математического аппарата.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных форумах: Международная метрологическая конференции «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов. Качество углеводородного сырья (нефти и природного газа)», Казань, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2023 г.; XXII Международная конференция «Алгебра, теория чисел, дискретная геометрия и многомасштабное моделирование: современные проблемы, приложения и проблемы истории», Тула, ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2023 г.; II Международная научно-практическая конференция «Цифровые международные отношения 2023», Москва, МГИМО МИД, партнерами являются институт Информационных технологий РТУ МИРЭА, Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, 2023 г.; Научно-практическая конференция с международным участием

«Современные проблемы автоматизации технологических процессов и производств», Москва, РОСБИОТЕХ, 2023 г.; XXVI Международной конференции «Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности», в XXIV Международном конкурсе научных и научно-методических работ, Москва, Региональное отделение Международной академии информатизации совместно с факультетом ИЗО и НР ФГБОУ ВО «ГУП», с факультетом политических и социальных технологий ФГБОУ ВО «РГСУ» и с ФГБОУ ВО «МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)», Москва 2023 г.; Национальная научно-практическая конференция «Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты», Москва, РТУ МИРЭА, 2023 г.; XXVII Международной конференции «Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности», факультет ИЗО и НР ФГБОУ ВО «ГУП» ФГБОУ ВО «МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)», Москва, 8-9.02.2024 г.; X Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности» круглый стол на тему «ИТ-тренды 2024» ФГБОУ ВО РТУ МИРЭА, Москва, 18.04.2024 г; V Международной конференции «ФАБРИКА БУДУЩЕГО: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям и роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности», ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ», Москва, 26 апреля 2024 г.

Результаты исследования представлялись и получили одобрение на 8 расширенных заседаниях кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет».

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 6 работ в рецензируемых научных периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 2 тезиса в сборниках трудов конференций, и получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, двух приложений. Работа изложена на 152 страницах основного текста; она содержит 12 таблиц, 43 рисунка; список литературы включает 103 наименования, из которых 91 отечественных и 12 зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении была обоснована актуальность темы диссертационного исследования, охарактеризована степень её проработанности, поставлена цель и определены задачи исследования. Осуществлён выбор предмета и объекта исследования, а также показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ состояния контроля качества нефтепродуктов на НПЗ в России, который позволил выявить «узкие» места и возможные пути совершенствования системы контроля качества.

Показано, что одним из основных недостатков в нефтехимической промышленности является управление процессами, которые имеют сложную динамику и требуют постоянного мониторинга и регулирования. Например, при переработке нефти в различные фракции, необходимо поддерживать определенные параметры, чтобы обеспечить высокую эффективность процесса и минимизировать потери. В автоматизированном процессе основную роль играет система усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП), так называемые APC-системы, которые осуществляют автоматический контроль этих параметров и оптимальное оперативное управление.

Рассмотрено, что для внедрения в автоматизированные системы управления НПЗ требуются в первую очередь автоматические средства контроля качества нефти, продуктов ее переработки и нефтепродуктов. В качестве технических средств в технологическом контроле качества могут использоваться поточные и виртуальные анализаторы, выходные данные которых поступают в СУУТП. В качестве поточных анализаторов могут быть использованы и используются наряду с другими анализаторы на базе ИК-Фурье спектрометров.

Проведенный анализ литературных и патентных данных показал, что основными недостатками по созданию систем поточного (автоматизированного) анализа являются проблемы, связанные с необходимостью разработки программного обеспечения, позволяющего обрабатывать поступающие с них данные для применения в конкретных технологических схемах переработки нефти.

В качестве системы, позволяющей анализировать ИК-спектры поточных анализаторов предлагается использовать разработанную ЭНС, которая позволяет на основе ИК спектров идентифицировать показатели качества автомобильного бензина.

Во второй главе предложена модернизация системы контроля качества продуктов нефтеперерабатывающей промышленности для усовершенствования управления технологическим процессом.

Модернизация заключается во внедрении разработанной ЭНС в состав системы поточного анализа (СПА), где на вход ЭНС подаются ИК спектры снятые поточным анализатором, а результат работы ЭНС поступает в СУУТП,

что позволяет ей своевременно осуществлять автоматический контроль параметров нефтепродуктов и производить оптимальное оперативное управление, показанное на рисунке 1.

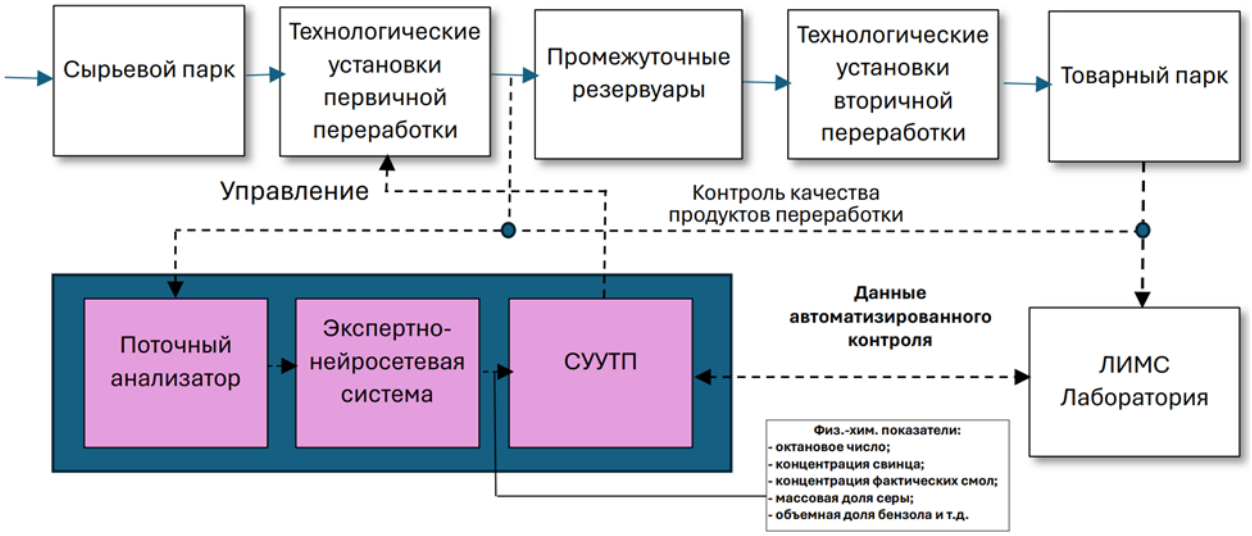


Рисунок 1 – Внедрение ЭНС в процесс функционирования подсистемы контроля качества на НПЗ

На рисунке 2 представлена функциональная схема автоматизации фракционирования автомобильного бензина с внедрением ЭНС, на которой показано, что после арматуры с пневмоприводом поз. UV028 поток автомобильного бензина проходит через поточный ИК Фурье спектрометр AE200-1 который формирует спектральные данные поступающие на контроллер ЭНС AT200-2. Данный процесс определяет физ.-хим. показатели автомобильного бензина. Например, если показатель октанового числа автомобильного бензина не соответствует заданному, то циркуляция прекращается и автомобильный бензин отправляется в резервуар, где отбирают пробу автомобильного бензина и осуществляют аналитический контроль по всем показателям.

Разработанная ЭНС представляет собой программный комплекс, включающий три компонента: интегрированную экспертную систему (ЭС); интегрированную нейронную сеть (НС); подсистему контроля. Общая схема функционирования интегрированной ЭНС представлена на рисунке 3.

Первый компонент, ЭС включает в себя: входной интерпретатор, необходимый для предварительной обработки спектральных данных; базу данных; базу знаний и машину логического вывода. ЭС используется для интерпретации, кластеризации (с учителем или без учителя), классификации (распознавания) данных, снижения их размерности, а также оценивания по спектральным данным сопутствующие им показатели, соответствующих объектов/процессов, породивших эти данные.

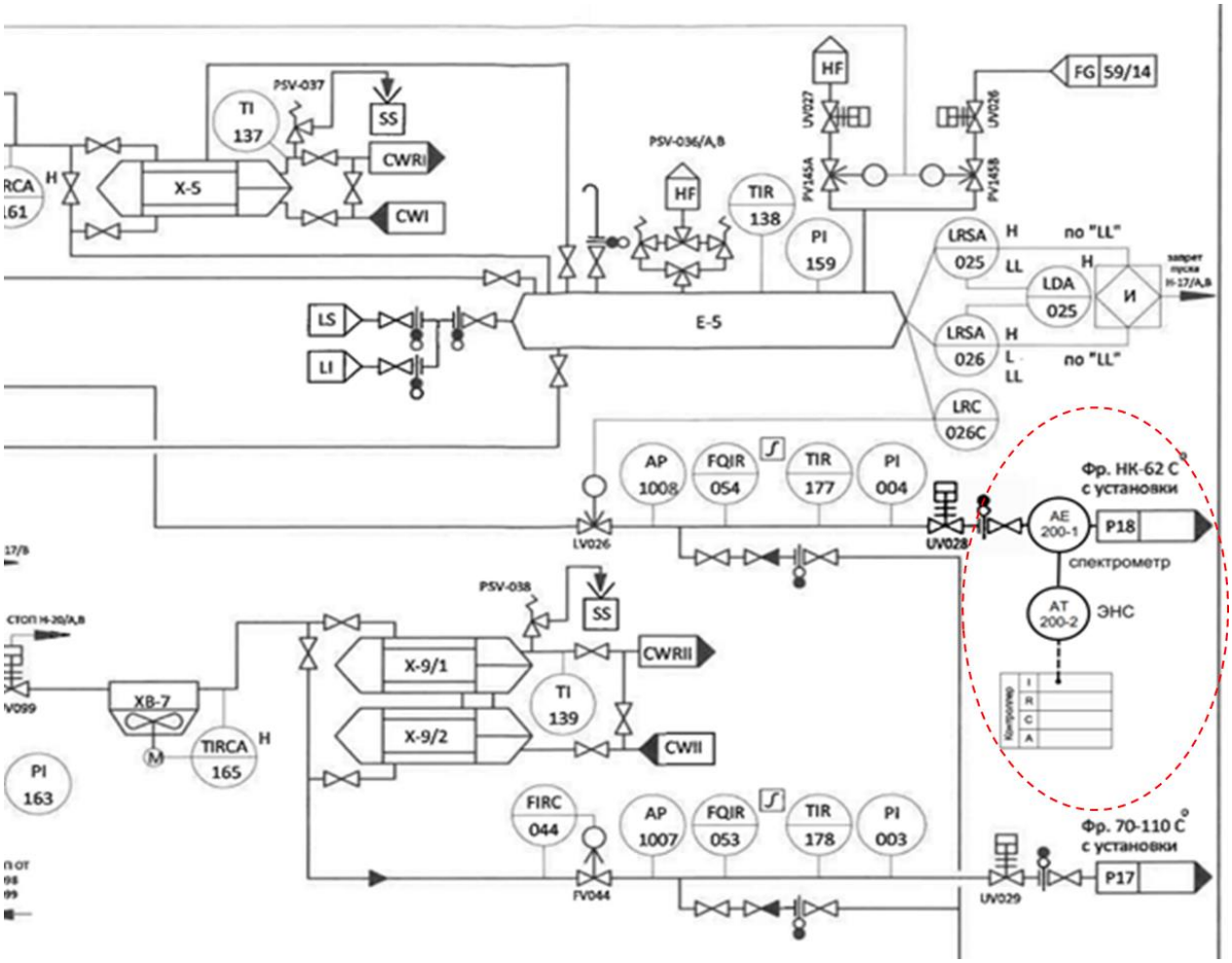


Рисунок 2 – Функциональная схема автоматизации с внедрением ЭНС системы фракционирования автомобильного бензина

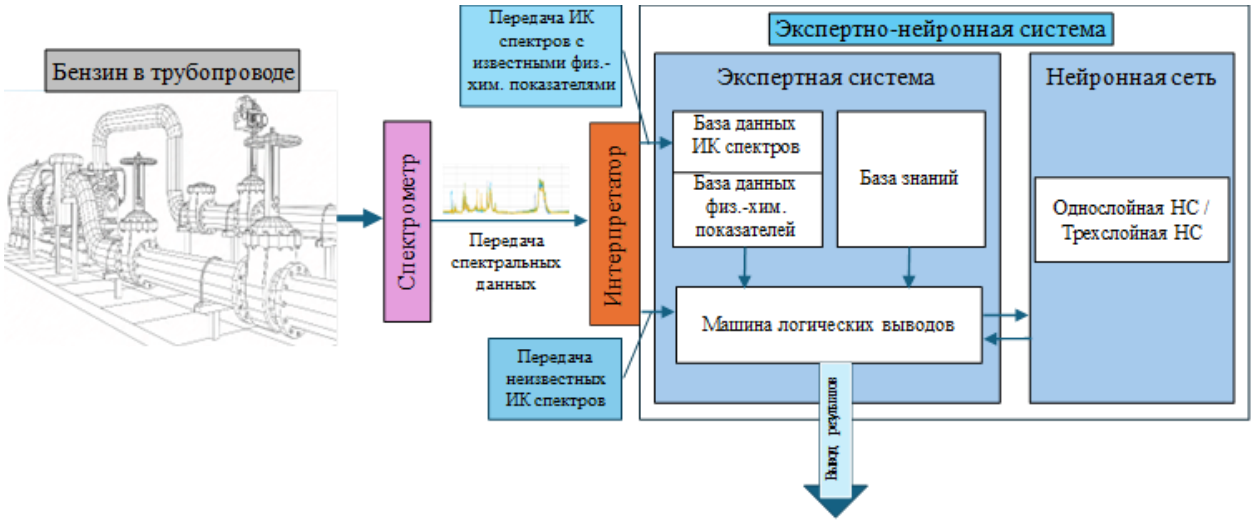


Рисунок 3 – Общая схема функционирования интегрированной ЭНС

При подаче на вход ЭС неизвестных данных на ее выходе формируются редуцированные данные - вектор принадлежности спектральных данных к классам (кластерам), который подается далее на вход нейронной сети для повышения надежности идентификации данных.

Второй компонент, которой является интегрированная НС, включает программные модули (рисунок 3): однослойную нейронную сеть; многослойную нейронную сеть центроидов классов; многослойную нейронную сеть ближайших соседей.

Однослойная нейронная сеть не имеет ограничений на количество возможных классов больших данных и представителей каждого класса.

Входными данными модуля однослойной нейронной сети является вектор принадлежности больших данных к классам (кластерам), реализованный на выходе интегрированной экспертной системы. Для каждого класса рассчитываются пороговые функции, исходя из максимальных значений мер сходства.

Обобщенная структура интегрированной ЭНС представлена на рисунке 4.

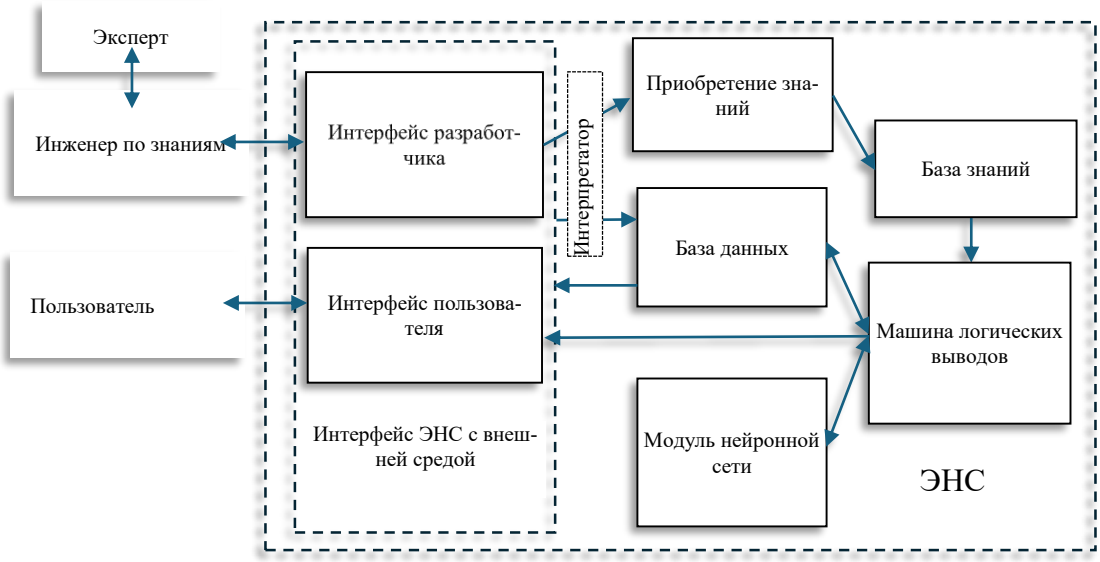


Рисунок 4 – Обобщенная структура интегрированной ЭНС

Интерфейс ЭНС с внешней средой поддерживает взаимодействие ЭНС с внешним миром на всех стадиях жизненного цикла системы и включает две компоненты: интерфейс разработчика и интерфейс пользователя. Интерфейс разработчика используется на этапе разработки ЭНС, его основной функцией является поддержка процесса наполнения базы знаний (БЗ). Обычно эта функция выполняется экспертом в предметной области во взаимодействии с инженером по знаниям. Интерфейс пользователя поддерживает общение пользователя с системой в режиме консультации или взаимодействие ЭНС с техническими средствами на этапе ее использования. Компонента приобретения знаний предназначена для занесения в БЗ новых знаний и модификации имеющихся, как на этапе начального обучения ЭНС, так и в режиме ее обучения в процессе эксплуатации. Ее задачей, в частности, является преобразование знаний в форму, позволяющую машине логических выводов (МЛВ) использовать их в процессе работы. База данных (БД) хранит факты о текущем состоянии предметной области, промежуточных и окончательных результатах вывода. БЗ служит для хранения знаний о проблемной области. Форма хранения соот-

ветствует выбранной модели представления знаний. МЛВ осуществляет взаимодействие с модулем нейронной сети, которая позволяет с высокой степенью надежности классифицировать входящие данные в присутствии значительных аддитивных помех, а также производит вывод решения задачи на основе имеющихся в системе знаний и фактов. БД, БЗ, модуль нейронной сети и МЛВ составляют ядро ЭНС.

Структура баз знаний (БЗ) содержит в себе две модели:

– модель идентификации макросостояний нефтепродуктов, включающей в себя выбор ближайших соседей в многомерном пространстве спектральных характеристик с использованием мер сходства;

– модель идентификации микросостояний, включающей в себя непараметрическое оценивание физико-химических показателей нефтепродуктов (показателей качества, далее ПК).

Для реализации модели идентификации макросостояний нефтепродуктов, позволяющей классифицировать спектральные данные, наблюдаемый спектра $S(\nu)$ нефтепродукта неизвестной марки представлен в виде

$$S(\nu) = S_m(\nu, k) + H_m(\nu, k), \qquad (1)$$

где $S_m(\nu, k)$ – спектры оптической плотности используемого диапазона волн, определенные для каждого волнового числа ν для k-го образца ($k = 1, 2, \ldots, K$) известного нефтепродукта m-ой марки ($m = 1, 2, \ldots, M$); $H_m(\nu, k)$ – неизвестные случайные спектральные функции, описываемые усеченными нормальными распределениями вероятностей, с нулевыми средними $\overline{H_m(\nu, k)} = 0$ и неизвестными дисперсиями $\sigma^2_{\mathrm{Hm}}(\nu, k)$.

В ней допускается, что наблюдаемый спектр $S(\nu)$ является зашумленной версией какого-либо полностью известного спектра $S_m(\nu, k)$, измеряемого с известными дисперсиями $\sigma_S^2(\nu)$, определяемыми точностью$\sigma_S(\nu)$ используемого инструментального средства при измерении спектра поглощения для данного волнового числа ν.

В этих условиях идентификация возможна при использовании статистики в виде мер сходства наблюдаемого спектра $S(\nu)$ с известными спектрами $S_m(\nu, k)$

$$\mu[S, S_m(k)] = \frac{\left(\sum_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \gamma_m(\nu) \frac{S(\nu) S_m(\nu,k)}{\sigma_S^2(\nu)}\right)^2}{\sum_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \gamma_m(\nu) \frac{S^2(\nu)}{\sigma_S^2(\nu)} \sum_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \gamma_m(\nu) \frac{S_m^2(\nu,k)}{\sigma_S^2(\nu)}}, \quad 0 \le \mu[S, S_m(k)] \le 1, \qquad (2)$$

где $\gamma_m(\nu)$ – идентификационные значимости волновых чисел спектров m-ой марки, зависящие от амплитуд спектров. Например, $\gamma_m(\nu)$=1, если $S_m(\nu, k) < 1{,}5$ и $\gamma_m(\nu)$= 0, если $S_m(\nu, k) \ge 1{,}5$.

Идентификацию неизвестной марки нефтепродуктов можно проводить методом «ближайшего соседа», относя испытуемый образец к той марке m,

для которой мера сходства $\mu[S, S_m(k)]$ принимает наибольшее значение, т.е. $m = \underset{m,k}{\operatorname{argmax}}\{\mu[S, S_m(k)]\}$.

В модели идентификации микросостояний, позволяющей проводить оценку значений показателей качества нефтепродукта на основе узлов интерполяции, получаемых для всех ее состояний (марок), будем использовать следующую нечеткую регрессионно-факторную зависимость

$$Y_{\Sigma} = \frac{\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{Km} Y_m(k)\ G[S(\nu),S_m(\nu,k)]}{\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{Km} G[S(\nu),S_m(\nu,k)]}, \quad (3)$$

$$G[S(\nu), S_m(\nu,k)] = 1\Big/\Big[1 + \sum_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \gamma_m(\nu)\frac{[S(\nu)-S_m(\nu,k)]^2}{\Delta^2_{R\min}}\Big] \quad (4)$$

$$\Delta^2_{R_{\min}} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{m=1}^{M} K_m}}\frac{\sigma_Y}{(Y_{\max}-Y_{\min})}\langle\sigma_S^2\rangle = \\ = \frac{1}{\sqrt{\sum_{m=1}^{M} K_m}}\frac{\sigma_Y}{(Y_{\max}-Y_{\min})}\ \frac{\Delta\nu}{\nu_{\max}-\nu_{\min}}\sum_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}}\sigma_S^2(\nu), \quad (5)$$

где $\sum_{m=1}^{M} K_m$ – количество узлов интерполяции, определяемых количеством K_m эталонных образцов нефтепродукта для каждой m-ой марки; σ_Y – ошибка (стандартное отклонение) лабораторного измерения ПК Y; $Y_{\min}$ и $Y_{\max}$ – минимальное и максимальное значения ПК соответственно; $\langle\sigma_S^2\rangle$ – усредненная по используемому спектральному диапазону ($\nu_{\min}$, $\nu_{\max}$) дисперсия спектра оптической плотности, определяемая точностью измерений оптических плотностей для различных волновых чисел ν; $\gamma_m(\nu)$ – функция, определяющая значимости используемых волновых чисел в диапазоне $\nu_{\min} \div \nu_{\max}$ и используемая для режекторной фильтрации аппаратных помех спектрометра.

Объединение экспертной системы и нейросети в одну ЭНС даёт синергетический эффект при идентификации больших данных, например, оптических спектральных данных: снижает их размерность до размерности, определяемой небольшим числом классов; повышает правдоподобие классификации.

В третьей главе рассмотрено применение разработанной ЭНС технологического контроля качества нефтепродуктов на примере автомобильных бензинов по их спектральным данным с объединением экспертной и нейросетевой технологий идентификации спектральных данных в системе усовершенствованного управления технологическим процессом на конкретном примере.

Спектральные данные, а именно инфракрасные (ИК) спектры оптического поглощения нефтепродуктов (автомобильные бензины разных марок с разным октановым числом) получены с применением ИК Фурье-спектрометра. Все спектры снимались в полосе волновых чисел среднего ИК-диапазона (450…4000) см$^{-1}$ с разрешением 0,964 см$^{-1}$ отечественным спектрометром АФ-3 (рисунок 5).

Диаграмма показывает сложность идентификации различных ИК-спек-

тров из-за практически полного перекрытия их характеристических полос поглощения.

Рисунок 5 – Примеры ИК-спектров автомобильных бензинов

ЭНС для идентификации марок автомобильных бензинов рассматривается с применение электронной таблицы.

Работа системы состоит из последовательности операций.

1. Определяется количество известных образцов, исходя из требуемой точности оценивания значений физико-химических показателей.

2. Измеряются спектры оптических плотностей известных образцов при различных условиях производства, обеспечивающих равномерное заполнение диапазонов значений их физико-химических показателей в максимальных границах, гостированных для каждой марки автомобильного бензина.

3. Производится режекторная фильтрация спектров известных образцов каждой марки автомобильного бензина. Полученные спектральные данные и соответствующие им физико-химические показатели заносятся в БД ЭС.

4. Измеряется ИК спектр неизвестного образца марки автомобильного бензина и производится его режекторная фильтрация. Отфильтрованный спектр поступает в МЛВ, где проводится предварительная классификация автомобильного бензина неизвестной марки методом «ближайшего соседа» на основе нечетких мер сходства, оцениваются его физико-химические показатели и формируются редуцированные данные - вектор принадлежности больших данных к классам (кластерам), который подается далее на вход нейронной сети.

5. Сжатые данные в виде вектора принадлежности больших данных к классам поступают на вход нейронной сети результатом работы которой является повышение правдоподобия классификации.

На первом шаге определено, что для оценивания физико-химических показателей (октанового числа) не противоречащим требованиям в промышленности и установленные ГОСТами на определение октанового числа по моторному и исследовательскому методам ($\leq 0{,}1$ единицы октанового числа), например $\delta Y = 0{,}1$, необходимо ввести в базу данных экспертной системы не менее 50 образцов ИК-спектров каждой из исследуемых марок автомобильных бензинов.

БД (Октановые числа бензинов)

	Октановые числа																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	…	50
80 нормаль	82,6	82,0	82,0	82,4	86,5	80,0	83,3	81,2	84,5	83,0	81,0	84,3	82,8	82,2	81,5	83,6	…	81,0
92 регуляр	93,0	93,1	93,3	93,5	93,7	93,6	92,0	92,0	92,0	92,8	92,8	92,5	92,9	92,9	92,6	93,7	…	93,1
95 премиум	95,6	95,0	95,0	95,1	96,5	96,2	96,5	96,2	95,0	95,0	95,0	95,6	95,6	95,4	95,8	95,8	…	96,4
98 супер	98,5	98,3	98,1	98,5	98,0	98,2	98,2	98,6	98,1	98,0	98,3	98,1	98,4	98,5	98,0	98,2	…	98,0

Рисунок 6 – Пример хранения значений октановых чисел в базе данных ЭС

На втором шаге показано преимущество равномерного заполнения диапазона значений физико-химических показателей (октановых чисел) при их максимально возможном разбросе (рисунок 6).

На третьем шаге осуществляется подготовка спектральных данных для проведения предварительной классификации автомобильного бензина методом «ближайшего соседа» с использованием режекторной фильтрации.

Режекторная фильтрация необходима, т.к. она позволяет избавиться от лишних спектральных данных, снижающих достоверность полученных результатов.

В качестве режекторного фильтра выступают следующие.

1) Фильтр диапазонов, отвечающий нестабильной работе конкретного прибора.

При работе с ПФС-1 используются значения спектрального диапазона 400…4000 $см^{-1}$, за исключением интервалов, содержащие нестационарные данные ($см^{-1}$): 692,0… 695,0; 702,0…703,0; 707,3…707,7; 746,0…750,0; 752,6…757,0; 769,0…770,0; 1490,0…1492,0. При работе на АФ-3 для анализа используется весь спектральный диапазон 400…4000 $см^{-1}$.

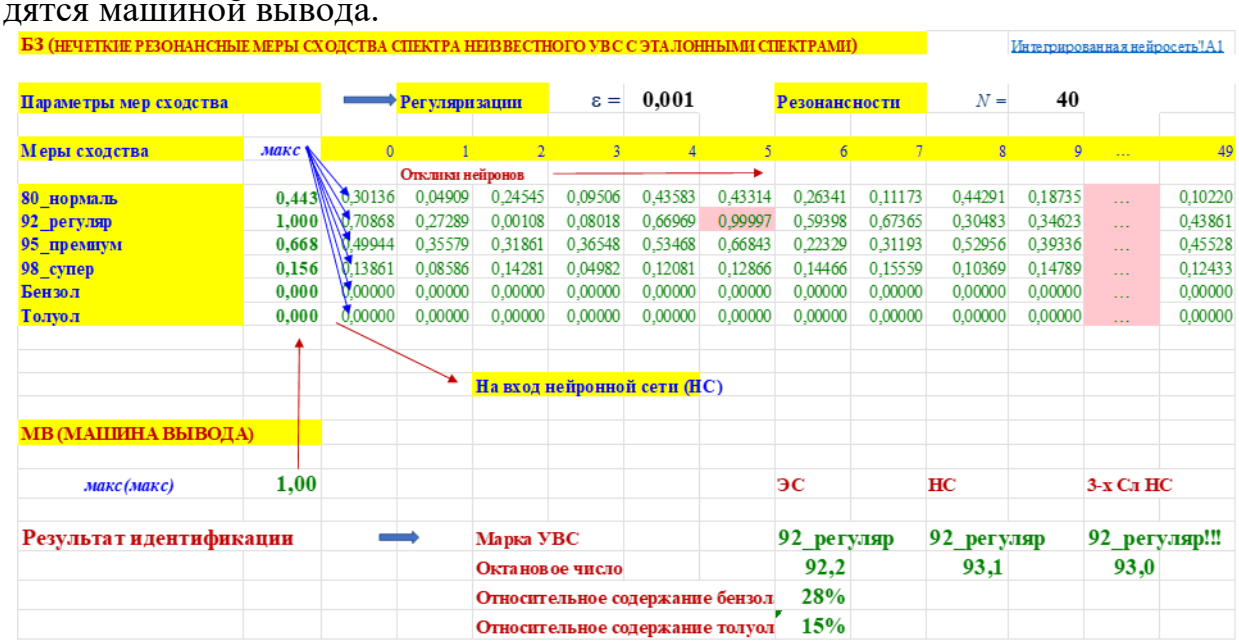
2) Фильтр диапазонов, отвечающий за поглощение паров воды. В исходном спектре с помощью режекторной фильтрации в районе 1500 $см^{-1}$ вырезана полоса частот, соответствующая данному поглощению (рисунок 7).

Рисунок 7 – Пример работы фильтра частот, соответствующих поглощению паров воды

3) Фильтр частот, соответствующих поглощению бензола, и др.

На четвертом шаге после режекторной фильтрации реализуется модель идентификации макросостояний автомобильных бензинов, позволяющая проводить предварительную классификацию нефтепродукта методом «ближайшего соседа».

Среди полученных мер сходства для каждого класса автомобильного бензина выбирается её максимальное значение. Результаты вычислений в виде вектора принадлежности спектральных данных к классам MAX[SM] выводятся машиной вывода.



БЗ (НЕЧЕТКИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ МЕРЫ СХОДСТВА СПЕКТРА НЕИЗВЕСТНОГО УВС С ЭТАЛОННЫМИ СПЕКТРАМИ) — Интегрированная нейросеть!A1

Параметры мер сходства → Регуляризации ε = 0,001 — Резонансности N = 40

Меры сходства	макс	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	…	49
		Отклики нейронов →											
80_нормаль	0,443	0,30136	0,04909	0,24545	0,09506	0,43583	0,43314	0,26341	0,11173	0,44291	0,18735	…	0,10220
92_регуляр	1,000	0,70868	0,27289	0,00108	0,08018	0,66969	0,99997	0,59398	0,67365	0,30483	0,34623	…	0,43861
95_премиум	0,668	0,49944	0,35579	0,31861	0,36548	0,53468	0,66843	0,22329	0,31193	0,52956	0,39336	…	0,45528
98_супер	0,156	0,13861	0,08586	0,14281	0,04982	0,12081	0,12866	0,14466	0,15559	0,10369	0,14789	…	0,12433
Бензол	0,000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	…	0,00000
Толуол	0,000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	…	0,00000

На вход нейронной сети (НС)

МВ (МАШИНА ВЫВОДА)

		ЭС	НС	3-х Сл НС
макс(макс)	1,00			
Результат идентификации →	Марка УВС	92_регуляр	92_регуляр	92_регуляр!!!
	Октановое число	92,2	93,1	93,0
	Относительное содержание бензол	28%		
	Относительное содержание толуол	15%		

Рисунок 8 – Предварительная классификация нефтепродукта методом «ближайшего соседа»

Неизвестный многомерный вектор (4000 отсчётов) приводится к шестимерному вектору MAX[SM] = (0,443; 1,000; 0,668; 0,156; 0,000; 0,000)^T (рисунок 8).

Таким образом осуществляется значительное сжатие информации и указание на то, что неизвестный вектор наиболее близок к классу АИ-92.

Идентификации микросостояний нефтепродукта - оценивание значений физико-химических показателей (октановых чисел) - осуществляется с помощью нечёткого регрессионно-факторного анализа.

На пятом шаге сжатые данные в виде вектора принадлежности больших данных к классам поступают на вход нейронной сети. Применение которой позволяет повысить правдоподобие классификации нефтепродуктов.

На рисунке 9 показан фрагмент структуры топологии модуля трёхслойной нейронной сети прямого распространения, реализованной в табличном процессоре.

Модуль рассчитан на работу с 6 классами (АИ-80, АИ-92, АИ-95, АИ-98, бензол, толуол).

На выходе модуля трехслойной нейронной сети, обладающего высокой устойчивостью к аддитивным входным помехам, формируются сигналы-индикаторы принадлежности исследуемых спектральных данных соответствующему классу.

Эксперименты показали, что однослойная и многослойная нейронные сети центроидов классов классифицируют неизвестные ИК-спектры с высокой степенью правдоподобия: ИК-спектр автомобильного бензина АИ-92 с вероятностью 99% и 100% соответственно (см. рисунок 9). Это говорит о том, что

для многих задач идентификации больших данных вполне достаточно использования интегрированных экспертных систем и однослойных нейронных сетей.

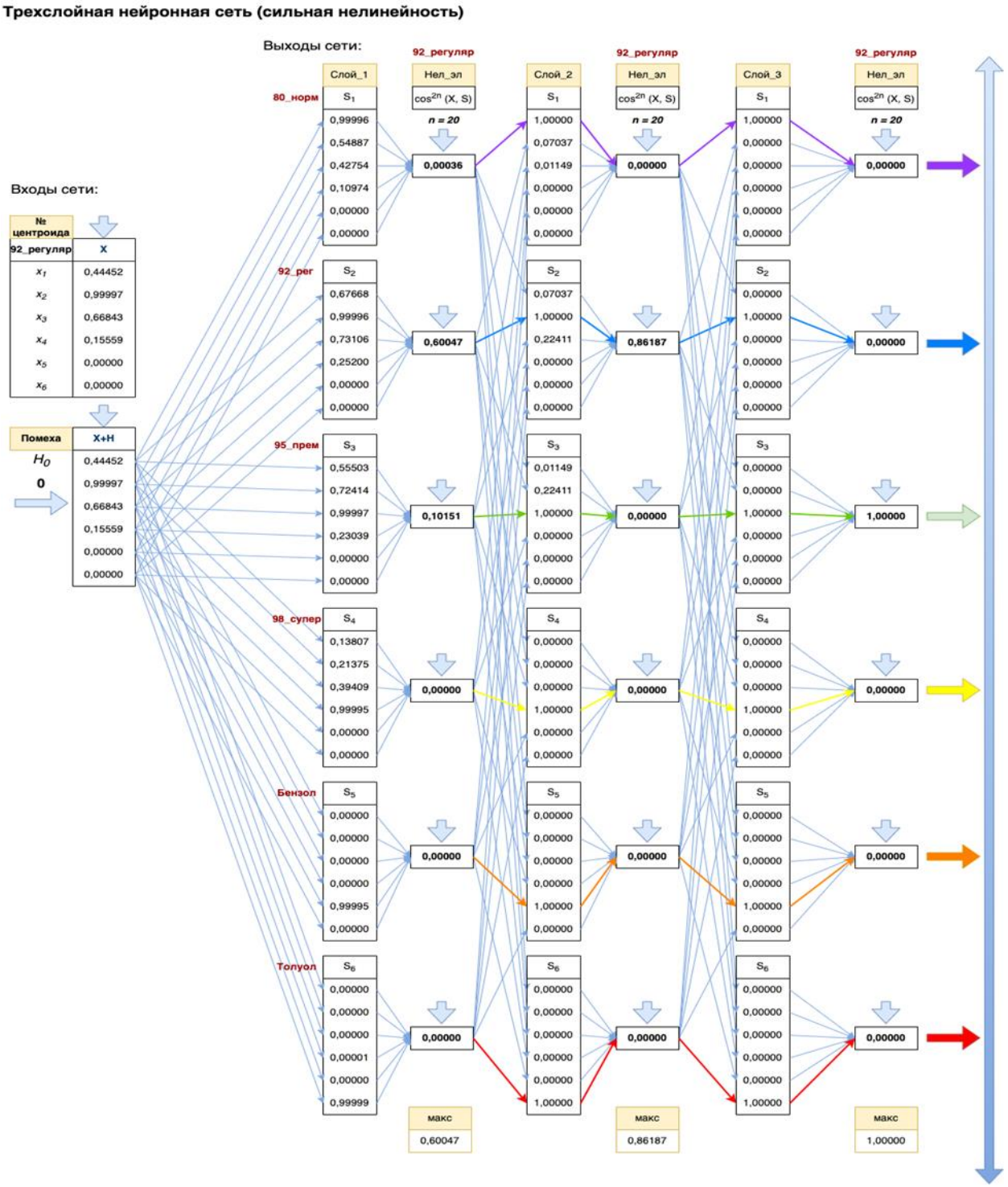


Рисунок 9 – Структурная топология модуля трехслойной нейронной сети прямого распространения

Показана эффективность применения в интегрированной ЭНС простейшей однослойной нейронной сети, количество нейронов которой равно числу идентифицируемых классов.

Эффективность внедрения разработанной ЭНС была проверена с помощью программно-вычислительного комплекса оценки качества производственных процессов «Своевременность». Расчеты проводились для двух случаев, до внедрения ЭНС и после внедрения ЭНС.

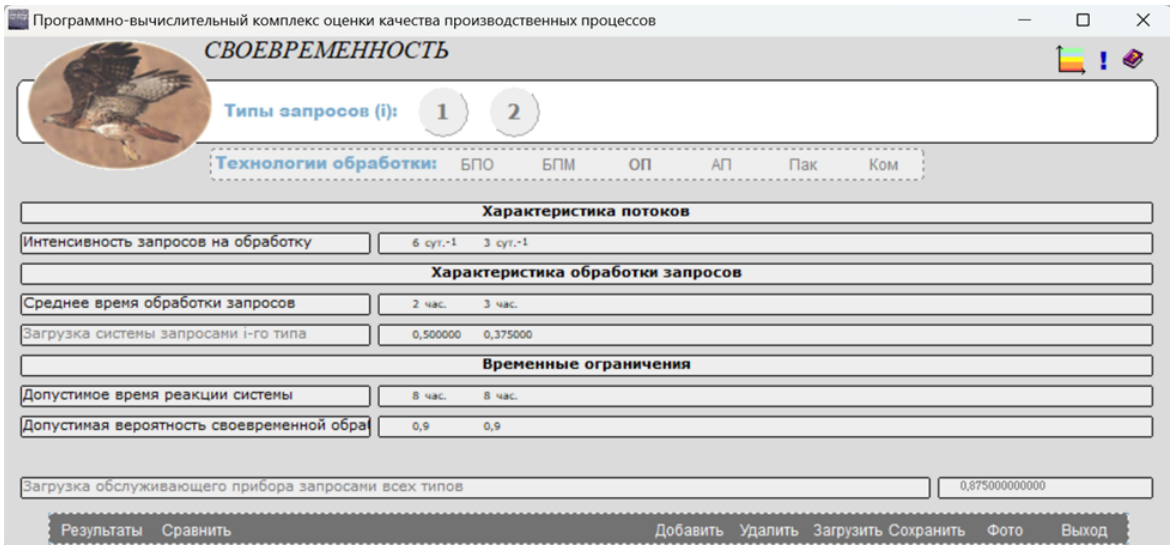


Рисунок 10 – Ввод данных в систему оценки качества производственных процессов до внедрения ЭНС

В первом случае результаты показали, что при внесении в программно-вычислительный комплекс следующих показателей: забор образцов бензина с частотой раз в 4 часа, ожидаемая обработка образца в ЛИМС в течении 2 часов, допустимое время реакции системы 8 часов (рисунок 10) вероятность своевременной обработки показателей качества составила 72% при допустимой вероятности 90% (рисунок 11).

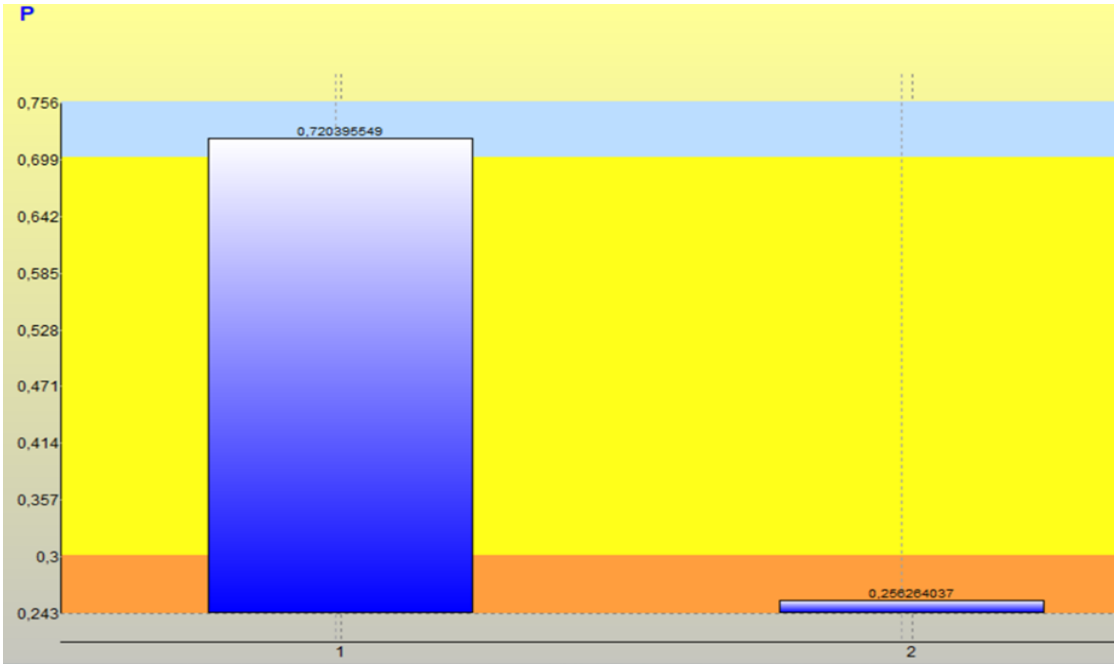


Рисунок 11 – Вероятность своевременной обработки показателей качества до внедрения ЭНС

При заборе образцов бензина с частотой раз в 8 часов, ожидаемой обработки образца в ЛИМС в течение 3 часов, допустимом времени реакции системы 8 часов вероятность своевременной обработки показателей качества составила 26% при допустимой вероятности 90%. Ни один результат не достиг уровня допустимой вероятности, что говорит о неэффективной работе автоматизированной системы контроля качества нефтепродуктов.

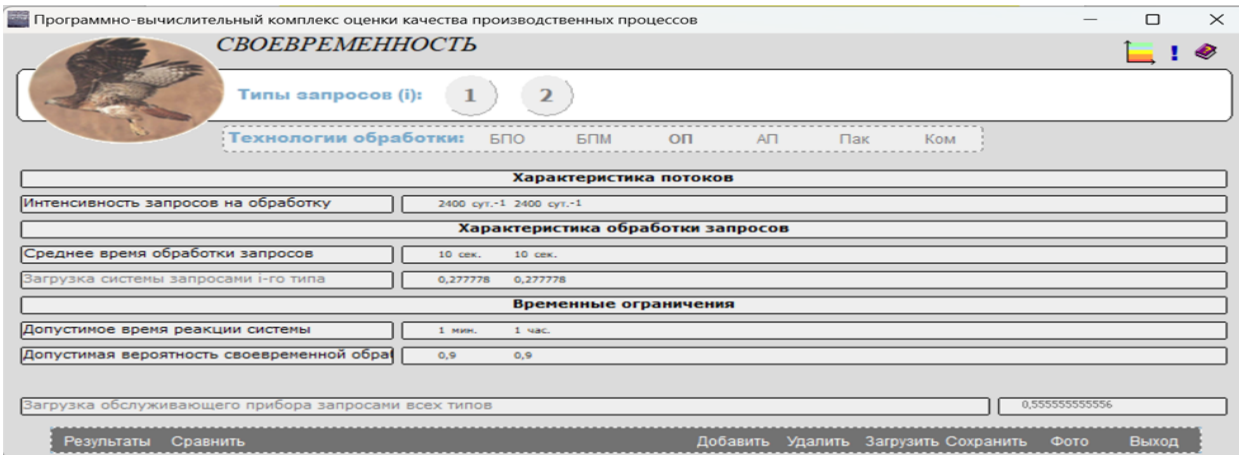


Рисунок 12 – Ввод данных в систему оценки качества производственных процессов после внедрения ЭНС

Во втором случае при использовании поточного анализатора с разработанной ЭНС были внесены следующие данные: забор образцов бензина осуществляется непрерывно (с частотой раз в 30 секунд), ожидаемая обработка образца в ЭНС в течении 10 секунд, допустимое время реакции системы 1 минута (рисунок 12). При этом вероятность своевременной обработки показателей качества составила 94% при допустимой вероятности 90%. При изменении допустимого времени реакции системы до 1 часа вероятность своевременной обработки показателей качества возрастает до 100% (рисунок 13).

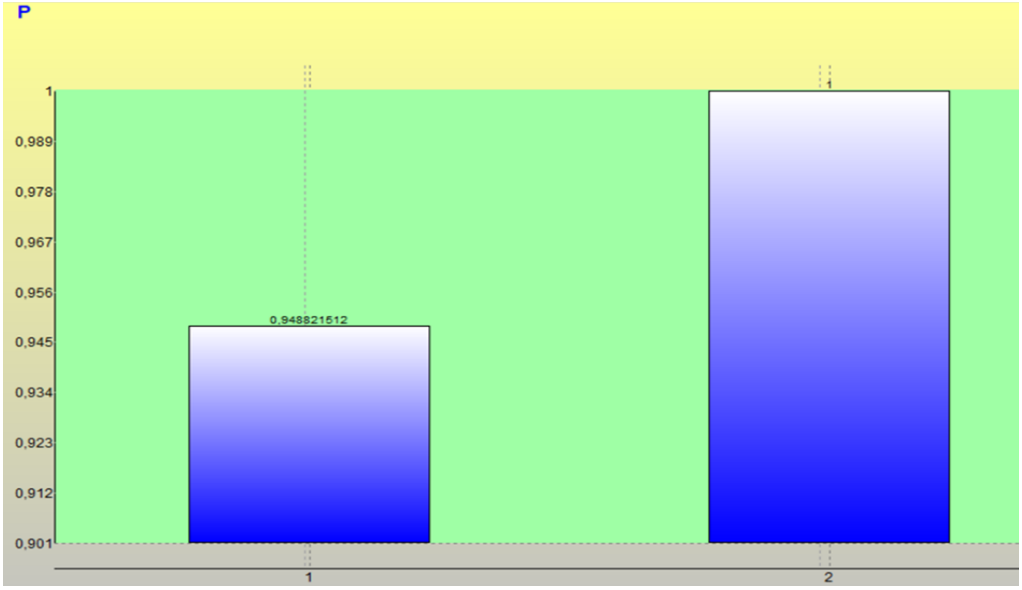


Рисунок 13 – Вероятность своевременной обработки показателей качества после внедрения ЭНС

Полученные результаты показывают, что внедрение в автоматизированный контроль качества нефтепродуктов разработанной ЭНС выводит управление технологическим процессом на новый уровень.

Четвертая глава посвящена программной реализации ЭНС для автоматизированного контроля качества нефтепродуктов. Рассмотрены программные компоненты и библиотеки, вошедшие в состав разработанной ЭНС. Сконфигурирована нейронная сеть для повышения правдоподобия классификации нефтепродуктов. Проработана и реализована серверная часть при помощи фреймворка Express на языке JavaScript. Данный фреймворк предоставляет небольшие и надёжные инструменты для HTTP-серверов что делает его отличным решением для одностраничных приложений и HTTP API.

Проработан и реализован пользовательский интерфейс для взаимодействия с ЭНС построенный на ReactJS (React), представляющим собой библиотеку JavaScript с открытым исходным кодом для создания пользовательских интерфейсов. Он используется для обработки уровня представления в одностраничных приложениях и при разработке мобильных приложений.

Сценарий использования ЭНС выглядит следующим образом. При открытии основной страницы приложения пользователю предлагается выбрать неизвестный спектр для его определения. После загрузки файла с неизвестным спектром пользователь должен выбрать классы или конкретные спектры, с которыми следует сравнивать неизвестный (рисунок 14).

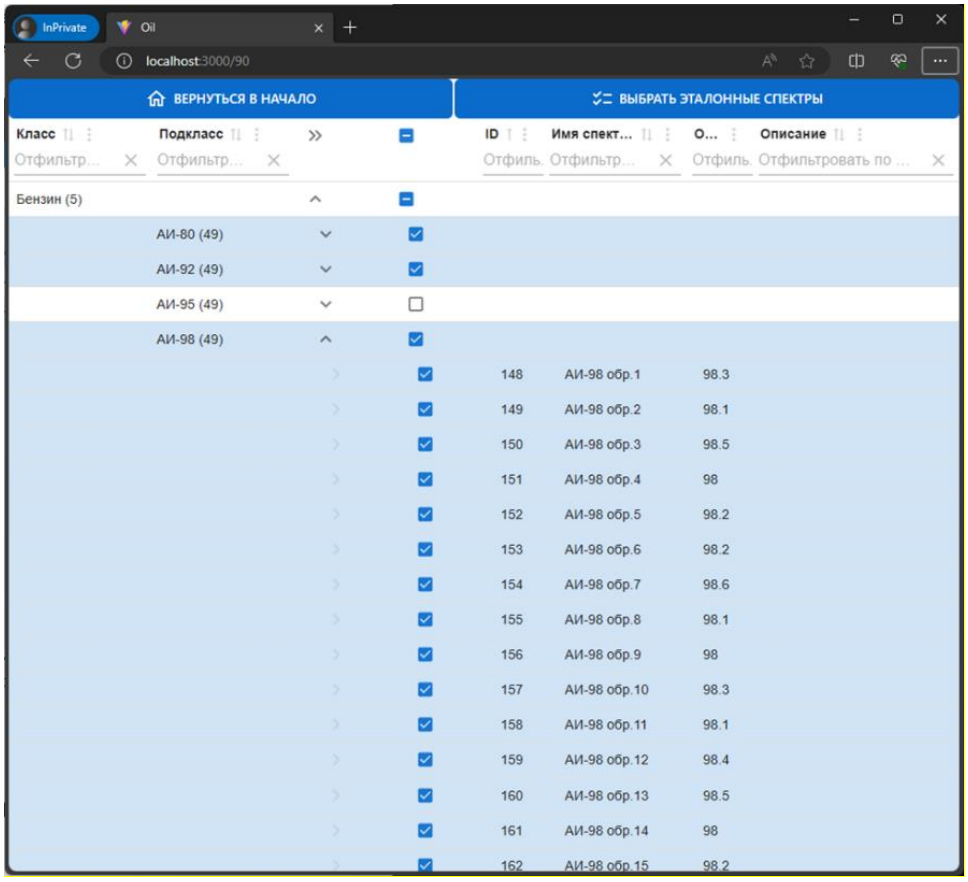


Рисунок 14 – Страница выбора спектров для проверки

После выбора спектров и обработки запроса сервером пользователь получает результат, но также может и визуально оценить неизвестный спектр и наиболее похожие на него спектры из выбранных классов. На этом этапе производится оценка октанового числа неизвестного спектра (рисунок 15).

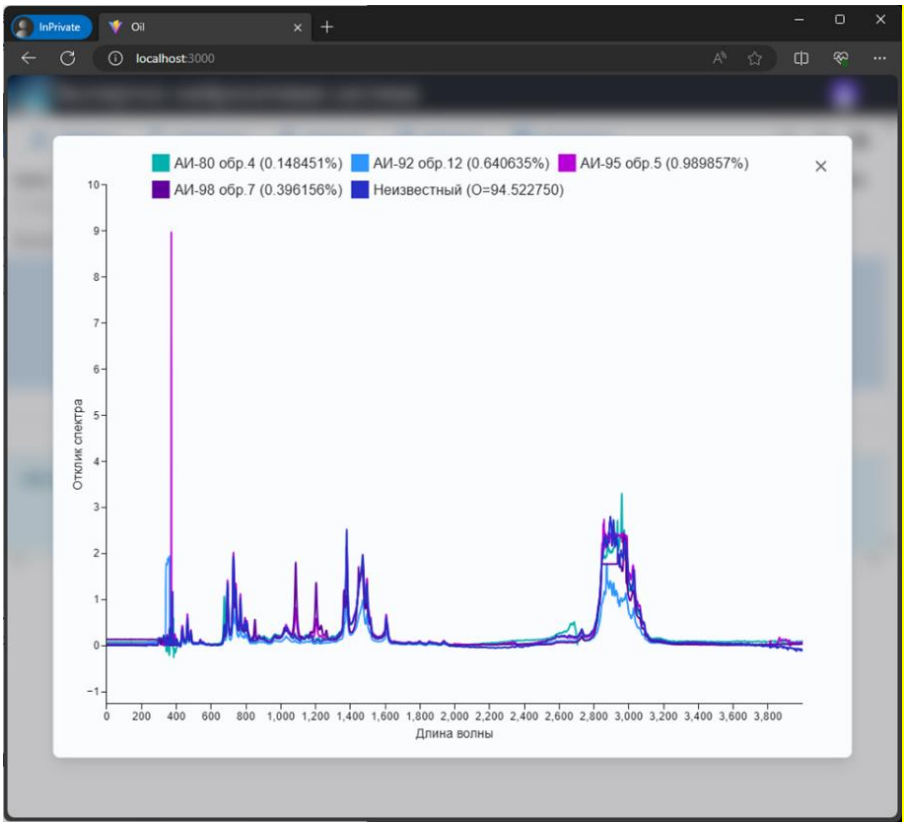


Рисунок 15 – Пример результатов работы алгоритма

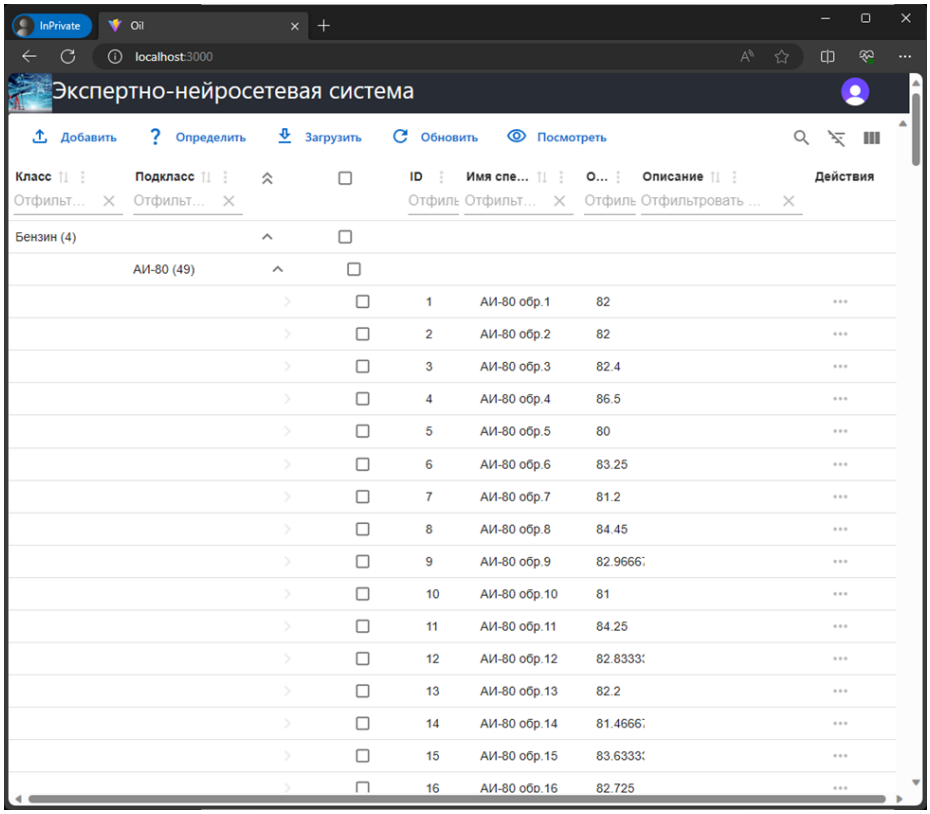


Рисунок 16 – Интерфейс администратора ЭНС

Помимо пользовательского интерфейса, разработан интерфейс администратора ЭНС (рисунок 16), предоставляющий администратору системы следующие возможности.

1. Добавление спектра в базу данных.
2. Определение неизвестного спектра из файла по имеющимся эталонным спектрам в базе данных.
3. Загрузка спектров из базы данных.
4. Изменение данных загруженного спектра.
5. Определение спектра по имеющимся эталонным.
6. Удаление спектра.
7. Просмотр значений спектров.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации содержатся новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны. Получены следующие основные результаты.

1. Проведён анализ действующих систем контроля качества и технических средств управления технологическим процессом производства нефтепродуктов, выявивший существующие недостатки на НПЗ, что позволило определить область внедрения ЭНС для модернизации функциональной схемы автоматизации производства автомобильного бензина с учётом таких особенностей функционирования сложной системы, как периодический контроль, мониторинг и нарушение технологического процесса.

2. Разработан метод построения интеллектуальных систем управления автоматизированным контролем качества продуктов нефтеперерабатывающей промышленности – объединены экспертная система и нейросеть в одну ЭНС, что даёт синергетический эффект при идентификации оптических спектральных данных: снижает их размерность до размерности, определяемой небольшим числом классов, и повышает правдоподобие классификации. Показана эффективность применения в интегрированной ЭНС простейшей трехслойной нейронной сети, количество нейронов которой равно числу идентифицируемых классов: что повышает достоверность определения марки бензина до 100%.

3. Адаптированы математические модели, содержащиеся в базе знаний, к параметрам показателей качества продуктов нефтеперерабатывающей промышленности (автомобильных бензинов) по их спектральным данным.

4. Создано информационное и программное обеспечение автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) – применение экспертной системы повышает гибкость и функциональность всей интегрированной ЭНС: позволяет интерпретировать исходные данные; оценивать по интерпретированным данным их сопутствующие показатели (в случае

оптических спектральных данных – показатели многокомпонентных молекулярных соединений, порождающих эти данные, концентрации соединений с известными спектрами). Прототип ЭНС разработан на основе клиент-серверной архитектуры: клиентская часть реализована в виде веб-клиента – она представляет собой т.н. «тонкий клиент», т.е. клиент, который переносит большую часть задач по обработке информации на серверную часть; серверная часть ЭНС обрабатывает запросы клиентов.

5. Программная реализация интегрированной ЭНС автоматизированного контроля качества нефтепродуктов показала высокую производительность на практике при внедрении в систему управления технологическим процессом для повышения эффективности в части оперативности и достоверности автоматизированного контроля качества автомобильных бензинов. В результате экспериментальных исследований с использованием программно-вычислительного комплекса оценки качества производственных процессов «Своевременность», было показано, что применение ЭНС в технологическом процессе повышает своевременную обработку показателей качества на 20 – 75%.

6. Результаты исследования, а именно: ЭНС идентификации больших данных автоматизированного контроля качества автомобильных бензинов, предложенные алгоритмы, модели и методы, программное обеспечение – реализованы в ФГБУН Научно-технологическом центре уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН), ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), АО ИНСТИТУТ НЕФТЕХИМПЕРЕРАБОТКИ (АО «ИНХП») и в ООО «Славянск ЭКО», а также в учебном процессе кафедры математического обеспечения и стандартизация информационных технологий института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет».

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Гусев, К.В. Автоматизированный контроль качества продукции в непрерывном цикле промышленных предприятий / К.В. Гусев, С.А. Красников, В.М. Образцов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 3. – С. 149-152.

2. Гусев, К.В. Визуализация больших данных в виде многомерных векторов на плоскость/ К.В. Гусев, С.А. Красников, М.А. Овчинникова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 1. – С. 155-158.

3. Гусев, К.В. Кластеризация многомерных спектральных данных с применением алгоритма уменьшения размерности / К.В. Гусев, С.В. Николаева, С.А. Красников, М.В. Сартаков [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 10. – С. 273-277.

4. Гусев, К.В. Технология интегрирования экспертных систем и нейронных сетей для автоматизации идентификации больших данных / К.В. Гусев,

А.Е. Краснов, С.А. Красников, М.А. Овчинников // Информатизация образования и науки. – 2023. – № 3(59). – С. 70-80.

5. Гусев, К.В. Метод спектральной компьютерной квалиметрии / К.В. Гусев, С.А. Красников, С.В. Николаева, М.А. Овчинников // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 4. – С. 143-146.

6. Гусев, К.В. Архитектура модуля загрузки данных распределенного текстового хранилища / К.В. Гусев, Г.Е. Аввакумов, С.А. Красников // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 12. – С. 294-298.

7. Гусев К.В., Краснов А.Е., Красников С.А., Овчинников М.А. Экспертно-нейронная система для идентификации больших данных (серверная часть). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в ФГУ ФИПС № 2023669265 от 12.09.2023г.

8. Гусев К.В., Краснов А.Е., Красников С.А., Овчинников М.А. Экспертно-нейронная система для идентификации больших данных (клиентская часть). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в ФГУ ФИПС № 2023668219 от 07.09.2023 г.

Публикации в других изданиях

9. Гусев, К.В. Технология интегрирования экспертных систем и нейронных сетей для автоматизации идентификации больших данных / К.В. Гусев // Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности: Сборник трудов XXVI Международной конференции, XXIV Международного конкурса научных и научно-методических работ, 09-10 ноября 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Экон-Информ», 2023. – С. 44-46.

10. Гусев, К.В. Новый подход к построению систем идентификации больших данных / К.В. Гусев, С.А. Красников // Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности: Сборник трудов XXVII Международная конференция; XXV Международный конкурс научных и научно-методических работ, 08-09 февраля 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Экон-Информ», 2024. – С. 26 - 29.

11. Гусев, К.В. «Автоматизированная система контроля качества светлых нефтепродуктов по их ИК спектрам», Международная метрологическая конференции «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов. Качество углеводородного сырья (нефти и природного газа)», ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 01 сентябрь 2023 г. Казань. (доклад на конференции)

12. Гусев, К.В. «Автоматизированная система управления для идентификации больших данных», НПК с международным участием «Современные проблемы автоматизации технологических процессов и производств», посвященной 100-летию со дня рождения И.К. Петрова, РОСБИОТЕХ, 11 октября 2023 Москва. (доклад на конференции)

13. Гусев, К.В. «Разработка автоматизированной системы управления для идентификации спектральных данных с применением клиент-серверной архитектуры», II Международной научно-практической конференции «Цифровые международные отношения 2023», МГИМО МИД, партнерами являются РТУ МИРЭА, Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, 26 октябрь 2023г Москва. (доклад на конференции)

14. Гусев, К.В. «Идентификация больших данных в непрерывном процессе оценки качества продуктов нефтеперерабатывающей промышленности", РТУ МИРЭА состоялся круглый стол «ИТ-тренды 2024» в рамках X Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности» 18 апреля 2024г Москва. (доклад на конференции)

15. Гусев, К.В. «Автоматизация контроля качества нефтепродуктов для обеспечения эффективного управления технологическим процессом», V Международная конференция «Фабрика будущего» РОСБИОТЕХ 26 апреля 2024 Москва (доклад на конференции)

16. Гусев, К.В. «Стандартизированные процедуры проектирования производственных систем. Автоматизированный контроль качества продукции в непрерывном цикле промышленных мероприятий», Международная научная конференция «ИТ-Стандарт 2024» РТУ МИРЭА 22-23 мая 2024г Москва. (доклад на конференции)

Подписано в печать 30.10.2024 г.
Объем 1,0 усл.печ.л.
Тираж 100 экз. Заказ 2942
Отпечатано в типографии ОО «Технология ЦД»
121471, г. Москва, улица Рябиновая д 51А, стр.1