

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева»**

На правах рукописи



Горбунов Сергей Сергеевич

**Система оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения
бензинов**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре кибернетики химико-технологических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Егоров Александр Фёдорович, профессор кафедры кибернетики химико-технологических процессов ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент
Колыбанов Кирилл Юрьевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гуманитарный университет», профессор кафедры информационных технологий и систем

кандидат технических наук, доцент
Рылов Сергей Андреевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», доцент кафедры промышленной информатики

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет».

Защита состоится «27» февраля 2025 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета РХТУ 2.6.09 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» (125047, Миусская пл., д. 9, ауд. 443, конференцзал).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре и на официальном сайте <https://www.muctr.ru> федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева».

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного
Совета РХТУ 2.6.09

Кандидат технических наук, доцент

В. А. Василенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Компаундирование бензинов – процесс интенсивного смешения бензиновых компонентов и небольшого количества высокооктановых присадок для поддержания требуемых показателей качества товарных бензинов, таких как октановое число по исследовательскому методу (ОЧИМ), октановое число по моторному методу (ОЧММ), давление насыщенных паров (ДНП) по Рейду и т. п.

Процесс смешения бензинов является одной из важных и завершающих стадий в технологической цепочке установок на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ), определяющих качество товарных бензинов и, как следствие, эффективность производства НПЗ в целом. Из множества возможных рецептур компонентов смешения, удовлетворяющих спецификации товарных бензинов, выбирается одна, в соответствии с выбранным критерием оптимальности, обеспечивающая эффективность компаундирования бензинов.

Текущее состояние технологической инфраструктуры и систем автоматизации на НПЗ не обеспечивают оптимальные показатели по времени смешения и оптимизации показателей качества производимой продукции. Также существуют риски использования на некоторых НПЗ программных продуктов зарубежных производителей, поддержка которых не обеспечивается.

Решение задачи оптимального управления процессом компаундирования бензинов вызывает необходимость реализации системы автоматического контроля и регулирования показателей качества продукта с использованием:

- поточных анализаторов качества продукта в замкнутом контуре автоматического управления смешением товарных бензинов;
- адаптивной математической модели смешения с учетом нелинейности ряда показателей качества товарного бензина от состава и показателей качества смешиваемых компонентов, неопределенности режимных параметров для улучшения качества системы управления;
- интеллектуальных систем мониторинга и коррекции измерений для обеспечения достоверности информации и, как следствие, повышения качества управления.

Эффективность процесса достигается за счет сокращения расходов дорогостоящих компонентов бензина, минимизации издержек за счет оптимального расписания ведения процесса смешения. Таким образом, задача повышения эффективности и оптимизации процессов производства бензинов является крайне актуальной как с точки зрения повышения качества продукции, так и с экономической точки зрения.

Степень научной разработанности темы. Для повышения качества получаемого бензина и его выхода ведется поиск путей совершенствования технологии компаундирования, поиск новых рецептур смешения с использованием присадок и добавок, повышающих октановое число. Эта задача может быть решена экспериментальными способами или с использованием методов математического моделирования.

Учет нелинейности изменения показателей качества товарных топлив от состава компонентов смешения при разработке математических моделей, как инструмента решения задач оптимизации рецептур и оптимального управления в режиме реального времени, обеспечивают эффективность системы управления.

В работе отмечен и проанализирован вклад отечественных и зарубежных учёных в разделы науки, связанных с темой диссертационной работы, следующих отечественных и зарубежных учёных:

- Теоретические основы математических методов, компьютерного моделирование и оптимизация режимов сложных технологических систем разработаны в трудах академика АН СССР Кафарова В. В., академика РАН Мешалкина В. П., профессора Егорова А. Ф., профессора Савицкой Т. В.;

- Проблемам повышения эффективности разрабатываемых рецептур смешения бензинов и оптимального управления процессом компаундирования посвящены труды: Иванчина Э. Д., Поздьева В. В., Сомова В. Е., Кузичкина Н. В., Сахневича Б. В., Киргиной М. В.;

- Существенный вклад в решение проблемы оптимального управления процессом компаундирования в режиме реального времени с учетом нелинейности показателей качества товарного топлива отражены в работах Никитина В. А., Мусаева А. А.;

- В значительной части работ по исследованию и разработке систем управления учитывается неопределенность параметров компаундирования топлив в режиме реального времени, которые отражены в трудах авторов: Zhang Y., Monder D. S.; A. Singh, J. F. Forbes, P. J. Vermeer, S. S. Woo J. Muller A.; Zahed A. H., Mullah S. A., Bashir M. D.; по многопериодному оптимальному планированию и управлению компаундированием топливных смесей представлено в трудах Mahalec V., Castillo Castillo P.

Цель работы и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является постановка задач, разработка математических моделей, алгоритмов и программного комплекса оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазута.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Анализ существующих на практике систем приготовления и оптимизации процессов компаундирования товарных бензинов;

2. Создание математической модели смешения бензинов с учетом нелинейной зависимости ряда показателей качества бензиновых смесей (ОЧИМ, ОЧММ, ДНП) и мазута (вязкости) от рецептуры и качественных показателей компонентов смешения;

3. Разработка и реализация онлайн-оптимизационных моделей и алгоритмов в условиях параметрической неопределенности, как инструмента решения проблемы эффективности процесса смешения бензинов.

4. Разработка программного комплекса оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазута.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Сформулирована математическая модель смешения бензинов и мазутов с учетом нелинейности показателей качества топливной смеси и неопределенности параметров технологического режима;

2. Предложена система оптимального управления смешением бензинов в условиях параметрической неопределенности;

3. Создан алгоритм интеллектуальной системы мониторинга и управления процессом смешения в производстве бензинов в режиме реального времени с целью уменьшения влияния возмущений на процесс компаундирования;

4. Предложен комбинированный алгоритм автоассоциативной нейронной сети и программного комплекса оптимального планирования и оптимизации рецептур для моделирования и управления процессом смешения бензинов.

5. Разработаны математические модели и алгоритмы оптимизации планирования операций процесса производства бензинов.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработанных впервые: автоматизированной системы, математических моделей и алгоритмов оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазутов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Сформулированы критерии оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов с точки зрения максимума производства товарного бензина;

2. Предложена модель и алгоритм онлайн-мониторинга элементов измерительной системы с использованием авто-ассоциативных нейронных сетей (ААНС) и аппарата статистического анализа данных для группировки по их принадлежности к технологическим режимам и самокоррекции ошибочных измерений для каждой из этих групп;

3. Разработаны база данных и программный комплекс решения задач оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазута.

Методология и методы исследования. При решении перечисленных задач использовались следующие методы и подходы:

1. Математическое моделирование и оптимизация процессов смешения бензинов и мазутов;

2. Статистический анализ измерительной информации;

3. Автоассоциативная нейронная сеть для построения интеллектуальной системы мониторинга текущих измерений с коррекцией грубых ошибок в режиме реального времени.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методы разработки математических моделей и систем управления в офф/онлайн режимах и оптимизации рецептур смешения бензинов;
2. Математическая модель и результаты расчета рецептур смешения бензинов и мазутов;
3. Интеллектуальная система управления смешением бензинов в режиме реального времени в условиях параметрической неопределенности;
4. Программный комплекс и результаты оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов (ПК ОПОР).

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов исследования основана на использовании исходных данных для моделирования и расчета рецептур смешения бензинов и мазутов, показателей эффективности рецептур смешения для сравнения с реальными данными по рецептурам на НПЗ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на научных конференциях: XXXII Международной научной конференции «Математические Методы в Технике и Технологиях» ММТТ-32, 4–7 июня 2019 г., (Санкт-Петербург, Россия); XXXV Международной научной конференции «Математические Методы в Технике и Технологиях» ММТТ-35 30 мая – 03 июня 2022 г., (Ярославль, Россия); VI Международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования» ИНФОРИНО-2022 Национальный исследовательский университет «МЭИ», 12–15 апреля 2022 г. (Россия, Москва); VII региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России», Москва, 2023 г.; LXXI Международной научно-практической конференции «Научный форум: технические и физико-математические науки», Москва, 2024 г.

Личный вклад автора. Вклад автора в выполнении диссертационной работы заключается в проведении основного объема теоретических и экспериментальных работ, изложенных в диссертационной работе, включая:

- обработку и обобщение экспериментальных и теоретических исследований;
- постановка и математическая формулировка задач оптимизации рецептур бензинов и оптимального управления смешением;
- построение математических моделей рецептур смешения и алгоритмов расчета и анализа результатов;
- оформление результатов в виде научных публикаций и докладов на международных научных конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня ВАК. Результаты научного исследования подтверждены участием на научных мероприятиях всероссийского и международного уровня: опубликовано 7 работ в

материалах всероссийских и международных конференций. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, выводы, список используемой литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 185 страниц, включающие 80 рисунков, 17 таблиц и 3 приложения. Список цитируемой литературы содержит 154 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели исследования, изложена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен обзор методов компаундирования бензинов и основных проблем, требующих решения с целью интенсификации и повышения эффективности проведения процесса.

Представлен анализ влияния, входящих в состав бензина углеводородов. Рассмотрены особенности построения математических моделей процессов смешения бензинов, оптимального планирования компонентных ресурсов и оптимизации рецептур смешения бензинов. Представлен обзор, существующих программных продуктов оптимального планирования рецептур смешения топлив. Рассмотрены особенности построения математических моделей, решения задач оптимизации производственного планирования и управления процессами смешения бензинов и мазутов, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлено описание структуры системы оптимизации и управления смешением товарных нефтепродуктов, состоящей из подсистем, предназначенных для планирования, мониторинга и исполнения задач смешения на НПЗ. Представлены модели расчета октановых чисел по исследовательскому методу (ОЧИМ) и давления насыщенных паров (ДНП).

В целом технология смешения и выпуск бензинов определенной марки разделена на множество партий по времени. Рецептуры смешения бензинов рассчитываются для каждой партии. Функциональная структура системы онлайн оптимизационного смешения бензинов представлена на рисунке 1.

Задание на планирование и смешение бензинов состоит:

- из требований к плану производства бензинов, сроков и критериев оптимизации;
- цен на компоненты смешения;
- запасов компонентов смешения и остатков товарной продукции в резервуарах;
- данных анализа состава и показателей качества компонентов смешения и бензинов с лабораторной информационно-менеджмент системы (ЛИМС).

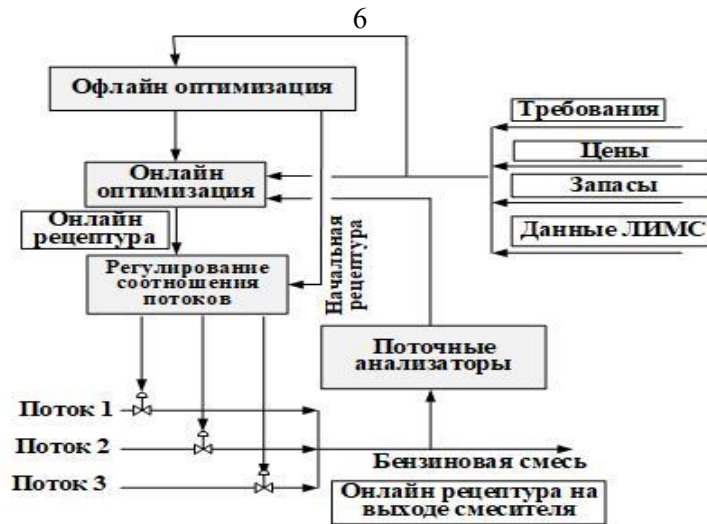


Рисунок 1 - Функциональная структура системы управления смешением бензинов

В модели офлайн оптимизации рассчитываются начальные оптимальные рецепты и пересылаются в распределенную систему управления (PCY) для начала процесса смешения и поддержания оптимального во времени соотношения потоков. В дальнейшем, онлайн модель оптимизации корректирует онлайн рецепты с учетом данных от поточных анализаторов и информации от производственно-диспетчерской службы до завершения партии.

Математическое описание зависимости показателей качества бензинов от состава рецептов смешения бензинов в общем случае имеет вид:

$$f_i(q_{i,j}, x_j) \approx \sum_{j=1}^N x_{i,j} q_{i,j} = q_{i,cm} * \sum_{j=1}^N x_j \quad (1)$$

где: $f_i(q_{i,j}, x_j)$ – функция зависимости i -го показателя качества бензиновой смеси от состава x_j и их показателей качества $q_{i,cm}$, с эффектом нелинейности в общем случае, $i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}$.

В выражении (1) приближенное равенство показателя качества смеси, как суммы произведений долей компонентов смеси на соответствующий показатель качества справедливо, кроме показателей качества, имеющих нелинейную зависимость от состава рецептуры: ОЧИМ, ОЧММ и ДНП.

Результатом решения задачи оптимизации рецептур смешения по математической модели (1) является вектор массовых (объемных) долей компонентов смешения X .

Постановка задач оптимизации рецептур смешения бензинов

Критерий оптимальности

$$R = C^T * X \quad (2)$$

Ограничения

$$F(Q, X) \leq (E^T * X) * S + \Delta Q \quad (3)$$

где

$$\Delta Q = [Q_{cm} - Q_{cm}^{\Pi}] * (E^T * X) \quad (4)$$

$$H * X \leq d \quad (5)$$

$$X^* = \mathop{\text{Arg min}}_{X \in \tilde{X}} R(X) \quad (6)$$

где: C - вектор цен компонентов смешения; S – вектор спецификаций показателей качества бензинов; X - вектор массовых (объемных) долей компонентов смешения; Q – матрица показателей качества компонентов смешения бензинов; Q_{CM}, Q_{CM}^{Π} – векторы показателей качества смеси измеренных и прогнозируемых по математической модели, соответственно; E^T – единичная матрица; H – матрица ограничений вовлекаемых компонентов смешения по рецептуре; d – вектор ограничений на количество доступных ресурсов смешения бензинов при расчете рецептов; ΔQ – вектор произведения «невязки» между измеренными и расчетными показателями качества смеси бензина на долю (объемную/массовую) компонента в смеси, обновляемый на каждом интервале оптимизации и управления процессом смешения; X^* - оптимальное значение вектора X ; \tilde{X} – область допустимых значений вектора X .

В постановке задачи (2) – (5), $F(Q, X)$ - в общем случае нелинейная функция по ряду показателей качества смеси бензинов. Для линейной функции в условии (3) $F(Q, X) = QX$.

Процесс смешения бензинов осуществляется по партиям в указанное время и в определенной последовательности в зависимости от состояния резервуарных парков как по компонентам смешения, так и товарного бензина.

Массив предшествующих показателей качества компонентов смешения используются для прогнозирования показателей качества и расчета рецептов на всем временном горизонте смешения.

Критерий оптимальности по партиям

$$R_P = \sum_{t_T}^{t_K} C^T * X_t \quad (7)$$

Ограничения

$$\sum_{t_H}^{t_T - \Delta t} F(Q_t, X_t) + \sum_{t_T}^{t_K} F(Q_{CM,t}^{\Pi}, X_t) \leq \left[\sum_{t_H}^{t_K} E^T * X_t \right] * S \quad (8)$$

$$F(Q_{CM,t}^{\Pi}, X_t) \leq [E^T * X_t] * S \quad (9)$$

$$[H * X_t]_{t_H \rightarrow t_K} \leq D \quad (10)$$

$$X_t^* = \mathop{\text{Arg min}}_{X_t \in \tilde{X}_t} R(X_t) \quad (11)$$

где t_H, t_m, t_K – время начала, текущего и окончания партии смешения, соответственно; t – время смешения; $Q_{CM,t}^{\Pi}$ – матрица прогнозируемых показателей качества; D - вектор ограничений на компоненты смешения; X_t^* - оптимальный вектора X_t на интервале времени t ; \tilde{X}_t – область допустимых значений вектора X на интервале t . Ограничение (9) обеспечивает выполнение требований по спецификации в каждой партии.

В постановке задачи (7) - (11) показатели качества компонентов смешения для каждой партии различны.

Для решения задачи учета неопределенности по качеству компонентов смешения бензинов в интервале периода смешения бензинов вводится случайная функция в математическое описание постановки задачи.

Пусть X - вектор компонентов рецептов смешения, ξ - стохастический (случайный) вектор.

$F(X, \xi)$ - целевая функция и $h_j(x, \xi)$ ($j = 1, 2, \dots, m$) - стохастическая функция ограничения.

Математическая формулировка задачи стохастической оптимизации с вероятностным ограничением имеет следующий вид:

$$R(x, \xi) = F(CX, \xi) \quad (12)$$

Ограничения по вероятности Pr в общем виде означает, что при формировании рецептов и смешении бензинов, количество вовлекаемых в смесь каждого компонента не будет превышать запасы компонентов в резервуарах с достоверностью a_j

$$Pr_j(h_j(x, \xi) \leq 0) \geq a_j, \quad j = \overline{1, m} \quad (13)$$

где: a_j - уровень достоверности ограничения, другими словами, после получения оптимальных значений, вероятность реализации решения должна быть не ниже, чем a_j для каждого $h_j(x, \xi) \leq 0$, что означает, относительно ОЧИМ, минимизацию вовлечения высокооктановых дорогих компонентов в смесь бензина. Результатом является экономия «октанового фонда» и снижение стоимости товарного бензина.

Постановка задачи в форме (12) определяет решение с учетом параметрической неопределенности, который применим и для онлайн оптимального управления смешением бензинов.

Неопределенность в целевой функции исключается, потому что целевая функция сводит к минимуму разницу между рецептурами верхнего уровня (офлайн оптимизация) и текущими в режиме реального времени для максимизации прибыли от смешения бензинов по каждой партии в срок

$$R_{t_T, t_{T-1}} = \Delta(X, \xi) = \|X_{t_T} - X_{t_{T-1}}\| \quad (14)$$

Ограничение

$$Pr_j \left\{ \left(\sum_{t_H}^{t_{T-1}} X_t \right) * Q_b + F(Q_{t_{T-1}}, \xi, X_{t_T}) \leq \left[\sum_{t_0}^{t_f} E^T * X_t \right] * S_j \right\} \geq a_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (15)$$

$$\sum_{t_H}^{t_T} H * X_t \leq d \quad (16)$$

В соотношении (15) слева от неравенства первое слагаемое в вероятности Pr - произведение вектора измерений показателей качества смеси поточного анализатора Q_b на долю компонентов смешения в смеси, реализует функцию обратной связи в блоке онлайн оптимизации, рисунок 1.

Качество сырья в текущих условиях определяется слагаемым в (17) со случайным вектором возмущений ξ .

$$Q_{t_r}^{\Pi} = Q_{t_r-1} + \lambda * \xi \quad (17)$$

где: ξ – случайная функция плотности распределения вероятностей; λ - вектор поправочных коэффициентов.

Учет вектора случайных возмущений ξ , влияющего на неопределенность изменения параметров компонентов смешения в каждой партии, решает проблему несоответствие («невязки») результатов, полученных по модели, и данными онлайн-оптимизации в режиме реального времени.

Представленная онлайн-модель оптимизации не прогнозирует показатели качества компонентов смешения для оставшегося интервала времени смешения бензинов как в (7) - (11), и рассчитывается рецептура для текущей партии с точным прогнозом длительности смешения.

Выполнение условия (15) обеспечивает высокую вероятность производства бензиновой смеси в соответствии с требованиями к спецификации, равной произведению достоверностей a_j в целом по партиям, снижающими риск повторного смешения, вызванного некондиционностью показателей качества товарного бензина.

Надежность и достоверность информации являются одним из определяющих факторов целостности и эффективности функционирования автоматизированной системы управления различных уровней. Небольшая ошибка в измерениях может привести к значительным финансовым издержкам.

В диссертационной работе представлено решение этой проблемы использованием автоассоциативной нейронной сети (ААНС), обучающейся модифицированным робастным методом в системе онлайн мониторинга «зашумленных» сигналов для обнаружения неисправностей и автокоррекции показаний измерительной системы (ИС).

Система строится на базе архитектуры ААНС, позволяющей фильтровать шумы измерения, осуществлять самокоррекцию ошибочных сигналов из-за сбоев и дрейфа показаний ИС с течением времени, осуществлять обработку данных, относящихся к грубым ошибкам. Для этого используется рекуррентная нейронная сеть Хопфилда для моделирования характеристик статики и динамики системы смешения бензинов с применением ААНС:

На рисунке 2 представлена блок-схема подсистемы ААНС в системе управления процессом смешения бензинов.

Входным образом для ААНС является вектор, состоящий из измерений компонентов смешения X с частью скорректированных с ИС в блоке ААНС $X_{t,i}$, $i = \overline{1, N}$, и вектора показателей качества бензиновой смеси $Q_{см}$. В качестве эталона обучения системы принимается вектор спецификации бензинов S .

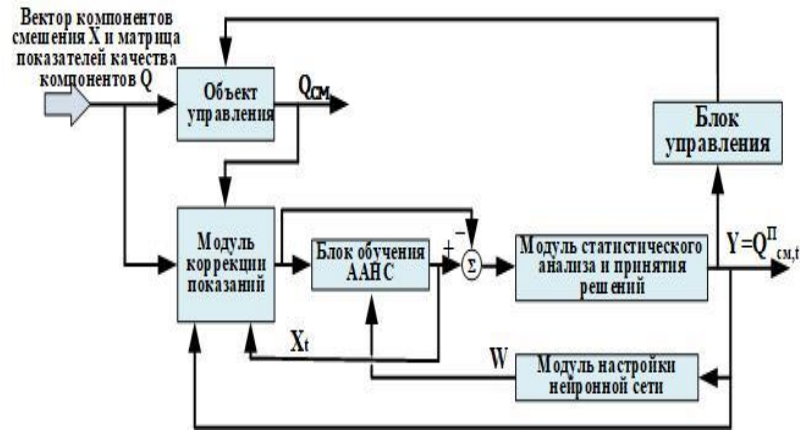


Рисунок 2 - Функциональная структура системы управления смешением бензинов с применением ААНС

Обучение ААНС является процессом непрерывной коррекции весовых коэффициентов связей (синапсов) в модуле настройки нейронной сети до устойчивого решения, являющееся признаком обученности сети. Выходной вектор рекуррентно формируется в результате процесса обучения ААНС и репродуцирования (отображения) входного вектора на выходе в соответствующем динамическом диапазоне.

При данных от резервированных (избыточных) измерительных элементов в ААНС можно использовать усредненное значение. В случае отсутствия избыточности измерительной информации оценка выходного обученного вектора основана на статистическом анализе взаимной корреляции измерений, обеспечивающей более адекватные результаты по сравнению с измерениями с меньшей взаимной корреляцией во входных векторах.

Динамика состояния во времени i -ого нейрона в сети из N нейронов в простейшем случае описывается дискретной динамической системой с активационной пороговой функцией T :

$$y_i(t+1) = F\left(\sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i\right) \quad (18)$$

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y(t), & \text{если } \sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i = T, \\ +1, & \text{если } \sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i > T, \\ -1, & \text{если } \sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i < T, \end{cases} \quad (19)$$

ААНС с обратными связями устойчива в соответствии с условиями симметричности матрицы весовых коэффициентов $w_{ij} = w_{ji}$ и равенство нулю весовых коэффициентов главной диагонали матрицы $w_{ii} = 0$.

В сети Хопфилда на начальном этапе веса задаются и вычисление весов осуществляется по соотношению:

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^M x_j^k * x_i^k, i \neq j, \\ w_{ij} = 0, \text{ при } i = j, \end{cases} \quad (20)$$

где x_j^k - j -я компонента запоминаемого k -го вектора; M – общее число запоминаемых образов.

Матрица весовых коэффициентов W формируется следующим образом:

$$W = \sum_{k=1}^m X_k^T * X_k - E \quad (21)$$

где E – единичная матрица, обеспечивающая условие равенства нулю элементов главной диагонали матрицы весовых коэффициентов в (20), $w_{ij}=0$ при $i = j$.

Укрупненный алгоритм работы ААНС состоит из двух стадий: обучения и прогнозирования (практического использования).

I. Стадия обучения:

1. Формирование матрицы эталонных образов $X_{ij}(0), Y_i(0)$;
2. Расчет матрицы весовых коэффициентов, уравнение (20).

II. Стадия практического использования:

1. На вход ААНС подается зашумленный вектор-столбец измерений \overline{X} , $i = \overline{1, N}$. Выходам нейронов присваиваются соответствующие значения входного вектора $Y(0) = X(0)$;

2. Пересчет состояния нейронов и расчет выходного вектора ААНС

$$Y_i^{\Pi}(t + 1) = \text{sign} \left| \sum_{i=1}^N w_{ij} * Y_i^{\Pi}(t) \right| \quad (22)$$

Каждый нейрон может быть в одном из двух состояний $Y_i^{\Pi}(t) \in \{-1; +1\}$.

Уравнение (22) представляет прогнозные результаты по ААНС.

3. Итерационные расчеты выполняются до устойчивого состояния выходного вектора, являющийся решением задачи распознавания (обученности НС).

На каждом этапе итерации t и $t+1$ осуществляется сравнение сходимости и устойчивости образов на выходе ААНС и оценка «невязки» с допустимым порогом ошибки. Если «невязка» в пределах порога ошибки, то ААНС обучена, эталонный образ близок входному вектору, если нет, то переход в пункт 2 стадии II, уравнение (22). Возможна и ситуация закливания (чередования) выходного вектора, являющаяся признаком завершения обучения. После стабилизации ААНС выходной вектор соответствует одному из эталонных образов.

При построении ААНС идентификация показателей качества бензинов в режиме реального времени (ОЧИМ, ДНП) задаются начальные значения коэффициентов в матрице парных взаимовлияний компонентом смещения $\{I_{i,k}\}$.

При использовании модели парного взаимовлияния на величину $ОЧИМ_1$ соотношение октанового числа бензинов может быть представлено в виде:

$$\text{ОЧИМ}_I = X^T * \text{ОЧИМ}_i + X^T * \{I_{i,k}\} \quad (23)$$

Укрупненная форма представления системы смешения имеет вид

$$Y(t) = F[X(t)] \quad (24)$$

где $Y(t) = \text{ОЧИМ}$, $X(t) = X$.

Оптимизация рецептуры смешения осуществляется в ПК ОПОР. Результаты по составу рецептуры смешения и показатели качества, полученные в ААНС, являются предварительными с точки зрения критерия оптимальности и передаются в ПК ОПОР для оптимизации в пределах требований по спецификации, в соответствии с постановкой задачи - минимизации стоимости или максимизации выхода товарного бензина.

Для моделирования статического свойства процесса смешения бензинов используются нейронные сети. Статическая нейронная сеть используется для моделирования октанового числа бензиновой смеси.

Рассмотрим смесь бензина их пяти компонентов, $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$. Модель парного взаимовлияния компонентов может быть записана как

$$\text{ОЧИМ}_3 = x^T p + x^T \{I_{I,K}\} \quad (25)$$

где вектор показателей качества исходных компонентов, $p = [p_1, p_2, p_3, p_4, p_5]^T = [90,1; 75,7; 93,8; 82,9; 95]^T$, $I_{I,K}$ - матрица парного взаимного влияния компонентов смешения на показатель качества смеси топлива, которая определяется как

$$I_{IK} = \begin{bmatrix} 0,0 & -6,0 & -8,25 & 8,25 & -6,0 \\ 0,0 & 0,0 & -7,8 & 9,0 & 11,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 11,0 & -9,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 11,5 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix}$$

Стандартная форма имеет вид

$$y(k) = \Phi[X(k)], \quad y(k) = \text{ОЧИМ}_3, \quad X(k) = x$$

Сначала в интервале $[0, 1]$ в качестве случайных чисел выбираем $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 = 1 - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)$ для обучения по модели нейронной сети

$$\hat{y}(k) = V_k \Phi[W_k X(k)] \quad (26)$$

где $W_k \in R^{9 \times 5}$, $V_k \in R^{1 \times 9}$ начальные условия для элементов V^{0T} , W_k и V_k являются случайными числами в интервале $[0, 1]$.

Алгоритм обучения

$$\begin{aligned} W_{k+1} &= W_k - \eta_k e(k) \Phi' V^{0T} X^T(k) \\ V_{k+1} &= V_k - \eta_k e(k) \Phi^T \end{aligned} \quad (27)$$

где

$$\eta_k = \frac{1}{1 + \|\Phi' V^{0T} X^T(k)\|^2 + \|\Phi\|^2}, \quad e(k) = \hat{y}(k) - y(k)$$

$$\Phi(*) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

$$\Phi'(*) = \operatorname{sech}(x) = \frac{2}{e^x + e^{-x}}$$

При этом используются различные скорости подачи потоков компонентов смешения для тестирования нейронной модели:

$$\begin{aligned} x_1(k) &= 0,1 \left[1 + \sin\left(\frac{2\pi}{20}k\right) \right], & x_2(k) &= 0,2 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{20}k\right) \right] \\ x_3(k) &= 0,1 \left[1 + \sin\left(\frac{2\pi}{30}k\right) \right], & x_4(k) &= 0,1 \left[1 + \sin\left(\frac{2\pi}{50}k\right) \right] \\ x_5(k) &= 1 - [x_1(k) + x_2(k) + x_3(k) + x_4(k)] \end{aligned}$$

Эти данные поступают в систему смешения (27) и модель смешения (26) одновременно, где N – дискретное время моделирования.

Следует отметить, что структура модели влияет на ошибку моделирования, но не нарушает стабильность процесса идентификации.

$$\text{ОЧИМ}_4 = M_0 + \sum_{i=1}^n M_i (x_i p_i^l)^k$$

с $M_0 = 0$, $M_i = 1$, $l = 1,25$; $k = 0,8$; $n = 5$; $p = [90,1; 75,7; 93,8; 82,9; 95]^T$.

Та же нейронная сеть применима и для новой структуры математической модели ОЧИМ_4 , отличие будут только массиве весов.

Для сравнения алгоритма (27) с нормальным алгоритмом обратного распространения используются многослойные нейронные сети с фиксированной скоростью обучения $\eta = 0,05$.

Установлено, что при $\eta > 0,1$ нормальный алгоритм обратного распространения становится неустойчивым. Сравнение производительности может быть реализовано по среднеквадратическим ошибкам (28).

Предложенный в этой работе устойчивый алгоритм имеет почти такую же скорость сходимости, что и обычный алгоритм обратного распространения.

Обычный алгоритм обратного распространения для многослойных нейронных сетей имеет низкую скорость сходимости и большую ошибку идентификации.

В третьей главе представлена постановка задач оптимального планирования операций производства бензинов.

Планирование технологических операций смешения бензинов на НПЗ является нелинейной комбинаторной задачей расчета рецептур компонентов смеси с различными качественными показателями.

Модель включает в себя оптимизацию рецептур бензиновых смесей, задачи распределения потоков от резервуаров хранения компонентов смешения до смесителей, после смесителей в продуктовые резервуары, операционные требования к автоматизированной системе смешения и технологических и экономических требований.

Алгоритм оптимизации, основан на процедуре аппроксимации. Общая задача декомпозируется на две подзадачи: основную - смешанное целочисленное линейное программирование, построенную путем релаксации (упрощений и допущений) исходной модели с использованием кусочно-оггибающих (релаксаций) Маккормика и гиперплоскостей, которая обеспечивает нижнюю границу и подчиненную нелинейную модель, которая дает верхнюю границу решений. Таким образом обеспечивается выпуклость задачи в каждом временном интервале разбиения.

Сложные промышленные предприятия могут иметь множество производственных, складских и распределительных подсистем, несколько различных видов сырья, промежуточных и конечных продуктов, а также сложные связи между всеми этими элементами. что делает составление расписания сложным процессом принятия решений.

Планирование и принятие решений состоит из четырех основных этапов:

1. Формулировка задач для достижения соответствующих целей, требований и/или целевых показателей спроса;
2. Формулировка каждой подзадачи;
3. Определение последовательности выполнения задач;
4. Определение времени выполнения задач от момента запуска до остановки.

В системе смешения бензинов компоненты из резервуаров хранения подаются в продуктовые резервуары на смешение или в поточные смесители (блендеры). Смесительные резервуары на каждом интервале времени имеет только входящий поток продукта либо только выходящий (рис. 3) для периодической системы смешения.

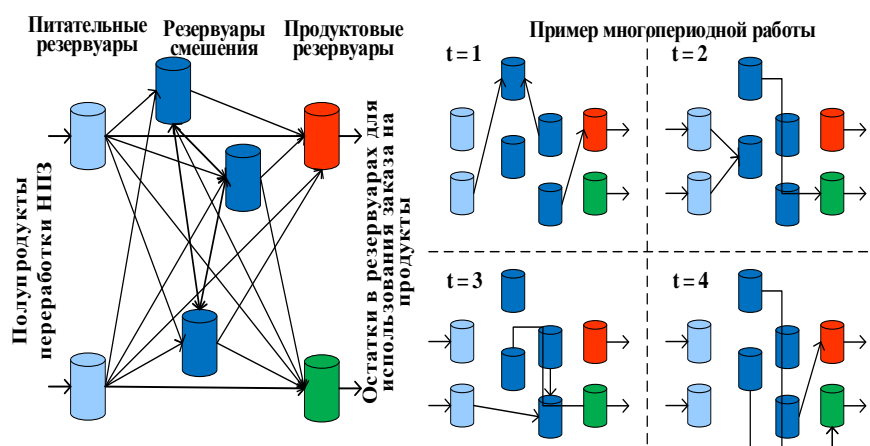


Рисунок 3 - Система смешения по партиям (t – время периода смешения)

В отличие от них, поточные блендеры работают в непрерывном режиме (рис. 4). В дополнение к четырем решениям, упомянутым ранее, планирование операций смешения должно включать определение рецептуры смеси компонентов с учетом требований по спецификации и выбранным критерием эффективности.

В некоторых технологических конфигурациях НПЗ смесь поступает в резервуар для хранения, в то время как в других конфигурациях он может поступать непосредственно в трубопровод.

Каждый переход требует частичной перестройки технологической схемы, линий подачи смеси, что приводит к потере мощности смешения. Кроме того, переход на другой, часто требуемый технологом, диапазон качественных показателей продукта требуется перенастройка или/и повторная калибровка поточных анализаторов.

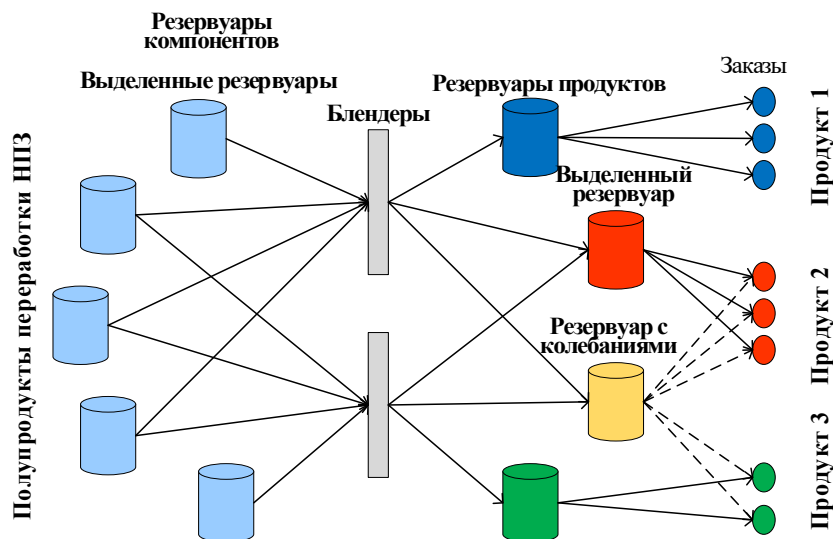


Рисунок 4 - Общая схема непрерывной системы смешения бензинов

Математические модели планирования сформулированы как задачи смешанного целочисленного линейного и нелинейного программирования.

В четвертой главе представлена структура разработанного программного комплекса (рис. 5) и результаты моделирования и оптимизации рецептов смешения бензинов.

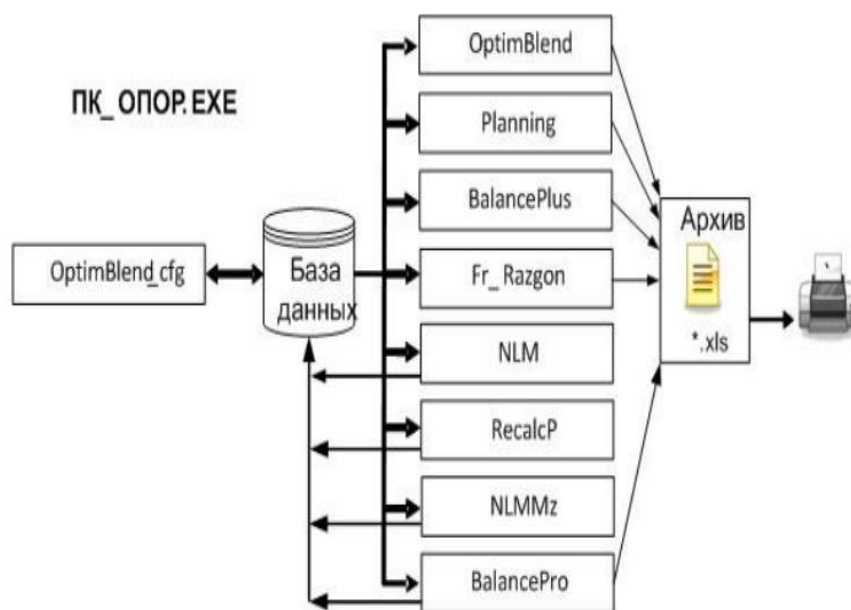


Рисунок 5 - Укрупненная функциональная структура ПК ОПОР

Ниже приведены результаты расчетов рецептур смешения бензинов по трем партиям. При этом в расчетах учитываются количество и показатели качества остатка продукта в продуктовом резервуаре в первой партии. Во второй и третьей партиях учитываются накопление продукта и их показатели качества от партии к партии.

Партия 1

Таблица 1 – Расчет рецептуры производства бензина AI92-K5_1

Остаток топлива 1399 т в 358 резервуаре									
№№	Наименование компонентов	Показатели качества							
		RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
1	Св-ва остатка	92,00	84,00	0,736	0,00050	35,00	0,33	3,94	73,60

№№	Наименование компонентов	Показатели качества							
		RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
1	Изомеризат_143	86,50	84,50	0,649	0,00030	0,00	0,00	0,00	105,00
2	Изомеризат_145	86,50	84,50	0,649	0,00030	0,00	0,00	0,00	105,00
3	Бензин КАС_153	85,00	78,20	0,710	0,00350	10,00	0,70	17,30	70,00
4	Стаб кат-г 35/11-600_279	96,20	85,60	0,788	0,00030	58,00	0,60	0,50	68,80
5	Стаб кат-г 35/11-600_281	96,20	85,60	0,788	0,00030	58,00	0,60	0,50	68,80
	Смесь	92,24	84,23	0,744	0,00080	35,00	0,46	2,99	77,49

Расход									
№№	Наименование компонентов	тонн	м ³	тонн/ч	м ³ /ч	%, об.	%, масс.		
1	Изомеризат_143	328,05	505,47	47,27	72,83	15,36	13,50		
2	Изомеризат_145	243	374,42	35,01	53,95	11,38	10,00		
3	Бензин КАС_153	364,5	513,38	52,52	73,97	15,61	15,00		
4	Стаб кат-г 35/11-600_279	765,45	971,38	110,30	139,97	29,53	31,50		
5	Стаб кат-г 35/11-600_281	729	925,13	105,04	133,30	28,12	30,00		
	Смесь	2430	3289,78			100,00	100,00		

Партия 2

Таблица 2 - Расчет рецептуры производства бензина AI92-K5_2

Накоплено топлива 3829 т в 358 резервуаре									
№№	Наименование компонентов	Показатели качества							
		RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
	Св-ва смеси	92,15	84,15	0,741	0,00068	35,00	0,41	3,34	76,07

№№	Наименование компонентов	Показатели качества							
		RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
1	Изомеризат_142	88,10	86,10	0,656	0,00050	0,05	0,05	0,05	92,00
2	Бензин КАС_154	85,00	79,00	0,710	0,00070	10,67	0,78	10,68	75,70
3	Стаб кат-г 35/11-600_280	96,90	85,80	0,792	0,00050	61,36	0,20	0,46	63,40
	Смесь	92,55	84,57	0,744	0,00050	34,96	0,28	2,38	72,50
Расход									
№№	Наименование компонентов	тонн	м³	тонн/ч	м³/ч	%, об.	%, масс.		
1	Изомеризат_142	448,4	683,73	82,58	98,52	26,61	23,60		
2	Бензин КАС_154	362,9	511,28	66,83	73,67	19,90	19,10		
3	Стаб кат-г 35/11-600_280	1088,7	1374,69	200,50	198,08	53,50	57,30		
	Смесь	1900	2569,71			100,00	100,00		

Партия 3

Талица 3 - Расчет рецептуры производства бензина AI92-K5_3

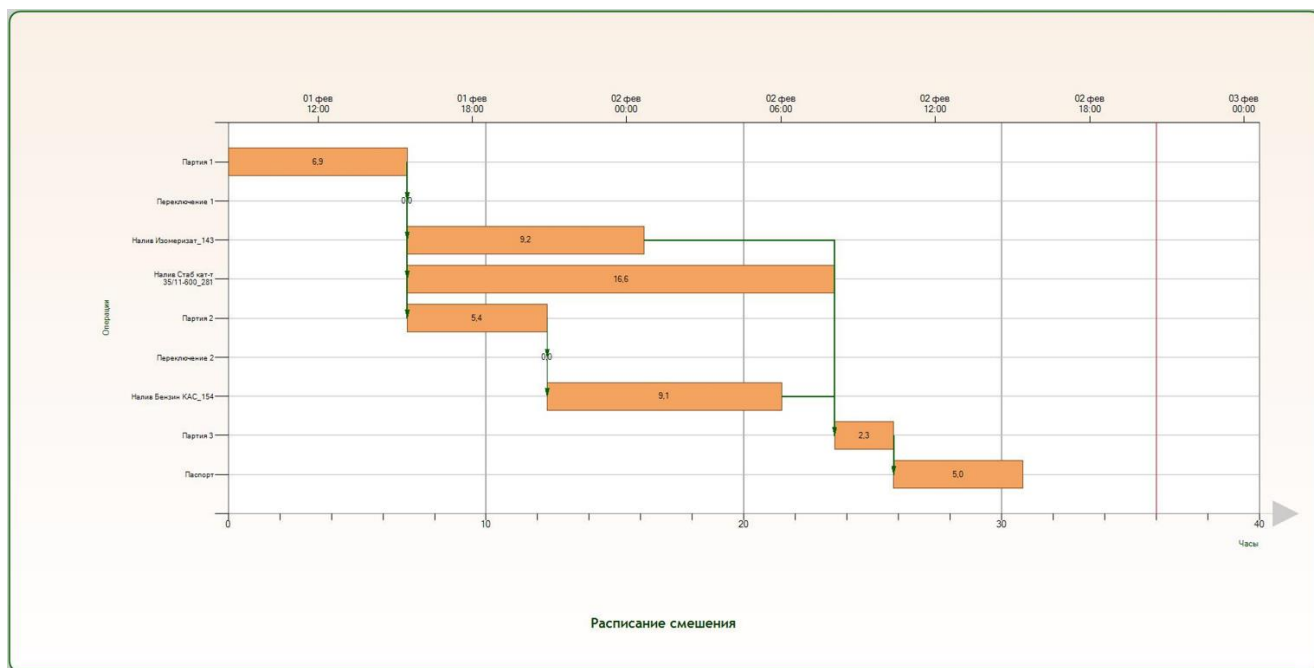
Накоплено топлива 5729 т в 358 резервуаре									
№№	Наименование компонентов	Показатели качества							
		RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
	Св-ва смеси	92,28	84,29	0,742	0,00063	34,99	0,36	3,02	74,88

№№	Наименование компонентов	Показатели качества							
		RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
1	Изомеризат_143	86,50	84,50	0,649	0,00030	0,00	0,00	0,00	105,00
2	Бензин КАС_154	85,00	78,20	0,710	0,00350	10,00	0,70	17,30	70,00
3	Стаб кат-г 35/11-600_281	96,20	85,60	0,788	0,00030	58,00	0,60	0,50	68,80
4	Алкилат_165	96,00	92,00	0,695	0,00050	0,20	0,00	0,04	60,00
	Смесь	92,99	86,24	0,727	0,00080	22,78	0,33	2,84	71,84
Расход									
№№	Наименование компонентов	тонн	м³	тонн/ч	м³/ч	%, об.	%, масс.		
1	Изомеризат_143	121,6	187,37	53,10	27,00	16,94	15,20		
2	Бензин КАС_154	120	169,01	52,40	24,35	15,28	15,00		
3	Стаб кат-г 35/11-600_281	318,4	404,06	139,04	58,22	36,54	39,80		
4	Алкилат_165	240	345,32	104,80	49,76	31,23	30,00		
	Смесь	800	1105,76			100,00	100,00		

Талица 4 – Рецептура топлива в продуктовом резервуаре

Накоплено топлива 6529 т в 358 резервуаре									
№№	Наименование компонентов	Показатели качества							
		RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
	Св-ва смеси	92,37	84,53	0,740	0,00066	33,49	0,36	3,00	74,51

Таблица 5 - Диаграмма Гантта (общая по трем партиям)



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлены математические модели для решения задач онлайн-оптимизации смешением бензинов с учетом условий параметрической неопределенности. Приведена нейросетевая модель решения задачи прогноза и оптимизации системы управления смешением бензинов в режиме реального времени.

Выводы

1. Проведен анализ существующих систем компаундирования бензинов и определены факторы, такие как: парафины, олефины, нафтены и ароматические углеводороды, влияющие на основные качественные показатели товарного бензина;
2. Разработана модель и сформулирована задача оптимального управления смешением бензинов с ограничениями на ресурсы в условиях параметрической неопределенности.
3. Сформулирована глобальная задача оптимального управления процессами смешения товарных нефтепродуктов по схеме резервуары компонентов смешения – трубопроводы до смесителей – трубопроводы после смесителей – резервуары товарного продукта.
4. Обоснована декомпозиция глобальной задачи на задачу верхнего уровня - нахождения оптимальных рецептур и оперативных планов смешения товарных продуктов, и задачу нижнего уровня - построения оптимальных расписаний смесительных операций.
5. Разработан программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазута (ПК ОПОР).

6. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613287 «Программный комплекс оптимального планирования и оптимизации бензинов и мазутов» от 07.03.2018 г., Версия 2.0 (ПК ОПОР v 2.0).

7. Проведены заводские испытания программного комплекса на НПЗ России (в городах Сургута, Нижнекамска, Омска, Сызрани) и обучение технологического персонала работе в ПК ОПОР.

Разработанные математические модели, постановка задачи оптимального управления смешением бензинов в режиме реального времени, как «цифровые двойники» технологических процессов НПЗ, являются одним из важных этапов цифровизации и создания усовершенствованной системы управления.

Внедрение цифровых двойников дает дополнительные возможности оптимизации и процессов управления производственными активами предприятия и процессов обеспечения его кибербезопасности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

1. Горбунов С.С. Программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов. / С.С. Горбунов, А.А. Алексанян, В.А. Костандян, А.Ф. Егоров // Нефтепереработка и нефтехимия – 2019 – № 1 – С. 13–19. **(ВАК)**.

2. Горбунов С.С. Учет нелинейности рецептур смешения топлив в программном комплексе оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения топлив / С.С. Горбунов, А.А. Алексанян, В.А. Костандян, А.Ф. Егоров // Нефтепереработка и нефтехимия – 2019 – № 2 – С. 9-11. **(ВАК)**.

3. Горбунов С.С. Интеллектуальная система управления смешением бензинов в режиме реального времени с учетом параметрической неопределенности / С.С. Горбунов, А.В. Костандян, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров, А.А. Алексанян // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности – 2021 – №7(576) – С. 28–36. **(ВАК)**.

4. Горбунов С.С. Комплексная система планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов / С.С. Горбунов, А.В. Костандян, А.А. Алексанян, А.Ф. Егоров // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2019. – Т. 4. – С. 91-94.

5. Горбунов С.С. Управление смешением бензинов в условиях параметрической неопределенности / С.С. Горбунов, А.В. Костандян, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров // Математические методы в технологиях и технике. – 2022 – № 2 – С. 11–14.

6. Костандян А.В. Интеллектуальная система мониторинга измерений в системах управления технологическими процессами / А.В. Костандян, С.С. Горбунов, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров // Математические методы в технологиях и технике – 2022 – №1 – С. 21–25.

7. Горбунов С.С. Система управления смешением бензинов в режиме реального времени в условиях параметрической неопределенности / С.С. Горбунов, А.В. Костандян, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров В.А. Костандян // Информатизация инженерного образования: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Москва, 12–15 апреля 2022 года. – Москва: Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2022. – С. 36-40.

8. Костандян А.В. Мониторинг измерений в интеллектуальных системах управления технологическими процессами / А.В. Костандян, С.С. Горбунов, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров, В.А. Костандян // Информатизация инженерного образования: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Москва, 12–15 апреля 2022 года. – Москва: Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2022. – С. 41-45.

9. Костандян, А. В. Постановка задачи оптимального управления смешением бензинов / А. В. Костандян, С. С. Горбунов, А. Ф. Егоров // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России : Тезисы докладов VII Региональной научно-технической конференции, посвященной 100-летию В.Л. Березина, Москва, 19–21 сентября 2023 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2023. – С. 315-316.

10. Горбунов С.С., Егоров А.Ф., Сидоров В.В. Дискретные и непрерывные модели многопериодного планирования производства бензинов // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам LXXI междунар. науч.-практ. конф. — № 3(71). — М., Изд. «МЦНО», 2024.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613287 Российская Федерация. Программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур бензинов и мазутов. Версия 2.0. (ПК ОПОР v 2.0).

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023689075 Российская Федерация. Программный комплекс обнаружения утечки в трубопроводах транспортировки нефтепродуктов и природного газа.