

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра математической кибернетики и компьютерных наук

**РАЗРАБОТКА НЕЙРО-НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ ANFIS ДЛЯ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 5 курса 551 группы
направления 09.03.04 — Программная инженерия
факультета КНиИТ
Медведева Александра Дмитриевича

Научный руководитель
доцент, к. ф.-м. н.

А. С. Иванов

Заведующий кафедрой
доцент, к. ф.-м. н.

С. В. Миронов

Саратов 2026

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях задача прогнозирования температуры воздуха имеет особую значимость в различных областях, таких как энергетика, сельское хозяйство, системы управления климатом, а также логистика. Повышение точности прогнозов позволяет оптимизировать использование ресурсов и снизить экономические потери, связанные с ошибочными решениями [1].

Традиционные методы прогнозирования, основанные на статистических моделях, имеют ряд ограничений, поскольку не всегда хорошо учитывают сложные нелинейные зависимости и неопределённость метеорологических данных. В реальных условиях температура воздуха зависит от множества факторов, таких как влажность, атмосферное давление и временные характеристики, что снижает точность прогнозирования при использовании классических подходов.

В ранее выполненной курсовой работе были рассмотрены методы нечёткой логики, в частности методы Мамдани и Сугено, и реализована система управления температурой на их основе [2]. Анализ результатов показал, что метод Сугено обладает преимуществом над методом Мамдани при решении задач, требующих получения числовых результатов и высокой вычислительной эффективности. Кроме того, данный метод хорошо подходит для использования в задачах машинного обучения благодаря возможности интеграции с алгоритмами обучения и адаптации параметров модели [2].

Дальнейшим этапом развития нечётких систем является переход от статических моделей к системам, способным обучаться на данных. Для решения данной задачи используются нейро-нечёткие системы, в частности модель ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), объединяющая механизм нечёткого вывода Сугено и методы обучения нейронных сетей [3]. В отличие от классических нечётких систем параметры модели ANFIS не задаются вручную, а автоматически настраиваются в процессе обучения, что позволяет повысить точность прогнозирования и уменьшить зависимость от экспертных оценок.

Таким образом, возникает необходимость разработки модели прогнозирования температуры воздуха, способной учитывать сложные зависимости между метеорологическими параметрами. Температура определяется совокупностью факторов, включая влажность воздуха, атмосферное давление и временные характеристики, причём данные зависимости часто имеют нелинейный характер. Использование адаптивных методов, способных обучаться на данных и учи-

тывать неопределённость, является актуальным направлением исследований. Одним из таких подходов является применение нейро-нечётких моделей, объединяющих преимущества нечёткой логики и методов машинного обучения.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка нейро-нечёткой системы ANFIS для прогнозирования температуры воздуха на основе метеорологических данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать теоретические основы нечёткой логики и нейро-нечётких систем;
2. Провести анализ методов прогнозирования температуры воздуха;
3. Разработать структуру нейро-нечёткой модели ANFIS на основе метода Сугено;
4. Реализовать модель на языке Python;
5. Провести обучение модели на метеорологических данных;
6. Оценить точность прогнозирования и сравнить результаты с альтернативными методами.

Объектом исследования являются процессы прогнозирования температуры воздуха, рассматриваемые как сложные динамические процессы, зависящие от множества метеорологических факторов. Данные процессы характеризуются наличием нелинейных зависимостей и неопределённости, что усложняет их точное моделирование с использованием традиционных методов.

Предметом исследования выступают методы построения нейро-нечётких моделей на основе ANFIS, позволяющие объединить принципы нечёткой логики и алгоритмы обучения нейронных сетей. Особое внимание уделяется применению метода нечёткого вывода Сугено как основы для построения обучаемой модели прогнозирования.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной системы для решения задач локального краткосрочного прогнозирования метеорологических параметров. В отличие от региональных прогнозов система ориентирована на использование данных конкретной точки наблюдения и позволяет учитывать её индивидуальные особенности [4].

Разработанная система может использоваться для прогнозирования температуры в тепличных комплексах, где даже незначительные отклонения тем-

пературного режима оказывают влияние на рост растений и урожайность. Использование локальной модели позволяет адаптировать режимы отопления и вентиляции в зависимости от ожидаемых изменений температуры.(рисунок 1)

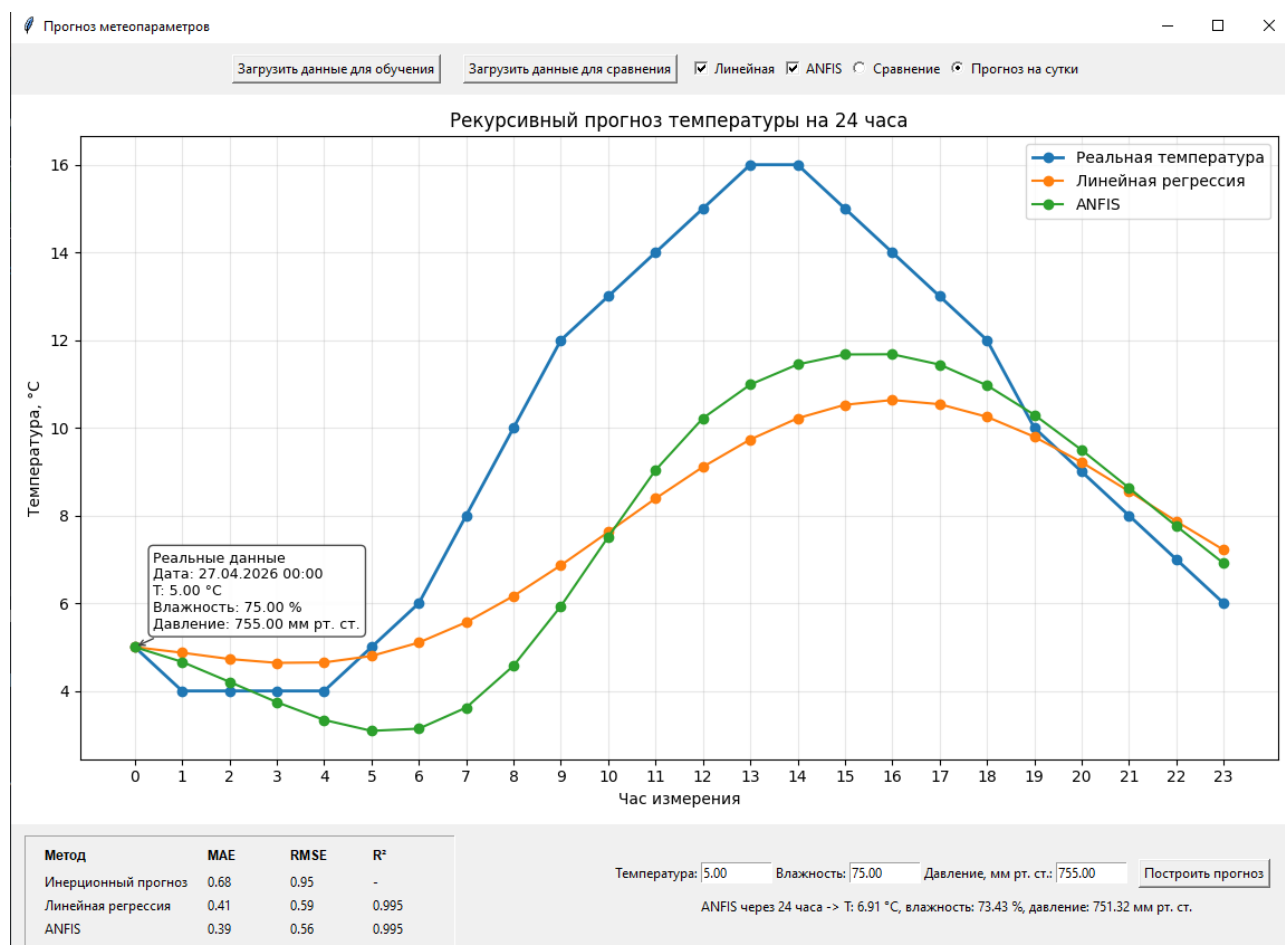


Рисунок 1 – Прогнозирование температуры методами ANFIS и Линейной регрессией и сравнение с реальными значениями

Кроме того, система может применяться в задачах управления микроклиматом складских помещений, промышленных объектов и систем «умного дома», где требуется оперативный прогноз параметров окружающей среды.

Таким образом, разработанная система может выступать в качестве вспомогательного инструмента локального анализа и краткосрочного прогнозирования температуры воздуха, дополняя существующие метеорологические решения.

Структура и объём работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объём работы - 66 страниц, из них 39 страниц - основное содержание, включая рисунки, таблицы и листинги программного кода. Список использован-

ных источников информации содержит 21 наименование. Приложение включает исходный код разработанной программной системы на языке Python.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Теоретические основы нейро-нечётких систем и методов прогнозирования» посвящён анализу методов нечёткой логики, исследованию особенностей прогнозирования метеорологических временных рядов и рассмотрению нейро-нечёткой модели ANFIS.

В подразделе 1.1 рассмотрены основные понятия нечёткой логики, включая лингвистические переменные, термы и функции принадлежности. Показано, что нечёткая логика позволяет работать с неопределёнными данными и описывать плавные переходы между состояниями объектов, что особенно важно при обработке метеорологических параметров.

В подразделе 1.2 проведён анализ методов нечёткого вывода Мамдани и Сугено. Установлено, что метод Сугено обладает более высокой вычислительной эффективностью и лучше подходит для интеграции с алгоритмами машинного обучения благодаря аналитической форме выходных функций.

В подразделе 1.3 выполнен обзор современных методов прогнозирования температуры воздуха. Рассмотрены статистические модели, методы машинного обучения и гибридные интеллектуальные системы. Отмечено, что традиционные методы испытывают трудности при моделировании нелинейных зависимостей и работе с нестационарными временными рядами.

Подраздел 1.4 посвящён анализу особенностей метеорологических временных рядов. Для учёта временной зависимости температуры используются лаговые признаки. Задача прогнозирования может быть представлена в виде

$$T_{t+1} = f(T_t, T_{t-1}, T_{t-2}, \dots, T_{t-k}), \quad (1)$$

где T_t - температура в момент времени t , а k определяет глубину используемой истории наблюдений.

Показано, что на точность прогнозирования существенно влияют сезонность, автокорреляция, шумы измерений и нестационарность данных.

В подразделах 1.5 и 1.6 рассмотрена нейро-нечёткая система ANFIS, объединяющая преимущества нечёткой логики и нейронных сетей. Проанализирована архитектура модели, состоящая из пяти слоёв: фаззификации, формирования правил, нормализации, вычисления следствий и агрегации результата.

Отмечено, что использование метода Сугено позволяет представить выход каждого правила в виде линейной функции входных переменных и применять

алгоритмы обучения для автоматической настройки параметров модели.

Второй раздел «Разработка нейро-нечёткой модели прогнозирования температуры» посвящён построению модели прогнозирования температуры воздуха на основе метеорологических данных.

В подразделе 2.1 выполнена постановка задачи прогнозирования. В качестве входных параметров используются температура воздуха, влажность и атмосферное давление:

$$x_t = \{T_t, RH_t, P_t\}, \quad (2)$$

где T_t — температура воздуха, RH_t — относительная влажность, P_t — атмосферное давление.

Для учёта временной динамики формируется расширенный вектор признаков

$$X_t = \{x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-k}\}. \quad (3)$$

Требуется построить отображение

$$f : X_t \rightarrow y_{t+1}, \quad (4)$$

где y_{t+1} является прогнозируемым значением температуры на следующий временной шаг.

В подразделе 2.3 представлена архитектура разработанной модели ANFIS. Для автоматического формирования нечётких правил применяется алгоритм кластеризации MiniBatchKMeans.

Каждому кластеру соответствует правило вида

$$\text{Если } x \approx c_i, \text{ то } y = a_i^T x + b_i, \quad (5)$$

где c_i является центром кластера.

Для вычисления степеней принадлежности используются гауссовы функции

$$\mu_{ij}(x_j) = \exp\left(-\frac{(x_j - c_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}\right). \quad (6)$$

Степень активации правила определяется как

$$w_i = \prod_{j=1}^M \mu_{ij}(x_j). \quad (7)$$

После этого выполняется нормализация весов

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{k=1}^N w_k}. \quad (8)$$

Выход отдельного правила задаётся линейной функцией

$$f_i(x) = a_i^T x + b_i. \quad (9)$$

Итоговое значение прогноза вычисляется как

$$y = \sum_{i=1}^N \bar{w}_i f_i(x). \quad (10)$$

В подразделе 3.1 представлена схема архитектуры программной системы.

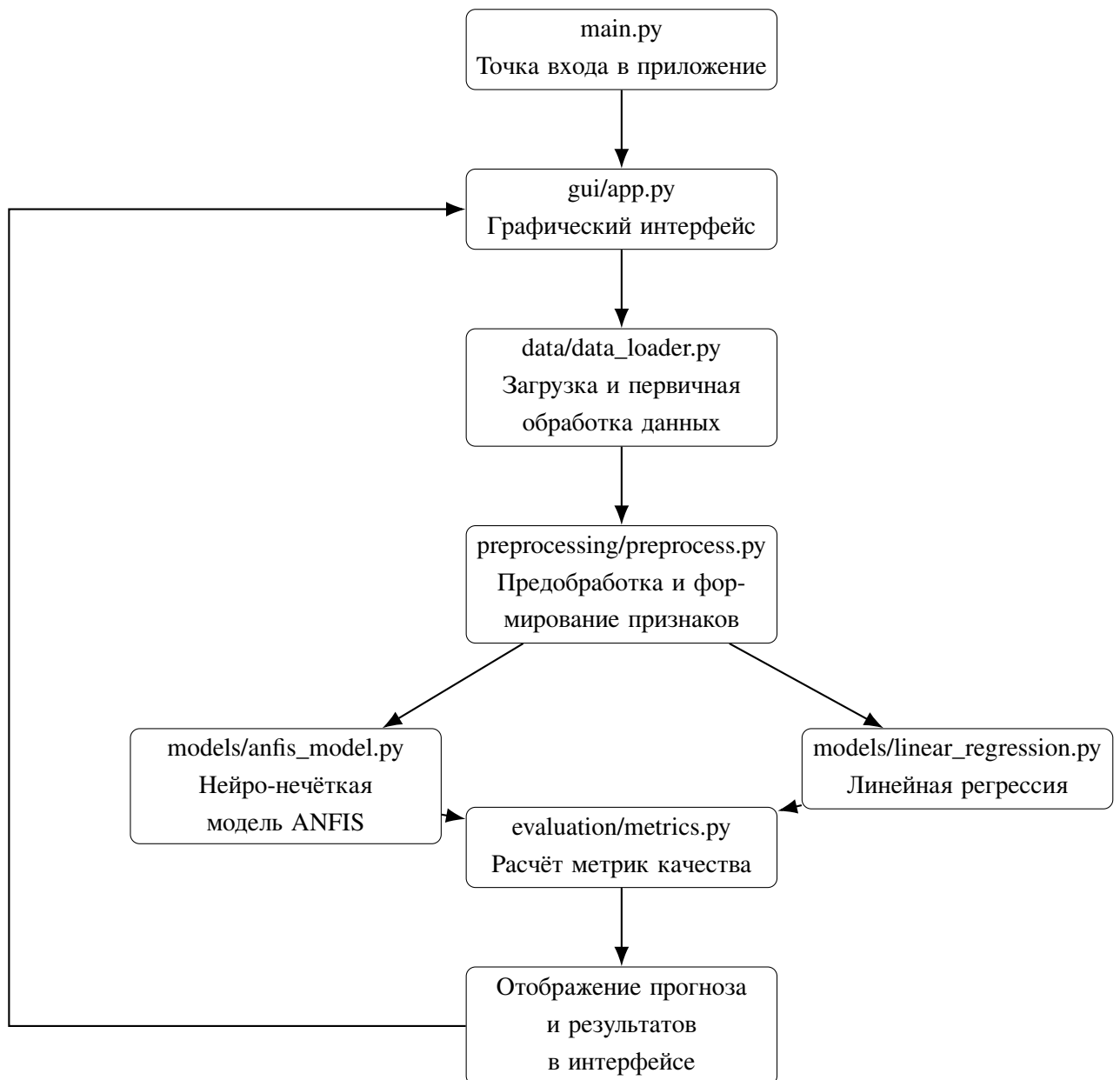


Рисунок 2 – Общая архитектура программной системы

В подразделе 3.5 проведён анализ результатов прогнозирования и сравнение модели ANFIS с моделью линейной регрессии.

Для оценки качества использовались следующие метрики.

Средняя абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|. \quad (11)$$

Среднеквадратичная ошибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (12)$$

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (13)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие основные результаты:

1. Разработана и реализована нейро-нечёткая система ANFIS для прогнозирования температуры воздуха на основе метеорологических данных.
2. Разработан полный цикл построения системы прогнозирования, включающий предобработку временного ряда: приведение данных к равномерному временному шагу, интерполяцию пропущенных значений и нормализацию входных данных.
3. Сформировано признаковое пространство с использованием лаговых признаков и циклических временных характеристик, позволяющих учитывать суточную и сезонную динамику метеорологических процессов.
4. Разработана и обучена нейро-нечёткая модель ANFIS, выполнено экспериментальное исследование её эффективности и проведено сравнение с базовой моделью persistence и моделью линейной регрессии.

Основные источники информации:

1. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. — 1965. — Vol. 8, no. 3. — Pp. 338–353.
2. Medvedev, A. D. Нечеткая логика в интеллектуальных системах. Методы Мамдани и Сугено / A. D. Medvedev. — Саратов: СГУ им. Н. Г. Чернышевского, 2024. — 28 с. — Курсовая работа.
3. Jang, J. S. R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System / J. S. R. Jang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1993. — Vol. 23, no. 3. — Pp. 665–685.
4. Применение нечеткой логики в системах управления [Электронный ресурс]. — 2023. — Top Technologies. — № 12(1). — Режим доступа: https://s.top-technologies.ru/pdf/2023/2023_12-1.pdf#page=75 (дата обращения: 10.03.2026).