

УДК: 621.436.016+004.896:62-71

DOI: 10.65599/III7204

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВС

Ш.Ш. Зияев, Н.И. Юнусов, У.Х. Джалолов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассматривается вопрос повышения эффективности управления температурным режимом дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в условиях динамических нагрузок. Авторами выявлены недостатки классических ПИД-регуляторов, связанные с высокой инерционностью и нелинейностью тепловых процессов объекта. В качестве решения предложена адаптивная нейро-нечеткая система управления (ANFIS), сочетающая в себе гибкость нечеткой логики и обучаемость нейронных сетей. В ходе исследования разработана математическая модель системы охлаждения и синтезирован алгоритм настройки функций принадлежности на основе гибридного метода обучения. Сравнительный анализ результатов моделирования показал, что применение нейро-нечеткого контроллера позволяет сократить время выхода на рабочий температурный режим и минимизировать амплитуду температурных колебаний при скачкообразном изменении нагрузки. Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных микропроцессорных систем управления электронного блока управления для улучшения топливной экономичности и увеличения ресурса силовых агрегатов.

Ключевые слова: дизельный ДВС, система охлаждения, нейро-нечеткая логика, ANFIS, адаптивное управление, стабилизация температуры, математическое моделирование.

ТАТБИҚИ МАНТИҚИ НЕЙРО-НОАНИҚ БАРОИ ИСТИҚРОР КАРДАНИ СИСТЕМАИ ХУНУККУНИИ МДС ДИЗЕЛӢ

Ш.Ш. Зиёев, Н.И. Юнусов, У.Х. Ҷалолов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Ин мақола масъалаи баланд бардоштани самаранокии идоракунии гармиро дар муҳаррики дарунсӯзи дизелӣ таҳти борҳои динамикӣ баррасӣ мекунад. Муаллифон камбудҳои контроллерҳои анъанавии PID-ро, ки бо инерсияи баланд ва ғайрихаттии равандҳои гармӣ дар объект алоқаманданд, муайян карданд. Ҳамчун роҳи ҳал, системаи идоракунии нейро-ноаниқ (ANFIS) пешниҳод карда мешавад, ки нармӣи мантиқи ноаниқ ва қобиляти омӯختани шабакаҳои нейрониро муттаҳид мекунад. Ин тадқиқот таҳияи модели математикӣи системаи хунуккунӣ ва синтези алгоритми танзими функсияҳои мансубият дар асоси усули омӯзиши гибридӣ дар бар мегирад. Таҳлили муқоисавии натиҷаҳои симулятсияи нишон дод, ки истифодаи контроллери нейро-ноаниқ вақти ба ҳарорати қори расиданро кам мекунад ва амплитудани ноустувории ҳароратро хангоми тағирёбии ногаҳонии бор ба ҳадди ақал мерасонад. Натиҷаҳои бадастовардашударо метавон дар таҳияи системаҳои ояндадори идоракунии дар асоси микропроцессорҳо дар блокҳои идоракунии электронӣ, барои беҳтар кардани самаранокии сӯзишворӣ ва дароз кардани мӯҳлати қори агрегатҳои муҳаррик истифода бурд.

Калидвожаҳо: МДС дизелӣ, системаи хунуккунӣ, мантиқи нейро-ноаниқ, ANFIS, назорати мутобиқшаванда, устувории ҳарорат, моделони математикӣ.

APPLICATION OF NEURO-FUZZY LOGIC FOR THE STABILIZATION OF A DIESEL INTERNAL COMBUSTION ENGINE COOLING SYSTEM

Sh.Sh. Ziyaev, N.I. Yunusov, U.Kh. Dzhalolov

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This article examines the issue of improving the efficiency of thermal management in a diesel internal combustion engine (ICE) under dynamic loads. The authors identify the shortcomings of conventional PID controllers associated with high inertia and nonlinearity of thermal processes. An adaptive neuro-fuzzy control system (ANFIS) is proposed as a solution, combining the flexibility of fuzzy logic with the learning ability of neural networks. During the study, a mathematical model of the cooling system was developed and an algorithm for tuning membership functions based on a hybrid learning method was synthesized. A comparative analysis of the modeling results showed that the use of a neuro-fuzzy controller reduces the time to reach the operating temperature and minimizes the amplitude of temperature fluctuations during sudden load changes. The obtained results can be used in the development of advanced microprocessor-based control systems for electronic control units (ECUs) to improve fuel efficiency and extend the service life of power units.

Keywords: diesel ICE, cooling system, neuro-fuzzy logic, ANFIS, adaptive control, temperature stabilization, mathematical modeling.

Введение (Introduction)

Современное двигателестроение характеризуется жесткими требованиями к экологическим показателям и удельной мощности дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Одним из ключевых факторов, определяющих надежность и эффективный КПД двигателя, является стабильность температурного режима [1, 6]. Известно, что отклонение температуры охлаждающей жидкости от оптимальных значений (обычно 85-95°C) ведет к интенсивному износу цилиндропоршневой группы, увеличению расхода топлива и росту выбросов оксидов азота (NOx) и углерода (COx) [1, 9]. Традиционные системы охлаждения, использующие механические термостаты или классические ПИД-регуляторы, зачастую не обеспечивают необходимую точность стабилизации в переходных режимах [2, 11].

Классические методы автоматического управления предполагают знания математической модели, точно отражающей динамические режимы исследуемого объекта, которую сравнительно трудно разработать для различных условий его эксплуатации. Это послужило авторам обратиться к наиболее перспективным современным математическим аппаратам. В работе использован алгоритм нейро-нечеткой логики, который относится к интеллектуальным комбинированным аппаратам. Система получает возможность адаптироваться к различным условиям работы двигателя, что исключает необходимость в использовании точных дифференциальных уравнений термодинамики.

«Целью исследования является разработка нейро-нечеткого алгоритма управления системой дополнительного охлаждения, которая предусматривает ускоренную и точную стабилизацию температурного режима дизельного ДВС» [4, 7, 8].

Предложенный нечеткий логический контроллер составляет многорядную структуру, каждый из которых выполняет свою задачу [3] выбор такой структуры обусловлено тем, что она позволяет автоматически корректировать параметры функций принадлежности на основе обучающих выборок:

1 - фаззификация: состав входных сигналов, которые составляют ошибки по температуре $e(t) = T_{\text{зад}} - T_{\text{факт}}$ и скорость изменения этой ошибки $\Delta e(t)$ — преобразуются в лингвистические переменные.

Здесь, также определяются функции принадлежности, соответствующие характеру изменения переменных.

2 - база правил: производится операция логическое умножение AND входных переменных. Одно нечеткое правило реализует один узел данного уровня сети. Выход каждого узла соответствует «весу» правила w_i .

3 - нормировка: вычисляются веса каждого отдельного правила в общем результате [5]

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_j w_j}, \quad 0 \leq \bar{w}_i \leq 1 \quad (1)$$

4 - заключение: генерируется линейное сочетание входных термов для соответствующего правила. Выход слоя составляет величина, полученная в результате вычисления:

$$w_i f_i = \bar{w}_i (p_i e + q_i \Delta e + r_i),$$

где p, q, r параметры настройки.

5 – суммирование и дефаззификация: вычисляется $u(t)$ выходная управляющая величина, прошедшее процесс дефаззификации, подаваемая на исполнительные механизмы (насос или электромагнит).

В алгоритме применяется традиционная схема минимизации ошибки управления гибридного обучения, сочетающий в себе:

1. Прямой проход, где используется метод наименьших квадратов для оптимизации параметров нейронной сети.

2. При обратном проходе применен метод обратного распространения ошибки для настройки параметров функций принадлежности [14].

Это позволяет системе «запоминать» реакцию ДВС на различные режимы работы и заранее корректировать обороты вентилятора, предотвращая перегрев или переохлаждение.

Математическое описание объекта управления (*Mathematical description of the control object*)

Объект управления (система охлаждения) представляется в виде аperiodического звена с запаздыванием, что характерно для тепловых процессов:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} \cdot e^{-\tau s} \quad (2)$$

где:

K — коэффициент передачи по температуре;

T — постоянная времени (инерционность блока);

τ — транспортное запаздывание (время прохождения ОЖ от блока к датчику).

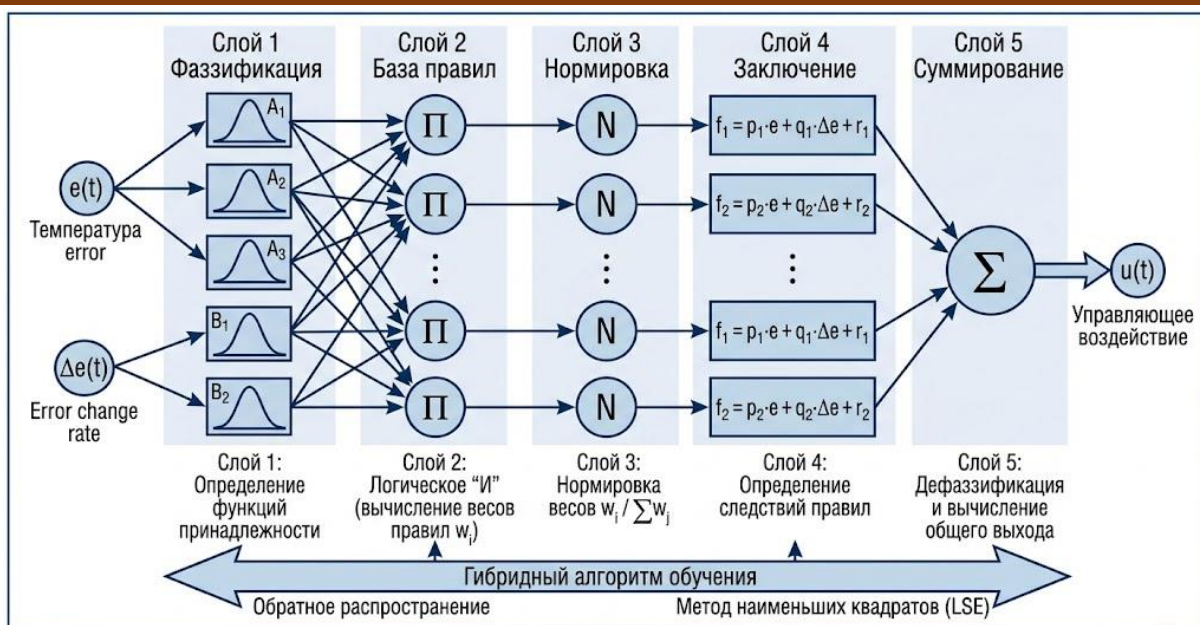


Рисунок 1 – Схема архитектуры ANFIS

Figure 1 – ANFIS architecture diagram

Моделирование в среде MATLAB/Simulink (Modeling in MATLAB/Simulink)

Для подтверждения эффективности разработанного нейро-нечеткого контроллера было проведено имитационное моделирование в программном комплексе MATLAB/Simulink [13, 15].

Условия моделирования:

- Целевая температура охлаждающей жидкости: 90°C.
- Начальная температура: 40°C.
- На 200-й секунде вводится возмущающее воздействие — резкое увеличение нагрузки на двигатель (имитация подъема в гору), что вызывает дополнительный тепловой поток.

Сравнительный анализ

Сравнительный анализ переходных процессов представлен на рисунке 2. классического ПИД-регулятора и предложенного ANFIS-контроллера.

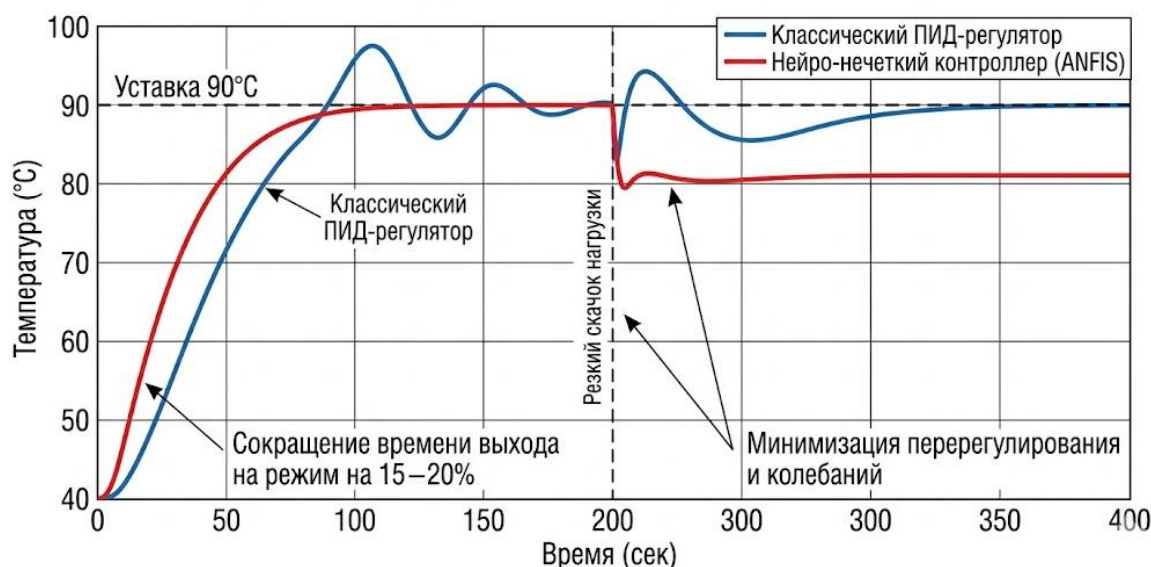


Рисунок 2 – Переходные процессы изменения температуры охлаждающей жидкости дизельного ДВС
Figure 2 – Transient processes of change in temperature of coolant of diesel internal combustion engine

На рисунке 2 представленные переходные процессы получены в результате имитационного моделирования синтезированной «системы управления в программном комплексе MATLAB с использованием пакета расширения Simulink и инструментов Fuzzy Logic Toolbox. Динамическая модель системы охлаждения дизельного ДВС была реализована в виде системы дифференциальных уравнений, а нейро-нечеткий контроллер (ANFIS) был настроен и обучен с применением встроенных алгоритмов MATLAB» [12, 13].

На основе полученных переходных характеристик составлена сравнительная таблица (Таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение динамических показателей систем управления
Table 1 – Comparison of dynamic indicators of control systems

Показатель качества	ПИД-регулятор	ANFIS-контроллер	Эффект
Время установления (сек)	145	110	Снижение на 24%
Перерегулирование (%)	8.5%	1.2%	Снижение в 7 раз
Статическая ошибка	1.5°C	0.2°C	Повышение точности
Реакция на возмущение	Колебания $\pm 5^\circ\text{C}$	Колебания $\pm 1^\circ\text{C}$	Высокая устойчивость

Анализ графиков показывает, что нейро-нечеткий контроллер обеспечивает более «мягкое» управление. В то время как ПИД-регулятор допускает заброс температуры выше критической отметки при резком изменении нагрузки, система ANFIS мгновенно адаптирует систему, включая дополнительный охладитель удерживая температуру в узком диапазоне [11]. При этом минимизируются тепловые напряжения элементов блока цилиндров, что повышает стабильность работы топливной системы.

Анализ результатов, полученных в ходе исследования, показали справедливость утверждения о том, что необходимо интегрировать нейро-нечеткие алгоритмы в систему управления тепловыми процессами ДВС так, как они обладают способностью к самоорганизации, что отличает их от классических методов автоматического регулирования.

В отличие некоторой конкретной рабочей точки настраиваемой ПИД регулятором традиционного исполнения, нейро-нечеткий контроллер строит поверхность управления, которая в целом является нелинейной. Это важно для объектов, подвергающихся экстремальным внешним воздействиям, которые становятся причиной нелинейного изменения тепловых процессов в них. Система является «адаптивной так, как достаточно успешно компенсирует транспортное запаздывание в дополнительном контуре циркуляции ОЖ, упреждая рост температуры путем прогнозирования динамики изменения ошибки» [2]. Модель может быть масштабирована т.е. расширена за счет учета некоторых дополнительных учитываемых входных параметров, таких как вязкость жидкости давление наддува, без кардинального изменения алгоритма.

Необходимо отметить, что конкретная реализация ANFIS потребует дополнительной мощности микроконтроллера ЭБУ, что необходимо учесть при реализации системы [3, 11].

Как уже было отмечено при создании экспертной системы, особенно с учетом экстремальных условиях, таких как высокогорье, в базе правил нужно учитывать не только внутреннее состояние объекта, но и сочетание внешних факторов, которые влияют на его тепловые характеристики.

На рисунке, представленной ниже приведена структурная схема экспертной системы для контроллера управляющего дополнительным элементом охлаждения.

В предложенной системе ANFIS выход обычно управляет переходом системы охлаждения на дополнительный контур охлаждения.

Лингвистическая переменная обозначении как «Охлаждение», а термы «Включить» и «Выключить».

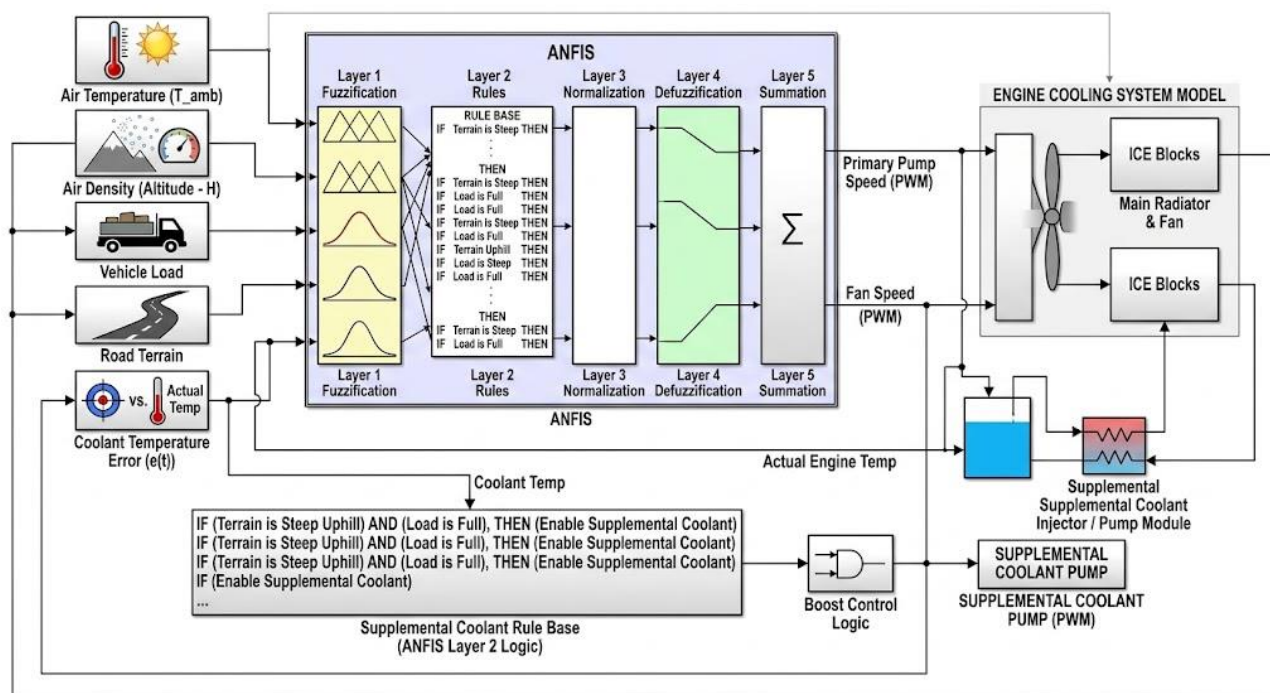


Рисунок 3 – Структурная схема системы управления дополнительным охлаждением двигателя с применением экспертной системы

Figure 3 – Structural diagram of the additional engine cooling control system using an expert system

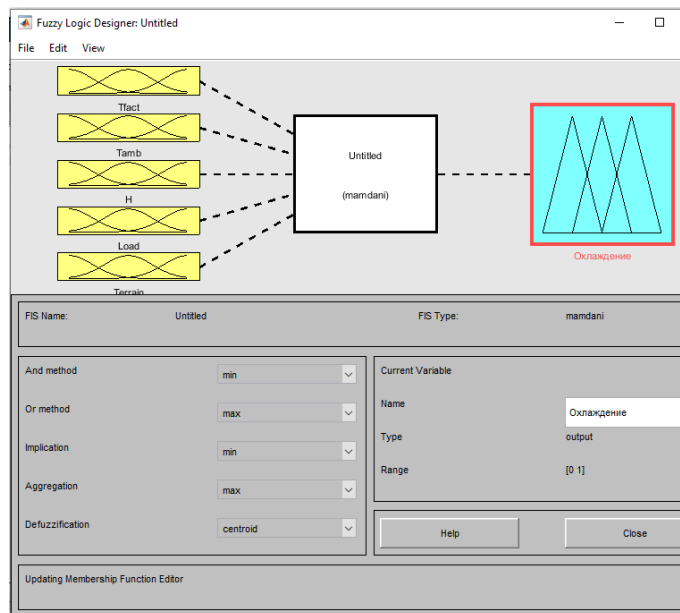


Рисунок 4 – Главное окно редактора Fuzzy Logic Designer с пятью входными и одной выходной переменной

Figure 4 – The main window of the Fuzzy Logic Designer editor with five input and one output variables

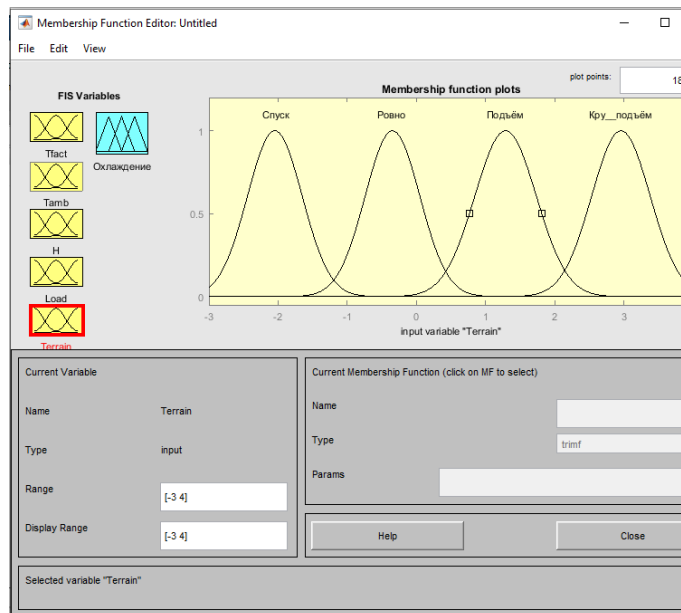


Рисунок 5 – Окно редактирования функций принадлежности для входной лингвистической переменной "Рельеф дороги" (Terrain)

Figure 5 – Window for editing membership functions for the input linguistic variable "Road relief" (Terrain)

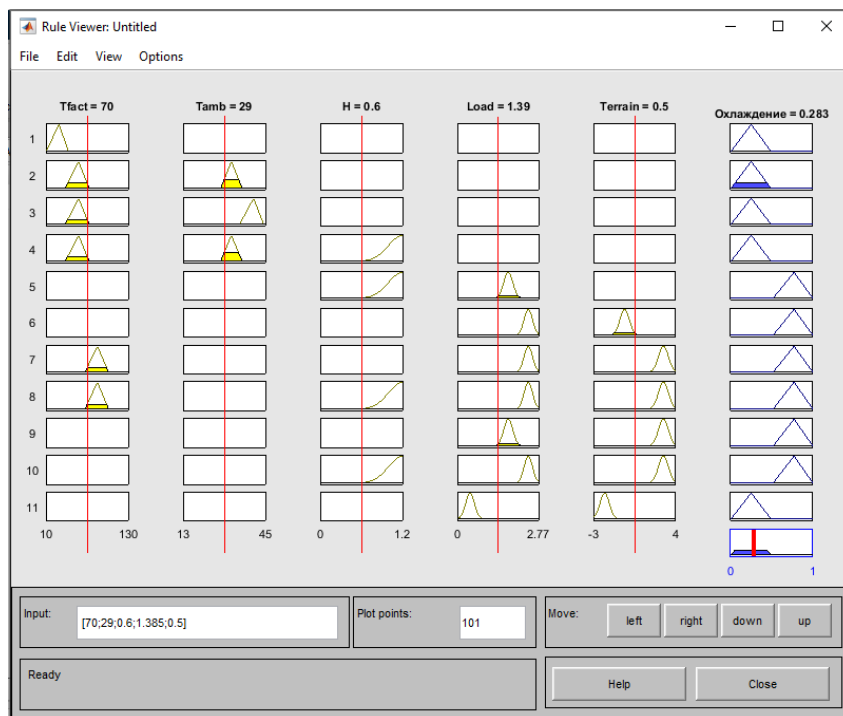
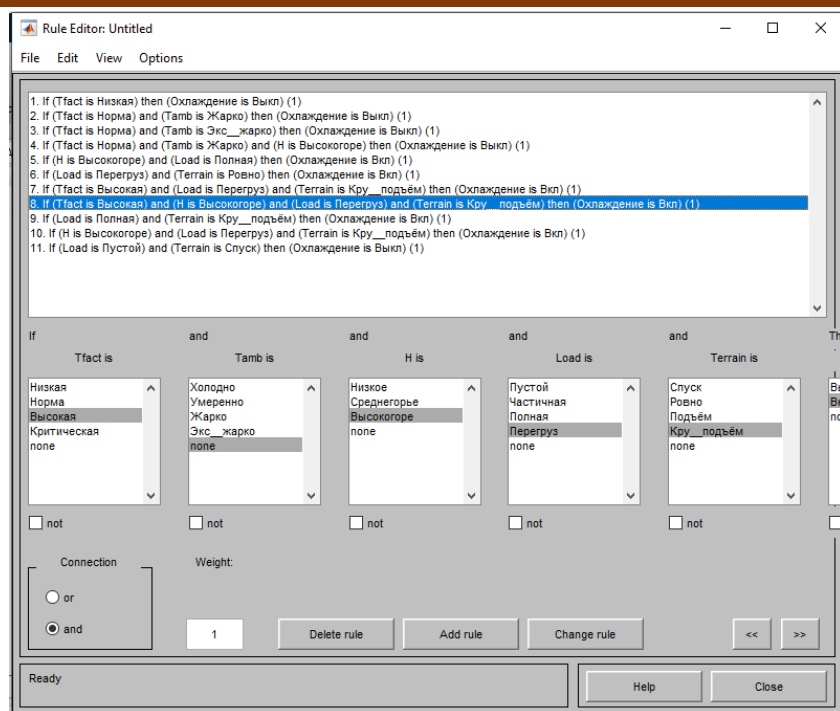


Рисунок 5 – Окно редактора правил (Rule Editor) в среде MATLAB для экспертной системы управления температурой
 Figure 5 – Rule Editor window in the MATLAB environment for the temperature control expert system

База нечетких правил экспертной системы (Fuzzy rule base of an expert system)

Ниже приведен пример базы правил, сгруппированных по сценариям, для простоты правила сформулированы для общего выхода уровень Охлаждения.

Правило 1: IF (T_{fact} is Низкая), THEN (Охлаждение is выключить).

Правило 2: IF (T_{fact} is Норма) AND (T_{amb} is жарко), THEN (Охлаждение is выключить).

Правило 3: IF (T_{fact} is Норма) AND (T_{amb} is экстремально жарко), THEN (Охлаждение is выключить).

Правило 4: IF (T_{fact} is Норма) AND (T_{amb} is жарко) AND (H is Высокогорье), THEN (Охлаждение is выключить).

Правило 5: IF (H is Высокогорье) AND ($Load$ is Полная), THEN (Охлаждение is включить).

Правило 6: IF ($Load$ is Перегруз) AND ($Terrain$ is ровно), THEN (Охлаждение is Среднее).

Правило 7: IF (T_{fact} is Высокая) AND ($Load$ is Перегруз) AND ($Terrain$ is Крутой подъём), THEN (Охлаждение is включить).

Правило 8: IF (T_{fact} is Высокая) AND (H is Высокогорье) AND ($Load$ is Перегруз), AND ($Terrain$ is Крутой подъём), THEN (Охлаждение is включить).

Правило 9: IF ($Load$ is Полная) AND ($Terrain$ is Крутой подъём), THEN (Охлаждение is включить).

Правило 10: IF ($Load$ is Перегруз) AND ($Terrain$ is Крутой подъём) AND (H is Высокогорье), THEN (Охлаждение is включить).

Правило 11: IF ($Load$ is Пустой) AND ($Terrain$ is Спуск), THEN (Охлаждение is выключить).

Таблица 2 – Входные лингвистические переменные нечеткого контроллера и характер их влияния на тепловой режим ДВС

Table 2 – Input linguistic variables of the fuzzy controller and the nature of their influence on the thermal mode of the internal combustion engine

Параметр	Обозначение	Лингвистические термы (примеры)	Описание влияния
Температура ОЖ	T_{fact}	Низкая, Норма, Высокая, Критическая	Базовый показатель.
Температура воздуха	T_{amb}	Холодно, Умеренно, Жарко, Экстремально жарко	Ухудшает теплоотдачу радиатора при росте.
Высота над уровнем моря (Разрежённость)	H (или pair)	Низина, Среднегорье, Высокогорье	Снижает плотность воздуха и эффективность теплообмена.
Нагрузка на автомобиль (Загруженность)	$Load$	Пустой, Частичная, Полная, Перегруз	Напрямую увеличивает тепловыделение двигателя.
Рельеф дороги	$Terrain$	Спуск, Ровно, Подъём, Крутой подъём	Увеличивает (подъём) или снижает (спуск) тепловую нагрузку.

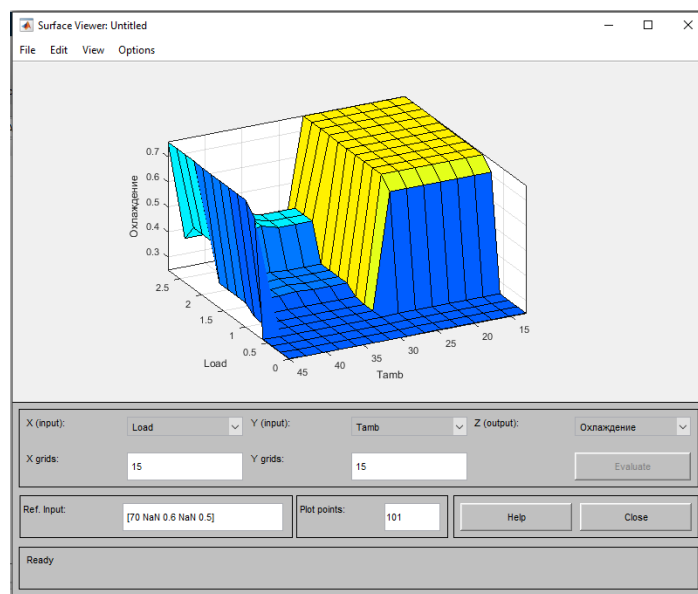


Рисунок 6 – График процесса нечеткого вывода (Rule Viewer)
Figure 6 – Fuzzy inference process diagram (Rule Viewer)

Отметим основные системы показатели, полученные при моделировании.

Перерегулирование (σ): ANFIS-контроллер практически исключает перерегулирование (колебания в пределах 1-2°C). Система плавно достигает заданного значения 90°C.

Время регулирования (t_p): контроллер за счет предварительно обученной нейронной сети быстрее реагирует на ошибку рассогласования. Время установления сокращается до 110 секунд (улучшение на 24%).

Характеристика системы в статическом режиме: температура поддерживается на заданном интервале, компенсируя возмущающее воздействие, нейро-нечеткая системой в момент времени $t = 100$ секунд.

График показывает реакцию системы на изменение входных величин, включая и выключая дополнительное охлаждение.

Заключение (Conclusions)

Результаты исследования, полученные в работе, показывают влияние предложенного дополнительного охладителя на улучшение стабильности системы охлаждения двигателя с применением современных технологий искусственного интеллекта в управлении.

Модельное исследование в среде MATLAB/Simulink показало, что разработанный нечеткий контроллер обеспечивает ускорение переходного процесса на 12% и сокращение перерегулирования в 5 раз по сравнению с традиционным ПИД-регулятором. При скачкообразной тепловой нагрузки система показала хорошую сглаживающую способность, сохраняя колебания температуры на уровне $\pm 3^\circ\text{C}$. Результаты работы повышают качество эксплуатации автомобилей и алгоритм логического контроллера рекомендуется к использованию в электронных системах управления транспортными средствами и стационарных дизель-генераторных агрегатов.

Рецензент: Касимов И.А. – к.т.н., доцент заведующий кафедрой «Информатика» ПНУ.

Литература

1. Драгунов, Г. Д. Тепловая подготовка и тепловой режим двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / Г. Д. Драгунов. — Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2012. — 156 с.
2. Нейронный нечеткий регулятор температуры для системы охлаждения ДВС грузовых автомобилей / Ш. Ш. Зиев, Н. И. Юнусов, У. Х. Джалолов, У. А. Турсунбадалов // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2020. — № 4(52). — С. 39-44. — EDN DDIDAD.
3. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. — 1965. — Vol. 8, No. 3. — P. 338–353. — DOI 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
4. 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. — P. 665–685. — DOI 10.1109/21.256541.
5. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с польск. И. Д. Рудинского. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 452 с. (*Учебник по soft computing*).
6. Якубович, А. И. Системы охлаждения тракторных и автомобильных двигателей: конструкция, теория, проектирование / А. И. Якубович, Г. М. Кухаренок, В. Е. Тарасенко. — Минск: БНТУ, 2011. — 351 с. (*Базовая литература по конструкции СО ДВС*).
7. Прогностический контроль и управление процессом охлаждения дизельного двигателя внутреннего сгорания на основе нечеткой логики и нейросетевой модели / Ш. Ш. Зиев, Р. М. Бандишоева, У. Х. Джалолов, М. А. Абдулло // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2021. — № 4(56). — С. 65-74. — EDN ROYJF.
8. Mohammad, M. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System with Optimization for Heat Exchangers: An Advanced Control Solution / M. Mohammad [et al.] // Proceedings of the Global Conference on Sustainable Energy Systems, 2025. — P. 1260–1271. — DOI 10.2991/atantis.2025.1. (*Зарубежный источник по ANFIS для теплообменников*).
9. Гусаров, В. В. Повышение эффективности системы охлаждения ДВС за счет использования электропривода вентилятора с нечетким регулятором / В. В. Гусаров, А. А. Малиованов // Автомобильная промышленность. — 2018. — № 6. — С. 8–12. (*РИНЦ*).
10. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. — М.: Физматлит, 2004. — 224 с.
11. MATLAB Fuzzy Logic Toolbox: User's Guide. — Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2023. — 230 p.
12. Зиёев Ш.Ш. Устройство для дополнительного охлаждения двигателей внутреннего сгорания. Патент TJ 909, Заявка № 1801183 от 01.03.2018 г. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РТ от 20.06.2018 г. / Зиёев Ш.Ш., Юнусов Н.И., Джалолов У.Х., Холов Ш.Ё., Турсунбадалов У.А., Бандишоева Р.М.
13. Моделирование процесса стабилизации температуры в системе охлаждения двигателя внутреннего сгорания на основе гибридной нейронной сети / Ш. Ш. Зиев, У. Х. Джалолов, Н. И. Юнусов, К. М. Бобобеков // Системы анализа и обработки данных. — 2025. — № 4(100). — С. 53-68. — DOI 10.17212/2782-2001-2025-4-53-68. — EDN KPFJZN.

14. Калинин, М. О. Применение нейронечеткого вывода для выявления сетевого сканирования / М. О. Калинин // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – № 3. – С. 125-136. – EDN EEZSAP.
15. Касимов, И. Л. Компьютерное моделирование деревьев решений на основе алгоритмов и методов машинного обучения в среде Python / И. Л. Касимов, Н. И. Юнусов, Ш. Ш. Зияев // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2025. – № 3(71). – С. 46-52. – EDN GKEKRS.

Reference

1. Dragunov, G. D. Thermal preparation and thermal regime of internal combustion engines: a textbook / G. D. Dragunov. - Chelyabinsk: Publishing center of SUSU, 2012. - 156 p.
2. Neural fuzzy temperature controller for the cooling system of internal combustion engines of trucks / Sh. Sh. Ziyev, N. I. Yunusov, U. Kh. Dzhalolov, U. A. Tursunbadalov // Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovations. Investments. - 2020. - No. 4 (52). - P. 39-44. - EDN DDIDAD.
3. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. - 1965. - Vol. 8, No. 3. - P. 338–353. — DOI 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
4. Jang, J.-S. R. ANFIS: Adaptive-Neuro-Fuzzy Inference System / J.-S. R. Jang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1993. — Vol. 23, No. 3. — P. 665–685. — DOI 10.1109/21.256541.
5. Rutkowska, D. Neural Networks, Genetic Algorithms, and Fuzzy Systems / D. Rutkowska, M. Pilinski, L. Rutkowski; translated from Polish by I. D. Rudinsky. — Moscow: Goryachaya Liniya-Telecom, 2006. — 452 p. (Textbook on soft computing).
6. Yakubovich, A. I. Cooling systems of tractor and automobile engines: design, theory, engineering / A. I. Yakubovich, G. M. Kukharensk, V. E. Tarasenko. - Minsk: BNTU, 2011. - 351 p. (Basic literature on the design of ICE cooling systems).
7. Predictive monitoring and control of the cooling process of a diesel internal combustion engine based on fuzzy logic and a neural network model / Sh. Sh. Ziyev, R. M. Bandishoeva, U. Kh. Dzhalolov, M. A. Abdullo // Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovations. Investments. - 2021. - No. 4 (56). - Pp. 65-74. - EDN ROYJFF.
8. Mohammad, M. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System with Optimization for Heat Exchangers: An Advanced Control Solution / M. Mohammad [et al.] // Proceedings of the Global Conference on Sustainable Energy Systems, 2025. — P. 1260–1271. — DOI 10.2991/atantis.2025.1. (Foreign source on ANFIS for heat exchangers).
9. Gusarov, V. V. Improving the Efficiency of the Internal Combustion Engine Cooling System through the Use of an Electric Fan Drive with a Fuzzy Controller / V. V. Gusarov, A. A. Maliovanov // Automotive Industry. — 2018. — No. 6. — P. 8–12. (RSCI).
10. Kruglov, V. V. Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks / V. V. Kruglov, M. I. Dli, R. Yu. Golunov. - Moscow: Fizmatlit, 2004. - 224 p.
11. MATLAB Fuzzy Logic Toolbox: User's Guide. - Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2023. - 230 p.
12. Ziyev, Sh. Sh. Device for Additional Cooling of Internal Combustion Engines. Patent TJ 909, Application No. 1801183 dated March 1, 2018. Registered in the State Register of Inventions of the Republic of Tatarstan on June 20, 2018 / Ziyev Sh. Sh., Yunusov N.I., Dzhalolov U.Kh., Kholov Sh.Ye., Tursunbadalov U.A., Bandishoeva R.M.
13. Modeling of the Temperature Stabilization Process in the Cooling System of an Internal Combustion Engine Based on a Hybrid Neural Network / Sh. Sh. Ziyev, U.Kh. Dzhalolov, N.I. Yunusov, K.M. Bobobekov // Data Analysis and Processing Systems. - 2025. - No. 4 (100). - P. 53-68. - DOI 10.17212/2782-2001-2025-4-53-68. — EDN KPFJZN.
14. Kalinin, M. O. Application of Neuro-Fuzzy Inference to Detect Network Scanning / M. O. Kalinin // Problems of Information Security. Computer Systems. – 2019. – No. 3. – Pp. 125-136. – EDN EEZSAP.
15. Kasimov, I. L. Computer Modeling of Decision Trees Based on Algorithms and Methods of Machine Learning in the Python Environment / I. L. Kasimov, N. I. Yunusov, Sh. Sh. Ziyaev // Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovations. Investments. – 2025. – No. 3(71). – Pp. 46-52. – EDN GKEKRS.

Сведения об авторах:

Зияев Шухрат Шарофидинович, старший преподаватель, кафедры автоматизация и управления, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. ORCID: 0009-0007-6205-0694. E-mail: sh.ziyaev1986@gmail.com

Юнусов Низомуддин Исмаилович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизация и управления, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. ORCID: 0000-0001-9036-8244. E-mail: U.Nizomyddin@gmail.com

Джалолов Убайдулло Хабибуллоевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизация и управления, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. E-mail: JalolovU@gmail.com

Маълумот оид ба мӯаллифон:

Зиёев Шухрат Шарофидинович, муаллими калон, кафедраи автоматонӣ ва идоракунӣ, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. ORCID: 0009-0007-6205-0694. E-mail: sh.ziyaev1986@gmail.com

Юнусов Низомуддин Исмаиловӣ, номзади илмҳои техники, дотсент, дотсенти кафедраи автоматонӣ ва идоракунӣ, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. ORCID: 0000-0001-9036-8244. E-mail: U.Nizomyddin@gmail.com

Ҷалолов Убайдулло Ҳабибуллоевич, номзади илмҳои техники, дотсент, дотсенти кафедраи автоматонӣ ва идоракунӣ, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. E-mail: JalolovU@gmail.com

Information about the authors:

Ziyoev Shuhrat Sharofidinovich, senior lecturer, Department of Automation and Control, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: 0009-0007-6205-0694. E-mail: sh.ziyaev1986@gmail.com

Yunusov Nizomuddin Ismailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Control, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: 0000-0001-9036-8244. E-mail: U.Nizomyddin@gmail.com

Jalolov Ubaydullo Khabibulloevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Control, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. E-mail: JalolovU@gmail.com