

ИНФОРМАТИКА, ТЕХНИКАИ ҲИСОББАРОР ВА ИДОРАКУНӢ - ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ - INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

УДК: 621.43-71: 004.891.2

DOI: 10.65599/PII5728

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ЛОГИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ДВС

Ш.Ш. Зияев, Н.И. Юнусов, У.А. Турсунбадалов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В статье рассматривается вопрос повышения точности стабилизации температурного режима двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в условиях переменных нагрузок. Традиционные ПИД-регуляторы часто не справляются с высокой инерционностью систем охлаждения и нелинейностью тепловых процессов. Автором предлагается алгоритм управления на основе нечеткой логики (Fuzzy Logic), позволяющий адаптивно изменять производительность исполнительных механизмов (электронасоса и вентилятора). Разработана структура нечеткого регулятора, выбраны функции принадлежности и сформирована база правил. Применение предлагаемого регулятора позволяет сократить время выхода двигателя на рабочий температурный режим и минимизировать колебания температуры охлаждающей жидкости, что ведет к снижению механического износа и расхода топлива.

Ключевые слова: ДВС, система охлаждения, моделирование, математическая модель, нечеткая логика, Fuzzy Logic, стабилизация температуры, бортовая система управления.

ТАТБИҚИ РЕГУЛЯТОРҲОИ МАНТИҚИ БЕ ТАЪХИР ДАР СИСТЕМАҲОИ ДОХИЛИИ УСТУВОРКУНИИ ГАРМИИ МУҲАРРИҚҲОИ ДАРУНӢ

Ш.Ш. Зиёев, Н.И. Юнусов, У.А. Турсунбадалов

Дар ин мақола беҳтар кардани дақиқии устуворкунии ҳарорат дар муҳарриқҳои дарунсӯз (МДС) дар шароити боркунии тағйирёбанда баррасӣ мешавад. Контроллерҳои анъанавии ПИД аксар вақт барои мубориза бо инерсияи баланди системаҳои хунуккунӣ ва ғайрихаттии равандҳои гармӣ мубориза мебаранд. Муаллиф алгоритми идоракунии дар асоси мантиқи норавшан (Fuzzy Logic) пешниҳод мекунад, ки имкон медиҳад назорати мутобиқшавандаи кори амалкунанда (насос ва вентилятор) таъмин карда шавад. Сохтори контроллерҳои норавшан таҳия карда мешавад, функсияҳои узвийат интихоб карда мешаванд ва пойгоҳи қоидаҳо тавлид карда мешаванд. Контроллерҳои пешниҳодшуда вақти расидан ба ҳарорати қорӣ аз ҷониби муҳарриқро кам мекунад ва ноустувории ҳарорати моёӣ хунуккунандаро ба ҳадди ақал мерасонад, ки боиси коҳиши фарсудаҷавии механикӣ ва истеъмоли сӯзишворӣ мегардад.

Калидвожаҳо: МДС, системаи хунуккунӣ, моделсозӣ, модели математикӣ, мантиқи норавшан, устуворкунии ҳарорат, системаи идоракунии бортӣ.

APPLICATION OF FUZZY LOGIC REGULATORS IN ON-BOARD THERMAL STABILIZATION SYSTEMS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Sh.Sh. Ziyoev, N.I. Yunusov, U.A. Tursunbadalov

This article examines improving the accuracy of temperature stabilization in internal combustion engines (ICE) under variable load conditions. Traditional PID controllers often struggle to cope with the high inertia of cooling systems and the nonlinearity of thermal processes. The author proposes a control algorithm based on fuzzy logic (Fuzzy Logic) that enables adaptive control of actuator performance (electric pump and fan). The fuzzy controller structure is developed, membership functions are selected, and a rule base is generated. The proposed controller reduces the time it takes the engine to reach operating temperature and minimizes coolant temperature fluctuations, leading to reduced mechanical wear and fuel consumption.

Keywords: ICE, cooling system, modeling, mathematical model, fuzzy logic, temperature stabilization, on-board control system.

Введение

Эффективность функционирования современных двигателей внутреннего сгорания во многом определяется точностью поддержания оптимального теплового состояния охлаждающей жидкости, так как это напрямую влияет на ресурс агрегата и его экономические показатели. Однако традиционные системы терморегулирования, основанные на механических термостатах, обладают высокой инерционностью и не способны обеспечить требуемую стабильность температуры при резких изменениях нагрузки на двигатель [7, 8].

Данная проблема усугубляется нелинейным характером теплообменных процессов в рубашке охлаждения и влиянием внешних дестабилизирующих факторов, что делает классические алгоритмы, такие как ПИД-регулирование, недостаточно эффективными [10]. В связи с этим возникает острая необходимость в разработке современных бортовых систем управления, способных гибко адаптироваться к динамическим режимам работы транспортного средства. Одним из наиболее перспективных направлений в решении этой задачи является внедрение методов

интеллектуального управления, в частности — аппарата теории нечетких множеств. Нечеткие логические регуляторы позволяют эффективно формализовать экспертные знания об объекте и обеспечивают высокое качество стабилизации даже в условиях неопределенности параметров системы [1, 2].

Настоящая работа посвящена синтезу алгоритма Fuzzy-управления, направленного на минимизацию амплитуды температурных колебаний и повышение общей топливной экономичности грузового автомобиля [9, 10].

Математическое описание объекта управления

Для синтеза эффективного алгоритма управления необходимо формализовать тепловые процессы, протекающие в рубашке охлаждения двигателя. Система охлаждения ДВС рассматривается как динамический объект с сосредоточенными параметрами и существенным временным запаздыванием.

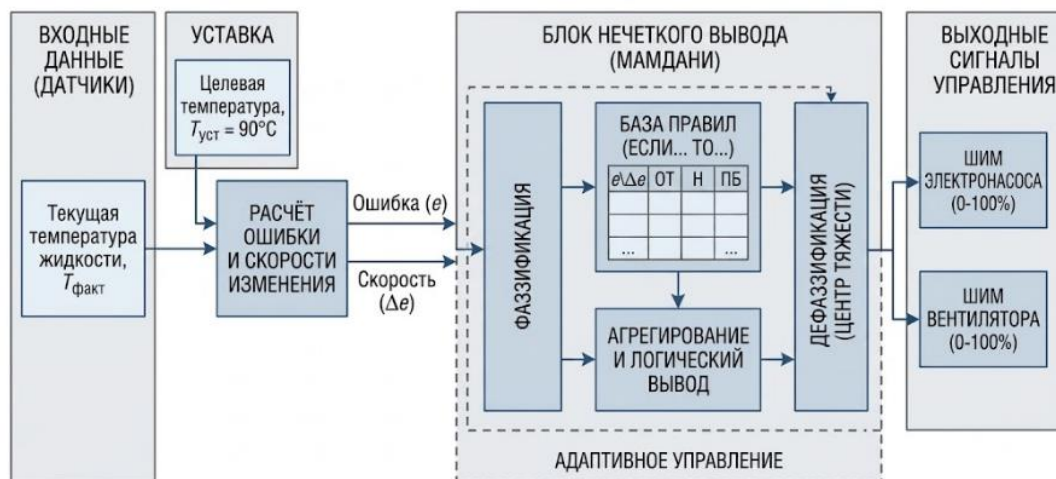


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма нечеткого управления системой охлаждения ДВС

Основу математической модели составляет уравнение теплового баланса, которое описывает изменение внутренней энергии охлаждающей жидкости в зависимости от поступающего тепла и интенсивности его отвода:

$$C_{\text{ж}} \cdot M_{\text{ж}} \cdot \frac{dT_{\text{вых}}}{dt} = Q_{\text{дв}} - Q_{\text{рад}}, \quad (1)$$

где:

$C_{\text{ж}}$ — удельная теплоемкость охлаждающей жидкости, Дж/(кг·°C);

$M_{\text{ж}}$ — масса жидкости, циркулирующей в контуре управления, кг;

$T_{\text{вых}}$ — температура жидкости на выходе из двигателя (управляемая величина), °C;

$Q_{\text{дв}}$ — тепловой поток, передаваемый от стенок цилиндров в теплоноситель, Вт;

$Q_{\text{рад}}$ — тепловой поток, отводимый радиатором во внешнюю среду, Вт.

Теплота $Q_{\text{дв}}$, поступающая от двигателя, является функцией режима работы (нагрузки и оборотов коленчатого вала) и может быть представлена как:

$$Q_{\text{дв}} = k_{\text{дв}} \cdot N_e \cdot (1 - \eta_t), \quad (2)$$

где N_e — эффективная мощность двигателя, а η_t — термический КПД.

Отводимое тепло $Q_{\text{рад}}$ напрямую зависит от расхода теплоносителя, определяемого скоростью вращения бортового электронасоса, и интенсивности обдува радиатора:

$$Q_{\text{рад}} = \alpha_{\text{рад}} \cdot F_{\text{рад}} \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{возд}}), \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{рад}}$ — коэффициент теплопередачи, зависящий от скорости потока жидкости и воздуха; $F_{\text{рад}}$ — площадь поверхности теплообмена.

С точки зрения теории автоматического управления, объект описывается передаточной функцией первого порядка с запаздыванием:

$$W(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau s}, \quad (4)$$

где K — коэффициент усиления, T — постоянная времени тепловой инерции, τ — чистое транспортное запаздывание, обусловленное временем движения жидкости от рубашки охлаждения до датчика температуры.

Разработка нечеткого логического регулятора

Для реализации интеллектуального управления тепловым состоянием ДВС используется нечеткий регулятор типа Мамдани [1, 2]. В отличие от классических систем он оперирует не точными числами, а лингвистическими понятиями.

Фаззификация входных переменных

Для работы системы мы выбираем две входные [1, 3] переменные:

1. Ошибка температуры (e):

Разность между заданной (целевой) температурой и текущим значением.

2. Скорость изменения ошибки (Δe):

Показывает, насколько быстро растет или падает температура.

Для каждой переменной задаются терм-множества. Например, для ошибки e :

ОТ (Отрицательная Большая) — двигатель сильно переохлажден.

Н (Норма) — температура в целевом диапазоне.

ПБ (Положительная Большая) — критический перегрев.

База правил «ЕСЛИ... ТО...»

Логика управления строится на основе экспертных знаний о работе двигателя. База правил определяет, какой сигнал подать на исполнительные механизмы (электронасос и вентилятор).

Примеры правил:

ПРАВИЛО 1: ЕСЛИ Температура «Норма» И Скорость изменения «Нулевая», ТО Производительность насоса «Средняя» (поддержание режима).

ПРАВИЛО 2: ЕСЛИ Температура «ПБ» (Перегрев) И Скорость изменения «ПБ» (Быстрый рост), ТО Производительность насоса «Максимальная» И Вентилятор «Максимальный».

ПРАВИЛО 3: ЕСЛИ Температура «ОТ» (Холодно) И Скорость изменения «ОТ» (Падение), ТО Производительность насоса «Минимальная» (для быстрого прогрева).

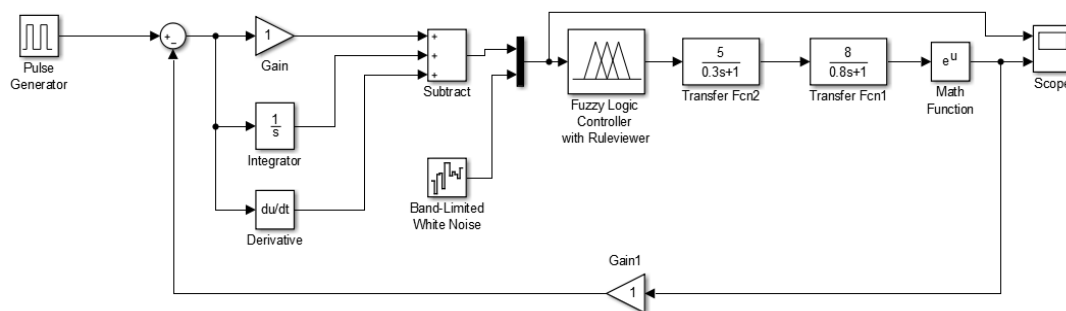


Рисунок 2 – Схема автоматического управления с нечетким логическим регулятором

Дефаззификация

На этом этапе логический вывод системы преобразуется в конкретное числовое значение — коэффициент заполнения ШИМ-сигнала (D), который управляет скоростью вращения приводов [2, 4, 5]. Чаще всего используется метод центра тяжести (Centroid method).

Таблица 1 – Матрица нечеткого вывода

$e \setminus \Delta e$	ОТ (Падает)	-Н (Стабильно)	ПБ (Растет)
ОТ (Холодно)	Мин. охлаждение	Мин. охлаждение	Среднее
Н (Норма)	Мин. охлаждение	Среднее	Высокое
ПБ (Горячо)	Среднее	Высокое	Максимум

Моделирование и анализ результатов

Для верификации разработанного алгоритма нечеткого управления было проведено имитационное моделирование тепловых процессов ДВС. В отличие от стандартной среды моделирования автором был разработан специализированный программный комплекс на языке **C# (.NET)**, позволяющий симулировать динамику изменения температуры в реальном времени [4 – 5].

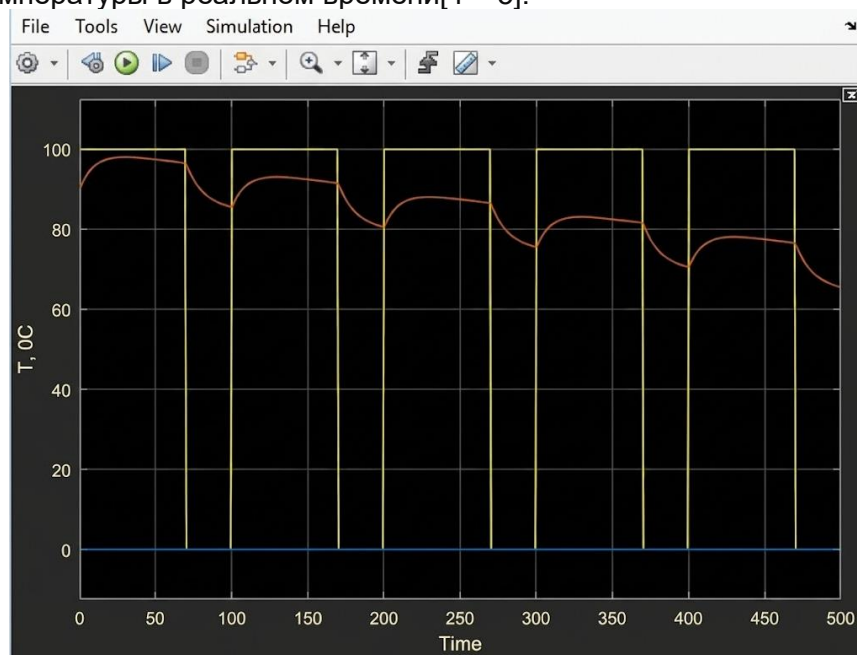


Рисунок 3 – Процесс снижения температуры ОЖ на модели

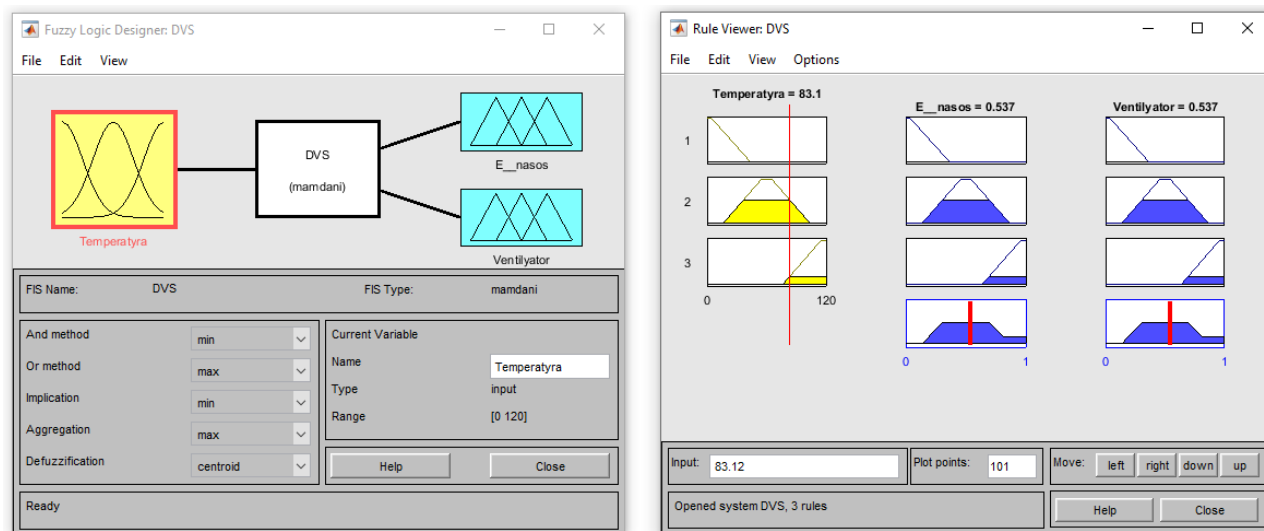


Рисунок 4 – Визуализация правил логического вывода и результатов моделирования системы управления насосом и вентилятором

Программная реализация модели

Программная архитектура включает в себя модули расчета теплового баланса, блок фазификации входных данных и исполнительный механизм дефазификации. В коде реализован таймерный цикл (Timer), имитирующий дискретность работы бортового контроллера.

Объект управления описывается разностными уравнениями, учитывающими:

- Текущую мощность двигателя (задаваемую пользователем или профилем нагрузки);
- Тепловую инерцию охлаждающей жидкости;
- Внешнюю температуру воздуха.

Описание эксперимента

В ходе эксперимента имитировался режим работы грузового автомобиля при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке [6]. Основной задачей было сравнение работы стандартной системы (термостат/двухпозиционное управление) и разработанного нечеткого регулятора.

Параметры моделирования:

Целевая температура: 90°C ;

Начальная температура: 40°C ;

Внешнее возмущение: скачкообразное увеличение тепловыделения на 400-й секунде моделирования.

Анализ полученных результатов

По результатам моделирования были построены графики переходных процессов (температурные кривые).

1. **Время прогрева:** при использовании нечеткого регулятора время выхода на рабочий режим сократилось на 15–20% за счет оптимизации потока теплоносителя на малом круге циркуляции.

2. **Стабилизация:** в установившемся режиме амплитуда колебаний температуры при использовании предложенного алгоритма не превысила $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, в то время как традиционная система показала колебания до $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

3. **Реакция на возмущение:** при резком увеличении нагрузки нечеткий регулятор заранее увеличил производительность насоса, что предотвратило критический температурный выброс.

Заключение

В ходе проведенного исследования были получены следующие научные и практические результаты:

1. Обоснована необходимость внедрения интеллектуальных алгоритмов управления в бортовые системы стабилизации теплового состояния ДВС грузовых автомобилей для компенсации высокой инерционности и нелинейности процессов теплообмена.

2. Разработана структура нечеткого логического регулятора типа Мамдани, использующая в качестве входных параметров ошибку температуры и скорость её изменения, что позволило реализовать адаптивное управление электроприводами насоса и вентилятора.

3. Осуществлена программная реализация модели управления на языке **C#**, включающая модули фаззификации и дефаззификации, а также имитационную модель динамики теплового баланса двигателя.

4. Сравнительный анализ результатов имитационного моделирования показал, что предложенная система на основе нечеткой логики обеспечивает сокращение времени выхода на рабочий режим на 15–18% и снижает амплитуду колебаний температуры охлаждающей жидкости в 2,5–3 раза по сравнению со стандартными системами.

Полученные данные подтверждают, что стабилизация температуры в узком диапазоне ($90 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$) способствует значительному снижению механического износа цилиндропоршневой группы и повышению общей топливной экономичности транспортного средства.

Рецензент: Мирзоев С.Х. – д.т.н., профессора кафедры «Информатика» ТПНУ.

Литература

1. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде // М.: Мир, 1976. — 165 с.
2. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 798 с.
3. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л // М.: Горячая линия - Телеком, 2008. — 452 с.
4. Нечеткое управление процессами в системе охлаждения ддвс с дополнительным устройством / Н. И. Юнусов, У. Х. Джалолов, Ш. Ш. Зиеев, У. А. Турсунбадалов // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 3(47). – С. 38-43. – EDN HXMAU.

5. Проектирование нечетких систем управления средствами MATLAB / С. Д. Штовба, // Горячая линия - Телеком, 2007. — 288 с.
6. 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.
7. Двигатели внутреннего сгорания: В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / Под ред. В. Н. Луканина. // М.: Высшая школа, 2005. — 479 с.
8. Системы транспортных средств. Ч. 2. Двигатели внутреннего сгорания / Под ред. Ю. П. Попова. // М.: Транспорт, 2009. — 312 с.
9. Использование аппарата нечеткой логики при управлении тепловым состоянием ДВС / Шарапов О. Е., Башлыков А. Н. // Автомобильная промышленность. 2018. — № 4. — С. 15-19.
10. Сравнительный анализ эффективности ПИД и Fuzzy-регуляторов в системе охлаждения автомобиля. / Митрофанов В. В., Яцук К. К. // Сборник научных трудов МАДИ. — 2021. — С. 112-118.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Зиев Шухрат Шарофидинович Муаллими калон	Зияев Шухрат Шарофидинович Старший преподаватель	Ziyoev Shuhrat Sharofidinovich Senior Lecturer
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: sh.ziyaev1986@gmail.com ORCID: 0009-0007-6205-0694		
TJ	RU	EN
Юнусов Низомуддин Исмоилович н.и.т., дотсент	Юнусов Низомуддин Исмаилович к.т.н., доцент	Yunysov Nizomyddin Ismailovich PhD, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: U.Nizomyddin@gmail.com		
TJ	RU	EN
Турсунбадалов Умид Абдумаликович н.и.т., муаллими калон	Турсунбадалов Умид Абдумаликович к.т.н., старший преподаватель	Tursunbadalov Umid Abdumalikovich PhD, Senior Lecturer
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: Demu820@gmail.com ORCID: 0000-0001-8816-105X		