

КОМПЕНСАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВС ПУТЕМ НЕЧЕТКОЙ АДАПТАЦИИ ТОПЛИВНОЙ КАРТЫ

Хуснутдинов Д.З., Галлямшин Э.М.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, параметрическая неопределенность, адаптивное управление, нечеткая логика, топливная карта.

Аннотация. В статье рассматривается проблема параметрической неопределенности в системах управления двигателем внутреннего сгорания, связанная с неточностью топливной карты, изменением свойств топлива и внешних условий. Предлагается метод компенсации путем введения дополнительного адаптивного контура, который на основе нечеткой логики корректирует задающие значения физических свойств топливной смеси статической карты, выраженных как коэффициент упругости газов в уравнениях. Описана структура двухконтурной системы, приведены нечеткие правила коррекции и результаты имитационного моделирования, подтверждающие повышение быстродействия управления в условиях неопределенности.

COMPENSATION OF PARAMETRIC UNCERTAINTY IN THE ENGINE CONTROL SYSTEM BY FUZZY ADAPTATION OF THE FUEL MAP

Khusnutdinov D.Z., Gallyamshin E.M.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

Keywords: internal combustion engine, parametric uncertainty, adaptive control, fuzzy logic, fuel map.

Abstract. The paper deals with the problem of parametric uncertainty in internal combustion engine control systems caused by inaccurate fuel map, fuel property changes and environmental variations. A compensation method is proposed by introducing an additional adaptive loop that, based on fuzzy logic, adjusts the set values of the physical properties of the fuel mixture in the static map, expressed as the coefficient of gas elasticity in the equations. The structure of a two-loop system is described, fuzzy correction rules are presented, and simulation results confirming the improvement of control speed under uncertainty are given.

Современные системы управления двигателями внутреннего сгорания функционируют в условиях значительной параметрической неопределенности. Источниками неопределенности служат производственные допуски, износ компонентов, вариации качества топлива, изменение атмосферных условий и температуры [1]. Традиционные подходы [2], основанные на статических калибровочных картах и классических ПИД-регуляторах, не всегда обеспечивают требуемое качество управления во всем диапазоне эксплуатационных режимов.

В связи с этим появляется необходимость разработать метод компенсации параметрической неопределенности путем введения дополнительного контура нечеткой адаптации, корректирующего саму топливную карту в реальном времени. Это позволяет системе подстраиваться не только под быстрые возмущения, но и под долговременные изменения характеристик объекта.

Модель объекта управления

В качестве объекта управления рассматривается имитационная модель двигателя внутреннего сгорания (ДВС), в которой рабочие газы при сгорании

топливно-воздушной смеси представлены в виде упругого элемента с переменным коэффициентом упругости c . Значение c определяет движущий момент, передаваемый через кривошипно-шатунный механизм.

Базовая система управления включает адаптивный нечеткий ПИД-регулятор, который на основе ошибки скорости и ее производных корректирует коэффициенты K_p , K_i , K_d [3]. Такая структура эффективно отрабатывает ступенчатые возмущения, но не способна устранить ошибку, вызванную систематическим смещением карты.

Нечеткая адаптация топливной карты

Для компенсации параметрической неопределенности предлагается дополнить систему вторым адаптивным контуром, который формирует мультипликативную поправку δ_c к базовому коэффициенту упругости c_0 :

$$c = c_0 \cdot (1 + \delta_c).$$

Поправка δ_c вырабатывается нечетким корректором на основе следующих входных переменных:

- ошибка управления;
- производная ошибки;
- текущие обороты двигателя;
- температура охлаждающей жидкости.

Выходная переменная δ_c ограничена диапазоном $\delta_c \in [-0,3; 0,3]$, что исключает чрезмерную коррекцию и сохраняет устойчивость.

Правила сформулированы на основе экспертных знаний о поведении ДВС. Для каждой входной переменной определены термы с треугольными функциями принадлежности.

Механизм нечеткого вывода реализован по методу Мамдани с последующей дефаззификацией центром тяжести. Полученное значение δ_c , накапливается с малым коэффициентом обучения, что придает корректору интегральные свойства и обеспечивает плавность адаптации.

Программная реализация и результаты моделирования

Разработанный алгоритм реализован в программном комплексе на языке Python, включающем имитационную модель ДВС, графический интерфейс и модули нечеткой адаптации, представленном на рисунке 1. Интерфейс позволяет включать/отключать коррекцию карты и наблюдать текущую поправку в реальном времени.

Для оценки эффективности проведен эксперимент. Заданная скорость составляла 25 м/с, масса автомобиля – 120 кг, уклон дороги – 0°.

Показатели качества управления приведены на рисунках 2 и 3.

Количество осцилляций – это число переходов производной скорости через ноль (смена знака) за время симуляции. Физически осцилляции отражают колебательный характер движения: каждое изменение направления ускорения (разгон-торможение) считается одной осцилляцией. Чем меньше этот показатель, тем плавнее работает система управления, тем ниже механические нагрузки на трансмиссию и выше комфорт.

Стабильность скорости – это стандартное отклонение (среднеквадратичное отклонение) скорости от её среднего значения в установившемся режиме.

Показывает, насколько сильно колеблется скорость вокруг заданного значения после завершения переходного процесса. Меньшие значения означают более точное и спокойное поддержание скорости, что свидетельствует о высоком качестве регулирования.

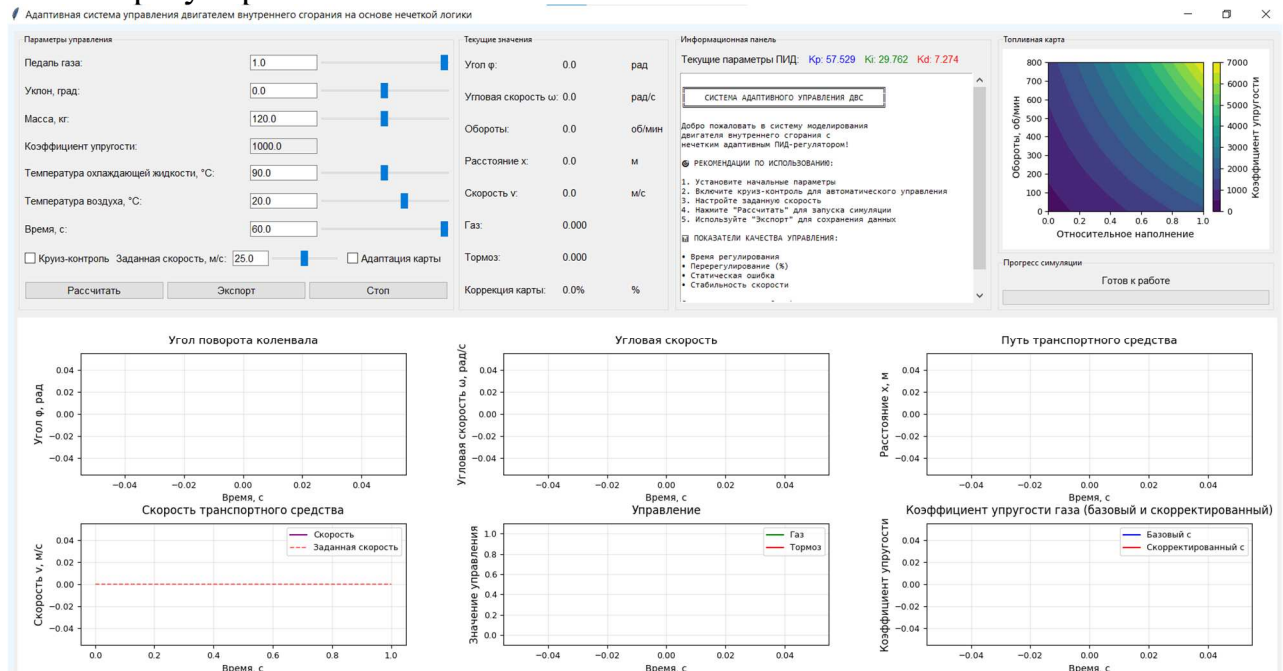


Рис. 1. Интерфейс программы на языке Python

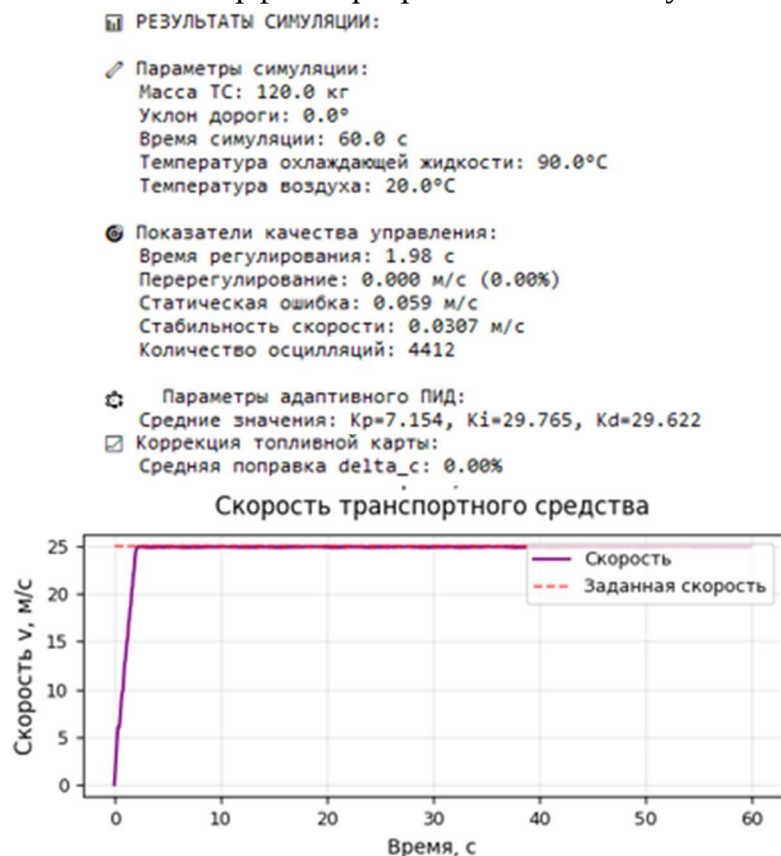


Рис. 2. Результат симуляции без нечеткой адаптации топливной карты

Оба режима обеспечивают выход на заданную скорость с нулевым перерегулированием и малой статической ошибкой (менее 0,08 м/с). Однако ключевое различие наблюдается в динамических показателях. При включенной адаптации карты время регулирования сокращается на 16% (с 1,98 до 1,67 с), а

количество осцилляций уменьшается более чем в два раза – с 4412 до 2165. Это свидетельствует о существенном снижении колебательности переходного процесса.

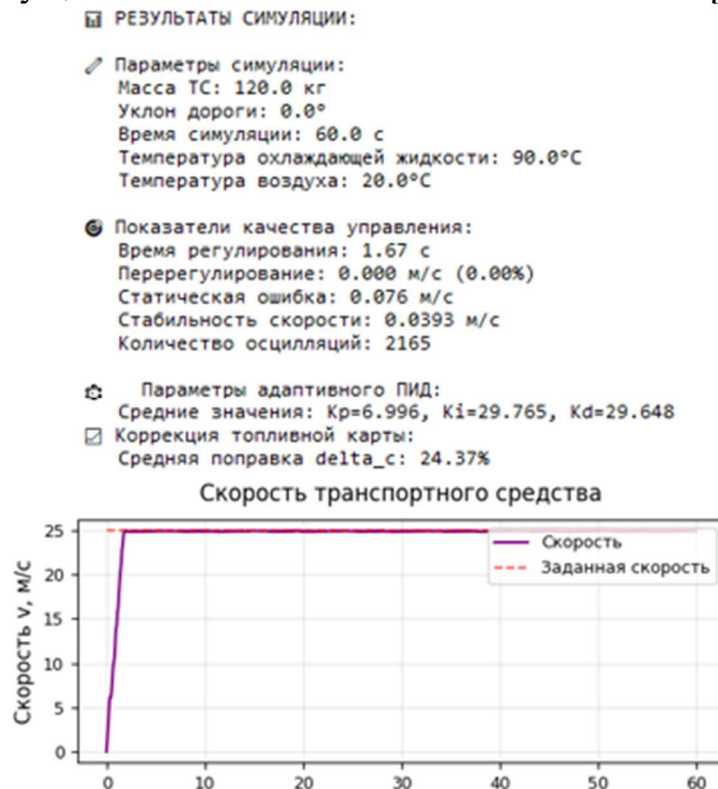


Рис. 3. Результат симуляции с нечеткой адаптацией топливной карты

Физическая интерпретация полученного эффекта заключается в следующем. Нечеткий корректор, анализируя динамику ошибки и текущие обороты, формирует поправку к коэффициенту упругости газов. В ходе симуляции средняя поправка достигла 24,37%, что означает адаптацию топливной карты к реальным условиям работы двигателя. Благодаря этому система отрабатывает заданное управляющее воздействие, и регулятор работает в более благоприятных условиях. Снижение осцилляций свидетельствует о меньшей склонности системы к колебаниям, что повышает комфорт и долговечность механизмов.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение базы нечетких правил и экспериментальную апробацию.

Список литературы

- Бадалян Л.Х., Гапонов В.Л. Анализ выбросов загрязняющих веществ автотранспортом // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды: Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 4 (международный). – Ростов н/Д.: РГАСХМ, 2000. – С. 29-31.
- Хмелев Р.Н., Радько А.Е., Подъемщиков А.Н. Разработка и исследование динамических моделей двигателей легковых автомобилей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – №11-1. – С. 362-368.
- Ротач В.Я. Теория автоматического управления. Учебник для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.

Сведения об авторах:

Хуснутдинов Дим Зинфирович – к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология»;

Галлямин Эльвир Мунирович – студент.