

Применение теории нечетких множеств для косвенной оценки компрессии в цилиндрах ДВС

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Рассмотрен вопрос применения теории нечетких множеств при выполнении косвенной оценки компрессии в цилиндрах ДВС по параметрам, измеряемым в процессе функционирования двигателя.

Ключевые слова: теория нечетких множеств, нечеткая логика, косвенное измерение компрессии, цилиндропоршневая группа ДВС, аппроксимация нелинейной зависимости.

Постановка проблемы

Спектр практического применения теории нечетких множеств на сегодняшний день очень широк. В современных автомобилях аппарат нечетких множеств используется, например, в системе управления двигателем, противобуксовочной системе, автоматической трансмиссии, системе кондиционирования воздуха, системе помощи при парковке, системе управления движением автомобиля, различных системах безопасности [1, 2].

Достоинства систем нечеткого вывода – эффективность в условиях неполноты и ограниченности экспериментальных данных, возможность учета экспертных знаний и способность к обучению – способствуют дальнейшему их внедрению как в разработки различных систем автомобиля, так и в процесс обработки информации в целях диагностики и прогнозирования технического состояния систем и агрегатов.

В данной статье рассмотрена возможность использования нечеткого моделирования при выполнении косвенной оценки величины компрессии в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания по величине тока стартера.

Анализ публикаций

Появление косвенных методов оценки компрессии обусловлено потребностью в автоматизации процесса контроля этого параметра. В [3], например, предлагается определять компрессию P_k посредством измерения активной мощности, потребляемой стартером в момент прокрутки двигателя при отключенных от свечей зажигания высоковольтных проводах.

В [4] предлагается способ оценки P_k , в котором наряду с током стартера I_{st} и напряжением аккумуляторной батареи U_{ab} учитываются частота вращения коленчатого вала n_{kv} и температура масла T_m .

Расширение номенклатуры учитываемых параметров повышает точность оценки компрессии, но при этом значительно усложняет задачу аппроксимации зависимости $P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m)$. Это связано с нелинейностью зависимости, сравнительно большим количеством измеряемых параметров, неравномерностью распределения их значений в диапазонах изменения.

Для решения задач такого рода успешно применяется математический аппарат нечетких множеств и нечеткой логики. Теоретическим обоснованием

правомерности его применения служит теорема Каско о нечеткой аппроксимации, согласно которой любая математическая система может быть аппроксимирована системой на нечеткой логике [2].

Цель и постановка задачи

Целью данной статьи является построение и настройка нечеткой модели, идентифицирующей зависимость $P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m)$ по измеренным значениям входящих в неё параметров.

Создание и настройка нечеткой модели для аппроксимации нелинейной зависимости $P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m)$

Для создания нечеткой модели была выбрана система Мамдани как наиболее легко интерпретируемая и дающая более качественный результат на малых обучающих выборках. Синтез модели нечеткого вывода Мамдани был осуществлён с использованием пакета Fuzzy Logic Toolbox системы Matlab.

После фильтрации собранный в ходе эксперимента массив данных, используемых для аппроксимации зависимости $P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m)$, был представлен в виде матрицы, каждая из 313 строк которой содержит набор значений входных параметров $P_k, I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m$, измеренных в момент нахождения цилиндра в ВМТ. Исходный массив данных был разделен на обучающую и контрольную выборки в соотношении 2 : 1.

Предварительно все значения входных параметров были пронормированы так, чтобы их значения входили в интервал [0; 1].

Входные переменные $I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m$ рассматриваются как лингвистические, которые задаются соответствующими терм-множествами (множествами всех возможных значений лингвистической переменной): $I_{st} - \{L, LM, M, MB, V\}$, $U_{ab} - \{L, M, V\}$, $n_{kv} - \{L, M, V\}$, $T_m - \{L, M, V\}$, где термам присвоены следующие значения: L – «малое», LM – «меньше среднего», M – «среднее», MB – «больше среднего», V – «большое». Выходной переменной системы является величина компрессии P_k , заданная терм-множеством $\{L, LM, M, MB, V\}$. Термы задаются нечеткими множествами посредством функции принадлежности.

В качестве функции принадлежности была выбрана функция Гаусса, как одна из наиболее популярных, так как для её задания требуется всего два параметра, что сокращает размерность задачи оптимизации при последующей настройке нечеткой базы знаний:

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right),$$

где μ – степень принадлежности переменной нечеткому множеству,
 b – координата максимума, c – коэффициент концентрации.

Для наглядности на рис. 1 показаны графики исходных функций принадлежности для некоторых переменных.

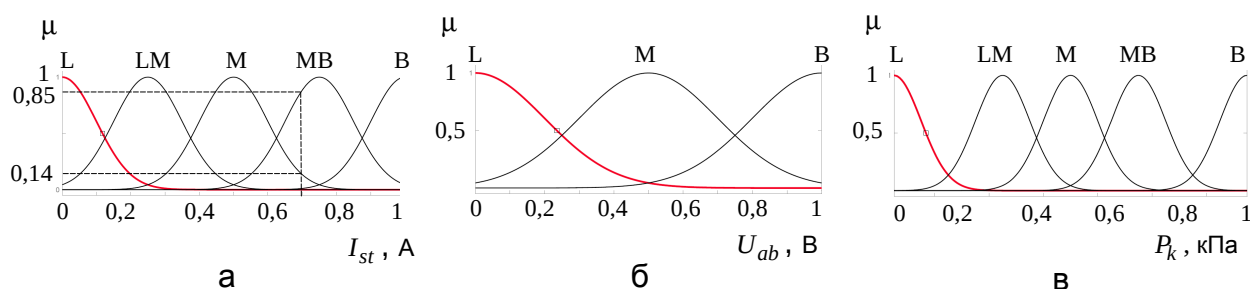


Рис. 1. Функции принадлежности: а – тока стартера I_{st} ; б – напряжения аккумуляторной батареи U_{ab} ; в – компрессии P_k

Для примера рассмотрим задание лингвистической переменной «ток стартера» (рис.1, а). Весь диапазон его нормированных значений разделим на пять термов. Тогда значение $I_{st}=0$ будет соответствовать терму «L» со степенью принадлежности $\mu=1$, а значение $I_{st}=0,7$ – терму «MB» с $\mu=0,85$ и терму «M» с $\mu=0,14$.

База нечетких правил была составлена на основе представлений о характере изменений измеряемых параметров соответственно различным степеням износа. Весовым коэффициентам всех правил было присвоено значение 1.

Вычислительные эксперименты показали, что наименьшую ошибку аппроксимации даёт база, состоящая из 127 правил, которые сведены в табл. 1. Каждое правило представляет собой простую языковую конструкцию типа «Если <усл. 1> и <усл. 2> и ..., то <заключение>». Поэтому в качестве метода агрегирования выбрана операция min-конъюнкции, а для аккумуляции заключений правил используется метод max-дизъюнкции.

Дефаззификация (преобразование лингвистических переменных в количественное значение) проводилась по методу центра тяжести (взвешенного среднего), обеспечивающему наилучшие показатели точности и скорости настройки базы нечетких правил.

Необходимо отметить, что количество термов в терм-множествах, количество и содержание нечетких правил определялись методом перебора различных комбинаций. Критерием для окончательного выбора параметров нечеткой модели было наименьшее значение среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки между экспериментальными и моделируемыми величинами компрессии, рассчитываемое по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - M)^2},$$

где n – количество пар $(P_{ki}; P_{k_{mod}i})$;

$e_i = P_{ki} - P_{k_{\text{mod}} i}$ – ошибка моделирования для i -го измерения;

$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$ – математическое ожидание ошибки моделирования.

СКО между экспериментальными значениями компрессии и значениями, полученными с помощью нечеткой модели, составляет на контрольной выборке 214,9 кПа (32,8 % от диапазона допустимых значений компрессии). Это означает, что построенная модель довольно грубо идентифицирует искомую зависимость и требует настройки.

Таблица 1

База нечетких правил

		L			LM			M			MB			B		
		L	M	B	L	M	B	L	M	B	L	M	B	L	M	B
ρ_{ab}	B	B	B	B	B	B	B	MB	B	B	MB	MB	B	M	MB	B
		M	B	B	B	MB	B	B	MB	B	MB	MB	B	M	MB	B
		L	B	B	B	MB	B	B	MB	MB	B	MB	MB	B	M	MB
	MB	B	MB	B	B	MB	MB	B	M	MB	MB	M	MB	M	MB	MB
		M	MB	MB	B	M	MB	B	M	MB	MB	M	MB	M	M	MB
		L	MB	MB	B	M	MB	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M
	M	B	M	MB	MB	M	M	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M
		M	M	MB	MB	M	M	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M
		L	M	M	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M	M	LM	M
	LM	B	LM	M	MB	LM	M	M	LM	M	M	LM	LM	M	LM	LM
		M	LM	M	M	LM	LM	M	LM	LM	M	LM	LM	M	L	LM
		L	LM	LM	M	LM	LM	M	LM	LM	M	L	LM	LM	L	LM
	L	B	LM	LM	M	L	LM	M	L	LM	LM	L	L	LM	L	L
		M	L	LM	M	L	LM	M	L	L	LM	L	L	LM	L	L
		L	L	LM	M	L	LM	LM	L	L	LM	L	L	L	L	L

Трёхмерные поверхности «входы-выход» созданной нечеткой модели изображены на рис. 2.

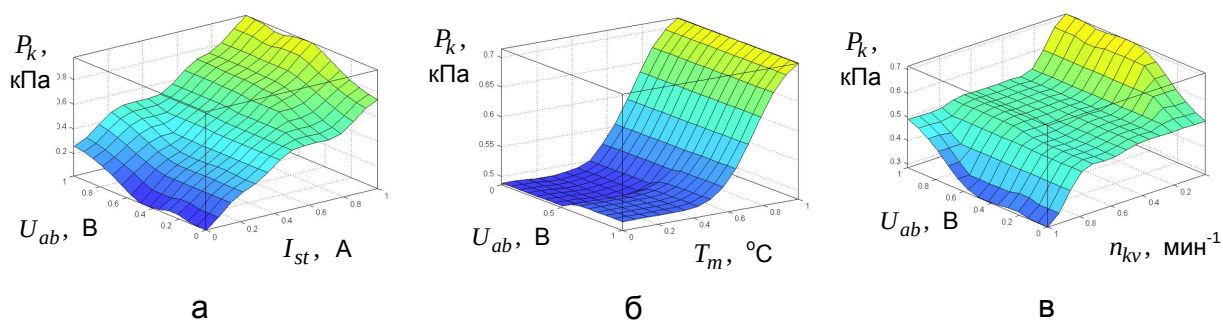


Рис. 2. Поверхности зависимостей: а – $P_k = f(I_{st}, U_{ab})$; б – $P_k = f(U_{ab}, T_m)$;
в – $P_k = f(n_{kv}, U_{ab})$

Настройка представляет собой нахождение таких параметров функций принадлежности и таких весовых коэффициентов правил, которые минимизируют отклонение между экспериментальными значениями компрессии P_k и полученными с помощью нечеткой модели значениями P_{kmod} на обучающей выборке. Большое количество правил и неочевидность взаимосвязей между параметрами дают основание полагать, что использование стандартных функций оптимизации предпочтительнее «ручной» настройки системы.

В данном случае обучение нечеткой модели выполнялось с использованием функции *fmincon* пакета Optimization Toolbox системы Matlab, которая предназначена для решения задач оптимизации методом нелинейного программирования и основана на методе наименьших квадратов. Настройка происходила в течение 10 итераций.

В результате настройки нечеткой модели σ на контрольной выборке уменьшилось до 57,63 кПа (8,78 % от диапазона допустимых значений компрессии), изменились функции принадлежности (рис. 3).

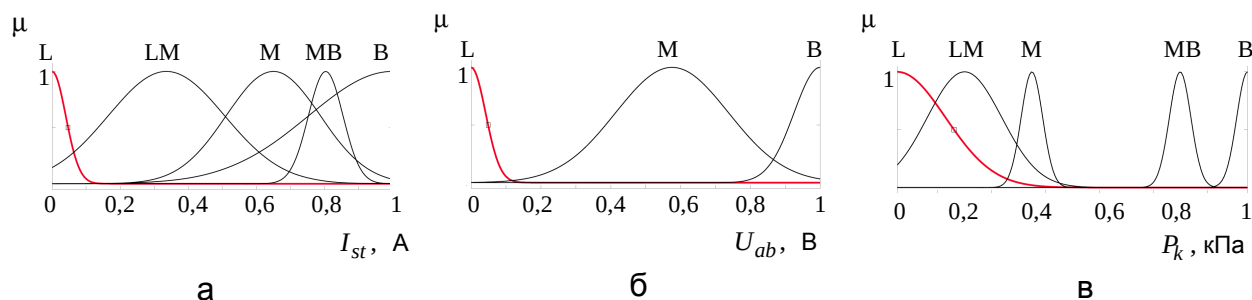


Рис. 3. Функции принадлежности после настройки: а – тока стартера I_{st} ;
б – напряжения аккумуляторной батареи U_{ab} ; в – компрессии P_k

Для наглядности на рис. 4 приведены поверхности «входы-выход», полученные после обучения нечеткой модели.

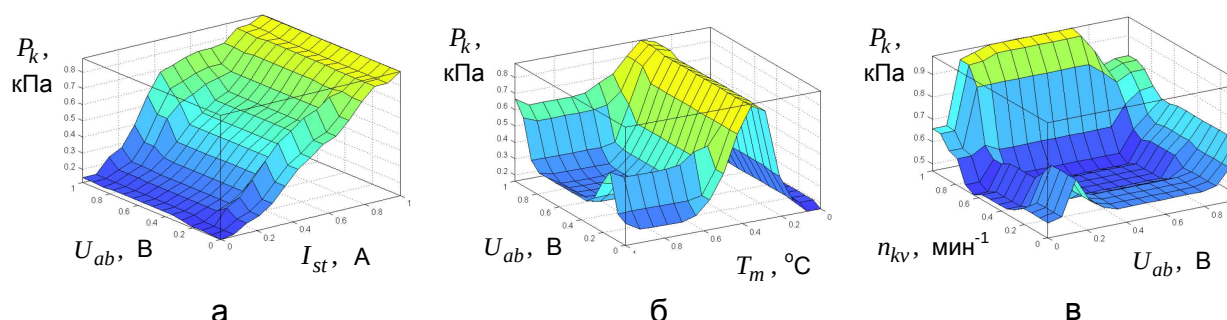


Рис. 4. Поверхности зависимостей после настройки:

а – $P_k = f(I_{st}, U_{ab})$; б – $P_k = f(U_{ab}, T_m)$; в – $P_k = f(n_{kv}, U_{ab})$

Выводы

Вычислительные эксперименты подтверждают целесообразность использования теории нечетких множеств для идентификации нелинейных многопараметрических зависимостей, в частности зависимости величины компрессии от измеряемых параметров.

Системы нечеткого вывода позволяют наиболее простым способом создать начальную грубую модель объекта или процесса, а затем настроить её по экспериментальным данным, собранным на автомобилях определенной марки. В этом случае появляется возможность при диагностике учитывать также конструктивные и иные особенности автомобиля.

Список литературы

1. Антипов, С.И. Нечеткая логика и возможности ее применения в системах управления современного автомобиля [электронный ресурс] / С.И. Антипов, Ю.В. Дементьев, А.Е. Калинин. – Электрон. данные. – Режим доступа: http://mami.ru/science/mami145/scientific/article/s01/s01_02.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
2. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab [текст] / С.Д. Штовба. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.
3. Пат. 2245532 Российская Федерация, МПК G01M15/00, G01L23/08. Электронное устройство для определения компрессии в цилиндрах бензинового двигателя внутреннего сгорания / Попов А.П. (RU), Горшенков А.А. (RU); патентообладатель Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ) (RU) – № 2003102287/06; заявл. 27.01.2003; опубл. 20.09.2004.
4. Бажинов, А.В. Компьютеризированная система диагностики цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма двигателей внутреннего сгорания [текст] / А.В. Бажинов, Е.А. Серикова // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2009. – № 11. – С. 17–21.

Рецензент: Богаевский Александр Борисович – д.т.н., профессор кафедры автомобильной электроники ХНАДУ, г. Харьков
Поступила в редакцию 09.11.12

Застосування теорії нечітких множин для непрямого оцінювання компресії в циліндрах ДВЗ

Розглянуто питання практичного застосування теорії нечітких множин для апроксимації нелінійних залежностей за експериментальними даними на прикладі непрямого визначення величини компресії в циліндрах ДВЗ за величиною вимірюваних параметрів

Ключові слова: теорія нечітких множин, нечітка логіка, непряме визначення компресії, циліндропоршньова група ДВЗ, апроксимація нелінійної залежності

The application of of fuzzy sets theory for the indirect estimation of compression in cylinders ICE

The question of the practical application of fuzzy sets theory for approximation of nonlinear dependences from experimental data is considered on the example of indirect determination of compression in cylinders ICE on the measureable parameters

Keywords: theory of fuzzy sets, fuzzy logic, indirect measuring of compression, ICE piston-cylinder-unit, the approximation of nonlinear dependence