

В.С. Кукис, В. А. Сеницын, В. П. Босяков

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В статье изложены возможности искусственной нейронной сети для оптимизаций конструктивных и регулировочных параметров дизеля с целью снижения количества вредных выбросов с отработавшими газами, описана методика построения искусственных нейронных сетей и основные их виды. *Математическое моделирование; рабочий процесс; нейронная сеть; метод обучения; двигатель внутреннего сгорания; токсичность отработавших газов; экспериментальные данные*

Наибольшее влияние на выбросы вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ) дизелей оказывает: способ смесеобразования, тип камеры сгорания, рабочий объем цилиндра, степень сжатия, уровень форсирования двигателя, параметры воздушного заряда и системы охлаждения, конструкция и регулировочные параметры системы топливоподачи, воздухоснабжения, газораспределения, рециркуляции ОГ, наличие устройств и систем очистки ОГ после выпуска их из цилиндра дизеля и др. Задача исследователей и инженеров-конструкторов – найти оптимальные конструктивные и регулировочные параметры двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые позволяют снизить выбросы ВВ с ОГ с сохранением экономичности и надежности. Такая задача может решаться двумя путями: первый – проведение ряда необходимых моторных испытаний при различных регулировочных и конструктивных параметрах, при оценке весомости принятых изменений и нахождение оптимальных значений. Данный метод обладает большой достоверностью результатов, но отрицательной чертой является высокая стоимость испытаний, связанная с ресурсоемкостью метода [1]. Второй путь основан на применении математических моделей, которые позволяют расчетным путем прогнозировать влияние вносимых изменений [2–5]. Такой путь становится актуальным в наше время в связи с развитием электронной техники, облегчающей расчеты и повышающей их точность. Расчеты обладают сравнительно меньшей стоимостью, занимают гораздо меньше времени, чем испытания, но требуют повышенного внимания к достоверности результатов.

В математическом моделировании различают три основных подхода: феноменологический

(«белый ящик»), формальный («черный ящик») и полуэмпирический («серый ящик») [2].

Феноменологический подход описывает математическим языком суть явления на основе законов природы (например, уравнения химической кинетики горения топлива в системном анализе). Главным недостатком этого подхода является большая трудоемкость подготовки модели, что делает их непригодными для предварительных оценок, связанных с перебором большого числа параметров, а также решения сопряженных задач, включающих различные физические модели нескольких элементов.

С помощью формального подхода описывается поведение объекта на основе данных об отклике системы на внешние возмущения без анализа физической сущности внутренних процессов. В основу формального подхода заложены экспериментальные данные, при обработке которых получают частные математические модели. Они не учитывают всего комплекса физических свойств элементов исследуемой технической системы, а лишь улавливают обнаруживаемую в процессе эксперимента связь между отдельными параметрами системы, которыми удается варьировать и (или) осуществлять их измерение. Положительным в таких моделях можно назвать простоту модели, что придает доступность и несложность в расчетах; возможность создания модели при неизученных до конца процессах, происходящих в системе, на основании входящих и исходящих данных. Если неизвестен физический процесс явления, факторная модель может заметно минимизировать затраты, связанные с доводкой или совершенствованием двигателя. Большим потенциалом при создании формальных моделей обладают искусственные нейронные сети (ИНС).

Использованию нейронных сетей в двигателестроении посвящены труды различных исследователей.

дователей, в которых рассмотрены вопросы анализа рабочего цикла, параметров надежности, транзиентных режимов ДВС, создания алгоритмов управления и др. В качестве исходных для обучения ИНС используются экспериментальные данные, получение которых связано с большими затратами времени и материальных ресурсов, что является серьезным недостатком существующих методик применения ИНС. В настоящей работе предложена методика оптимизации, основанная на обучении ИНС с использованием как экспериментальных, так и расчетных данных, полученных с применением математической модели рабочего процесса на основе системы дифференциальных уравнений энергетического и массового балансов рабочего тела, что позволяет значительно сократить затраты времени и материальных ресурсов на доводку ДВС. Также комплексная математическая модель позволяет производить расчеты для обоснования вносимых изменений в конструкцию двигателей с целью их доводки и модернизации для повышения мощностных, экономических характеристик и снижения выбросов ВВ с ОГ.

Математическая модель рабочего процесса построена на основе системы дифференциальных уравнений энергетического баланса рабочего тела, которая включает динамические модели состояния рабочего тела в камере сгорания (1), во впускном и выпускном коллекторах, необходимые параметры турбокомпрессора, цилиндропоршневой группы, газораспределительного механизма и топливной аппаратуры.

Изменение массы воздуха и продуктов сгорания в цилиндре описывается с использованием дифференциальных уравнений массового баланса газов (2).

В качестве независимой переменной использовано время, а не угол поворота коленчатого вала (ПКВ), так как для динамических систем длительность процессов (например, периода задержки воспламенения топлива) удобнее задавать в единицах времени, которое, в отличие от угла ПКВ, не зависит от частоты вращения коленчатого вала.

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} = & (H_u \delta q_u \frac{dx}{dt} + \frac{dQ_w}{dt} + \\ & + \frac{dQ_n}{dt} - \frac{dQ_m}{dt} - u' \frac{dG'}{dt} - \\ & - u'' \frac{dG''}{dt} + \frac{dL}{dt}) \frac{1}{C_v (G' + G'')}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dG'}{dt} = & \frac{dG'_n}{dt} - \frac{dG'_m}{dt} - G_0 q_u \frac{dx}{dt}, \\ \frac{dG''}{dt} = & \frac{dG''_n}{dt} - \frac{dG''_m}{dt} + (G_0 + 1) q_u \frac{dx}{dt}, \\ P = & \frac{(G' + G'')RT}{V}. \end{aligned}$$

где $\frac{dQ_w}{dt}$ – элементарное количество энергии, подведенное к рабочему телу (или отведенное от него) в процессе теплообмена со стенками цилиндра;

$\frac{dQ_n}{dt}$ – элементарное количество энергии, подведенное к рабочему телу (или отведенное от него) в процессе наполнения цилиндра;

$\frac{dQ_m}{dt}$ – элементарное количество энергии, подведенное к рабочему телу (или отведенное от него) в процессе очистки цилиндра;

$\frac{dL}{dt}$ – элементарное количество энергии, отведенное от рабочего тела в форме работы (элементарная работа цикла);

G'_n – количество свежего заряда, поступившего в цилиндр через впускные органы;

G'_m – количество свежего заряда, вошедшего в цилиндр через впускные органы;

G''_n – количество продуктов сгорания, вышедших из цилиндра через выпускные органы;

C_v – удельная массовая изохорная теплоемкость смеси воздуха и продуктов сгорания;

$\frac{dx}{dt}$ – скорость выгорания топлива;

R – индивидуальная газовая постоянная рабочего тела.

$$\begin{aligned} dG'' = & -G_0 dg_x + r'_n dG_n - r'_m dG_m, \\ dG'' = & (G_0 + 1) dg_x + r''_n dG_n - r''_m dG_m. \end{aligned} \quad (2)$$

где G_0 – теоретически необходимая масса воздуха для полного сгорания 1 кг топлива;

g_x – масса сгоревшего топлива, кг;

r'_n – массовая доля воздуха на впуске, кг;

r'_m – массовая доля продуктов сгорания на впуске, кг;

r''_n – массовая доля воздуха на выпуске, кг;

r''_m – массовая доля продуктов сгорания на выпуске, кг;

G_n – масса воздуха, поступающая в цилиндры через впускные органы, кг;

G_m – масса газов, выходящих из цилиндров через выпускные органы, кг.

Уравнения (1) и (2) составляют методологическую основу синтеза рабочего цикла двигателя. Скорость выгорания топлива определяется по закону И. И. Вибе [4].

Элементарное количество теплоты, подведенное к рабочему телу (или отведенное от него) в процессе теплообмена со стенками цилиндра, находится из уравнения теплоотдачи с использованием уравнения Вошни.

Элементарный расход воздуха и газов через проходные сечения впускных и выпускных органов (клапанов) определяются из уравнения:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{\sqrt{1000}}{6} \frac{\mu f}{n} \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_f}{P_1} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_f}{P_1} \right)^{(k+1)/k} \right]}, \quad (3)$$

где μf – эффективное проходное сечение клапана;

T_1 – температура газов перед сечением;

p_1 – давление газов перед сечением;

p_f – условное давление в минимальном сечении;

k – показатель адиабаты.

Система уравнений (1–3) решается численными методами, например, Эйлера или Рунге-Кутты.

Сравнительную простоту математической модели несет формальный подход, моделью которого является ИНС. Распространенными моделями ИНС чаще всего бывают однослойная линейная нейронная сеть, многослойная нейронная сеть, RBF-сети.

Простейшая однослойная линейная ИНС может быть описана векторно-матричным соотношением:

$$q = W^{(K)} r_1 + w_0 r_0 = W^{(K)} r, \quad (4)$$

где $q = \text{col}(q_1, \dots, q_i, \dots, q_k)$ – вектор выхода;

$r = \text{col}(r_1, \dots, r_j, \dots, r_n)$ – вектор входа;

$W^{(K)}$ – матрица весовых коэффициентов.

Такие сети обладают простотой и могут хорошо описать линейную закономерность.

Структура многослойной нейронной сети отличается тем, что выходы базовых элементов каждого слоя поступают на входы всех базовых элементов следующего слоя. В векторной форме выход i -го слоя сети равен:

$$q_i^{(i)} = f(W_1^{(i)} q_1^{(i-1)} + w_0^{(i)} q_0^{(i-1)}), \quad (5)$$

где $w_0^{(l)} = \text{col}(w_{1,0}^{(l)}, \dots, w_{n_l,0}^{(l)})$ – вектор весовых коэффициентов сигнала инициализации $q_0^{(l-1)}$ в слое l ; $q_i^{(i)} = \text{col}(q_{1i}^{(i)}, \dots, q_{n_i i}^{(i)})$ и $q_i^{(i-1)} = \text{col}(q_{1i}^{(i-1)}, \dots, q_{n_{i-1} i}^{(i-1)})$ – векторы выходов базовых процессорных элементов слоя l и выходов предыдущего $(l-1)$ -го поступающих на входы базовых элементов слоя l . Такие сети считаются универсальным инструментом для точной многократной аппроксимации непрерывных функций.

Выбор используемой структуры сети основан на эмпирических рекомендациях [6], а также опыте исследования.

Для работы ИНС (распознавания, оптимизации, управлений и др.) необходима настройка весовых коэффициентов w_{ij} ее базовых процессорных элементов. Такой процесс называется обучением ИНС. В настоящее время существует множество стратегий обучения ИНС, из них различают три основных: «с учителем», «без учителя» и смешанную.

Схематично расчетная схема ИНС представлена на рис. 1.

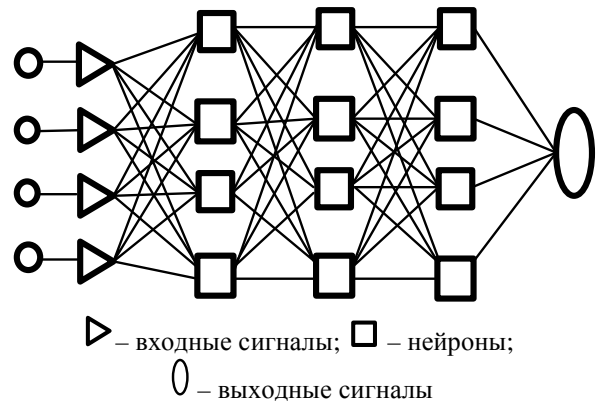


Рис. 1. Структура ИНС

Возможности разработанной комплексной математической модели показаны на примере дизеля типа 4ЧН13/15 при оптимизации угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) с целью снижения выбросов ВВ с ОГ на режимах, определенных ГОСТ Р 41.96, так как дизель предназначен для промышленных тракторов и специальной техники.

Расчет рабочего процесса моделировал методику 8-режимных испытаний по ГОСТ Р 41.96.

В расчетную модель рабочего процесса были заложены основные конструктивные и регулировочные характеристики дизеля: тип двига-

теля – четырехтактный дизель с непосредственным впрыскиванием топлива с жидкостным охлаждением и с газотурбинным наддувом, число цилиндров – 4 шт., расположение цилиндров – рядное, порядок работы цилиндров – 1-3-4-2, диаметр цилиндра – 130 мм, ход поршня 150 мм, фазы газораспределения и конструкция газораспределительного механизма аналогичны прототипу.

Для получения обучающей выборке ИНС были взяты данные испытаний дизеля типа 4ЧН13/15 при различной нагрузке и частоте вращения коленчатого вала от 800...2000 мин⁻¹ (всего 45 режимов). Параметрами входа были выбраны такие показания как: частота вращения коленчатого вала двигателя, крутящий момент, часовой расход воздуха, цикловая подача топлива, максимальное давление в цилиндре ДВС. Параметрами выхода являлись: удельные выбросы нормированных ВВ.

Архитектура ИНС представлена в виде трехслойного перцептрона. Каждый скрытый слой содержит 60 нейронов, в качестве оценивающего метода был применен двухэтапный Квази-Ньютоновский метод. В нем вычисляются асимптотические оценки (частных) производных второго порядка функции потерь, которые затем используются для определения направления перемещения параметров от итерации к итерации. В случае, когда вторые производные определены (а обычно это так), этот метод обладает большой эффективностью. Метод обучения ИНС использовался «с учителем» по заранее известным данным, полученными в ходе экспериментов.

В качестве критерия оптимизации для оценки эффективности проводимых изменений и находений наилучших значений параметров выбрана минимальная величина показателя токсичности ОГ F , рассчитанного с учетом относительного коэффициента агрессивности A_i и требований ГОСТ Р 41.96 к выбросам ВВ с ОГ для дизеля типа 4ЧН13/15.

$$F = \frac{g_{CO} A_{i_{CO}}}{g'_{CO}} + \frac{g_{NOx} A_{i_{NOx}}}{g'_{NOx}} + \frac{g_{CH} A_{i_{CH}}}{g'_{CH}} + \frac{g_{PM} A_{i_{PM}}}{g'_{PM}}, \quad (6)$$

где g_{CO} , g_{NOx} , g_{CH} и g_{PM} – удельный выброс компонента (г/(кВт·ч)); $A_{i_{CO}}$, $A_{i_{NOx}}$, $A_{i_{CH}}$ и $A_{i_{PM}}$ – относительный коэффициент агрессивности компонента. Для дизелей коэффициенты агрессивности CO, NOx, CH и PM имеют соотношения 1; 41,1; 3,16; 200 соответственно [1, 7]; g'_{CO} , g'_{NOx} , g'_{CH} и g'_{PM} – предельно допустимые вы-

бросы токсичного компонента согласно требованиям ГОСТ Р 41.96 к содержанию ВВ в ОГ. Для дизеля 4ЧН13/15, вновь проектируемого и модернизируемого, предельно допустимые выбросы соответственно равны 5; 6; 1; 0,3 (г/(кВт·ч)).

Показатель токсичности F является комплексным критерием оптимизации, помимо нормированных удельных выбросов ВВ с ОГ дизеля, он включает в себя агрессивность компонента и требования нормативно-технической документации к данному двигателю.

Границами оптимизации из соображений экономичности и низкой тепломеханической напряженности деталей цилиндропоршневой группы были выбраны следующие параметры: на режиме номинальной мощности удельный эффективный расход топлива с учетом допускаемого отклонения – не более 224,54 г/(кВт·ч), максимальное давление сгорания – не более 11 МПа, максимальная температура сгорания – не более 2000 К.

Наименьшее значение показателя токсичности F , не ограниченного тепловой напряженностью и топливной экономичностью, достигнуто при УОВТравным 24 град ПКВ до верхней мертвой точки (ВМТ). Перенастройка топливной аппаратуры согласно рекомендациям позволит получить следующие результаты: показатель токсичности F по сравнению с исходными настройками (УОВТ равен 21 град ПКВ до ВМТ) будет снижен с 365,88 до 341,50 (процентная разница 6,66 %), суммарные удельные выбросы вредных частиц снижены с 0,43 до 0,39 г/(кВт·ч) (процентная разница 8,62 %), суммарные удельные выбросы углеводородов снижены с 0,51 до 0,49 г/(кВт·ч) (процентная разница 8,62 %), суммарные удельные выбросы оксида углерода II снижены с 1,75 до 1,71 г/(кВт·ч) (процентная разница 2,02 %), суммарные удельные выбросы оксида азота повышены с 11,44 до 11,49 г/(кВт·ч) (процентная разница 0,42 %).

ВЫВОД

1. В ходе исследования была разработана комплексная математическая модель на основе системы дифференциальных уравнений энергетического и массового балансов рабочего тела и ИНС, обучаемых с использованием как экспериментальных, так и расчетных данных. Комплексная математическая модель позволяет определять удельные выбросы ВВ с ОГ дизеля 4ЧН13/15 и другие параметры (экономичность,

тепломеханическую напряженность). Проверка адекватности полученной комплексной математической модели показала, что погрешности расчетных данных лежат в допустимых пределах.

2. На основе комплексной математической модели разработана методика оптимизации конструктивных параметров ДВС. Режимы оптимизации служили стандартные режимы определения выбросов вредных ВВ с ОГ для дизеля 4ЧН13/15 по ГОСТ Р 41.69. В качестве критерия оптимизации выбран комплексный критерий – показатель токсичности ОГ F , рассчитанный с учетом относительного коэффициента агрессивности A_i и требований нормативно-технической документации к выбросам ВВ с ОГ для дизеля типа 4ЧН13/15.

3. С использованием разработанной методики был оптимизирован УОВТ для дизеля типа 4ЧН13/15, оптимальное значение которого составляет 24 град ПКВ до ВМТ. Показатель токсичности F по сравнению с исходными настройками будет снижен с 365,88 до 341,50. При этом параметры надежности и экономичности будут сохранены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кульчицкий А. Р.** Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. Владимир: Владимирск. гос. ун-т, 2000. – 266 с.
2. Разработка методов и технических решений по улучшению экологических параметров транспортных дизелей / А. А. Малоземов [и др.]. Отчет о

НИОКР. Челябинск: ООО «ФУМНПЦ», 2006, код ВНИИЦ 03 4000 6830332.

3. **Тарасик В.П.** Математическое моделирование технических систем. Минск, 2004. С. 29–28.

4. **Вибе И. И.** Новое о рабочем цикле. Свердловск: Машиностроение, 1962. 271 с.

5. **Малоземов А. А.** Математическая модель двигателя на основе системы дифференциальных уравнений энергетического и массового балансов // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: науч. вестник ЧВВАКИУ. Челябинск, 2006. № 18. С. 8–15.

6. **Терехов В. А.** Нейросетевые системы управления: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2002. 183 с.

7. **Марков В. А., Баширов Р. М.** Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ, 2002. 376 с.

ОБ АВТОРАХ

Кукис Владимир Самойлович, проф. каф. КГМ ЮурГУ. Дипл. инженер (Алт. политехн. ин-т, 1959). Д-р техн. наук по тепл. двигателям (1991). Иссл. в обл. ДВС, утил. тепл. потерь теплоэнергетич. уст-к.

Сеницын Владимир Александрович, проф. АлтГТУ. Дипл. инженер (Алт. политехн. ин-т, 1979). Д-р техн. наук по тепл. двигателям (1995). Иссл. в обл. мат. моделир. теплообмена в ДВС.

Босьяков Владимир Петрович, асп. каф. ДВС АлтГТУ. Дипл. инженер (ЧВВАКИУ, 2008). Иссл. в обл. токсичности ОГ ДВС.