

УДК 629.4.083:621.014.24

ЖАЛКІН Д.С., д.т.н., професор (УкрДАЗТ)

Нечітке сезонне керування енергетичною установкою тепловоза

Розглянуто методику регулювання кута випередження подачі палива тепловозних дизелів, що заснована на принципах нечіткої логіки та дозволяє знизити питомі витрати палива під час експлуатації дизелів у різні сезони року.

Ключові слова: тепловоз, енергетична установка, нечітке регулювання, модель, витрати палива, надійність, економічність, сезонна експлуатація.

Вступ

Дослідження відносяться до галузі енергетики та енергоефективності та спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми - підвищення енергетичної ефективності сучасних тепловозів та стратегії впровадження одержаних результатів.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями

Експлуатація тепловозних дизелів у різні сезони року супроводжується значними змінами показників робочого процесу. З кліматичних факторів на дизель найбільший вплив здійснюють температура зовнішнього повітря і барометричний тиск. Атмосферні умови прямо або побічно впливають на такі параметри дизелів: ефективну й індикаторну потужність (N_e і N_i), максимальний тиск горіння P_c , температуру газів, що відпрацювали T_g , тиск повітря в ресивері (наддування) - P_s , питому витрату палива g_e . На ці ж показники робочого процесу значно впливає кут випередження впорскування палива φ_e , значення якого оказують вплив на економічність, потужність та динамічні показники роботи дизеля й мають своє оптимальне значення для кожного режиму роботи дизеля [1, 2]. Конструкція тепловозних дизелів не передбачає зміну кута випередження впорскування палива, що приводить до нераціональних витрат палива під час експлуатації. Вищесказане дозволяє сформулювати науково - технічну проблему – підвищення економічності роботи тепловозних дизелів шляхом розробки принципів управління витратами палива під час сезонної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Програмою оновлення залізничного рухомого складу України [3], передбачається модернізація тягового рухомого складу з метою зниження витрат на його експлуатацію. Одним з перспективних напрямків такої модернізації є застосування електронних регуляторів частоти обертів колінчастого валу дизеля сумісно з системами електронного керування процесами паливоподачі [4, 5]. Для складання програми роботи таких систем можливо застосування принципів нечіткої логіки та нечіткого керування складними динамічними системами, що з успіхом використовуються в інших галузях [6] – наприклад при управлінні роботою автомобіля, діагностуванні технічного стану літаків, оптимізації систем ремонту [8]. Робота тепловозного дизеля має значні особливості, що пояснює необхідність більш детального вивчення цих питань та розробки спеціальних програм регулювання, які б урахували зміни режимів потужності та сезонів експлуатації.

Визначення мети та задачі дослідження

Мета статті складається в науковому обґрунтуванні та практичному застосуванні методів сезонного регулювання тепловозних дизелів.

Для досягнення цього необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити моделі зміни витрат палива тепловозними дизелями в залежності від температури навколишнього повітря, кута випередження впорскування палива та режиму роботи дизеля;
- розробити методику зміни кута випередження подачі палива в залежності від зміни сезону експлуатації тепловозного дизеля.

Основна частина дослідження

Експеримент на дизелі досить трудомісткий та тривалий. Тому при випробуваннях складають статистичну математичну модель, що адекватно описує досліджуваний процес.

В даний час найбільше поширення одержали так звані функціональні математичні моделі об'єкту дослідження, що імітують поведінку оригіналу у визначених умовах.

Функціональні математичні моделі дозволяють апроксимувати рівняння стану системи іншою функцією

$$\varphi(y_j, x_1, \dots, x_j, \dots, x_k, t, A_1, \dots, A_j, \dots, A_k) = 0, \quad (1)$$

де параметри $A_1, \dots, A_j, \dots, A_k$ підбираються на основі експериментальних даних, отриманих при проведенні визначених дослідів на об'єкті дослідження, так, щоб у всім полі дослідження об'єкту відхилення функції φ було не більш припустимого значення для конкретних цілей дослідження. В результаті реалізується принцип відповідності, або адекватності, моделі. Для вирішення більшості реальних прикладних техніко - економічних задач доцільно застосовувати поліноміальні моделі порядку m , що для k факторів записуються як

$$y_j = A_0 + \sum_1^k A_j x_j + \sum_{i \neq e}^k A_{ej} x_e x_j + \sum_1^k A_{jj} x_j^2 + \dots$$

На підставі експериментальних результатів можна розрахувати тільки статистичні оцінки ($a_0, a_j, a_{je}, a_{jj}, \dots$) справжніх коефіцієнтів поліноміальної моделі A_0, A_j, A_{je}, A_{jj} і одержати стохастичну модель для розрахунку значень вихідної функції y_j у полі досліджень

$$y_1 = a_0 + \sum_1^k a_j x_j + \sum_{i \neq e}^k a_{ej} x_e x_j + \sum_1^k a_{jj} x_j^2 + \dots + \varepsilon, \quad (2)$$

де ε — відображення впливу випадкових факторів (випадкова величина з математичним очікуванням, рівним нулю).

Оптимізаційну задачу в плануванні багатфакторного експерименту вирішують різними методами (градієнтний, симплекс-метод та ін.). Найбільше часто застосовується градієнтний метод чи метод крутого сходження. Використання градієнтного методу в цих умовах забезпечує вирішення задачі оптимізації з найменшим числом дослідів [8].

Відповідно до розглянутої методики проведено визначення коефіцієнтів регресійної моделі питомих ефективних витрат палива та максимального тиску при згорянні палива для дизеля типу 1А5Д49 тепловозів 2ТЕ116.

Після виконання покрокової регресії, одержано коефіцієнти моделей:

$$g_e = 438,835 + 4,184 \cdot 10^{-4} \cdot n + 1,531 \cdot 10^{-4} \cdot t_0 + 4,783 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{\varphi_r} -$$

$$-1104,666 \cdot n \cdot \frac{1}{\varphi_r} - 4,661 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{\varphi_r} \cdot t_0 + 1,572 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot t_0 +$$

$$+ 9,107 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 + 217199310,624 \cdot \frac{1}{\varphi_r^2} + 5,699 \cdot 10^{-5} \cdot t_0^2;$$

$$P_z = 23,421 - 1,14 \cdot 10^{-5} \cdot n + 1,298 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\varphi_r} - 1,78 \cdot 10^{-6} \cdot t_0 - \quad (3)$$

$$-1,542 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot \frac{1}{\varphi_r} + 3,056 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1}{\varphi_r} \cdot t_0 - 1,111 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot t_0 +$$

$$+ 1,57 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 - 3,539 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{\varphi_r^2} - 5,849 \cdot 10^{-6} \cdot t_0^2.$$

Коефіцієнт регресії для моделі g_e $R=0,989$, для моделі P_z $R=0,967$, що свідчить про щільність зв'язку між факторами, які уведено до моделі і функціями відгуку. Усі уведено до моделі фактори значимі на рівні $p=0,05$.

Одержані регресійні залежності зміни g_e та P_z від змін n , t_0 та φ_r дозволяють визначити значення φ_r при зміні температури повітря t_0 та зміни частоти обертів колінчастого валу n . Для визначення значень φ_r , при яких забезпечується мінімальна витрата палива при роботі дизеля з відповідною n при відповідній t_0 необхідно розв'язати нелінійне рівняння $g_e = \int (t_0, n, \varphi_r)$ при обмеженні $P_z \leq P_{дон}$.

Одержані результати [9] вказують на те, що при роботі дизеля необхідно забезпечити безперервне регулювання кута випередження подачі палива. При зниженій n кут подачі палива φ_r необхідно збільшувати, при зниженні t_0 при роботі дизеля на режимах близьких до номінального, φ_r необхідно зменшувати з метою зниження P_z .

Існуюча система паливободачі дизеля не забезпечує потрібне регулювання φ_r , яке можливе тільки при застосуванні електронних систем регулювання. Найбільш важливим питанням при цьому є, складання програми для мікропроцесора регулятора.

Повна математична модель дизеля занадто складна, і дотепер не створена. Через це більшість систем керування дизелів використовують табличну модель, отриману експериментальним шляхом на випробуваннях і з урахуванням досвіду експертів [4]. Серйозний недолік такої моделі - складність створення багатомірних таблиць і великий об'єм пам'яті,

необхідний для їхнього запису. Нечітка логіка дозволяє замінити таблиці правилами і реалізувати керування за великим числом вхідних параметрів.

Поняття нечіткої множини - це математична формалізація нечіткої інформації для побудови математичних моделей. В основі цього поняття лежить представлення про те, що складові даної множини елементи, що володіють загальною властивістю, можуть мати цю властивість у різному ступені і, отже належати до даної множини з різним ступенем. При такому підході висловлення типу "такий-то елемент належить даній множині" утрачають сенс, оскільки необхідно вказати "наскільки сильно" чи з яким ступенем конкретний елемент задовольняє властивостям даної множини.

Алгоритм нечіткого керування [7, 10] складається з перетворення вхідних перемінних нечіткого регулятора в його вихідні перемінні з використанням наступних взаємозалежних процедур:

- перетворення нечітких вхідних фізичних змінних фази регулятора, одержуваних від вимірювальних датчиків з об'єкта керування в безрозмірні відносні змінні;

- обробка логічних висловлень щодо безрозмірних вхідних і вихідних змінних фази регулятора;

- перетворення вихідних безрозмірних відносних змінних фази регулятора у фізичні керуючі змінні.

Побудову нечіткої системи регулювання дизеля розглянемо на прикладі підсистеми вибору значень кутів випередження подачі палива дизеля 1А-5Д49, значення яких дозволяють одержати мінімальні витрати g_e , при значеннях P_z , що не перевищують допустимих значень. Вибір значень φ_r проводимо при змінних температурах t_0 та частоті обертів колінчастого валу n .

Для вихідних змінних t_0 , n визначаємо наступні нечіткі множини : *min*, *нсп*, *ср*, *всп*, *max* – 5 рівнів; для φ_r : *min*, *ср*, *max* – 3 рівня. Для величин g_e та P_z також обираємо нечіткі множини з 5 рівнів – рис. 1.

З метою зменшення часу розрахунків приймаємо трикутні функції належності, метод дефазіфікації "центр ваги" [7]. У цьому разі поведінка g_e та P_z при зміні t_0 та φ_r при фіксованому n описується за допомогою 35 правил. Об'єднання правил регулювання для різних термів дозволило скоротити їх загальну кількість до 25. Для $n=1000 \text{ хв}^{-1}$ примір одержаної нечіткої бази наведен у таблиці 1.

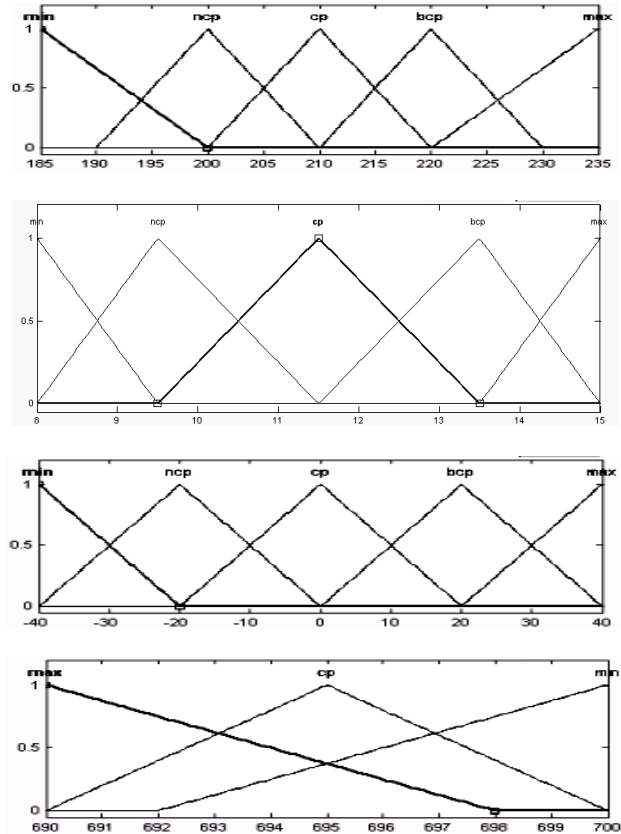


Рис. 1. Функції належності g_e , P_z , t_0 та φ_r

Таблиця 1

Правила нечіткого регулювання дизеля зміною кута впорскування палива

№	n	t_0	φ_r	№	n	t_0	φ_r
1	<i>max</i>	<i>max</i>	<i>всп</i>	14	<i>ср</i>	<i>нсп</i>	<i>max</i>
2	<i>max</i>	<i>всп</i>	<i>всп</i>	15	<i>ср</i>	<i>min</i>	<i>max</i>
3	<i>max</i>	<i>ср</i>	<i>всп</i>	16	<i>нсп</i>	<i>max</i>	<i>max</i>
4	<i>max</i>	<i>нсп</i>	<i>нсп</i>	17	<i>нсп</i>	<i>всп</i>	<i>max</i>
5	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>min</i>	18	<i>нсп</i>	<i>ср</i>	<i>max</i>
6	<i>всп</i>	<i>max</i>	<i>всп</i>	19	<i>нсп</i>	<i>нсп</i>	<i>max</i>
7	<i>всп</i>	<i>всп</i>	<i>всп</i>	20	<i>нсп</i>	<i>min</i>	<i>max</i>
8	<i>всп</i>	<i>ср</i>	<i>всп</i>	21	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>ср</i>
9	<i>всп</i>	<i>нсп</i>	<i>ср</i>	22	<i>min</i>	<i>всп</i>	<i>ср</i>
10	<i>всп</i>	<i>min</i>	<i>нсп</i>	23	<i>min</i>	<i>ср</i>	<i>ср</i>
11	<i>ср</i>	<i>max</i>	<i>max</i>	24	<i>min</i>	<i>нсп</i>	<i>ср</i>
12	<i>ср</i>	<i>всп</i>	<i>max</i>	25	<i>min</i>	<i>min</i>	<i>ср</i>
13	<i>ср</i>	<i>ср</i>	<i>max</i>				

Залежності зміни g_e та P_z при зміні t_0 та φ_r наведені на рис. 2.

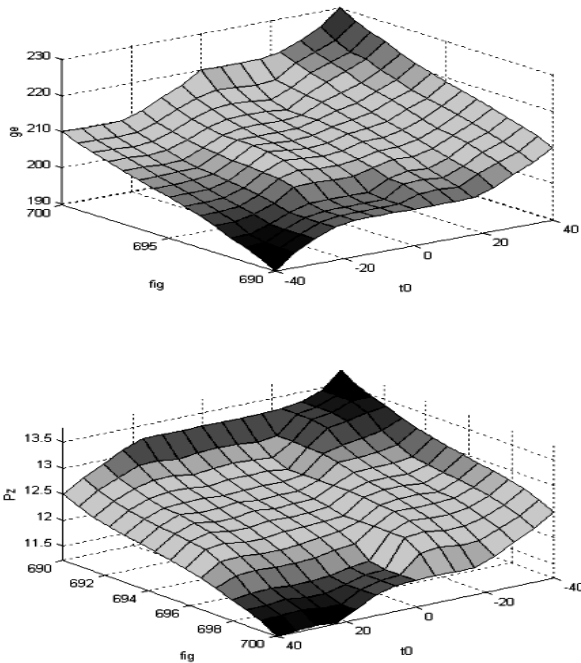


Рис. 2. Залежність питомої витрати палива та максимального тиску при згорянні від зміни температури та кута випередження впорскування палива

Можно зробити висновок, що нечіткий апроксиматор добре описує сложну нелінійну залежність між розглядаємими показниками, та дозволяє визначити значення кутів подачі палива, що забезпечують мінімум витрат палива.

Розроблена програма регулювання дизеля забезпечує мінімально можливі значення витрат палива g_e при значеннях P_z , що не перевищують допустимих ($P_z \leq 12$ МПа) значень, та заданих за тепловозною характеристикою значеннях N_e – рис. 3.

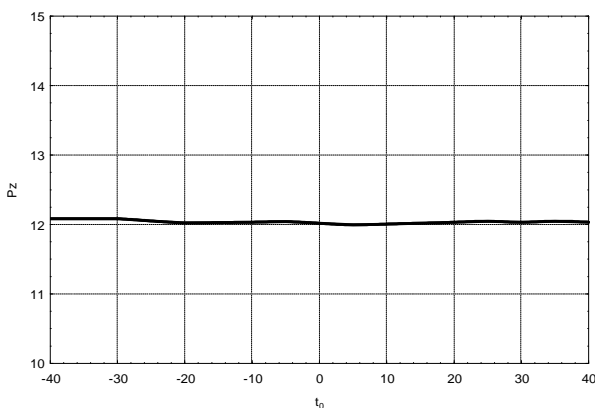


Рис. 3. Зміни P_z при зміні t_0 та нечіткому регулюванні ϕ_r

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку

1) Одержані залежності зміни питомих витрат палива тепловозними дизелями від умов експлуатації дають можливість розробити програму безперервного регулювання кута випередження подачі палива, що дозволяє зменшити витрати палива у різні сезони року.

2) Розроблена програма регулювання кута випередження впорскування палива, що заснована на нечіткій логіці, дозволяє знизити середньоексплуатаційну витрату палива дизелями на 5-7 %.

3) Одержані результати можуть бути використані при модернізації тепловозних дизелів шляхом установки електронних регуляторів та розробці систем електронного впорскування палива.

Література

1. Симсон А.Э. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания. -2-е изд. перераб. и доп. / А.Э. Симсон., А.З. Хомич, А.А. Куриц // -М.: Транспорт, 1987. - 536 с.
2. Вплив сезонних факторів на техніко-експлуатаційні показники тепловозних дизелів типу Д-80 / Звіт про НДР № ДР 0199U003100, ХарДАЗТ. -Харків, 2001. – 103 с.
3. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки / Укрзалізниця. -К.:, 2009. - 299 с.
4. Азаренко В.А. Электронный регулятор дизеля тепловоза ЧМЭЗ / В.А. Азаренко, И.П. Аникиев // Локомотив, 2002. -№3 – С.24-28.
5. Коссов Е.Е. Микропроцессорная система для регулирования дизель – генератора / Е.Е. Коссов, А.С. Нестрахов // Локомотив, 2002. - №12 – С. 24-26.
6. Сериков С.А. Идентификация математической модели двигателя внутреннего сгорания с использованием системы нечеткого вывода / С.А. Сериков, А.А. Дзюбенко// Двигатели внутреннего сгорания: научн.- техн. журнал. – Х.: НТУ«ХПИ», 2009. – №1. – С. 14–18.
7. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
8. Касьян О.В. Принятие решений в условиях неопределенности при диагностировании авиационного оборудования // Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті, 2002. -№1. – С.10-15.
9. Підвищення паливної економічності і надійності дизелів в умовах сезонної експлуатації / Жалкін Д.С., Крашенінін О.С. та інш. / Звіт про науково - дослідну роботу № ДР 01954U13341, ХарДАЗТ. – Харків, 1995. –156 с.

10. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: Учебное пособие / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов // - М.: Редакция Физ. мат. лит., 2001. – 224 с.

Zhalkin D. Fuzzy seasonal control of diesel locomotive power plant. The technique of fuel injection advance angle regulation of diesel locomotive engines based on fuzzy logic principles and permitting to decrease fuel consumption while operating diesel engines in different seasons of year have been considered.

Key words: diesel locomotive, power plant, fuzzy control, model, fuel consumption, reliability, efficiency, seasonal operation.

Жалкин Д.С. Нечеткое сезонное управление энергетической установкой тепловоза. Рассмотрена методика регулирования угла опережения подачи топлива тепловозных дизелей, основанная на принципах нечеткой логики и позволяющая снизить удельный расход топлива при эксплуатации дизелей в разные сезоны года.

Ключевые слова: тепловоз, энергетическая установка, нечеткое регулирование, модель, расход топлива, надежность, экономичность, сезонная эксплуатация.

Рецензент д.т.н., профессор Фалендиш А.П.
(УкрДАЗТ)

Поступила 18.12.2013