

Секція 7. ЕНЕРГЕТИЧНІ І ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ, ЇХ КЕРУВАННЯ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ

УДК 629.114

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО НАДДУВУ

Макаренко Микола Григорович, доцент каф. «Трактори і автомобілі»,
Державний біотехнологічний університет,
e-mail: mak_nk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4078-9045/

Шевченко Ігор Олександрович, канд. техн. наук, доцент, завідувач каф.
«Трактори і автомобілі», Державний біотехнологічний університет,
e-mail: igorshvchnk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1280-5290

Калашник Єгор Анатолійович, магістр,
Державний біотехнологічний університет,
e-mail: Kalashnikegor0904@gmail.com

У сучасному автомобілебудуванні пріоритетним напрямком є підвищення ефективності двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) шляхом зменшення споживання палива та викидів шкідливих речовин без зниження потужності та динамічних характеристик автомобіля. Одним із важливих шляхів досягнення цих цілей є використання систем наддуву, зокрема, мехатронних систем адаптивного наддуву, що дозволяють автоматично регулювати параметри роботи двигуна залежно від навантаження і умов експлуатації [1].

Системи турбонаддуву стали важливою частиною автомобільних двигунів ще в 20-му столітті. Вони дозволяли підвищити потужність двигуна за рахунок подачі більшої кількості повітря в камеру згоряння, що забезпечувало кращі умови для згоряння палива. Однак традиційні турбонаддуви мають низку обмежень, таких як турбояма (затримка в подачі додаткового повітря) та недостатня гнучкість у відповідь на зміну навантаження [2].

Мехатроніка як дисципліна об'єднує електроніку, механіку та інформатику, дозволяючи створювати високоточні системи контролю та регулювання. Мехатронні системи адаптивного наддуву вирішують проблеми, характерні для традиційних систем турбонаддуву. Вони включають в себе датчики, електронні контролери та виконавчі механізми, що дозволяють динамічно змінювати ступінь наддуву в залежності від режиму роботи двигуна [3, 4].

Адаптивна система наддуву за допомогою датчиків контролює ключові параметри двигуна (тиск у впускному колекторі, частоту обертання, температуру, кількість кисню у вихлопних газах тощо). Контролер аналізує ці дані в режимі реального часу і регулює роботу турбіни або компресора, забезпечуючи оптимальний тиск повітря в камері згоряння на кожному етапі [5].

Мехатронні системи наддуву використовують електронно керовані турбіни із змінною геометрією (Variable Geometry Turbochargers, VGT), які дозволяють змінювати параметри турбіни в залежності від швидкості обертання колінчастого вала двигуна та навантаження. Це зменшує турбояму і забезпечує більш рівномірний приріст потужності при будь-яких умовах [5].

Застосування мехатронних систем адаптивного наддуву дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики двигуна. Основні переваги включають: оптимізацію процесу згоряння шляхом точного регулювання подачі повітря, що дозволяє досягати економії палива при збереженні потужності; покращення згоряння палива знижує кількість невикористаного пального, що зменшує викиди CO₂ та інших забруднювачів; підвищення потужності на низьких обертах та дозволяють уникнути турбоями, забезпечуючи швидкий приріст потужності на низьких і середніх обертах двигуна; точне регулювання наддуву знижує механічне навантаження на компоненти двигуна, що позитивно впливає на його ресурс [5].

Незважаючи на численні переваги, впровадження мехатронних систем адаптивного наддуву вимагає розв'язання ряду технічних і економічних проблем. Основні виклики включають: системи потребують складних електронних компонентів і алгоритмів управління, що збільшує собівартість двигуна; необхідність адаптації існуючих двигунів, розробки високоточних алгоритмів управління, що включає моделювання та тестування в різних режимах експлуатації.

Адаптивні системи наддуву в автомобільних двигунах вимагають розробки алгоритмів, що забезпечують ефективне керування наддувом залежно від поточних умов роботи двигуна. Для цього будується математична модель системи, яка описує процеси, що відбуваються в двигуні та системі наддуву.

Основним є рівняння динаміки повітряного потоку в системі наддуву

Потік повітря в системі наддуву визначається зміною тиску у впускному колекторі p_{in} , температурою повітря T_{in} , швидкістю обертання тур бокомпресора ω_{turbo} , та масовою витратою повітря m_{air} .

Для опису динаміки наддуву можна використати закон збереження маси та рівняння Бернуллі:

$$\dot{m}_{air} = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

де C_d – коефіцієнт пропускної здатності системи,

A – площа перетину каналу впускного колектора,

$\Delta p = p_{turbo} - p_{in}$ – різниця тисків на вході турбіни і у впускному колекторі,

ρ – густина повітря.

Температура повітря після турбіни T_{turbo} обчислюється на основі рівняння:

$$T_{turbo} = T_{in} \left(1 + \frac{\eta_t}{\eta_c} \left(\left(\frac{p_{turbo}}{p_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right),$$

де η_t – ефективність турбіни,

η_c – ефективність компресора,

γ – показник адиабати (для повітря $\gamma = 1.4$).

Механічна потужність P_{eng} , що розвивається двигуном, залежить від кількості палива та повітря, що подаються до циліндрів. Потужність можна визначити за рівнянням:

$$P_{eng} = \eta_{eng} \cdot Q_{fuel} \cdot m_{fuel},$$

де η_{eng} – ефективність двигуна,

Q_{fuel} – теплотворна здатність палива,

m_{fuel} – масова витрата палива.

Масова витрата палива визначається стехіометричним співвідношенням палива та повітря:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{m}_{air}}{AFR_{st}},$$

де AFR_{st} – стехіометричне відношення паливо-повітря (наприклад, для бензину це близько 14.7).

Швидкість обертання турбіни ω_{turbo} залежить від енергії, що виділяється в процесі згоряння та від масової витрати вихлопних газів $m_{exhaust}$.

Для моделювання динаміки наддуву можна використати наступне рівняння:

$$I_{turbo} \frac{d\omega_{turbo}}{dt} = T_{exhaust} - T_{friction},$$

де I_{turbo} – момент інерції турбіни,

T_{exhaust} – момент, створений вихлопними газами,

T_{friction} – втрати на тертя.

Момент, створений вихлопними газами, визначається через тиск у вихлопному колекторі:

$$T_{\text{exhaust}} = C_t \cdot \dot{m}_{\text{exhaust}} \cdot \sqrt{T_{\text{exhaust}}},$$

де C_t – коефіцієнт турбіни.

Для ефективного керування наддувом використовується система зворотного зв'язку, що базується на датчиках, які вимірюють тиск, температуру, масову витрату повітря і паливо-повітряне співвідношення. Алгоритм управління наддувом може бути побудований на основі PID-регулятора або адаптивного управління з використанням моделей прогнозування.

PID-регулятор забезпечує керування швидкістю турбіни для досягнення бажаного тиску у впускному колекторі. Основне рівняння PID-регулятора:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

де $e(t) = p_{\text{desired}} - p_{\text{in}}$ – похибка тиску,

$u(t)$ – вихід керуючої дії,

K_p , K_i , K_d – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної складової відповідно.

Адаптивне управління передбачає використання моделей прогнозування для оцінки оптимальних параметрів наддуву в режимі реального часу. Використовується наступний процес: оцінка поточних параметрів роботи двигуна (швидкість, навантаження, витрата палива, температура тощо); прогнозування оптимального тиску наддуву для даних умов експлуатації; регулювання положення клапана турбіни для забезпечення бажаного тиску.

Адаптивні алгоритми можуть використовувати методи машинного навчання або ідентифікації моделі для точного налаштування параметрів керування.

В цілому математична модель адаптивної системи регульованого наддуву дозволяє оптимізувати роботу двигуна, забезпечуючи ефективний процес згоряння палива і зменшуючи викиди шкідливих речовин. Моделювання та використання високоточних алгоритмів управління дозволяє досягти стабільної роботи системи в різних режимах експлуатації.

Застосування мехатронних систем адаптивного наддуву має великий потенціал у майбутньому. Такі системи вже використовуються в сучасних дизельних і бензинових двигунах преміум-класу. Подальший розвиток технологій та зниження вартості компонентів може призвести до поширення

цих рішень у масовому виробництві автомобілів. Можливим напрямом розвитку мехатронних систем є інтеграція з гібридними силовими установками, в яких вони можуть бути ефективно поєднані з електродвигунами для ще більшого зменшення викидів і підвищення економічності.

Висновки

Використання мехатронних систем адаптивного наддуву є перспективним шляхом підвищення ефективності автомобільних двигунів внутрішнього згоряння. Завдяки гнучкому і точному регулюванню процесу наддуву, такі системи дозволяють знизити споживання палива, зменшити викиди та покращити динамічні характеристики двигунів. Незважаючи на певні технічні виклики, розвиток цієї технології відкриває широкі можливості для її використання в майбутньому автомобілебудуванні.

Література

1. Макаренко М. Г., Шевченко І. О., Кривоніс С. В. Оптимізація систем керування двигунами вантажних автомобілів // Збірник тез та доповідей міжнародної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії». 11–12 березня 2024 року, ХНАДУ, Харків, 2024. С. 271-274.

2. Макаренко М. Г., Шевченко І. О., Хейло В. О., Пиріжок В. І. Електронні системи керування та діагностики сучасних автомобілів: проблеми і рішення. // Збірник тез та доповідей міжнародної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії». 11–12 березня 2024 року, ХНАДУ, Харків, 2024. С. 274-278.

3. Макаренко М. Г., Пиріжок В. І. Використання штучного інтелекту у вбудованих системах сільськогосподарських тракторів. // Матеріали XX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті" 04-05. 04. 2024. - Харків : ДБТУ, 2024 С. 192.

5. Макаренко М. Г., Кулаков Ю. М. Підвищення експлуатаційних показників вантажного автомобіля вдосконаленням системи наддуву двигуна ММЗ Д-260.4. // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції навчально-наукового інституту механотроніки і систем менеджменту 16-17 травня 2019 року. Харків : ДБТУ, 2019 С. 57.