

УДК 621.43

В.П.Матейчик, М.П.Цюман

Національний транспортний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПАЛИВНУ ЕКОНОМІЧНІСТЬ І ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА З СИСТЕМОЮ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ

В роботі проведено дослідження впливу регулювальних параметрів, зокрема, ступеня рециркуляції відпрацьованих газів і кута випередження запалювання на паливну економічність і екологічні показники бензинового двигуна з системою нейтралізації відпрацьованих газів. Визначено доцільні значення регулювальних параметрів для покращення паливної економічності в усьому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів двигуна VW BBU.

Ключові слова: бензиновий двигун, нейтралізатор, рециркуляція, кут випередження запалювання.

Основними джерелами енергії на автомобільному транспорті є поршневі двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), а їх паливна економічність і рівень забруднення навколишнього середовища являються основними характеристиками транспортних засобів [1].

Основними видами палив для ДВЗ є палива нафтового походження, світові запаси яких обмежені. Внаслідок шкідливого впливу постійно зростаючого автомобільного парку в розвинутих країнах встановлено жорсткі норми токсичності відпрацьованих газів (ВГ) ДВЗ. Тому, подальший розвиток автомобільних двигунів тісно пов'язаний з проблемою підвищення паливної економічності і зниження токсичності ВГ.

Для ефективного зниження викидів шкідливих речовин з ВГ бензинових двигунів широко використовують засоби зовнішньої очистки – каталітичні нейтралізатори, які дають можливість звести до нуля викиди токсичних речовин в окремих режимах роботи двигуна [2].

Основним недоліком існуючих систем нейтралізації є їх негативний вплив на потужність і паливну економічність двигуна, що є наслідком збільшення опору випускної системи [3]. Крім того, ефективність роботи каталітичного нейтралізатора в режимах малих навантажень двигуна знижена внаслідок неоптимального його теплового режиму роботи [4]. Тому, актуальною задачею є проведення досліджень щодо впливу регулювальних параметрів, зокрема ступеня рециркуляції ВГ і кута випередження запалювання, на паливну економічність і екологічні показники бензинового двигуна з системою нейтралізації ВГ, та вибору їх доцільних значень, чому і присвячена робота.

Для вирішення поставленої задачі бензиновий двигун з системою нейтралізації ВГ представлено як єдину систему «двигун-нейтралізатор» (рис. 1). В системі протікає два основних процеси: перетворення в ДВЗ хімічної енергії палива E_x в теплову E_t , а потім в механічну E_m (рівень А) і знешкодження шкідливих компонентів ВГ в нейтралізаторі (рівень С). Управління процесами системи відбувається за допомогою зворотних зв'язків (рівні В і D).

Функціонування системи відбувається наступним чином. Входом системи на рівні А є паливо $G_{\text{пал}}$, повітря $G_{\text{пов}}$, які надходять із навколишнього середовища, що характеризується тиском p_0 і температурою T_0 , та рециркульовані ВГ $G_{\text{ВГ}}$, кількістю яких керує зворотний зв'язок (рівень В).

Ці речовини, а також інформаційні дані про частоту обертання колінчастого вала n_d , кут відкриття дросельної заслінки $\varphi_{\text{др}}$ і ступінь рециркуляції ВГ $R_{\text{ВГ}}$ передаються в процес рівня А. При протіканні процесу частина теплової енергії віддається в навколишнє середовище в результаті теплообміну і втрат в ДВЗ. Виходом процесу рівня А є механічна енергія E_m , невикористана теплова енергія E_t і ВГ $G_{\text{ВГ}}$, а також інформація про частоту обертання n_d , кут відкриття дросельної заслінки $\varphi_{\text{др}}$, вміст кисню O_2 у ВГ і сигнал від датчика детонації (ДД). Механічна енергія E_m є корисним виходом і надходить до споживача. Невикористана теплова енергія E_t і ВГ $G_{\text{ВГ}}$ надходять в наступний процес системи і частково знову вертається на вхід попереднього процесу (рівень А). Метою зворотного зв'язку є забезпечення максимальної ефективності системи в даних умовах роботи. З цією метою аналізуються вміст кисню O_2 у ВГ, частота обертання, кут відкриття дросельної заслінки і сигнал від ДД. За результатами аналізу визначаються оптимальний

коефіцієнт надміру повітря α , кут випередження запалювання θ і ступінь рециркуляції ВГ $R_{ВГ}$. Управління цими параметрами процесу відбувається через тривалість управляючого імпульсу на електромагніті паливної форсунки $t_{впр}$, ступінь відкриття клапана рециркуляції ВГ $f_{ВГ}$ і моменту припинення подачі первинної напруги на котушку запалювання.

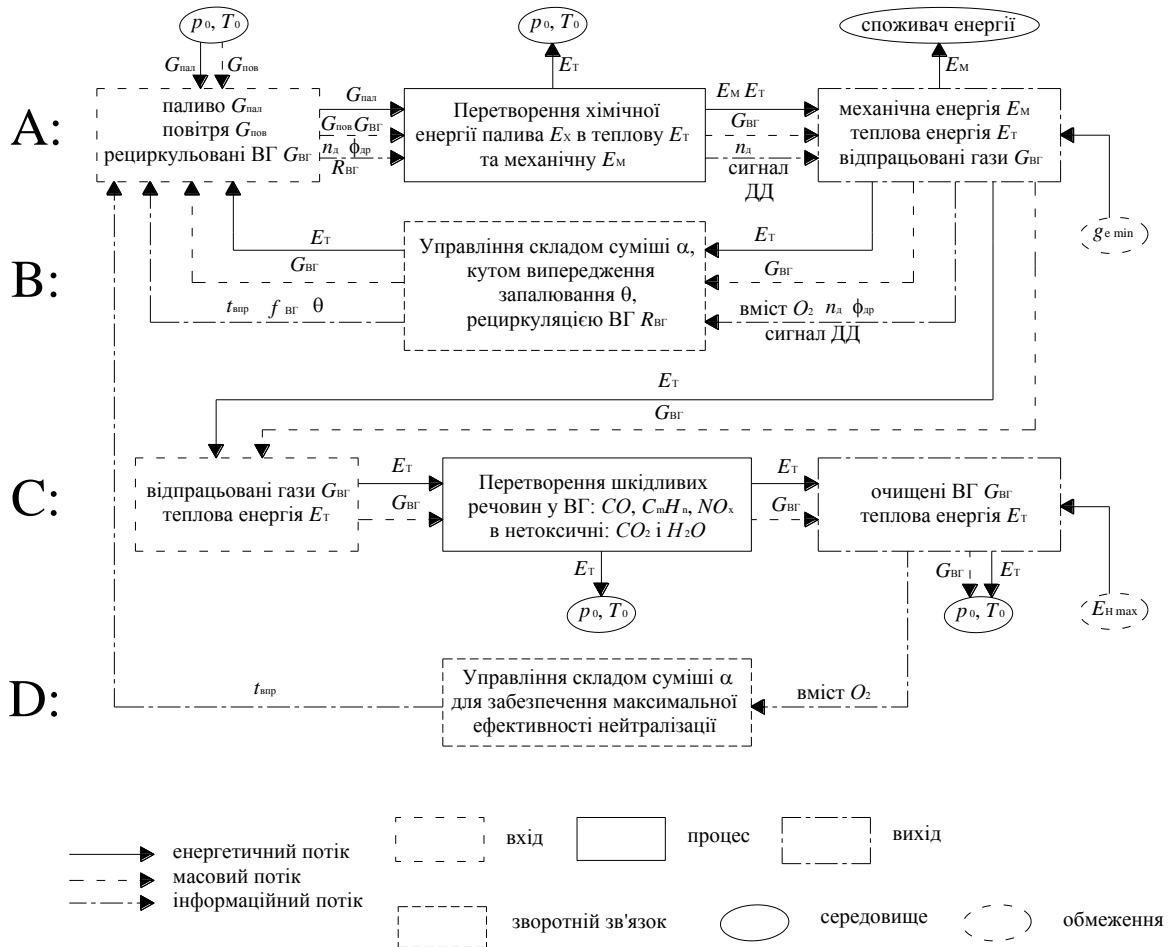


Рис. 1. Функціональна структура системи «двигун-нейтралізатор»

Входом процесу рівня С є теплова енергія E_t і ВГ $G_{ВГ}$. В результаті протікання процесу токсичні компоненти ВГ CO , C_mH_n і NO_x перетворюються в нетоксичні CO_2 і H_2O з використанням теплової енергії ВГ, частина якої віддається в навколишнє середовище. Виходом рівня С є очищені ВГ і залишкова теплова енергія, які потрапляють в навколишнє середовище. На рівні D зворотний зв'язок здійснює корекцію складу паливоповітряної суміші, аналізуючи вміст кисню в очищених ВГ, для забезпечення максимальної ефективності нейтралізації.

Показниками ефективності функціонування системи є питома ефективна витрата палива g_e і ефективність нейтралізації шкідливих компонентів ВГ E_n , які є обмеженнями, що накладені споживачем на основні процеси системи. Збільшення ефективності системи «двигун-нейтралізатор» є достатньо складною задачею, враховуючи, що екстремальні значення показників ефективності досягаються при різних кількісних значеннях окремих параметрів системи.

На основі функціональної структури системи «двигун-нейтралізатор» розроблено її математичну модель, основними рівняннями якої є диференціальні рівняння об'ємного балансу і адиабати [5] і інтегральне рівняння руху газового потоку [6]:

$$dV = dV_i - dV_s + dV_a - dV_{Q_t} + dV_{Q_x} + dV_i, \tag{1}$$

$$dp = -\frac{k \cdot p}{V} \cdot dV, \tag{2}$$

$$\omega_i = \omega_0 \frac{(\omega_{i-1} + \omega_0)e^{-\frac{\alpha_0 dt}{V}} + (\omega_{i-1} - \omega_0)}{(\omega_{i-1} + \omega_0)e^{-\frac{\alpha_0 dt}{V}} - (\omega_{i-1} - \omega_0)}, \tag{3}$$

де $dV_{I\bar{b}}$, dV_S , dV_B , dV_M , $dV_{Q_{\bar{v}}}$, dV_{QT} – елементарні зміни об’єму, обумовлені відповідно переміщенням поршня, поступанням свіжого заряду, виходом робочого тіла в випускний трубопровід, зміною кількості речовини і температури в хімічних реакціях, тепло відводом, m^3 ; k - показник адіабати; p – тиск робочого тіла, Па; V – об’єм робочого тіла, m^3 ; dV – елементарна зміна об’єму робочого тіла, m^3 ; ω_{i-1} – швидкість потоку газу в кінці каналу в попередньому розрахунковому періоді, м/с; ω_0 – швидкість стаціонарного потоку при даному перепаді тисків, м/с; l – довжина колектора, м; dt - тривалість розрахункового періоду, с.

Адекватність моделі було перевірено шляхом порівняння експериментальних даних і результатів розрахунку. Максимальні відхилення основних показників двигуна не перевищують 10 %.

Об’єктом досліджень був двигун VW BBY, технічна характеристик якого наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Технічна характеристика двигуна VW BBY

Модель двигуна і заводський номер	VW BBY 070901
Число і розташування циліндрів	P-4
Порядок роботи циліндрів	1-3-4-2
Робочий об’єм, л	1,39
Діаметр циліндра і хід поршня, мм	76,5/75,6
Ступінь стискання	10,5
Мінімальна частота обертання холостого ходу, xv^{-1}	800
Номинальна потужність, кВт	55 при 5000 xv^{-1}
Максимальний крутний момент, Нм	126 при 3800 xv^{-1}
Сорт палива	бензин А-95
Система впорскування палива	Magneti Marelli 4MV
Система запалювання	електронна з індивідуальними котушками запалювання та регулюванням детонації
Система нейтралізації шкідливих викидів	двоступенева з прискореним прогрівом та рециркуляцією ВГ: два трикомпонентних каталітичних нейтралізатори

На рис. 2 наведено результати досліджень на математичній моделі впливу ступеня рециркуляції ВГ $R_{\bar{A}\bar{A}}$ і кута випередження запалювання θ на ефективні показники двигуна VW BBY для режиму $n_{\bar{i}} = 2400 \bar{\omega}^{-1}$, $\varphi_{\bar{a}\bar{\omega}} = 20\%$. Зміна кута випередження запалювання здійснювалась для компенсації збільшення тривалості згоряння при застосуванні рециркуляції ВГ.

При збільшенні ступеня рециркуляції ВГ $R_{\bar{A}\bar{A}}$ за постійного кута випередження запалювання θ мінімальна питома ефективна витрата палива g_e отримується при $R_{\bar{A}\bar{A}} = 2,5\%$, відсоток зменшення складає 0,03 %. При одночасній зміні $R_{\bar{A}\bar{A}}$ і θ мінімум g_e досягається при $R_{\bar{A}\bar{A}} = 20\%$, зменшуючись порівняно із роботою без рециркуляції ВГ з 263 до 252 г/(кВт·год) на 4,2%. Питомі викиди шкідливих речовин незначно вищі при роботі без зміни θ , що пов’язано із більшою витратою палива. При одночасній зміні $R_{\bar{A}\bar{A}}$ і θ для $0 \leq R_{\bar{A}\bar{A}} \leq 20\%$ питомих масовий викид оксиду вуглецю g_{CO} знижується з 2,05 до 1,84 г/(кВт·год), питомих масовий викид вуглеводнів g_{CH} зростає з 0,1 до 0,13 г/(кВт·год), питомих масовий викид оксидів азоту g_{NOx} зменшується з 0,13 до 0,04 г/(кВт·год), сумарні питомих масові викиди $g_{\Sigma CO}$ зменшуються з 7,6 до 4 г/(кВт·год). При цьому сумарні питомих масові викиди $g_{\Sigma CO}$ при $20 \leq R_{\bar{A}\bar{A}} \leq 40\%$ зменшуються з 4 до 3,6 г/(кВт·год), а питома ефективна витрата палива збільшується з 252 до 257 г/(кВт·год). Доцільний ступінь рециркуляції для цього режиму складає 20 %.

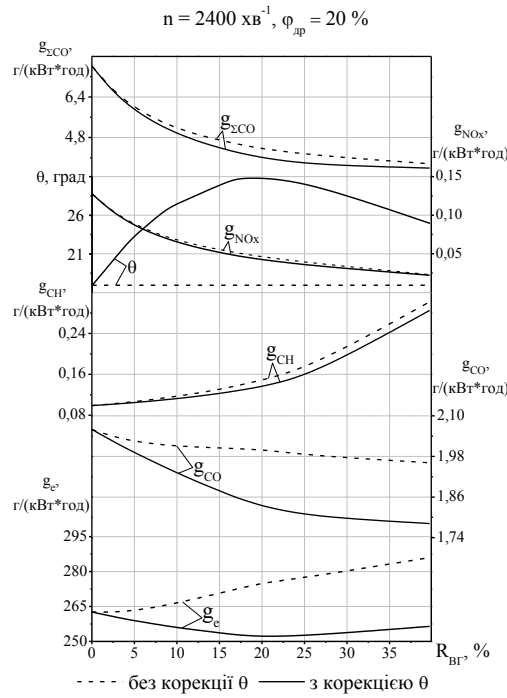


Рис. 2. Вплив ступеня рециркуляції і кута випередження запалювання на ефективні показники двигуна VW BBU

Подібні дослідження були проведені і для інших швидкісних і навантажувальних режимів роботи двигуна VW BBU. Результати визначення доцільних значень ступеня рециркуляції ВГ і кута випередження запалювання для цих режимів разом з регулюваннями штатної системи рециркуляції ВГ і максимальними значеннями ступеня рециркуляції приведені на рис. 3.

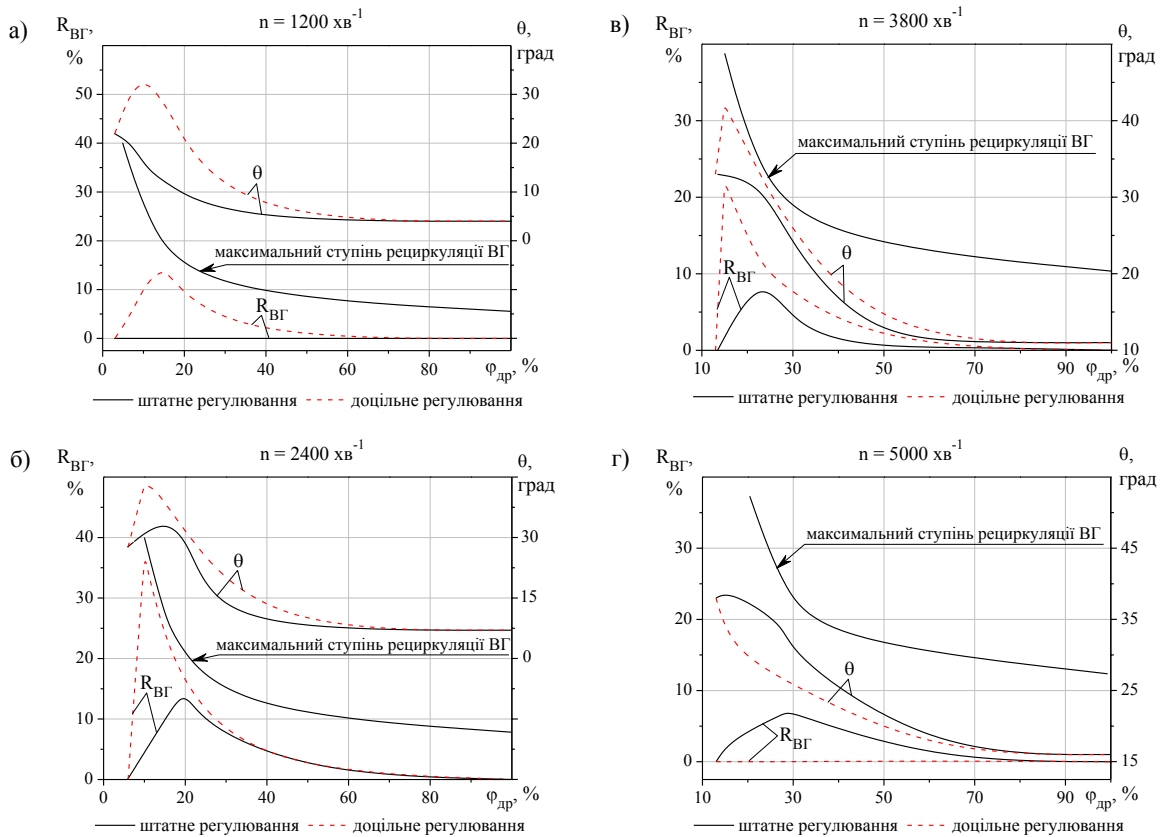


Рис. 3. Результати визначення доцільних значень ступеня рециркуляції ВГ і кута випередження запалювання двигуна VW BBU

Із характеристик видно, що доцільні ступені рециркуляції мають максимальні значення, які значно вищі ступенів рециркуляції при штатному регулюванні та зміщені в бік менших частот обертання і навантажень двигуна. При штатному регулюванні рециркуляція ВГ не здійснюється при $n_{\tilde{a}} = 1200 \tilde{\alpha}^{-1}$ (рис. 3, а), а при доцільному регулюванні – при $n_{\tilde{a}} = 5000 \tilde{\alpha}^{-1}$ (рис. 3, г). При $n_{\tilde{a}} = 2400 \tilde{\alpha}^{-1}$ (рис. 3, б) максимальний ступінь рециркуляції при штатному регулюванні досягається при $\varphi_{\tilde{a}\tilde{\alpha}} = 20\%$, а при доцільному регулюванні – при $\varphi_{\tilde{a}\tilde{\alpha}} = 11\%$. При $n_{\tilde{a}} = 3800 \tilde{\alpha}^{-1}$ (рис. 3, в) максимальний ступінь рециркуляції при штатному регулюванні досягається при $\varphi_{\tilde{a}\tilde{\alpha}} = 25\%$, а при доцільному регулюванні – при $\varphi_{\tilde{a}\tilde{\alpha}} = 15\%$. Така розбіжність пояснюється тим, що штатна система рециркуляції оптимізована для максимального зниження концентрацій оксидів азоту, а доцільне регулювання здійснюється з метою отримання найкращої паливної економічності. Доцільні значення ступенів рециркуляції не перевищують максимально можливих на відповідних режимах роботи двигуна.

Значення доцільних кутів випередження запалювання, при штатному і доцільному регулюваннях рециркуляції ВГ, відрізняються. При збільшенні ступеня рециркуляції ВГ значення оптимального кута випередження запалювання зростає. Зокрема, для режиму $n_{\tilde{a}} = 3800 \tilde{\alpha}^{-1}$, $\varphi_{\tilde{a}\tilde{\alpha}} = 15\%$ (рис. 3, в) при збільшенні ступеня рециркуляції з 10 до 25% кут випередження необхідно збільшити на 5 град

Висновки

Основним недоліком існуючих систем нейтралізації ВГ є їх негативний вплив на потужність і паливну економічність двигуна. Тому проведення досліджень щодо впливу регульованих параметрів, зокрема ступеня рециркуляції ВГ і кута випередження запалювання, на паливну економічність і екологічні показники бензинового двигуна з системою нейтралізації ВГ та вибору їх доцільних значень є актуальною задачею.

Розроблено математичну модель системи «двигун-нейтралізатор», що являє собою систему диференціальних рівнянь руху газового потоку, об'ємного балансу і адіабати та дозволяє описати основні процеси системи в двигуні і нейтралізаторі, входи і виходи, зворотні зв'язки і взаємодію з навколишнім середовищем з використанням рівнянь. Адекватність моделі підтверджено порівнянням розрахункових та експериментальних показників двигуна VW BBU.

Теоретично визначено, що застосування рециркуляції ВГ для покращення паливної економічності бензинового двигуна без одночасної зміни кута випередження запалювання малоефективне. При одночасній зміні $R_{\tilde{A}\tilde{A}}$ і θ для $0 \leq R_{\tilde{A}\tilde{A}} \leq 20\%$ для режиму $n_{\tilde{a}} = 2400 \tilde{\alpha}^{-1}$, $\varphi_{\tilde{a}\tilde{\alpha}} = 20\%$ питома ефективна витрата палива g_e зменшується на 4,2%. При зміні лише $R_{\tilde{A}\tilde{A}}$ відсоток зменшення g_e складає 0,03%. Визначено доцільні значення ступеня рециркуляції ВГ і кута випередження запалювання двигуна VW BBU. На відміну від існуючих систем рециркуляції ВГ, робота яких оптимізована для максимального зниження концентрацій оксидів азоту, доцільне регулювання здійснюється з метою отримання найкращої паливної економічності. З цією метою максимальні значення ступенів рециркуляції ВГ зміщені в бік менших частот обертання і навантажень двигуна.

1. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни: Підручник. – К.: Арістей, 2007. – 476 с.
2. Гутаревич Ю.Ф., Зеркалов Д.В., Говорун А.Г., Корпач А.О., Мержиевська Л.П. Екологія та автомобільний транспорт: Навчальний посібник. – К.: Арістей, 2006. – 292с.
3. Медведев Ю.С., Починок В.М. Разработка современных конструкций каталитических нейтрализаторов отработавших газов // Двигателестроение. – 2001. – № 2. – С. 10–12.
4. Corpage G.N., Bell S.R. Use of an Electrically Heated Catalyst to Reduce Cold-Start Emissions in a Bi-Fuel Spark Ignited Engine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – ASME, New York. – Vol. 123. – pp. 125–131.
5. Дьяченко В.Г. Газообмен в двигателях внутреннего сгорания. – К.: УМК ВО, 1989. – 204 с.
6. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. - М.: Машиностроение, 1983. - 372 с.