

УДК 621.43

О.О. ОСЕТРОВ, С.С. КРАВЧЕНКО

Національний технічний університет «ХПІ», Україна

**РОЗРОБКА ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ КАРТ КЕРУВАННЯ КУТОМ
ВИПЕРЕДЖЕННЯ ЗАПАЛЮВАННЯ В ВОДНЕВОМУ ДВИГУНІ**

Робота присвячена дослідженню з розробки раціональних характеристичних карт керування кутом випередження запалювання в водневому двигуні на основі обраних критеріїв оптимізації. Проаналізовано вплив кута випередження запалювання на показники двигуна та визначено принципи особливості його вибору залежно від режиму роботи водневого двигуна із якісним регулюванням складу суміші. Запропоновано чотири характеристичні карти керування кутом випередження запалювання за умови забезпечення найкращої паливної економічності та балансу між паливною економічністю та токсичністю викидів двигуна.

Ключові слова: альтернативні джерела енергії, водень, кут випередження запалювання, Характеристична карта керування, критерій оптимізації.

Вступ

Скорочення природних запасів традиційних палив і екологічні проблеми, пов'язані з їх використанням, гостро ставлять питання впровадження альтернативних джерел енергії. Одним з найбільш перспективних альтернативних палив для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) є водень, який має високі енергетичні показники, унікальні кінетичні характеристики, хороші моторні властивості, екологічну чистоту, необмеженість сировинних запасів, тощо [1 – 9]. Тому дослідженням з використання водню в ДВЗ у світі присвячується велика увага.

Для кожного конкретного двигуна при його конвертації для використання водню необхідно вирішити ряд проблем, пов'язаних зі зберіганням палива, організацією сумішоутворення і згоряння, вибором раціональних конструктивних і регулювальних параметрів.

В роботі розроблено характеристичні карти керування кутом випередження запалювання для водневого двигуна Honda GX390.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням дослідження процесів у водневих ДВЗ, вибору їх раціональних параметрів присвячено ряд робіт [1 – 9]. Аналіз публікацій показує, що важливим регулювальним параметром, який суттєво впливає на показники двигуна, є кут випередження запалювання θ .

Як правило, в бензинових ДВЗ кут θ регулюють залежно від зміни частоти обертання n і навантаження, що оцінюється розрідженням у впускному

колекторі P . Принципова схема (так звана «мапа» або карта) регулювання кута θ залежно від n і P наведена на рис. 1 [10]. Видно, що із зменшенням навантаження (збільшенням розрідження на впуску P) і збільшенням частоти обертання кут випередження запалювання θ збільшують.

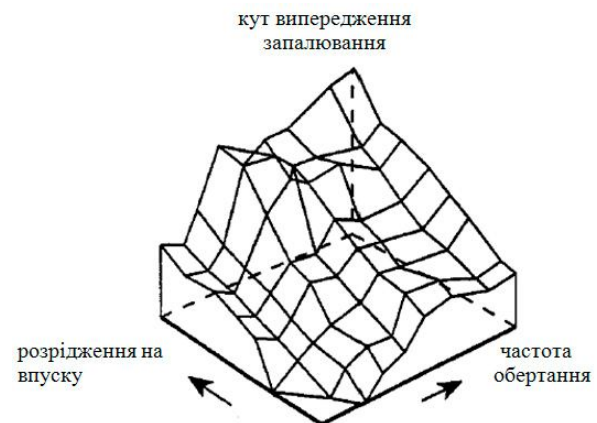


Рис. 1. Принципова схема регулювання кута випередження запалювання в бензинових ДВЗ

При збільшенні частоти обертання зростає період затримки запалювання, виражений в град. повороту колінчастого валу. Процес згоряння в циклі починається пізніше.

Крім того, збільшується тривалість догорання паливної суміші в ході процесу розширення продуктів згоряння [11]. Отже робоче тіло треба запалювати раніше, і кут θ збільшують. При зменшенні навантаження у циліндрі збільшується частка залишкових відпрацьованих газів. Це також призводить до росту періоду затримки запалювання і збільшенню

тривалості догоряння паливної суміші [11]. Тому кут θ також збільшують.

Деякі дослідники при розробці характеристичних карт керування кутом θ враховують температуру двигуна (на «холодному» двигуні кут θ збільшують), детонацію (при її виникненні кут θ зменшують), а також інші параметри [10, 12].

Певну специфіку на вибір кута випередження запалювання накладає спосіб регулювання потужності двигуна. Водень на відміну від більшості альтернативних палив має широкі межі займання: $\alpha = 0,15 \dots 10$ [5]. Це дозволяє здійснити якісне регулювання потужності двигуна, отже забезпечити високу паливну економічність у широкому діапазоні експлуатаційних навантажень.

В роботах [4, 6, 8] представлено карту керування кутом θ , розроблену для водневого двигуна GM 454 (8Ч 10,795/10,160) залежно від навантаження (вісь Y) і частоти обертання колінчастого валу (вісь X). Навантажувальний пристрій моделював сигнал датчика розрідження на впуску таким чином, що 2000 mBar відповідало максимальному навантаженню, а 0 mBar – відсутності навантаження (холостий хід).

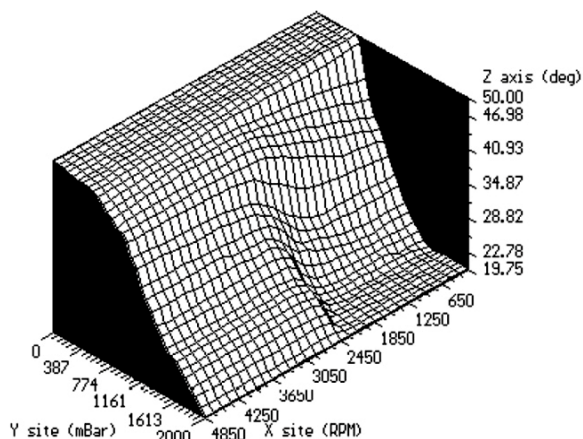


Рис. 2. Карта керування водневого двигуна GM454 (8Ч 10,795/10,160)

Видно, що при зменшенні навантаження кут випередження запалювання на більшості режимів збільшують. Це пояснюють зростанням тривалості згоряння водню: при зменшенні навантаження при якісному регулюванні потужності зростає коефіцієнт надлишку повітря α , що призводить до збільшення тривалості згоряння. Отже кут θ необхідно також збільшувати. Виключенням є режими малих і високих навантажень і малих частот обертання, де кут θ приймають постійним в певному діапазоні навантажувальних режимів. Пояснення цьому в роботах не надано.

Вплив частоти обертання на вибір кута θ багато менший [4, 6, 8]. На режимах малих і високих

навантажень кут θ приймають постійним у всьому діапазоні (або на певній ділянці діапазону) частот обертання і змінюють тільки на середніх навантаженнях. Пояснення необхідності збільшувати кут θ із ростом частоти обертання на означених режимах в жодній з проаналізованих робіт не наведено.

Параметр θ найчастіше призначають, виходячи із забезпечення найкращої паливної економічності двигуна. В деяких випадках намагаються урахувати токсичність відпрацьованих газів, проте методика вибору компромісного рішення в публікаціях не наводиться. Складність представляє також вибір критерію оптимізації, який дозволяє врахувати як показники паливної економічності, так і токсичності відпрацьованих газів (ВГ) ДВЗ.

З аналізу робіт видно, що не достатньо висвітленими в технічній літературі є питання обґрунтування вибору кута випередження запалювання в водневому двигуні залежно від потужності і частоти обертання, методики такого вибору, обґрунтування оптимізаційного критерію

Метою роботи є розробка і обґрунтування характеристичних карт керування кутом випередження запалювання в водневому двигуні в діапазоні експлуатаційних навантажень на основі обраних оптимізаційних критеріїв.

Результати досліджень

На кафедрі ДВЗ НТУ «ХП» спільно із вченими університету міста Труа Рів'єр (Канада) виконані розрахунково-експериментальні дослідження з використання водню в чотиритактному одноциліндровому двигуні Honda GX390 (1Ч 8,8/6,4). В ході цих досліджень розроблено і верифіковано математичні моделі газообміну, згоряння водню і утворення оксидів азоту у циліндрі двигуна [9]. Програмний код написано в системі MATLAB. Створені математичні моделі дозволяють виконувати широкий спектр розрахункових оптимізаційних досліджень, зокрема з вибору раціональних значень кута θ .

Експлуатаційні режими

Згідно паспортних даних двигуна Honda GX390 частота обертання n при роботі на бензині на режимах швидкісних характеристик змінюється в діапазоні $2000 \dots 3600 \text{ хв}^{-1}$, а крутний момент $M_{кр}$ в діапазоні $2,5 \dots 25 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Експериментальні дослідження двигуна показали, що внаслідок витиснення частини повітря воднем максимальний крутний момент і потужність двигуна зменшуються приблизно на 10%. Тому для розрахункового дослідження обраний інший діапазон зміни крутного моменту $M_{кр}$ – від 2,5 до 20 Н·м. При проведенні

розрахункового дослідження задавали крок по частоті обертання 100 хв^{-1} , та крок по моменту – $1,25 \text{ Н·м}$.

Таким чином, вибір раціонального значення кута випередження θ проводився для 255 режимів роботи двигуна.

Діапазон зміни кута випередження запалювання

Для визначення діапазону зміни кута θ були виконані попередні розрахунки.

Мінімальні значення θ задавали поблизу верхньої мертвої точки ($\theta = 6$ град. п.к.в. після верхньої мертвої точки (ВМТ)). Розрахунки показали, що при більш пізніх кутах θ суттєво зменшується індикаторна робота і ростуть температури відпрацьованих газів, отже зменшується надійність деталей випускного тракту.

Максимальні значення θ залежать від режиму роботи двигуна (рис. 3).

Так, на режимах високих навантажень ($M_{кр} = 20 \text{ Н·м}$) максимальні значення θ знаходяться в межах $22...26$ град. п.к.в. до ВМТ. При більших θ зменшення індикаторної роботи призводить до того, що навіть збільшуючи циклову подачу палива (до $\alpha = 1$) не вдається забезпечити задану потужність (або крутний момент) двигуна.

На режимах малих навантажень ($M_{кр} = 2,5 \text{ Н·м}$) зростає тривалість згоряння, що дає змогу збільшувати кут випередження запалювання до $64...68$ град. п.к.в. до ВМТ.

Таким чином, із зменшенням навантаження збільшується діапазон регулювання кута випередження запалювання з $28...32$ град. п.к.в. до $70...74$ град. п.к.в.

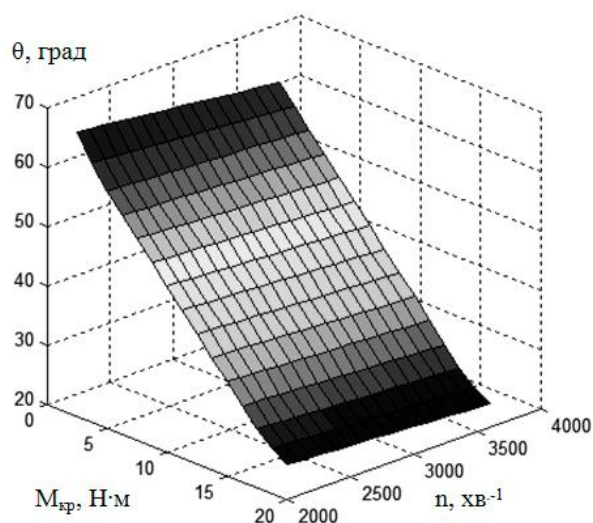


Рис. 3. Максимальні значення кута випередження запалювання для двигуна Honda GX390

Критерії оптимізації

Найбільше поширення як критерій якості протікання робочого процесу отримала питома ефективна витрата палива g_e . Тому цей параметр був прийнятий у якості першого оптимізаційного критерію.

Останнім часом все більше застосування знаходять також екологічні критерії – питоми викиди шкідливих речовин з ВГ, зокрема оксидів азоту g_{NOx} , монооксиду g_{CO} і діоксиду g_{CO2} , вуглецю, вуглеводнів g_{CH} , твердих частинок g_{TC} тощо. Аналіз відпрацьованих газів водневого двигуна показав, що основним шкідливим компонентом продуктів згоряння є оксид азоту NO. Викиди інших шкідливих речовин у ВГ майже відсутні. Незначний вміст CO і твердих частинок у ВГ пояснюється потраплянням мастила в камеру згоряння двигуна. Отже питоми викид оксиду азоту g_{NO} доцільно також врахувати при оптимізації.

Аналіз розрахункових залежностей питомого викиду оксиду азоту g_{NO} та питомої ефективної витрати палива g_e від конструктивних і режимних параметрів робочого процесу показує, що в деяких випадках ці критерії змінюються у протилежних напрямках. Забезпечити компроміс між показниками паливної економічності і токсичності відпрацьованих газів двигуна можливо використанням паливно-екологічного критерію, запропонованого в роботі [7]:

$$K_{те} = \frac{3600}{Q_H g_e} \cdot \frac{g_e}{g_e + \sigma \cdot f \sum_{k=1}^N (A_k g_{вbk})}, \quad (1)$$

де g_e , $g_{вbk}$ – відповідно питома ефективна витрата палива і питоми викид k -го компоненту токсичних викидів з відпрацьованими газами;

A_k – показник відносної агресивності k -го компонента токсичних викидів;

N – загальне число врахованих токсичних компонентів, які викидаються в навколишнє середовище з ВГ;

σ – безрозмірний показник відносної небезпеки забруднення для різних територій;

f – безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання ВГ в атмосфері;

Q_H – нижча теплота згоряння палива.

Залежність (1) можна модифікувати для урахування тільки двох показників двигуна – питомої витрати палива і викидів оксиду азоту:

$$K_{те} = \frac{3600}{Q_H g_e} \cdot \frac{g_e}{g_e + \sigma \cdot f \cdot A_{NO} \cdot g_{NO}}.$$

Таким чином, в роботі запропоновано проводити оптимізацію кута випередження запалювання θ за двома критеріями: питомою витратою палива g_e і комплексним паливно-екологічним критерієм $K_{те}$.

Аналіз впливу зміни кута випередження запалювання на показники роботи дослідного двигуна

На рис. 4 та 5 наведені регульовальні характеристики дослідного двигуна на режимах великих і малих навантажень (крутного моменту) при постійній частоті обертання (рис. 4), а також високої і малої частоти обертання при постійному навантаженні (крутному моменті) (рис. 5). При кожному значенні кута θ варіювали циклову подачу палива за умови забезпечення заданої потужності (крутного моменту) двигуна.

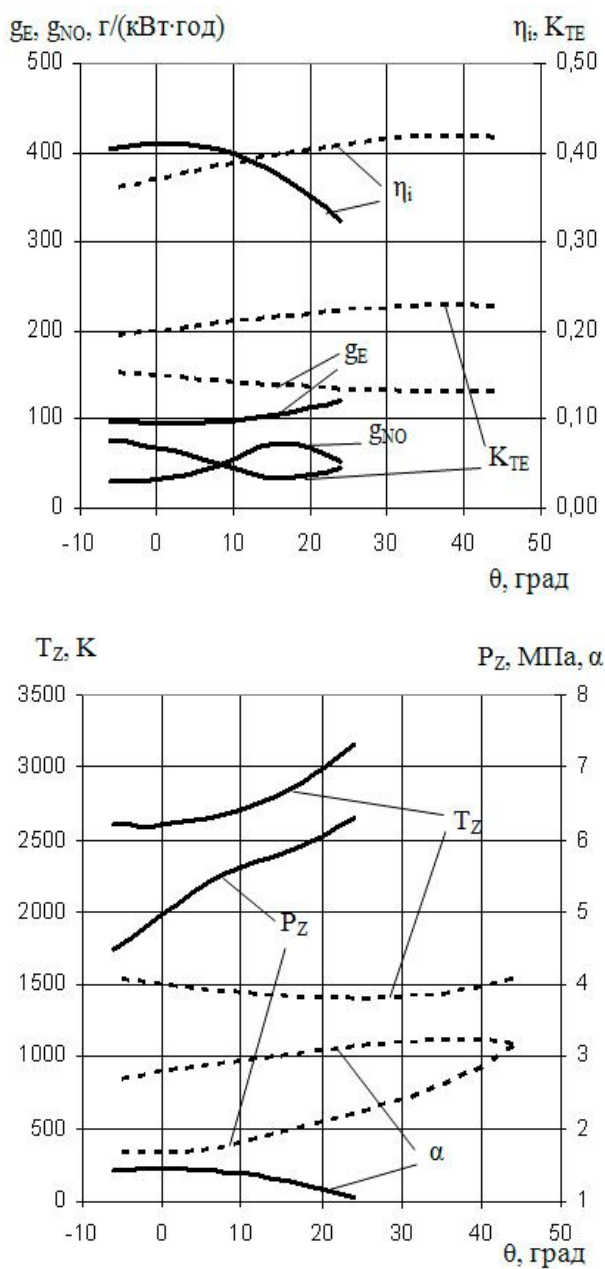


Рис. 4. Регульовальні характеристики дослідного двигуна: $n = 2800 \text{ хв}^{-1}$; — - $M_{кр} = 20 \text{ Н} \cdot \text{м}$; --- - $M_{кр} = 7,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$

З рис. 4 та 5 видно, що із збільшенням кута випередження запалювання θ в циліндрі, як правило, зростають максимальні температура T_z і тиск P_z згоряння. Це призводить до підвищення механічної і термічної напруженості деталей двигуна, а також збільшення викидів оксиду азоту g_{NO} . Термодинамічна ефективність циклу (індикаторний ККД) з ростом кута θ спочатку збільшується, а потім починає різко зменшуватися. Максимум η_i (і відповідно мінімум g_e) досягається у момент, коли робота розширення є максимальною, а робота стиску – мінімальною.

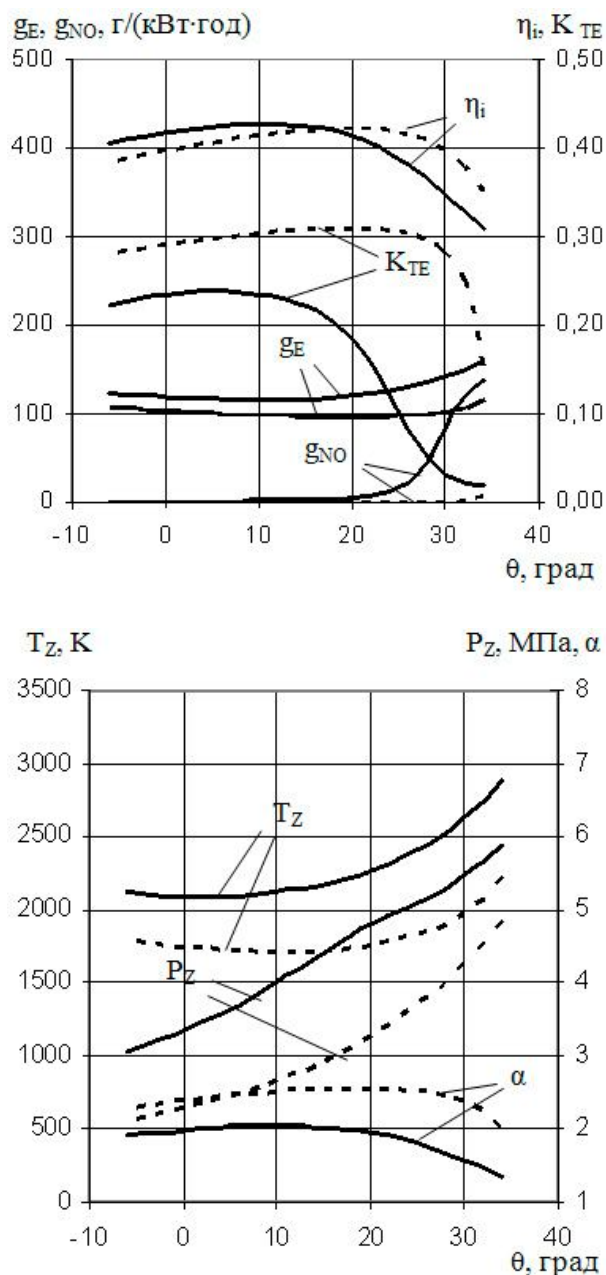


Рис. 5. Регульовальні характеристики дослідного двигуна: $M_{кр} = 12,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$; — - $n = 3600 \text{ хв}^{-1}$; --- - $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$

Зі зменшенням навантаження максимум індикаторного ККД η_i , паливно-екологічного критерію K_{TE} і мінімум питомої витрати палива g_E зміщуються в сторону більших кутів випередження запалювання θ (рис. 4).

Це пов'язано зі збільшенням коефіцієнту надлишку повітря (рис. 5) і зростанням тривалості згоряння, отже необхідністю більш раннього запалювання робочої суміші. На режимах малих і середніх навантажень максимумами індикаторного ККД η_i , паливно-екологічного критерію і мінімум питомої витрати палива g_E співпадають. Це пов'язано з тим, що при коефіцієнтах надлишку повітря α більше 2 вміст оксидів азоту у ВГ (складова токсичності в комплексному критерії) надзвичайно низький, отже зміна паливно-екологічного критерію віддзеркалює зміну питомої витрати палива.

В області високих навантажень викиди оксидів азоту сягають 50 г/(кВт·год) і більше, тому максимум паливно-екологічного критерію приходить на 2...7 град. менші кути випередження запалювання, ніж максимум індикаторного ККД (відповідно мінімум питомої витрати палива).

Вплив частоти обертання n на вибір θ істотно менше, ніж вплив навантаження (рис. 5). Слід відзначити те, що найкращі показники робочого процесу двигуна із збільшенням n досягаються при більш пізніх кутах випередження запалювання θ . Це можна пояснити тим, що із збільшенням частоти обертання погіршується наповнення циліндра, зменшується коефіцієнт надлишку повітря і зменшується тривалість згоряння. Тому кут θ доцільно збільшувати.

Вплив частоти обертання на вибір кута θ більш суттєвий на режимах малих навантажень і менш суттєвий – на режимах високих навантажень. На режимах високих навантажень і малих α робочий процес двигуна дуже чутливий до зміни кута θ (рис. 4). Навіть незначна зміна θ на цих режимах дозволяє забезпечити задані показники двигуна. Проте на режимах малих навантажень вплив зміни кута θ не суттєвий. Тому для забезпечення заданих показників роботи двигуна кут випередження запалювання слід регулювати у більших діапазонах.

Вказані особливості вибору кута випередження запалювання покладені в основу розробки характеристичних карт керування цим параметром.

Характеристичні карти керування

На рис. 6 а, показані карти керування кутом θ 1 і 2, оптимізовані як за навантаженням, так і за частотою обертання. Карта 1 забезпечує найкращу паливну економічність, карта 2 – як високу паливну

економічність, так і низьку токсичність (максимальний паливно-екологічний критерій).

Вище показано, що вплив частоти обертання n на вибір кута випередження запалювання θ не суттєвий, отже θ можна приймати постійним у всьому діапазоні n . Карти керування 3 і 4, що відповідають характеристичним картам 1 і 2 не враховують вплив частоти обертання на вибір θ , наведені на рис. 6 б.

Також показано, що на режимах малих і середніх навантажень, викиди оксидів азоту є надзвичайно низькими, отже оптимізовані за g_E і K_{TE} характеристичні карти керування (відповідно 1 і 2, 3 і 4) на цих режимах співпадають. На режимах високих навантажень оксиди азоту сягають значних рівнів, отже характеристичні карти керування 1 і 2, 3 і 4 на 3...6 град. п.к.в. відрізняються.

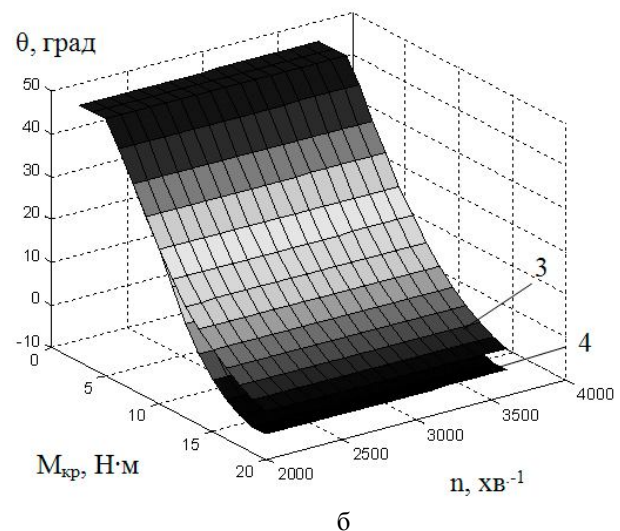
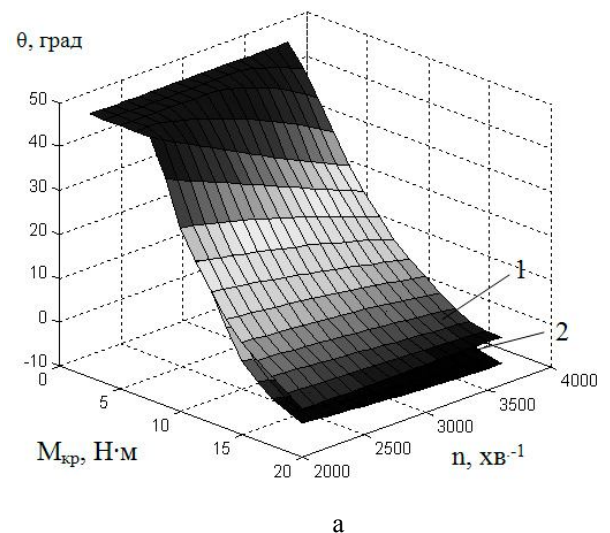


Рис. 6. Характеристичні карти керування кутом випередження запалювання: 1, 3 – оптимізовані за паливною економічністю; 2, 4 – оптимізовані за паливно-екологічним критерієм

При малих навантаженнях $M_{кр}$ і частотах обертання раціональні рівні θ співпадають з максимальними допустимими значеннями кута випередження запалювання для дослідного двигуна (див. рис. 3). В роботі запропоновано на цих режимах встановлювати дещо менші значення $\theta = 50$ град. п.к.в. до ВМТ.

Це призначено для забезпечення стабільної і рівномірної роботи двигуна. Такий самий підхід до регулювання θ на режимах малих навантажень прийнятий і в роботах [4, 6, 8].

Для порівняння ефективності керування кутом θ за розробленими характеристичними картами визначено середні експлуатаційні значення питомої ефективної витрати палива g_e , викиду оксиду азоту g_{NO} та паливо – екологічного критерію КТЕ в досліджуваному діапазоні режимів. При цьому спрощено

прийнято, що двигун на всіх режимах працює однаково кількість часу. Результати порівняння представлені в табл. 1. З табл. 1 видно, що при використанні усіх розроблених карт забезпечується приблизно однакова середньо-експлуатаційна витрата палива – різниця складає менше одного відсотка. Проте середні експлуатаційні викиди оксидів азоту при використанні карт 1 і 2, 3 і 4 відрізняються приблизно на 13%, що в сучасних умовах жорстких обмежень токсичності вихлопу є дуже суттєвим.

На наш погляд, раціонально використовувати характеристичні карти керування 2 і 4, оптимізовані за паливно-екологічним критерієм, що дозволить суттєво знизити токсичність викидів при майже незмінній витраті палива.

Таблица 1

Порівняння ефективності застосування карт керування кутом випередження запалювання

№	Характеристичні карти керування	КТЕ	g_e , г/(кВт год)	g_{NO} , г/(кВт год)
1	Оптимізована за g_e	0,199	0,135	4,93
2	Оптимізована за K_{TE}	0,201	0,136	4,33
3	Оптимізована за g_e без урахування впливу n	0,197	0,136	5,04
4	Оптимізована за K_{TE} без урахування впливу n	0,200	0,137	4,41

Висновки

В результаті розрахункового дослідження отримані такі результати:

1. Визначено діапазони керування кутом випередження запалювання залежно від режимів роботи дослідного двигуна.

2. Запропоновано проводити оптимізацію кута θ за модифікованим виразом комплексного паливно-екологічного критерію, що враховує витрату палива двигуна і викиди оксиду азоту з продуктами згоряння.

3. Проаналізовано вплив кута випередження запалювання на показники дослідного двигуна. Визначено принципові особливості вибору кута θ залежно від режиму роботи водневого двигуна із якісним регулюванням складу суміші.

4. Запропоновано чотири характеристичні карти керування кутом θ за умови забезпечення найкращої паливної економічності (перша і третя карта) та балансу між паливною економічністю та токсичністю викидів двигуна (друга і четверта карта). Перша і друга карта оптимізовані як за частотою обертання, так і за навантаженням двигуна, друга і четверта – тільки за навантаженням без урахування впливу частоти обертання.

Література

1. MacCarley, C.A. *Electronic fuel injection techniques for hydrogen powered I.C. engines* [Text] / C.A. MacCarley, W.D. Van Vorst // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 1980. – Volume 5, issue 2. – P. 179 – 203.
2. *Effect of ignition timing and hydrogen fraction on combustion and emission characteristics of natural gas direct-injection engine* [Text] / J. Wang, Z. Huang, B. Liu, K. Zeng, J. Yu, D. Jiang // *Frontiers of energy and power engineering in china*. – 2008. – Vol. 2, № 2. – P. 194-201.
3. Blair, G.P. *Design and simulation of four stroke engines* [Text] / G.P. Blair. – USA: SAE International, 1999. – 840 p.
4. Sierens, R. *Experimental study of a hydrogen-fueled engine* [Text] / R. Sierens, S. Verhelst. // *J. Eng. Gas Turbines Power*. – 2001. – Volume 123, issue 1. – P. 211 – 216.
5. Мищенко, А.И. *Применение водорода для автомобильных двигателей* [Текст] / А.И. Мищенко. – К.: Наука, 1984. – 143 с.
6. Verhelst, S. *A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines* [Text] / S. Verhelst. – USA: Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics. Ghent University, 2005. – 222 p.

7. Парсаданов, И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия [Текст] / И.В. Парсаданов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с.

8. Verhelst, S. Aspects concerning the optimisation of a hydrogen fueled engine [Text] / S. Verhelst, R. Sierens // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2001. – Volume 26, issue 9. – P. 981–985.

9. Расчетно-экспериментальное исследование процесса сгорания водорода в одноцилиндровом четырехтактном двигателе с искровым воспламенением [Текст] / А.П. Марченко, А.А. Осетров, И. Дубей, Р. Маамри // *Энерготехнологии и Ресурсосбережение*. – 2011. – №4. – С. 14–18.

10. *Engine sub systems - Spark Advance Control* [Text]. – Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc. All Rights Reserved.

11. Двигатели внутреннего сгорания: теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст]: Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

12. *Automotive Engineering: Engine Fuel Map Design* [Электронный ресурс] / George Alexandrov, Kaitlin Bergin, Xiao Ying Zhao, Rolih Ferdinand. – Режим доступа: <http://www.soe.rutgers.edu/sites/default/files/gset/Paper08-Auto.pdf>. – 10.04.2009 г.

Надійшла до редакції 28.12.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. Двигуни внутрішнього згоряння Ф.І. Абрамчук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

РАЗРАБОТКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ КАРТ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОМ ОПЕРЕЖЕНИЯ ЗАЖИГАНИЯ В ВОДОРОДНОМ ДВИГАТЕЛЕ

А.А. Осетров, С.С. Кравченко

Работа посвящена исследованию разработки рациональных характеристических карт управления углом опережения зажигания в водородном двигателе на основе избранных критериев оптимизации. Проанализировано влияние угла опережения зажигания на показатели двигателя и определены принципиальные особенности его выбора в зависимости от режима работы водородного двигателя с качественной регулировкой состава смеси. Предложены четыре характеристические карты управления углом опережения зажигания при условии обеспечения наилучшей топливной экономичности и баланса между топливной экономичностью и токсичностью выбросов двигателя.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, водород, угол опережения зажигания, характеристическая карта управления, критерий оптимизации.

APPLICATION OF DEVELOPING CONTROL MAPS CHARACTERISTIC ANGLE IGNITION TIMING IN THE HYDROGEN ENGINES

A.A. Osetrov, S.S. Kravchenko

The work is devoted to research to develop the characteristic maps of rational control of ignition timing angle in the hydrogen engine based on the selected optimization criteria. The influence of the angle of ignition timing on engine performance and defined the basic features of his choice depending on the mode of hydrogen engine with quality control of the mixture. A four characteristic maps control of ignition timing angle, provided that the best fuel economy and the balance between fuel economy and emissions of toxic engine.

Key words: alternative energy, hydrogen, ignition timing, the characteristic map control, the criterion of optimization.

Осетров Александр Александрович - канд. техн. наук, доцент, доцент каф. «Двигуни внутрішнього згоряння», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харьков, Украина.

Кравченко Сергій Сергійович – студент каф. «Двигуни внутрішнього згоряння», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харьков, Украина.