

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ 6-ЦИЛІНДРОВОГО ДИЗЕЛЯ З РЯДНИМ РОЗМІЩЕННЯМ ЦИЛІНДРІВ І РЕГУЛЮВАННЯМ ПОТУЖНОСТІ ВІДКЛЮЧЕННЯМ ОКРЕМИХ РОБОЧИХ ЦИКЛІВ

Доктор технічних наук Філіппов А.З.,
кандидат технічних наук Бешун О.А.

Постановка проблеми у загальному вигляді, аналіз останніх досліджень і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Прагнення знизити витрату палива і шкідливі викиди з відпрацьованими газами приводить часто до значного ускладнення конструкцій двигунів внутрішнього згоряння [1, 2]. Але є і інший, більш раціональний підхід, заснований на аналізі найбільш уживаних в експлуатації режимів роботи двигунів та розробці для цих режимів методів і способів зниження витрати палива.

Численними дослідженнями встановлено, що найбільш уживаними в експлуатації режимами роботи автомобільних двигунів в умовах міського руху є холостий хід і часткові навантаження. Робота тракторних дизелів також характеризується значною тривалістю експлуатації на холостому ході і малих навантаженнях, що пояснюється великим обсягом транспортних робіт, включаючи переїзд з порожнім причепом, а також частою розрядкою акумуляторних батарей [1].

Підвищити ефективність роботи дизеля великого об'єму на холостому ході і часткових навантаженнях можна шляхом застосування методу регулювання потужності відключенням окремих робочих циклів (ДРЦ), який має декілька суттєвих переваг в порівнянні з відомим методом відключення циліндрів [3]. Проте регулювання потужності двигунів таким методом при роботі на часткових навантаженнях і холостому ході супроводжується збільшенням нерівномірності крутного моменту [4], що є одним з недоліків даного методу, а також однієї з основних причин вібрацій двигуна. Тому при вирішенні питання про доцільність використання способу відключення робочих циклів необхідно досліджувати динамічні параметри дизельного ДРЦ. Особливо важливо це для автомобільних двигунів на рівень шуму і вібрацій яких накладені жорсткі обмеження.

Формування цілей статті (постановка завдання)

У зв'язку з вище викладеним, було поставлене завдання розробити алгоритм відключення окремих робочих циклів для 6-циліндрового дизеля з рядним розміщенням циліндрів, і вивчити зміну динамічних параметрів дизельного ДРЦ. Зокрема, провести якісну і кількісну оцінку індикаторного крутного моменту і нерівномірності ходу дизеля в залежності від частоти обертання колінчастого валу та кількості відключених циклів згідно із запропонованим алгоритмом.

Викладення основного матеріалу дослідження

Вичерпну інформацію про динаміку двигуна дає математичне моделювання. Тому вивчення динамічних параметрів дизельного ДРЦ виконувалося на уточненій математичній моделі динаміки поршневих ДРЦ [5], розробленій на кафедрі тракторів і автомобілів НУБіП України. Ця модель не враховує динаміки газових процесів, а також коливань колінчастого валу.

Результати виконаних раніше досліджень показали, що різниця в розрахункових і теоретичних значеннях не перевищує 6 %, що свідчить про достатньо високу адекватність цієї математичної моделі.

Весь комплекс теоретичних досліджень виконаний на математичній моделі в проблемній науково-дослідній лабораторії теплових двигунів і альтернативних палив НУБіП України.

Об'єкт досліджень – 4-тактний 6-циліндровий дизель з рядним розміщенням циліндрів і порядком роботи 1–5–3–6–2–4.

Динамічний розрахунок дизеля з регулюванням потужності відключенням окремих робочих циклів виконувався шляхом інтеграції диференціального рівняння руху, яке зв'язує кутову швидкість колінчастого валу з індикаторним моментом, моментом від сил інерції, моментом від сил тертя та моментом опору [5] і розв'язується за допомогою спеціально розробленої програми для персонального комп'ютера. Програма складена на мові ФОРТРАН і дає можливість застосовувати стандартне рішення даного рівняння методом Рунге-Кутта.

Вона містить власне головну програму і підпрограму *SUM*, яка дозволяє за значеннями змінного моменту інерції поступально рухомих мас, моменту від сил тертя та індикаторного крутного моменту одного циліндра визначати відповідні сумарні моменти на валу двигуна від всіх (в даному випадку шести) циліндрів.

Інтеграція рівняння проводилася в інтервалі, на якому розташовано 12 робочих циклів в кожному циліндрі. На цьому інтервалі визначалися середні значення, середні квадратичні відхилення і коефіцієнти варіації кутової швидкості, індикаторного моменту, моменту тертя і ефективного крутного моменту.

В даній роботі ступінь регулювання потужності дорівнює $(1/12) \cdot N_i$ в 6-циліндровому двигуні. Виходячи з цього, закономірність відключення робочих циклів може визначатися послідовністю $2 \cdot i_c$. З кожних $2 \cdot i_c$ робочих циклів пропускається m , де $m = 1, 2, \dots, 2 \cdot i_c$.

Для 6-циліндрового двигуна алгоритм відключення робочих циклів може бути представлений у вигляді послідовності, наведеної в таблиці 1.

Таблиця 1

Алгоритм відключення робочих циклів
для 6-циліндрового ДРЦ із ступенем регулювання $(1/12) \cdot N_i$

Відключена частина індикаторної потужності	Номера циліндрів в порядку їх роботи											
	1	5	3	6	2	4	1	5	3	6	2	4
	Номери відключених циклів											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$(0/12) \cdot N_i$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$(1/12) \cdot N_i$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$(2/12) \cdot N_i$	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$(3/12) \cdot N_i$	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
$(4/12) \cdot N_i$	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$(5/12) \cdot N_i$	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
$(6/12) \cdot N_i$	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
$(7/12) \cdot N_i$	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
$(8/12) \cdot N_i$	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
$(9/12) \cdot N_i$	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
$(10/12) \cdot N_i$	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
$(11/12) \cdot N_i$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
$(12/12) \cdot N_i$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Цифри в кожному рядку означають, що з кожних 12 робочих циклів пропускається, залежно від навантаження, певна їх кількість.

Наприклад, забезпечення відключення $(3/12) \cdot N_i$ створюється пропуском робочих циклів 1, 5 і 9. Тобто відключається 3/12 індикаторної потужності дизеля. Відключення робочих циклів здійснювалося з умови забезпечення мінімальної нерівномірності ходу двигуна.

На рис. 1 і рис. 2, а також в табл. 2 і табл. 3 представлені результати розрахунку основних показників динаміки дизельного 6-циліндрового ДРЦ. Розрахунки виконані для робочого діапазону частот обертання колінчастого валу дизеля (600...2000 об/хв) з кроком 200 об/хв.

Зокрема, в табл. 2 і на рис. 1 приведена залежність нерівномірностей індикаторного крутного моменту від режиму відключень циклів і частоти обертання.

З приведених даних видно, що зі збільшенням кількості відключених циклів на всіх швидкісних режимах нерівномірність крутного моменту монотонно зростає згідно із законом увігнутої параболи, і на режимі відключень 10/12 при частоті обертання $n = 600$ об/хв це збільшення максимальне. Значення μ в цьому випадку становить 29,28, і в порівнянні з номінальним режимом збільшується майже у 18 разів.

Як видно з рис. 1, μ істотно залежить також від частоти обертання колінчастого валу. Найменші значення μ мають місце на режимах $n = 1400$ і $n = 1600$ об/хв у всьому діапазоні відключень (1/12...10/12) окрім режиму 0/12 – тобто режиму без відключень циклів, для якого мінімальні значення μ мають місце при частоті $n = 1800$ об/хв.

Таблиця 2

Розрахункові значення коефіцієнта нерівномірності індикаторного крутного моменту μ двигуна при різних швидкісних режимах і кількості відключених циклів

Частота обертання КВ, об/хв	Коефіцієнт нерівномірності індикаторного крутного моменту μ двигуна										
	Відключена частина індикаторної потужності двигуна										
	0/12	1/12	2/12	3/12	4/12	5/12	6/12	7/12	8/12	9/12	10/12
2000	1,63	3,61	4,02	4,51	5,07	5,93	7,05	8,88	11,38	16,16	–
1800	1,32	2,84	3,16	3,56	3,99	4,67	5,56	7,03	8,99	12,76	22,26
1600	1,68	2,77	3,06	3,43	3,88	4,50	5,02	6,34	8,19	11,63	20,16
1400	2,07	2,77	3,06	3,43	3,88	4,49	5,03	6,33	8,16	11,59	20,08
1200	2,43	3,11	3,44	3,84	4,36	5,03	5,68	7,00	9,03	12,81	22,04
1000	2,78	3,49	3,86	4,33	4,88	5,63	6,43	7,91	10,17	14,44	22,04
800	3,06	3,80	4,20	4,74	5,33	6,17	7,05	8,70	11,15	15,83	27,32
600	–	4,06	4,50	–	5,69	6,60	7,54	9,34	11,92	16,94	29,28

Таблиця 3

Розрахункові значення коефіцієнта нерівномірності обертання вала двигуна δ при різних швидкісних режимах і кількості відключених циклів

Частота обертання КВ, об/хв	Коефіцієнт нерівномірності ходу (частоти обертання) δ двигуна										
	Відключена частина індикаторної потужності двигуна										
	0/12	1/12	2/12	3/12	4/12	5/12	6/12	7/12	8/12	9/12	10/12
2000	0,00207	0,01164	0,01037	0,00952	0,01062	0,01055	0,00654	0,01148	0,01211	0,01049	–
1800	0,00164	0,01351	0,01229	0,01238	0,01326	0,01257	0,00698	0,01271	0,01292	0,01142	0,01301
1600	0,00270	0,01755	0,01595	0,01962	0,01548	0,01615	0,01042	0,01743	0,01474	0,01283	0,01490
1400	0,00491	0,02382	0,02167	0,02918	0,02125	0,02162	0,01779	0,02543	0,01858	0,01701	0,01891
1200	0,00929	0,03416	0,03698	0,04055	0,03083	0,03045	0,02888	0,03802	0,02537	0,02379	0,02639
1000	0,03269	0,05193	0,06067	0,07027	0,04778	0,04569	0,05012	0,05771	0,03900	0,03549	0,02639
800	0,06352	0,08487	0,08885	0,12360	0,08054	0,08516	0,08506	0,10154	0,06181	0,05764	0,06751
600	–	0,15676	0,17880	–	0,12517	0,17248	0,14651	0,20502	0,12154	0,10629	0,12820

Слід відмітити, що згідно з даними розрахунків двигун не зможе працювати на режимах 0/12 та 3/12 відключень при $n = 600$ об/хв, і 10/12 відключень при $n = 2000$ об/хв.

В табл. 3 і на рис. 2 приведені розрахункові (теоретичні) значення коефіцієнта нерівномірності обертання вала двигуна δ при різних швидкісних режимах і кількості відключених циклів.

З таблиці і приведеного рисунка видно, що зі збільшенням числа відключених циклів коефіцієнт нерівномірності ходу двигуна δ збільшується. Він в значній мірі залежить від режиму відключень. Наприклад, на режимах 2/12, 4/12, 6/12 і 8/12 значення δ істотно менше в порівнянні з режимами відключення 3/12, 5/12 і 7/12.

Особливо звертає на себе увагу зменшення нерівномірності ходу двигуна на режимі 6/12 відключень робочих циклів, тобто при відключенні половини індикаторної потужності.

Істотним є вплив на нерівномірність ходу двигуна частоти обертання колінчастого вала. При зменшенні частоти обертання нерівномірність δ стрімко зростає, досягаючи найбільших значень на режимі мінімального холостого ходу ($n = 600$ об/хв).

Характерним також є те, що в діапазоні частот 2000...1600 об/хв числові значення нерівномірності δ відрізняються незначно. При подальшому зменшенні частоти обертання різниця стає більш істотною. Найбільша нерівномірність має місце на режимах 3/12, 5/12 і 7/12 відключень робочих циклів.

Видно, що при роботі двигуна на режимі мінімального холостого ходу у всьому діапазоні відключень робочих циклів нерівномірність ходу двигуна вище за допустимі значення.

Допустимі значення δ для тракторних двигунів на номінальному режимі становлять 0,010...0,016.

Для режиму мінімального холостого ходу значення δ в літературних джерелах, як правило, не приводяться. Очевидно, що для цих режимів допустимі значення δ будуть більші, ніж на номінальному режимі.

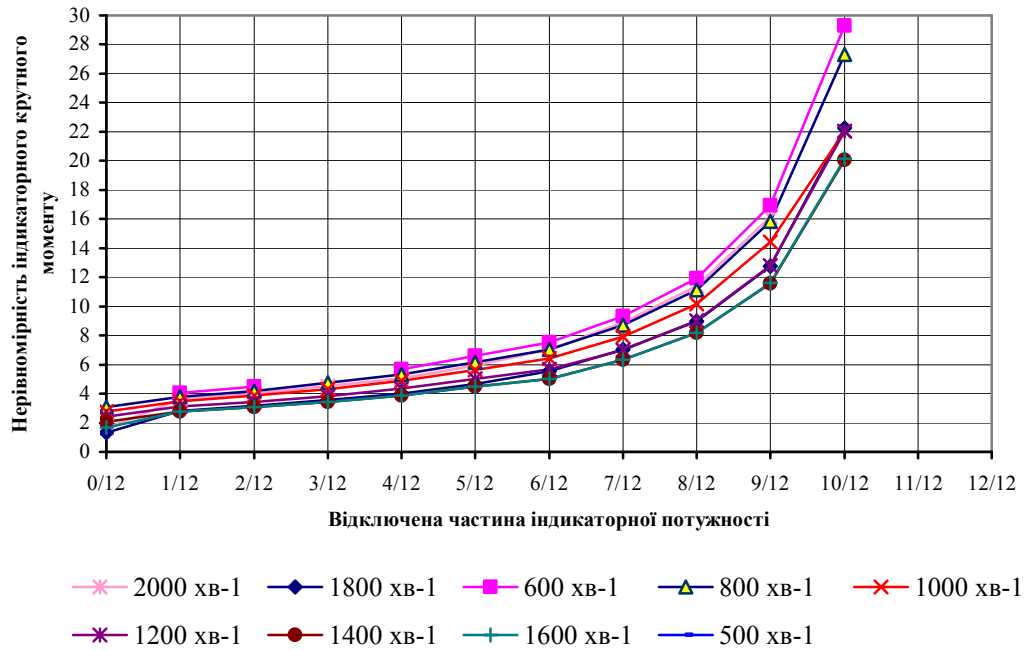


Рис. 1. Залежність нерівномірності індикаторного крутного моменту μ від кількості відключених робочих циклів і частоти обертання

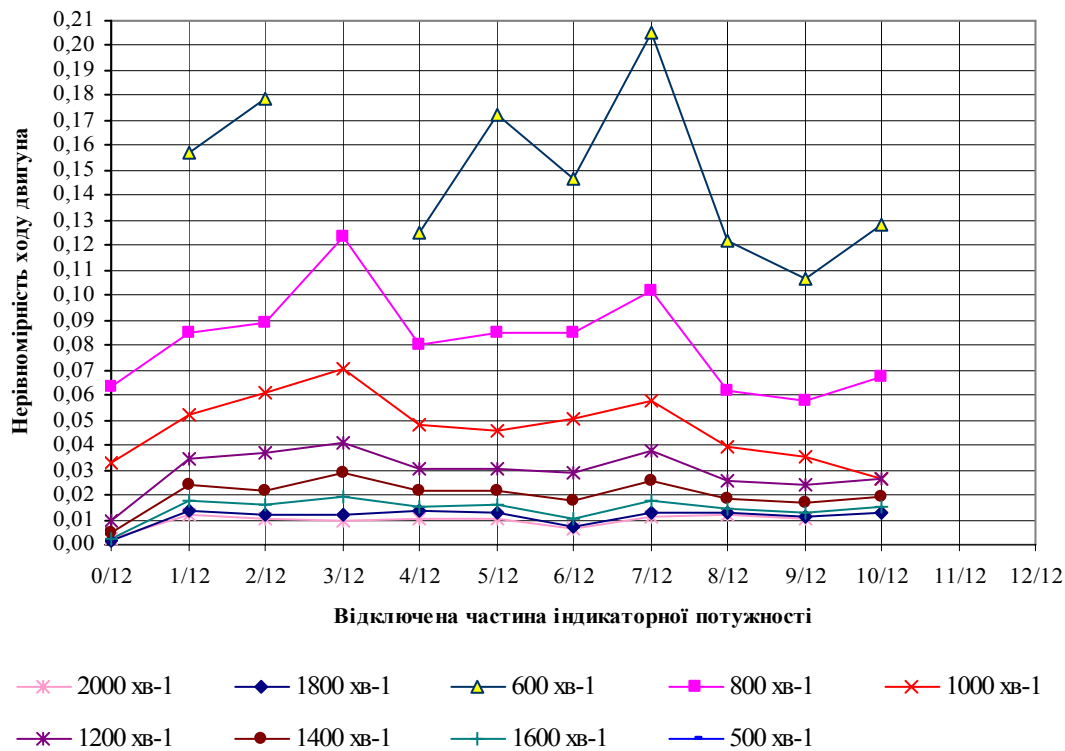


Рис. 2. Залежність нерівномірності ходу двигуна δ від кількості відключених циклів і частоти обертання

Це можна пояснити цілим рядом причин. Наприклад, міжциліндовою і міжцикловою нестабільністю максимального тиску P_z , який впливає на нерівномірність δ , значним погіршенням робочого процесу, незадовільною роботою паливної апаратури та іншими причинами. Але з урахуванням моменту інерції засобу, на якому встановлюватиметься

дизельний ДРЦ, наприклад автомобіля, нерівномірність ходу двигуна і його крутного моменту різко зменшується, комфортність останнього при цьому порушуватиметься незначно.

Висновки і перспективи подальших розвідок у даному напрямку

1. Проведені на оригінальній математичній моделі дослідження нерівномірності ходу 6-циліндрового рядного дизеля залежно від частоти обертання і кількості відключених циклів показали, що при збільшенні останніх нерівномірність ходу збільшується, досягаючи найбільших значень при 3/12, 5/12 і особливо 7/12 відключень індикаторної потужності N_i .
2. Істотно на нерівномірність ходу двигуна впливає частота обертання, зменшення якої викликає збільшення нерівномірності. Найбільша нерівномірність кутової швидкості колінчастого валу $\delta = 0,20502$ має місце на режимі 7/12 відключень при $n = 600$ об/хв, що істотно вище, ніж без відключення циклів, але майже в 2 рази нижче ніж в 4-циліндровому дизельному ДРЦ, для якого аналогічний показник становить 0,3874;
3. Нерівномірність крутного моменту двигуна при роботі на режимі мінімального холостого ходу ($n = 600$ об/хв; 10/12 відключень) становить $\mu = 29,28$.
4. В даному дослідженні наведені результати для випадку застосування методу регулювання потужності відключенням окремих робочих циклів шляхом припинення лише подачі палива (без впливу на процеси газообміну). Для випадку синхронного припинення процесів газообміну при відключенні циклів доцільно виконати аналогічні дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т. 3. Комп'ютерні системи керування ДВЗ / За ред. проф. А.П. Марченка та засл. діяча науки України проф. А.Ф. Шеховцова. – Харків: Прапор, 2004. – 344 с.
 2. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулём», 2004. – 480 с.
 3. Пат. 79657 С2 Україна, (2006) F 02 D 17/00, F 02 D 13/06. Система автоматичного регулювання потужності багатociліндрового дизеля / А.З. Філіппов, О.А. Бешун (Україна). – № а 2005 06190. Заявл. 22.06.2005.; Опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10.
 4. Anatoliy Filippov, Aleksey Beshun, Yuriy Gerasimchuk, Olga Gluhovska, Ludmila Evchenko. Динамика дизельного ДРЦ (двигателя с регулированием мощности отключением отдельных рабочих циклов) // MOTROL: Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. – Lublin. – 2005, Т. 7. – С. 83–91.
- Філіппов А.З., Бешун О.А., Топчій С.І. Математична модель динаміки багатociліндрового дизельного двигуна з регулюванням потужності відключенням окремих робочих циклів (ДРЦ) // Науковий вісник Нац. аграрн. ун-ту. – Київ. – 2005. – Вип. 80. – С. 317–325.