

О. О. Осетров, Є. І. Жуковський

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ТА ПОСЛІДОВНОСТІ ВІДКЛЮЧЕННЯ ЦИЛІНДРІВ СТАЦІОНАРНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ

Стационарні дизель-генератори працюють в широкому діапазоні навантажень при практично постійній частоті обертання колінчастого вала. На режимах низьких навантажень їх ефективність зменшується внаслідок погіршення якості сумішоутворення в циліндрі, зменшення тиску та температури в камері згоряння і, як наслідок, зменшення індикаторного та ефективного ККД. Покращити показники дизеля на цих режимах можливо застосуванням відключення циліндрів або циклів. На сьогодні запропоновано ряд систем відключення циліндрів, що застосовуються на серійних двигунах. Проте в літературі недостатньо розкрито методологія визначення кількості та послідовності відключення циліндрів залежно від режимів роботи двигуна. Відсутній єдиний підхід до використання критеріїв ефективності відключення циліндрів, критеріальних та параметричних обмежень. В роботі представлений розрахунково-експериментальний метод, що базується на забезпеченні максимального індикаторного ККД двигуна з урахуванням комплексу обмежувальних параметрів. З використанням цього методу запропоновано дві схеми відключення циліндрів стаціонарного дизель-генератора 7Д100, у яких кількість відключених циліндрів визначається за потужністю двигуна, а послідовність відключення циліндрів встановлюється, виходячи із забезпечення мінімального ступеня нерівномірності обертання колінчастого вала двигуна. Згідно першої схеми в діапазоні ефективної потужності 0-280 кВт двигун працює на п'яти циліндрах, а в діапазоні 280-1100 кВт – на десяти циліндрах. Згідно другої схеми в діапазоні ефективної потужності 0-500 кВт дизель працює на п'яти-дев'яти циліндрах, а в діапазоні 500-1100 кВт – на десяти циліндрах. Відключення циліндрів за першою схемою більш просте в реалізації та забезпечує кращу рівномірність обертання колінчастого вала та крутного моменту двигуна. Відключення циліндрів за другою схемою дозволяє досягти кращої паливної економічності та меншої механічної та термічної навантаженості деталей циліндро-поршневої групи.

Ключові слова: дизель генератор; відключення циліндрів; робочий процес; математичне моделювання; індикаторний ККД; нерівномірність обертання колінчастого вала.

Вступ

В Україні накопичений багаторічний досвід виробництва та надійної експлуатації стаціонарних дизель-генераторів 7Д100, які використовуються на автономних електростанціях спеціального призначення для цивільних і військових об'єктів. Ці дизелі мають високі показники паливної економічності на режимах високих і середніх навантажень. Проте при роботі дизелів на режимах малих навантажень і холостого ходу внаслідок зменшення циклових подач палива відбувається погіршення якості сумішоутворення в циліндрі, що призводить до погіршення якості згоряння і показників двигунів.

Одним з ефективних напрямів покращення показників дизельних двигунів на режимах малих навантажень є відключення циліндрів або циклів. Відключення окремих циліндрів дозволяє збільшити циклову подачу до активних циліндрів, покращити якість сумішоутворення і згоряння палива. Підвищенню індикаторного ККД сприяє зростання максимального тиску та температури в активних циліндрах, що забезпечує зростання термічного ККД циклу. До позитивних ефектів відключення циліндрів відносять також можливість зменшення частоти обертання холостого ходу.

Важливим етапом комплексної реалізації відключення циліндрів на двигуні є обґрунтування

вибору кількості та послідовності відключення циліндрів залежно від режиму роботи двигуна.

Аналіз попередніх досліджень

Відключення циліндрів розглядається як ефективний захід покращення показників дизельних двигунів на режимах малих навантажень і холостого ходу [2-12]. Означений спосіб дозволяє забезпечити незначну зміну максимального тиску згоряння, індикаторного ККД, якості та повноти згоряння в активних циліндрах в усьому діапазоні робочих навантажень.

На цей час можна виділити ряд підходів щодо створення систем відключення циліндрів або циклів – відключення окремих циліндрів або груп циліндрів [6-8, 10], створення «розтягнутого» порядку роботи відключенням окремих циклів [2, 4, 5, 9, 11, 12], забезпечення часткового режиму шляхом розгонів-вигибів поблизу заданої частоти обертання [3] та інш.

На наш погляд, найбільш засвоєним у виробництві і експлуатації є відключення окремих циліндрів або груп циліндрів. В цьому випадку можливе точне підтримання заданого крутного моменту, простота його реалізації на двигуні. Вибором числа циліндрів, що відключаються, можна забезпечити мінімальний ступінь нерівномірності колінчастого вала. Особливо ефективно використання цього способу в багатциліндрових двигунах, що дозволяє

зменшити стрибки потужності при відключенні циліндрів або груп циліндрів.

Незважаючи на широке використання методу відключення окремих циліндрів (або груп циліндрів) на сучасних двигунах, на сьогодні в літературі бракує інформації щодо методів визначення кількості та послідовності відключення циліндрів залежно від режимів роботи двигунів. Запропоновані різні критерії та обмеження для встановлення кількості активних і відключених циліндрів: годинна [3] та питома ефективна витрата палива [4, 8], індикаторний ККД [7], екологічні показники двигуна [6], вібрації та шум [6, 11, 12] тощо. Залишаються питання щодо вибору раціональної схеми відключення циліндрів, діапазону частоти обертання та навантаження при здійсненні відключення циліндрів.

Очевидно, що створення схем відключення циліндрів визначається конструктивними особливостями та умовами роботи конкретного типу двигуна. На сьогодні в літературі представлені чисельні дослідження для двигунів автомобільного призначення [2-13]. Проте майже відсутня інформація щодо застосування методів відключення циліндрів на багатциліндрових двигунах великої розмірності, зокрема стаціонарних дизель-генераторів змінного струму 7Д100

Вказане визначає актуальність теми дослідження.

Метою роботи є визначення кількості та послідовності відключення циліндрів стаціонарного дизель-генератора 7Д100 на експлуатаційних режимах його роботи з використанням комплексу критеріїв ефективності та обмежень.

Особливості використаних математичних моделей.

Для дослідження впливу відключення циліндрів на показники двигуна 7Д100 розроблено комплекс математичних моделей. Основу розрахунку робочого процесу двигуна складає квазістаціонарна термодинамічна модель, що базується на рівняннях першого принципу термодинаміки, закону збереження маси і рівняння стану. Математична модель робочого процесу двигуна доповнена залежностями для розрахунку кінематики і динаміки кривошипно-шатунного механізму двигуна.

Комплекс математичних моделей реалізовано в програмному середовищі MATLAB. Програма дозволяє за заданими вихідними даними визначати параметри робочих процесів, кінематики і динаміки кривошипно-шатунного механізму двотактних дизельних і газових двигунів з щільною продувкою і відключеними циліндрами [13].

Адекватність математичної моделі робочого

процесу перевірена при розрахунках для газових двигунів типу ГД100 [13].

Вплив відключення циліндрів на показники робочого процесу двигуна 7Д100

Базовий двигун працює на різних режимах навантажувальної характеристики з ефективною потужністю N_e від нуля до 1100 кВт та частотою обертання n 750 хв⁻¹.

Основні результати розрахунку навантажувальної характеристики двигуна при відключенні від 1 до 6 циліндрів наведено на рисунку 1.

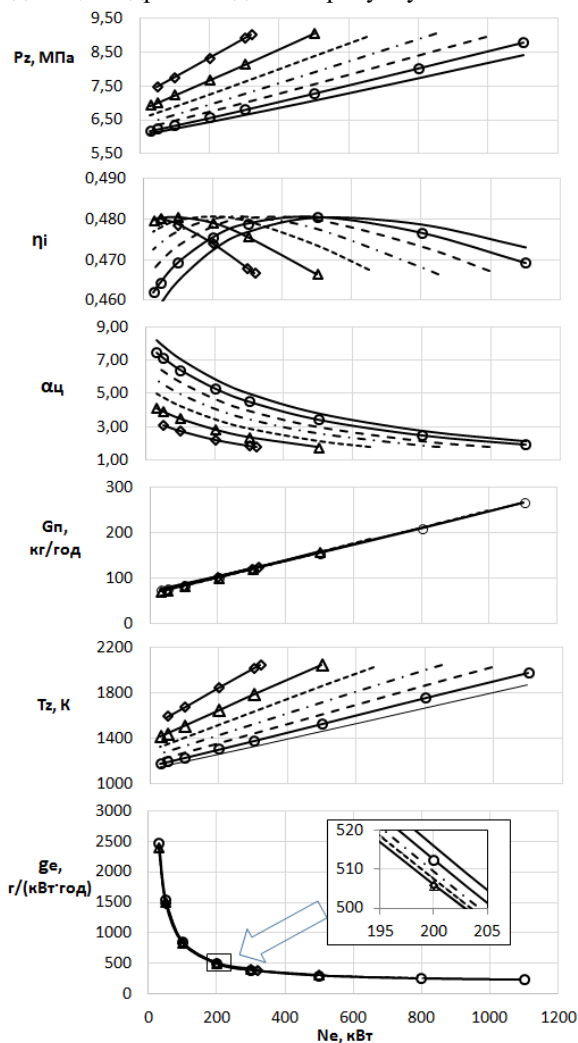


Рис. 1. Навантажувальні характеристики двигуна 7Д100 ($n=750$ хв⁻¹) при роботі на: — — — — 10 циліндрах; —●— 9 циліндрах; - - - - 8 циліндрах; — . — 7 циліндрах; 6 циліндрах; —▲— 5 циліндрах; —◆— 4 циліндрах

З рис. 1 видно, що відключення циліндрів забезпечує покращення індикаторного ККД η_i двигуна на режимах малих і середніх навантажень в діапазоні зміни N_e від 0 до 500 кВт. Так, наприклад на режимі роботи з $N_e=200$ кВт η_i базового двигуна

складає 47,2%, а двигуна із відключенням чотирьох і трьох циліндрів – відповідно, 48,0 і 48,1%.

Покращення індикаторного процесу при відключенні раціональної кількості циліндрів призводить до зменшення годинної G_n та питомої ефективної g_e витрат палива порівняно з роботою базового двигуна. Наприклад, на режимі з $N_e = 200$ кВт g_e базового двигуна становить 516 г/(кВт·год), а двигуна із відключенням трьох і чотирьох циліндрів – відповідно, 508 і 507 г/(кВт·год).

Аналіз даних рис. 1 показує, що при відключенні циліндрів відбувається збагачення паливоповітряної суміші і, відповідно, зменшення коефіцієнту надлишку повітря $\alpha_{\text{ц}}$ в активних циліндрах. На базовому двигуні при зменшенні навантаження $\alpha_{\text{ц}}$ зростає до 8,2 при $N_e = 30$ кВт. При відключенні 3-х циліндрів $\alpha_{\text{ц}}$ зменшується до 5,84, а при відключенні п'яти циліндрів – до 4,15 за тієї ж потужності.

Зменшення коефіцієнту надлишку повітря в активних циліндрах призводить до зростання максимального тиску і температури в камері згоряння. Так, на режимі з $N_e = 200$ кВт максимальний тиск P_z зростає з 6,43 МПа для базового двигуна до 8,32 МПа при відключених шести циліндрах. Максимальна температура T_z при цьому збільшується з 1261 К до 1841 К. Зростання тиску і температури є однією з причин покращення індикаторного процесу двигуна при відключенні циліндрів.

Таким чином, аналіз результатів розрахунку робочого процесу двигуна показав, що відключен-

ня циліндрів призводить до покращення індикаторних та ефективних показників двигуна.

Вплив відключення циліндрів на нерівномірність крутного моменту та кутової швидкості колінчастого вала

В роботах [3, 4, 6, 11, 12] показано, що відключення циліндрів призводить до збільшення інтервалу між спалахами в робочих циліндрах. Як результат – збільшується нерівномірність крутного моменту і кутової швидкості колінчастого вала двигуна. В двигунах-генераторах струму питання забезпечення заданої нерівномірності обертання колінчастого вала є надзвичайно важливим.

Вібрації, що виникають при відключенні циліндрів, у першу чергу сприймаються елементами нижнього кривошипно-шатунного механізму, через який передається близько 70% ефективної потужності двигуна. Таким чином, основну увагу в роботі приділено саме цьому КШМ.

Розрахунок сил і крутного моменту у відсіку двигуна, а також сумарного крутного моменту на фланці колінчастого вала виконано за методикою, наведеною в роботі [14].

Вплив навантаження на нерівномірність крутного моменту $\delta_{\text{Мкр}}$ та кутової швидкості колінчастого вала δ двигуна 7Д100 при відключенні циліндрів наведений на рис. 2. При розрахунках для певної кількості циліндрів обиралися така послідовність відключення окремих циліндрів в порядку роботи циліндрів двигуна (ПРЦД), що забезпечувала мінімальне значення δ (див. табл. 1).

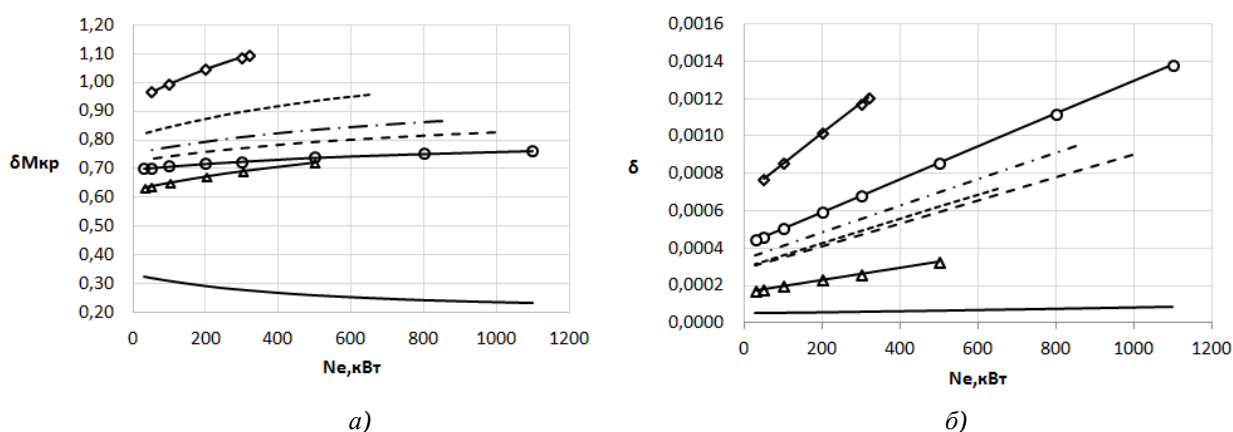


Рис. 2. Нерівномірність крутного моменту (а) та кутової швидкості колінчастого вала (б) двигуна на режимах навантажувальної характеристики при роботі на: — — 10 циліндрах; —○— 9 циліндрах; - - - 8 циліндрах; — · — 7 циліндрах; 6 циліндрах; —▲— 5 циліндрах; —◆— 4 циліндрах

З рис. 2 видно, що відключення циліндрів призводить до суттєвого збільшення нерівномірності крутного моменту двигуна. Найбільше зростання

$\delta_{\text{Мкр}}$ спостерігається при відключенні шести і чотирьох циліндрів (відповідно, до 3,0 та 3,75 разів), найменше - при відключенні одного і п'яти цилін-

рів (відповідно, до 2,7 та 2,5 разів).

Нерівномірність обертання колінчастого вала зростає у ще більшому ступені ніж нерівномірність крутного моменту. Максимальне збільшення δ відбувається при відключенні одного і шести циліндрів (відповідно, до 17 і 18 разів), мінімальне – при відключенні п'яти циліндрів – до 4,75 разів.

Слід зазначити, що незважаючи на значне зростання нерівномірності обертання при відключенні циліндрів, цей параметр не перевищує допустимих значень для двигунів – генераторів змінного струму $[\delta]=0,005$. Причина незначної нерівномірності ходу двигуна при відключенні циліндрів полягає у наявності масивного ротора генератора струму (з моментом інерції 400 кг·см) та великій кількості робочих циліндрів.

Таким чином, динамічний розрахунок КШМ двигуна показав, що найбільш сприятливим, з точки зору, найменшого зростання нерівномірності крутного моменту і кутової швидкості обертання колінчастого вала, є відключення п'яти циліндрів. Однак і при застосуванні інших варіантів відключення циліндрів нерівномірність δ не перевищує допустимих значень для генераторів змінного струму $[\delta]=0,005$. Отже відключення від чотирьох до шести циліндрів в заданих межах може розглядатися як ефективний захід регулювання потужності двигуна 7Д100.

Визначення кількості та послідовності відключення циліндрів на режимах навантажувальної характеристики двигуна 7Д100.

Аналіз даних рис. 1 дозволив визначити основний критерій вибору кількості циліндрів залежно від режиму роботи двигуна. Найбільш чітко переваги відключення циліндрів характеризує індикаторний ККД двигуна η_i . Цей параметр має екстремум при роботі на постійній кількості циліндрів. Тобто можна визначити режим, на якому індикаторний ККД приймає максимальне значення.

З іншої сторони на певному навантажувальному режимі існує раціональна кількість відключених циліндрів, що забезпечує максимальні значення η_i двигуна. При відключенні більшої або меншої кількості циліндрів відносно раціональної відбувається погіршення індикаторного процесу. Таким чином, цей параметр в роботі прийнято в якості основного критерію (цільової функції), що визначає кількість активних і відключених циліндрів.

При виборі кількості відключених циліндрів слід враховувати ряд обмежень.

Для забезпечення надійної роботи двигуна слід обмежувати максимальні механічні і теплові напруги в двигуні. Критерієм, що опосередковано

характеризує навантаження на деталі двигуна, є максимальний тиск згоряння. В роботі згідно рекомендацій виробника двигунів 7Д100 приймалося, що максимальний тиск згоряння не повинен перевищувати 8,8 МПа.

Забезпечення вказаної вимоги призводить до обмеження максимальної потужності при відключенні певної кількості циліндрів. Наприклад, при відключенні двох циліндрів максимальна потужність двигуна складає 995 кВт, трьох циліндрів – 850 кВт, чотирьох циліндрів – 650 кВт, п'яти циліндрів – 500 кВт, шести циліндрів – 320 кВт.

З екологічних міркувань (підвищені викиди сажі, незгорілих вуглеводнів та твердих частинок) доцільно обмежувати мінімальні значення коефіцієнту надлишку повітря в циліндрі α_{ci} , наприклад, величиною 1,5.

Важливим обмеженням для стаціонарного двигуна для генератора струму є необхідність забезпечення ступеня нерівномірності кутової швидкості колінчастого вала δ не більше 0,005. Збільшення ступеня нерівномірності вище цього значення призводить до зростання вібрацій корпусу двигуна, а також пульсації напруги, що виробляється генератором змінного струму. Динамічний розрахунок показав що для двигуна 7Д100 ця проблема не є актуальною, оскільки навіть при виключенні 6 циліндрів ступінь нерівномірності обертання залишається більше ніж в 4 рази меншим за гранично допустимий.

Аналіз навантажувальної характеристики з урахуванням обраного критерію та обмежень дозволив запропонувати дві схеми відключення циліндрів, що представлені в таблиці 1.

Схема 1 призначена забезпечити найкращу нерівномірність кутової швидкості обертання колінчастого вала двигуна при одночасному підвищенні індикаторного ККД на режимах малих навантажень. Ця схема відрізняється простотою реалізації і конструктивного забезпечення.

Згідно схеми 1 в діапазоні ефективної потужності 1100–280 кВт двигун працює на десяти циліндрах, а в діапазоні ефективної потужності 0–280 кВт – на п'яти циліндрах (рисунк 3).

При відключенні п'яти циліндрів, активні циліндри в порядку роботи працюють через один, чим досягається найкраща нерівномірність кутової швидкості обертання колінчастого вала серед інших варіантів відключення циліндрів. При цьому реалізується змішане регулювання потужності – якісне зміною подачі палива до циліндрів і зміною активного робочого об'єму при припиненні подачі палива до групи циліндрів.

Таблиця 1. Схеми відключення циліндрів двигуна

Діапазон потужності	Число відключених циліндрів	Число активних циліндрів	Номери циліндрів у порядку їх роботи									
			1	6	10	2	4	9	5	3	7	8
Схема 1												
280-1100 кВт	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0-280 кВт	5	5	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
Схема 2												
500-1100 кВт	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
425-500 кВт	1	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
325-425 кВт	2	8	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
230-325 кВт	3	7	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
140-230 кВт	4	6	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
0-140 кВт	5	5	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Примітка: *0- активний циліндр; 1 – відключений циліндр

З рис. 3 видно, що при відключенні одночасно п'яти циліндрів суттєво зростає індикаторний ККД порівняно з базовим двигуном. Наприклад за потужності 100 кВт індикаторний ККД збільшується з 0,465 до 0,48. Як наслідок, питома ефективна витрата палива збільшується з 838 до 865 г/(кВт·год).

Слід однак зазначити, що в момент виключення п'яти циліндрів при 280 кВт різко зменшується коефіцієнт надлишку повітря α (з 5,14 до 2,46), зростають максимальний тиск P_z (з 6,6 до 8,0 МПа) і температура T_z (з 1314 до 1753 К) в циліндрі, а також нерівномірність кутової швидкості обертання δ (з $6,0 \cdot 10^{-5}$ до $2,6 \cdot 10^{-4}$).

Реалізація схеми 2 дозволяє досягти кращих значень індикаторного ККД, паливної економічності, екологічних показників двигуна, зменшення навантаженості його деталей порівняно зі схемою 1. Згідно цієї схеми при зменшенні потужності нижче 500 кВт відбувається послідовне відключення від одного до п'яти циліндрів.

З рис. 3 видно, що використання схеми 2 забезпечує індикаторний ККД на максимальному рівні (0,48) при зниженні потужності менше 500 кВт. При цьому максимальний тиск згоряння не перевищує 7,4 МПа, а коефіцієнт надлишку повітря не опускається нижче за 3,2. З огляду на менш суттєву зміну показників двигуна при виключенні циліндрів за схемою 2 порівняно з роботою двигуна за схемою 1 можна вважати, що тривалість перехідного процесу та навантаження на деталі двигуна також будуть меншими.

Недоліком реалізації другої схеми є значне зростання нерівномірності обертання колінчастого вала δ . Цей параметр залежить від кількості відключених циліндрів і зростає максимально в 12 разів з $6,7 \cdot 10^{-5}$ до $8,6 \cdot 10^{-4}$ за ефективної потужності 500 кВт. Однак при цьому значення δ є в шість разів

меншими за допустимі значення для генераторів змінного струму ($[\delta]=0,005$).

Перспективи подальших досліджень

Наведені вище схеми забезпечують максимальний позитивний ефект від відключення циліндрів. Проте на стадії розробки алгоритмів керування відключенням циліндрів слід врахувати наступне:

- необхідність забезпечення, так званого, «гістерезису» при роботі двигуна в зоні потужності, за якої відбувається відключення/включення циліндрів. Якщо не враховувати це обмеження, то на певних режимах роботи двигуна при незначних коливаннях навантаження на двигун буде відбуватися постійне відключення та включення циліндрів і, як результат, «смикання» двигуна. Для забезпечення виконання цієї рекомендації виключення циліндрів здійснюється при досягненні меншої (або більшої) потужності ніж включення циліндрів;

- різка зміна теплового і напруженого стану в активних циліндрах після відключення інших циліндрів двигуна. Для запобігання закидів тиску і температури в циліндрі, в перехідний період слід змінювати кут випередження впорскування і циклову подачу палива за певним алгоритмом;

- відключення циліндрів призводить до зменшення періодів між спалахами в циліндрах, що може призвести до виникнення резонансних коливань деталей двигуна на деяких режимах його роботи. В цьому випадку необхідно переходити на роботу з іншим числом активних циліндрів;

- з метою швидкого прогріву двигуна, а також зменшення механічних втрат запуск та зупинку двигуна слід проводити на усіх активних циліндрах. В цьому випадку для покращення робочого процесу доцільно відключати не окремі циліндри, а ряд паливних насосів або форсунок (подача палива здійснюється двома паливними насосами на цилін-

ндр). Як обмежувальний параметр для відключення циліндрів слід використовувати мінімальне значення температури охолоджуючої рідини.

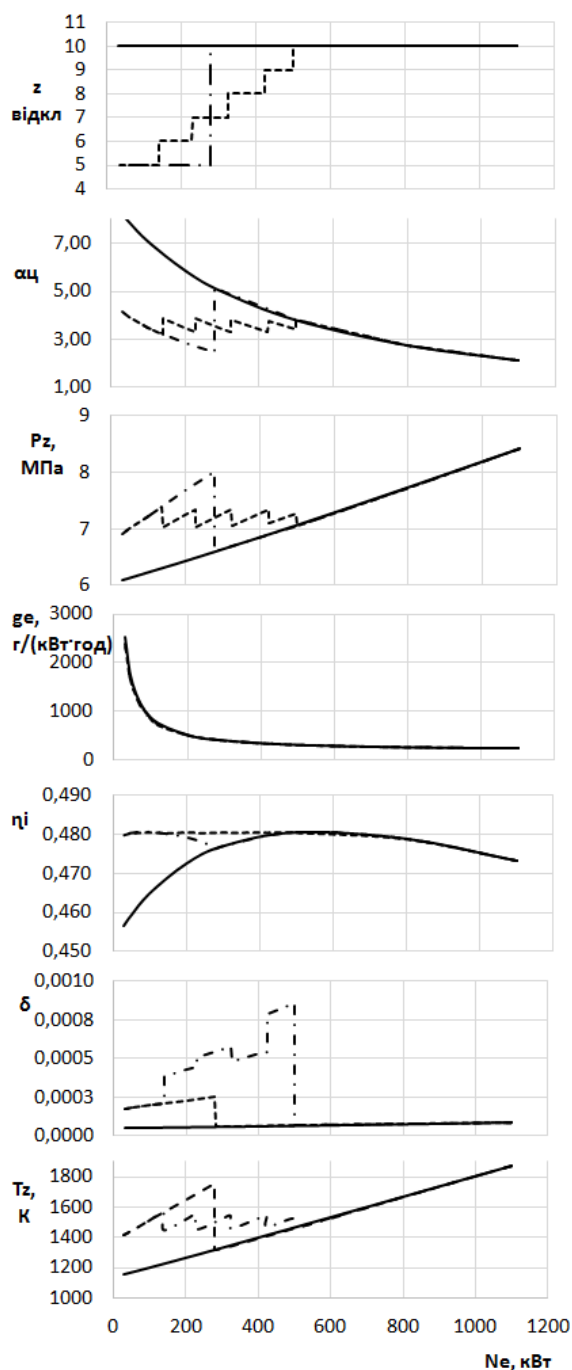


Рис. 3. Навантажувальна характеристика двигуна 1ГД100М: — базовий двигун; — . — двигун із системою відключення циліндрів за схемою 1; - - - двигун із системою відключення циліндрів за схемою 2

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці на базі представлених схем алгоритмів керування відключенням циліндрів з урахуванням наведених вище рекомендацій.

Висновки

В роботі визначено кількість та послідовність відключення циліндрів стаціонарного дизель-генератора 7Д100 в діапазоні його експлуатаційних режимів. При цьому вирішені задачі:

1. Розраховано навантажувальні характеристики двигуна при роботі на різній кількості циліндрів. Показано, що при відключенні циліндрів на режимах середніх і малих навантажень покращуються індикаторний та ефективний ККД двигуна, зменшується питома ефективна і годинна витрата палива. Однак при цьому зменшується коефіцієнт надлишку повітря, зростають максимальні тиск і температура в активних циліндрах.

2. За результатами динамічного розрахунку визначено вплив кількості відключених циліндрів на нерівномірність крутного моменту $\delta_{Мкр}$ і кутової швидкості колінчастого вала δ . Показано, що $\delta_{Мкр}$ і δ зростають при цьому до 3,75 і 18 разів, відповідно. Найбільш суттєво нерівномірність кутової швидкості колінчастого вала зростає при відключенні одного і шести циліндрів, найменше – при відключенні п'яти циліндрів. Незважаючи на зазначене зростання нерівномірності обертання при відключенні циліндрів, цей параметр не перевищує допустимих значень для двигунів-генераторів змінного струму ($[\delta]=0,005$).

3. Запропоновано комплекс критеріїв, за якими визначається кількість відключених циліндрів: індикаторний ККД двигуна, максимальний тиск згоряння, коефіцієнт надлишку повітря, нерівномірність кутової швидкості обертання колінчастого вала.

4. Запропоновано дві схеми відключення циліндрів стаціонарного дизель-генератора 7Д100. Відповідно до першої схеми в діапазоні ефективної потужності 0-280 кВт двигун працює на п'яти циліндрах, а в діапазоні 280–1100кВт – на десяти циліндрах. Згідно другої схеми в діапазоні ефективної потужності 0–500 кВт дизель працює на п'яти-дев'яти циліндрах, а в діапазоні 500-1100 кВт – на десяти циліндрах. Кількість відключених циліндрів визначається за потужністю двигуна. Відключення циліндрів за першою схемою більш просте в реалізації та забезпечує кращу рівномірність обертання колінчастого вала та крутного моменту двигуна. Відключення циліндрів за другою схемою дозволяє досягти кращої паливної економічності, меншої механічної та термічної навантаженості деталей циліндро-поршневої групи.

Список літератури:

1. Генкин К. И. Газовые двигатели ГД100 и агрегаты на их базе / К. И. Генкин, Д. Т. Аксенов, Б. Н. Струнге. – Л. : Недра, 1970. – 328 с.
2. Бердников А. А. Повышение эко-

номических показателей двигателей внутреннего сгорания путем отключения части цилиндров / А. А. Бердников, С. Р. Мингазов, А. А. Жуков // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 1. – С. 12-16. 3. Страинов С.В. Регулирование дизеля 6С11/12,5 изменением числа работающих цилиндров или циклов : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.04.02 «Тепловые двигатели» / Страинов Станислав Викторович ; Российский университет дружбы народов. – М., 2012. – 18 с. 4. Wilcutts M. Design and Benefits of Dynamic Skip Fire Strategies for Cylinder Deactivated Engines / M. Wilcutts, J. Switkes, M. Shost, A. Tripathi // SAE Int. J. Engines. – 2013. – Vol. 6, Issue 1. – P. 278–289. 5. Грабовский А. А. Способ повышения экономических и экологических показателей поршневых двигателей / А. А. Грабовский, И. И. Артемов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 88-93. 6. Peters. G. Cylinder deactivation on 4 cylinder engines: a torsional vibration analysis (DCT rapporten; Vol. 2007.011). – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven – 75 p. 7. Медведев А.Н. Повышение топливной экономичности автомобильных дизелей отключением части цилиндров: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.04.02 «Тепловые двигатели» / Медведев Алексей Николаевич ; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2008. – 16 с. 8. Kuruppu C. Investigation of Cylinder Deactivation and Variable Valve Actuation on Gasoline Engine Performance / C. Kuruppu, A. Pesiridis, S. Rajoo // SAE Technical Paper. – 2014. – 2014-01-1170. – 10 p. 9. Eisazadeh-Far K. Fuel Economy Gains through Dynamic-Skip-Fire in Spark Ignition Engines / K. Eisazadeh-Far, M. Younkin // SAE Technical Paper. – 2016. – 2016-01-0672. DOI:10.4271/2016-01-0672. 10. Lee N. Estimation of Fuel Economy Improvement in Gasoline Vehicle Using Cylinder Deactivation / N. Lee, J. Park, J. Lee, K. Park, M. Choi, W. Kim // Energies. – 2018. – 11, 3084. DOI: 10.3390/en1113084. 11. Chen S. Misfire Detection in a Dynamic Skip Fire Engine / S. Chen, L. Chien, M. Nagashima, J. Van Ess // SAE Int. J. Engines. – 2015. – vol. 8, issue 2. 12. Бешун О. А. Дослідження динаміки дизельного двигуна з регулюванням потужності відключенням циклів і їх перспектива / О. А. Бешун, М. А. Лях, О. С. Дем'янюк // Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. – 2010. – №24. – С. 6-9. 13. Кравченко С. С. Конвертація стаціонарного двигуна ГД100 для роботи на низькокалорійних газових паливах: дисертація. Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» Кравченко Сергій Сергійович; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2015. – 20 с. 14. Автомобільні двигуни: Підруч. для студентів спец. «Автомобілі та автомобільне господарство» вищ. навч. закладів Ф. І. Абра-

мчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, І. І. Тимченко. – К.: Арістей, 2004. – 438 с.

Bibliography (transliterated):

1. Genkin, K. I., Aksenov, D. T., Strunge, B. N. (1970), Gas engines GD100 and units based on them [Gazovyye dvigateli GD100 i agregaty na ikh baze], Leningrad, Nedra, 328 p. 2. Berdnikov, A. A., Mingazov, S. R., Zhukov, A. A. (2017), "Improving the economic performance of internal combustion engines by disabling part of the cylinders" ["Povysheniye ekonomicheskikh pokazateley dvigateley vnutrennego sgoraniya putem otklyucheniya chasti tsilindrov"], *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*, № 1, pp. 12-16. 3. Strashnov, S.V. Regulation of diesel 6С11 / 12,5 by changing the number of working cylinders or cycles: Author's thesis [Regulirovaniye dizelya 6С11/12.5 izmeneniyem chisla rabotayushchikh tsilindrov ili tsiklov: avtoref. dis. ... kand. techn. nauk], Moscow, 18 p. 4. Wilcutts, M., Switkes J., Shost, M., Tripathi, A.(2013), "Design and Benefits of Dynamic Skip Fire Strategies for Cylinder Deactivated Engines", *SAE Int. J. Engines*, – Vol. 6, Issue 1, pp. 278–289. DOI: 10.4271/2013-01-0359. 5. Grabovskiy, A. A., Artemov, I. I. (2012) "The way to improve the economic and environmental performance of piston engines" [Sposob povysheniya ekonomicheskikh i ekologicheskikh pokazateley porshnevikh dvigateley], *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, № 2, pp. 88-93. 6. Peters, G. (2007) "Cylinder deactivation on 4 cylinder engines: a torsional vibration analysis", *Technische Universiteit Eindhoven: DCT rapporten*. – Vol. 2007.011, Eindhoven, 75 p. 7. Medvedev, A.N. (2008), Improving the fuel economy of automotive diesel engines by deactivating part of the cylinders: Author's thesis [Povysheniye toplivnoy ekonomichnosti avto-mobilnykh dizel'ey otklyucheniym chasti tsilindrov: avtoref. dis. ... kand. techn. nauk], Chelyabinsk, 16 p. 8. Kuruppu, C, Pesiridis, A., Rajoo, S. (2014) "Investigation of Cylinder Deactivation and Variable Valve Actuation on Gasoline Engine Performance", *SAE Technical Paper*, 2014-01-1170. DOI:10.4271/2014-01-1170. 9. Eisazadeh-Far, K., Younkin M. (2016) "Fuel Economy Gains through Dynamic-Skip-Fire in Spark Ignition Engines", *SAE Technical Paper*, 2016-01-0672. DOI:10.4271/2016-01-0672. 10. Lee, N., Park, J., Lee, J., Park, K., Choi, M., Kim, W. (2018) "Estimation of Fuel Economy Improvement in Gasoline Vehicle Using Cylinder Deactivation", *Energies*, 11, 3084. DOI: 10.3390/en1113084. 11. Chen, S., Chien, L., Nagashima, M., Van Ess, J.(2015) "Misfire Detection in a Dynamic Skip Fire Engine", *SAE Int. J. Engines*, vol. 8, issue 2. DOI:10.4271/2015-01-0210. 12. Beshun, O. A., Lyakh M. A., Dem'yanyuk, O. S. (2010) "Research of dynamics of a diesel engine with regulation of power by disconnection of cycles and their prospect" ["Doslidzhennia dynamiky dyzelnoho dvyhuna z reguliuvanniam potuzhnosti vidkluchenniam tsykliiv i yikh perspektyva"], *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu im. Tarasa Shevchenka.*, №24, pp. 6-9. 13. Kravchenko S. S. (2015), Converting of stationary engine GD100 for work on low-calorie gas fuels: Author's thesis [Konvertatsiia statsionarnoho dvyhuna HD100 dlia roboty na nyzkokaloriinykh hazovyykh palyvakh: avtoref. dis. ... kand. techn. Nauk], Kharkiv, 20 p. 14. Abramchuk, F. I., Hutarevych, Yu. F., Dolhanov, K. Ye., Tymchenko, I. I. (2004) *Automobile engines: Textbook for students of the specialty "Automobile and automobile economy" of higher educational institutions [Avtomobilni dvyhuny: Pidruch. dlia studentiv spets. "Avto-mobili ta avtomobilne hospodarstvo" vyshch. navch. Zakladiv]*, Aristei, Kyiv, 438 p.

Надійшла до редакції 03.06.2019 р.

Осетров Александр Александрович – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: osetrov2010@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-5495-9626.

Жуковський Євген Ігорович – студент кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: zekajukovskiy@gmail.com.

РАЗРАБОТКА СХЕМ ОТКЛЮЧЕНИЯ ЦИЛИНДРОВ СТАЦИОНАРНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ

А.А. Осетров, Е. И. Жуковский

Стационарные дизель-генераторы работают в широком диапазоне нагрузок при практически постоянной частоте вращения коленчатого вала. На режимах низких нагрузок их эффективность уменьшается вследствие ухудшения качества смесеобразования в цилиндре, уменьшения давления и температуры в камере сгорания и, как следствие, снижения индикаторного и эффективного КПД. Улучшить показатели дизеля на этих режимах возможно применением отключения цилиндров или циклов. На сегодня предложен ряд систем отключения цилиндров, применяющихся на серийных двигателях. Однако в литературе недостаточно раскрыта методология определения количества и последовательности отключения цилиндров в зависимости от режимов работы двигателя. Отсутствует единый подход к использованию критериев эффективности отключения цилиндров, критериальных и параметрических ограничений. В работе представлен расчетно-экспериментальный метод, базирующийся на обеспечении максимального индикаторного КПД двигателя с учетом комплекса ограничительных параметров. С использованием этого метода предложены две схемы отключения цилиндров стационарного дизель-генератора 7Д100, в которых количество отключенных цилиндров определяется по мощности двигателя, а последовательность отключения цилиндров устанавливается исходя из обеспечения минимальной степени неравномерности вращения коленчатого вала двигателя. В первой схеме в диапазоне эффективной мощности 0-280 кВт двигатель работает на пяти цилиндрах, а в диапазоне 280-1100 кВт - на десяти цилиндрах. Согласно второй схеме в диапазоне эффективной мощности 0-500 кВт дизель работает на пяти-девяти цилиндрах, а в диапазоне 500-1100 кВт – на десяти цилиндрах. Отключение цилиндров по первой схеме более простое в реализации и обеспечивает лучшую равномерность вращения коленчатого вала и крутящего момента двигателя. Отключение цилиндров по второй схеме позволяет достичь лучшей топливной экономичности и меньшей механической и термической напряженности деталей цилиндро-поршневой группы.

Ключевые слова: дизель - генератор; отключение цилиндров; рабочий процесс; математическое моделирование; индикаторный КПД; неравномерность вращения коленчатого вала.

DEVELOPMENT OF THE DEACTIVATION SCHEMES OF THE CYLINDERS FOR THE STATIONARY DIESEL-GENERATOR ON OPERATIONAL MODES

O.O. Osetrov, Y. I. Zhukovskyi

Stationary diesel generators operate in a wide range of loads at almost constant frequency of rotation of the crankshaft. At low load conditions, their efficiency decreases due to deterioration of the mixture-formation in the cylinder, reduction of pressure and temperature in the combustion chamber and, as a result, decrease in indicator and effective cycle efficiency. It is possible to improve the performance of a diesel engine in these modes by turning off cylinders or cycles. At present, a number of cylinder shut-off systems have been proposed, which are used on serial engines. However, the literature does not sufficiently disclose the methodology for determining the number and sequence of cylinder deactivation, depending on the engine operating conditions. There is no unified approach to the use of criteria for cylinder shutdown efficiency, criterial and parametric constraints. The paper presents a computational-experimental method based on ensuring the maximum indicator engine efficiency with regard to a set of restrictive parameters. Using this method, two schemes for shutting down the cylinders of a 7D100 stationary diesel generator are proposed, in which the number of disabled cylinders is determined by engine power, and the cylinder shutdown sequence is determined on the basis of ensuring the minimum degree of the crankshaft cyclic speed fluctuation. In the first scheme, in the range of effective power of 0-280 kW, the engine operates on five cylinders, and in the range of 280-1100 kW - on ten cylinders. According to the second scheme, in the range of effective power of 0-500 kW, the diesel works on five to nine cylinders, and in the range of 500-1100 kW - on ten cylinders. Turning off the cylinders according to the first scheme is simpler to implement and provides better uniformity of the crankshaft cyclic speed and engine torque fluctuation. Switching off the cylinders according to the second scheme allows achieving better fuel efficiency and less mechanical and thermal tensions in the details of the cylinder-piston group.

Key words: diesel-generator; cylinder deactivation; the working process; mathematical modeling; indicator efficiency; cyclic speed fluctuation.