



Кафедра двигунів внутрішнього згоряння

**РОЗРАХУНКОВО –
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД
ПОБУДОВИ АЛГОРИТМУ
ВІДКЛЮЧЕННЯ ЦИЛІНДРІВ
СТАЦІОНАРНОГО ДИЗЕЛЬ-
ГЕНЕРАТОРА**

Доповідач:

студент, Жуковський Євгеній Ігорович

Керівник проекту:

доцент Осетров Олександр Олександрович

**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,**

Харків, Україна

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

Дизель-генератори 7Д100 виробництва ДП «Завод ім. Малишева» широко використовуються в Україні та країнах СНД на:

- міні-електростанціях;
- сільськогосподарських і промислових підприємствах;
- об'єктах комунального господарства;
- військових об'єктах тощо.

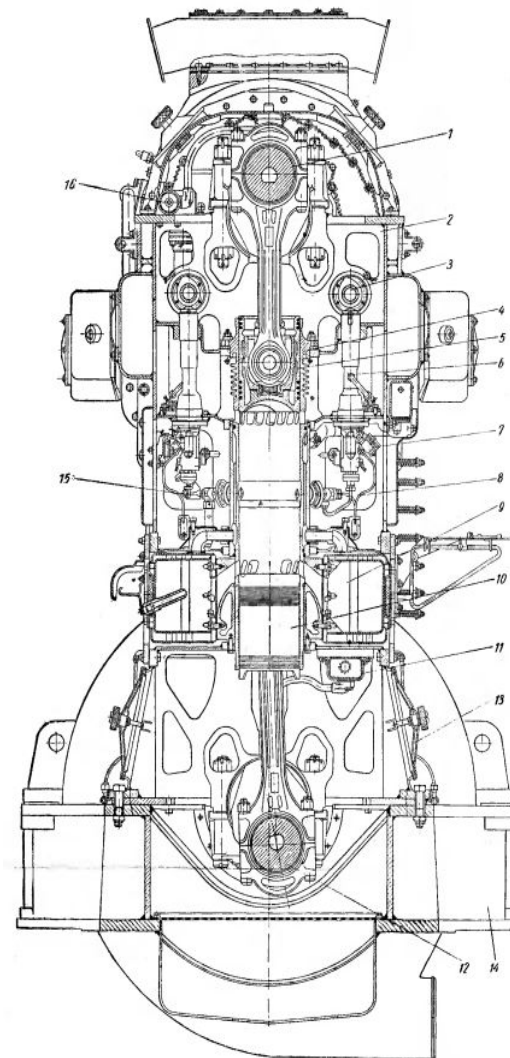
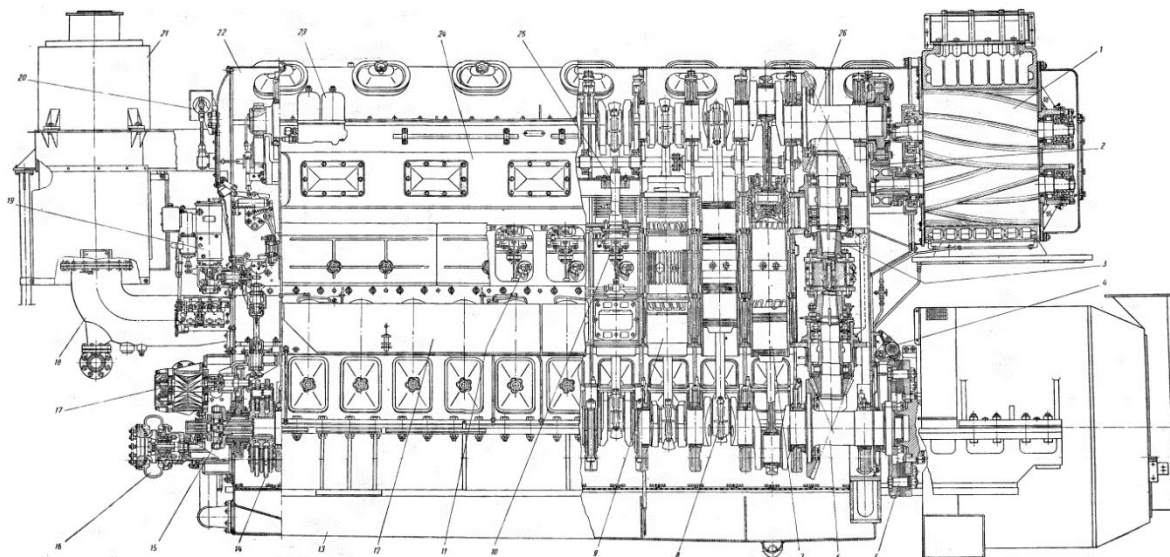
Ці двигуни є дефорсованою модифікацією тепловозних дизелів 2Д100.



(c) Ralph Mirebs

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

1 – верхній колінчастий вал; 2 – циліндровий блок;
3 – вал приводу паливних насосів; 4 – гільза циліндра;
5 – верхній поршень; 6 – паливний насос з штовхачем;
7 – керування подачею палива; 8 – форсунка;
9 – випускний колектор; 10 – нижній поршень;
11 – нижній масляний колектор; 12 – нижній колінчастий вал;
13 – бокова кришка; 14 – рама; 15 – запобіжний клапан і індикаторний кран;
16 – верхній масляний колектор.





АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ



4

Потужність, кВт	1100
Частота обертання колінчастого валу, хв⁻¹	750
Число циліндрів	10
Діаметр циліндра, мм	207
Хід поршня, мм	2x254
Ступінь стиску	15,1
Порядок роботи циліндрів	1-6-10-2-4-9-5-3-7-8
Середній ефективний тиск	5,32
Максимальний тиск згоряння, МПа	8,8
ККД:	
ефективний	0,36
індикаторний	0,45
механічний	0,8
Коефіцієнт надлишку повітря:	
сумарний	2,6
в циліндрі	1,9
Тиск наддуву, кг/см²	1,26
Питома витрата палива, г/кВт.ч	231⁺⁵
Питома витрата масла на угар, Г/кВт.ч	1,36
Питома витрата масла сумарн. Г/кВт.ч	4,08
Ресурс до першої переборки, час	6 000
Ресурс до капітального ремонту, час	40 000



АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ



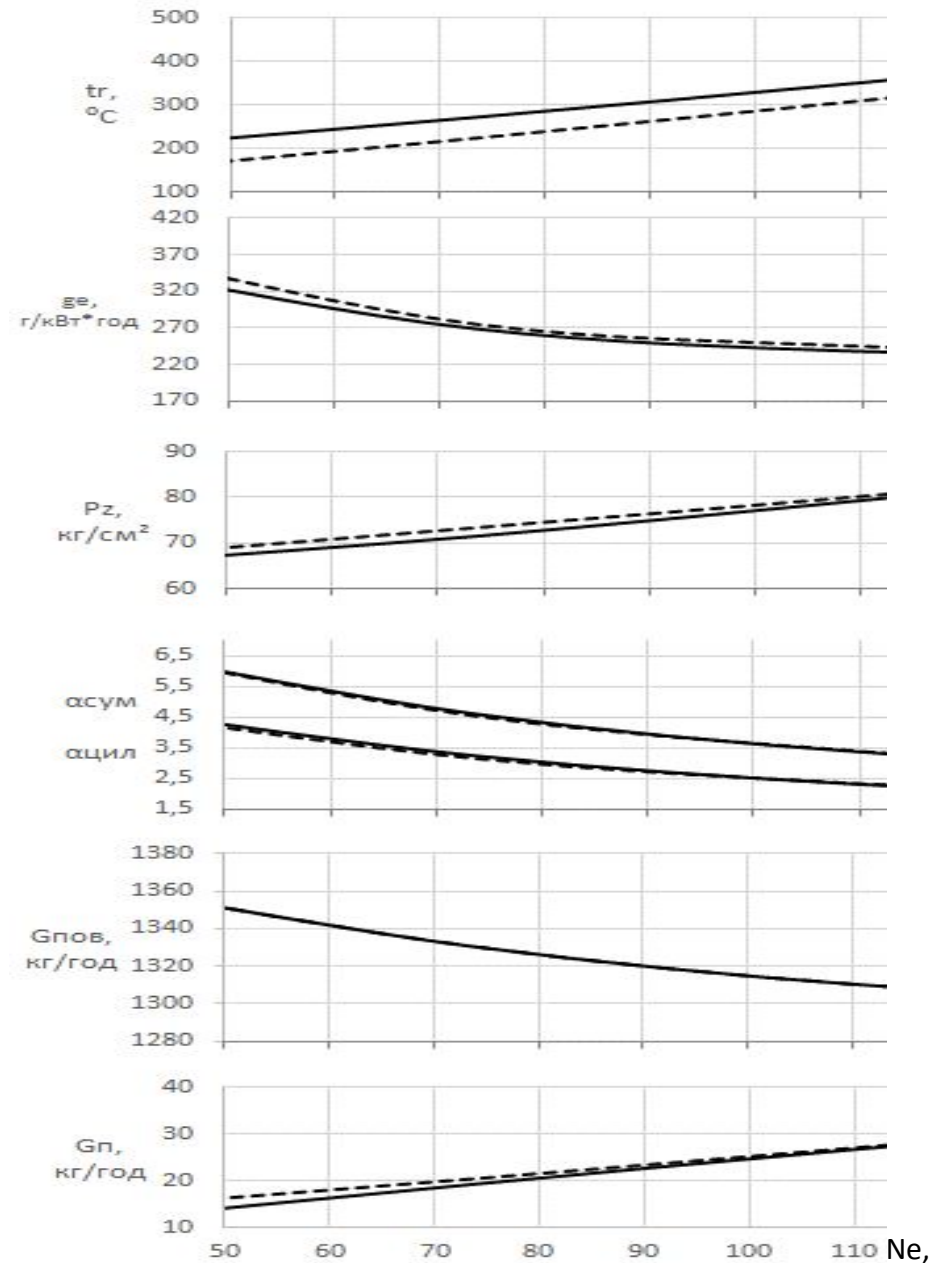
5

Навантажувальна характеристика дизеля 2Д100 (параметри відсіку) :

- результати експериментальних випробувань відсіку ОД100; - - - — результати розрахунку робочого процесу дизеля 2Д100.

При зменшенні навантаження на двигун внаслідок зменшення циклової подачі палива зростає коефіцієнт надлишку повітря в циліндрі з 1,9 на номінальному режимі до 4,0 на режимі 50% Ne (а на режимі 25% Ne - до 4,9). Максимальний тиск циклу зменшується з 8,8 до 6,8 МПа, а температура випускних газів знижується від 480 до 220°C.

Як наслідок, *погіршується* якість сумішоутворення в циліндрі, знижуються максимальні температури в циклі і термічний ККД, значно зростає питома ефективна витрата палива – з 231,2 г/кВт*год до 320 г/кВт*год.



ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ДВИГУНА ВІДКЛЮЧЕННЯМ ЦИКЛІВ

Одним з ефективних **шляхів покращення показників дизельних двигунів** на режимах малих навантажень і холостого ходу є застосування **відключення циліндрів або циклів**

Означений спосіб дозволяє забезпечити незначну зміну максимального тиску згоряння, індикаторного ККД, якості та повноти згоряння в «робочих» циліндрах в усьому діапазоні робочих навантажень.

На цей час можна виділити ряд підходів щодо створення алгоритмів відключення циліндрів або циклів – відключення окремих циліндрів або груп циліндрів, створенні «розтягнутого» порядку роботи відключенням окремих циклів, забезпеченні часткового режиму шляхом розгонів-вибігів поблизу заданої частоти обертання та інш.

Найбільш засвоєним у виробництві і експлуатації є відключення **окремих циліндрів або груп циліндрів**.

ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ АЛГОРИТМІВ ВІДКЛЮЧЕННЯ ЦИКЛІВ

Незважаючи на широке використання методу відключення окремих циліндрів (або груп циліндрів) на сучасних двигунах, на сьогодні в літературі недостатньо розглянуті **методологічні аспекти цієї проблеми:**

- Не наведено методику (або методологію) розробки алгоритму відключення циліндрів;
- Не зрозуміло, за яким критерієм обмежується максимальна потужність двигуна при роботі з відключеними циліндрами;
- як обирається робочий діапазон частоти обертання при відключенні циліндрів;
- Яким чином визначається ефективність того чи іншого алгоритму відключення циклів.

Вказане визначає актуальність теми наукової роботи.



Мета роботи і задачі дослідження

Мета роботи: розробка розрахунково-експериментального методу відключення циліндрів дизель-генератора 7Д100 на базі запропонованих критеріїв ефективності і обмежень.

Задачі дослідження:

1. Виконати аналіз впливу відключення циліндрів на показники ефективності робочого процесу.
2. Дослідити вплив відключення циліндрів на динаміку кривошипно-шатунного механізму двигуна.
3. Запропонувати критерії та обмеження при виборі раціонального алгоритму відключення циліндрів.
4. Розробити алгоритми відключення циліндрів та дослідити ефективність роботи двигуна за пропонованими алгоритмами.
5. Запропонувати зміни до конструкції паливної системи двигуна включенням до неї елементів, що забезпечують з можливість відключення циліндрів.
6. Виконати техніко-економічне обґрунтування роботи.
7. Розглянути питання охорони.
8. Розглянути питання цивільного захисту.

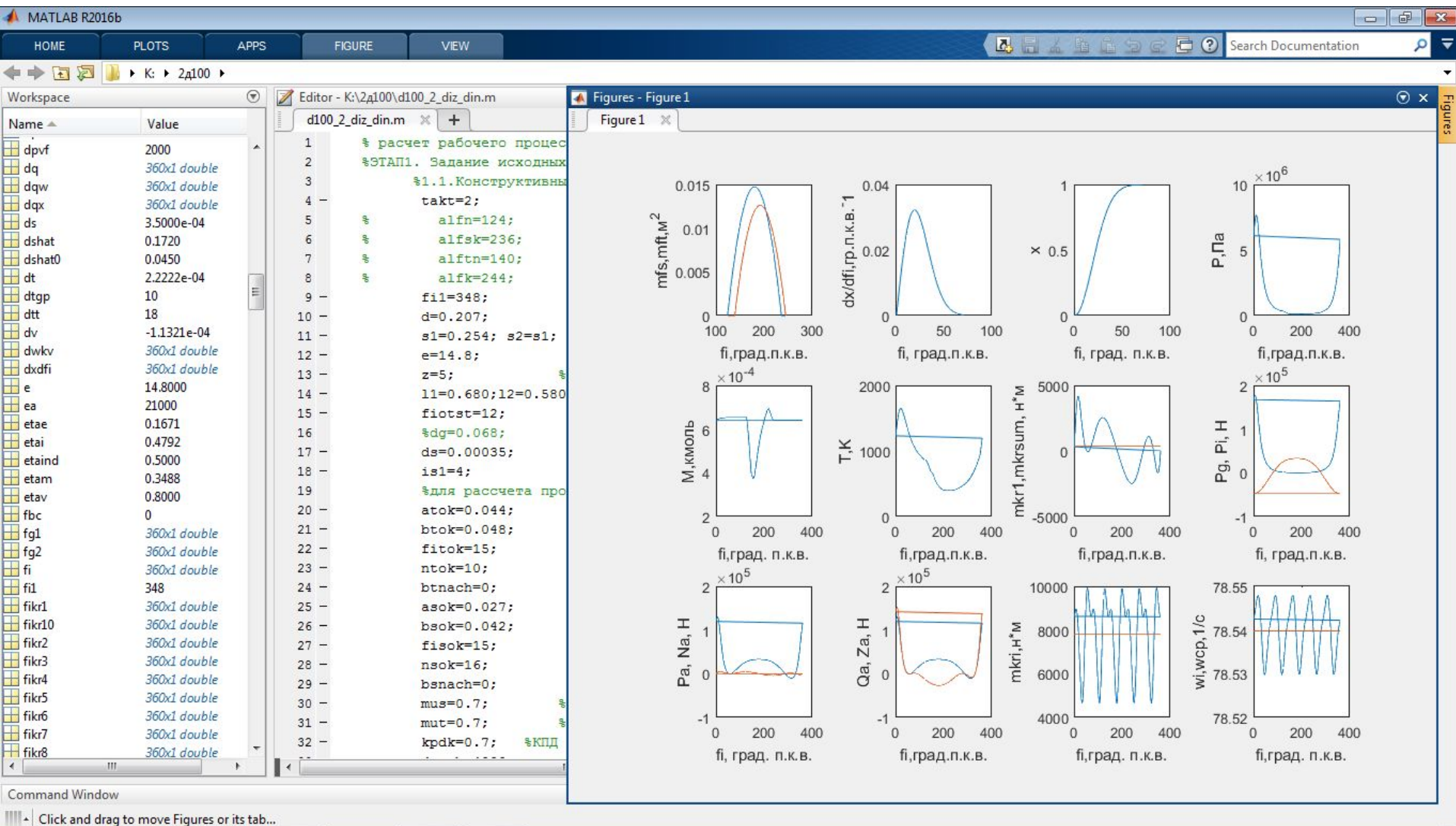


ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СТАЦІОНАРНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

- ✓ модель дозволяє визначати теплофізичні властивості компонентів дизельного палива та продуктів згоряння;
- ✓ математична модель робочого двигуна є квазістаціонарною;
- ✓ в основу розрахунку параметрів робочого тіла в ході робочого процесу покладені диференціальні рівняння процесів масо- і теплообміну.
- ✓ теплообмін між робочим тілом та стінками визначається за залежністю Ньютона – Ріхмана в якому коефіцієнт тепло віддачі розраховується за формулою Вошні.
- ✓ в основу математичної моделі згоряння покладено формулу проф. І.І. Вібе, у якій тривалість і повнота згоряння газового палива визначається за емпіричними залежностями кафедри ДВЗ НТУ ХПІ



Вікно програми MATLAB з результатами розрахунку





Аналіз робочого процесу двигуна при відключенні окремих циліндрів або циклів

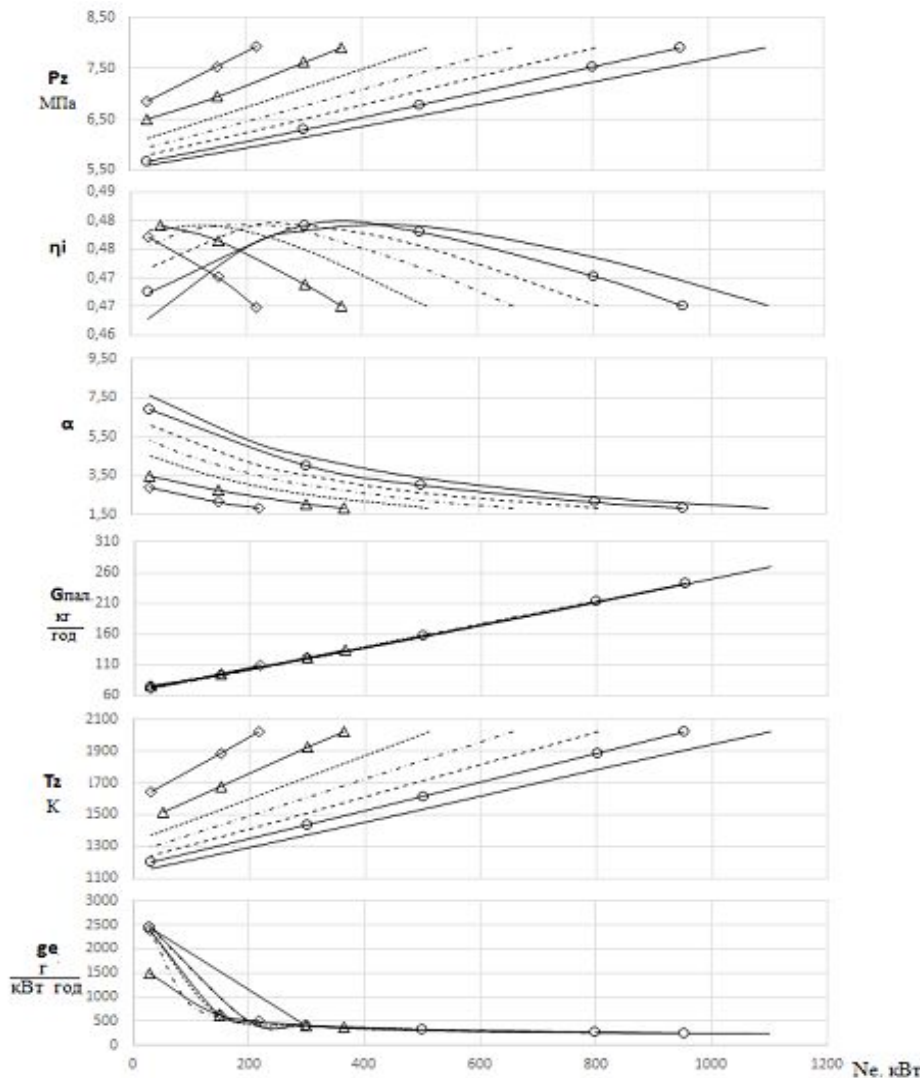


11

На певному навантажувальному режимі існує раціональна кількість відключених циліндрів, що забезпечує зростання індикаторного ККД двигуна.

При відключенні більшої або меншої кількості циліндрів відносно раціональної відбувається погіршення індикаторного процесу.

Таким чином цей параметр (індикаторний ККД) можна прийняти в якості **основного критерію (цільової функції)**, що визначає кількість робочих і відключених циліндрів



Навантажувальні характеристики двигуна 7Д100 ($n=750 \text{ хв}^{-1}$) при роботі на:
— 10 циліндрах; $\diamond$ — 9 циліндрах; - - - - 8 циліндрах; - . - . - 7 циліндрах; - 6 циліндрах; Δ — 5 циліндрах; $\blacklozenge$ — 4 циліндрах.



Аналіз робочого процесу двигуна при відключенні окремих циліндрів або циклів



Зменшення коефіцієнту надлишку повітря в «робочих» циліндрах призводить до зростання максимального тиску в камері згоряння.

Зростання максимального тиску згоряння є причиною збільшення навантажень на деталі КШМ та зниження їх надійності, що обмежує максимальну потужність двигуна. Отже при створенні алгоритму відключення циліндрів слід враховувати зростання **максимального тиску згоряння як обмежувального критерію**.

В розділі 1 показано, що відключення циліндрів призводить до зростання інтервалу між спалахами в циліндрах двигуна, що є причиною збільшення **нерівномірності крутного моменту і ходу двигуна**, і, як наслідок, вібрацій двигуна і установки в цілому. Визначенню цих параметрів присвячений наступний розділ роботи.

РЕЗУЛЬТАТИ ДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ НИЖНЬОГО КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ

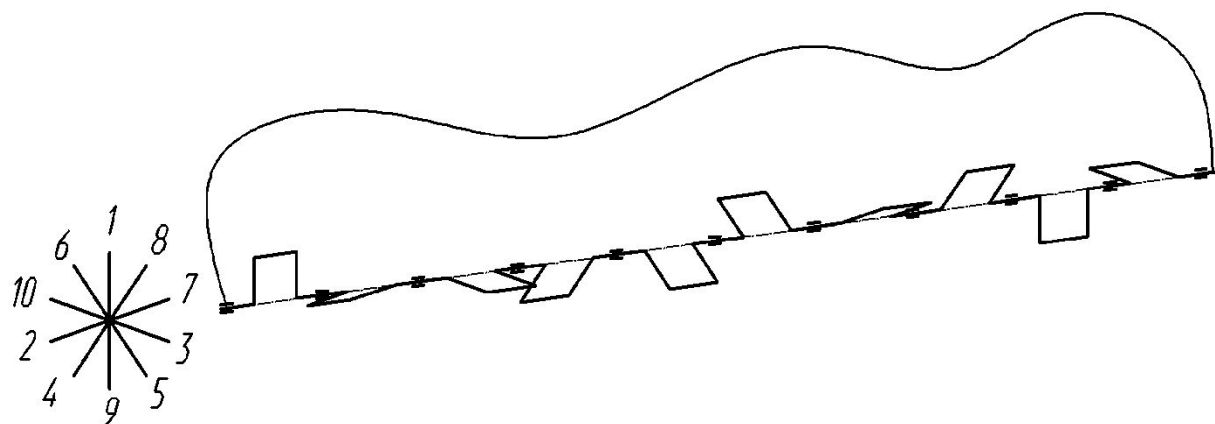


Схема нижнього кривошипно-шатунного механізму

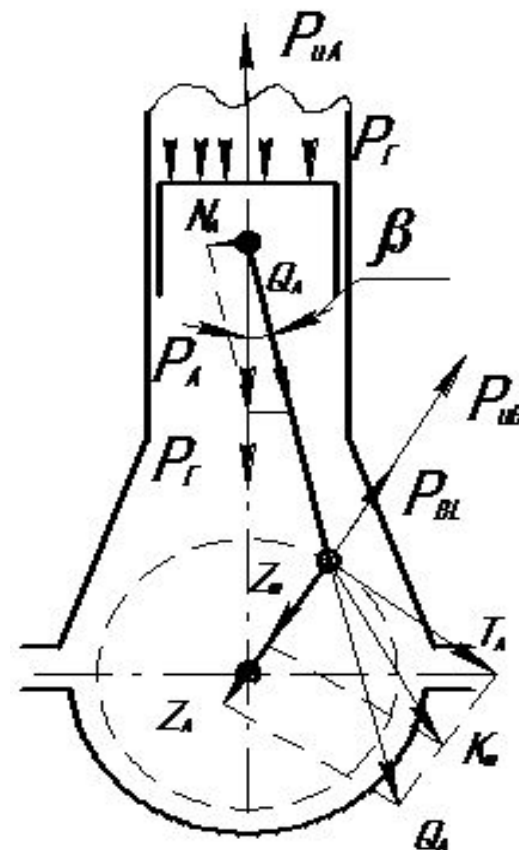
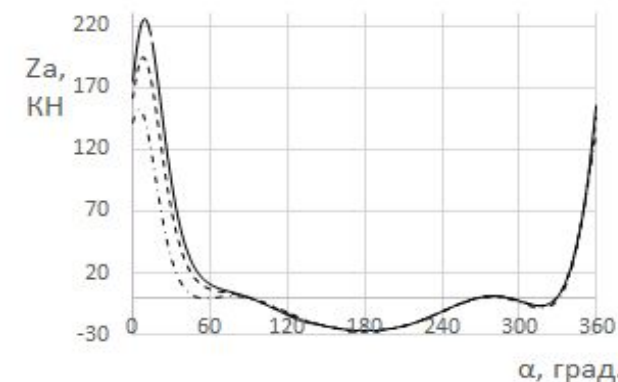
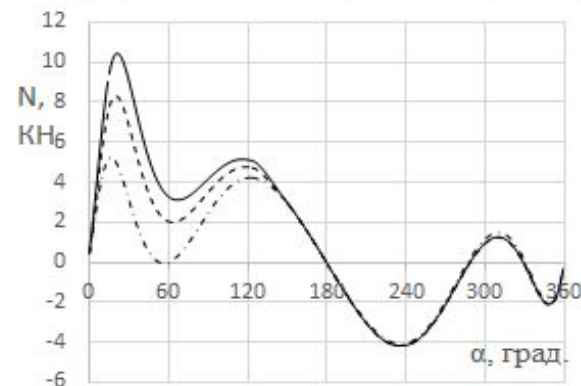
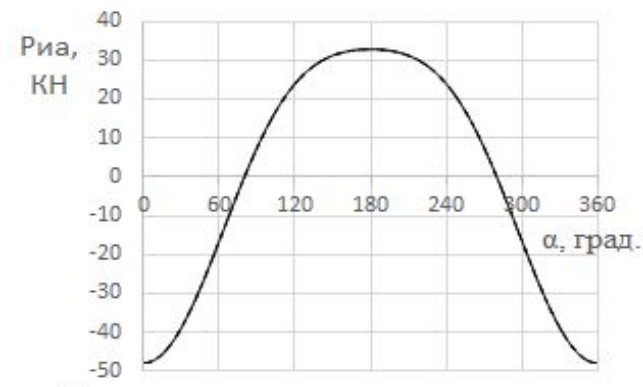
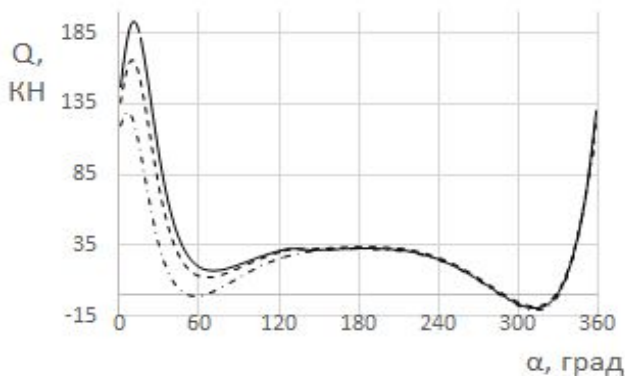
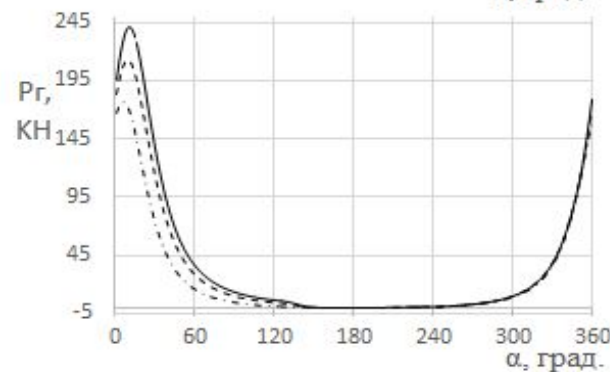
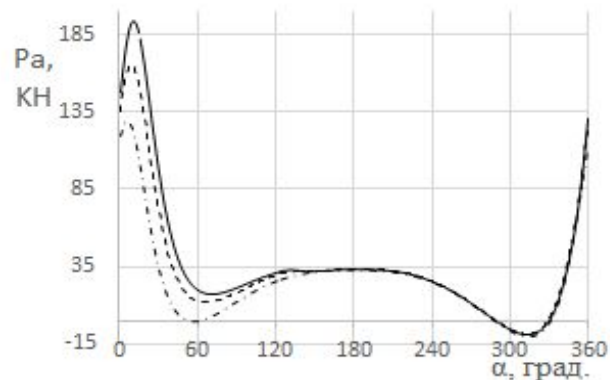


Схема сил, що діють у нижньому КШМ двигуна

РЕЗУЛЬТАТИ ДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ НИЖНЬОГО КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ

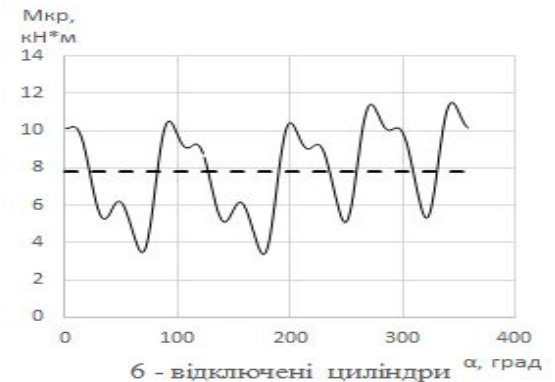
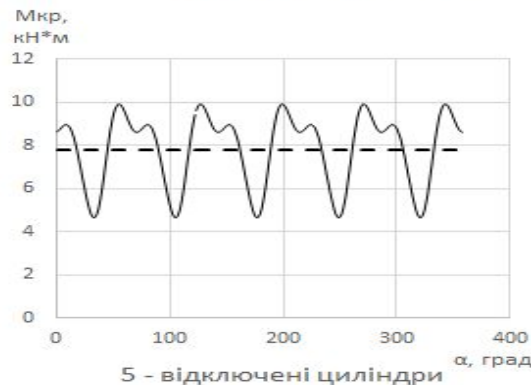
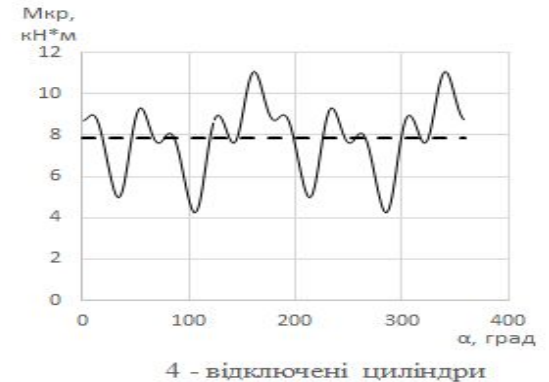
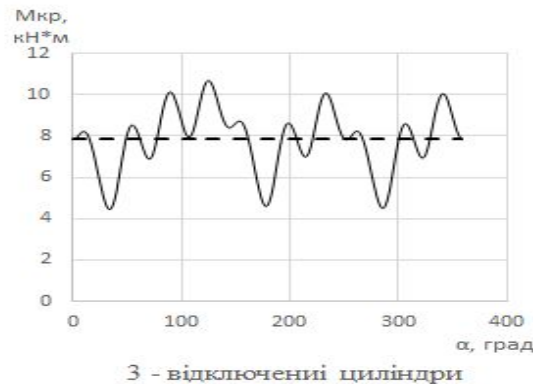
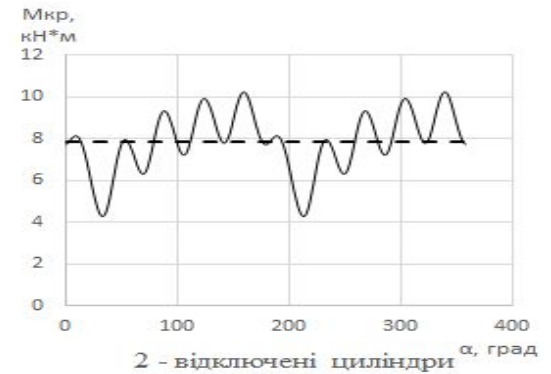
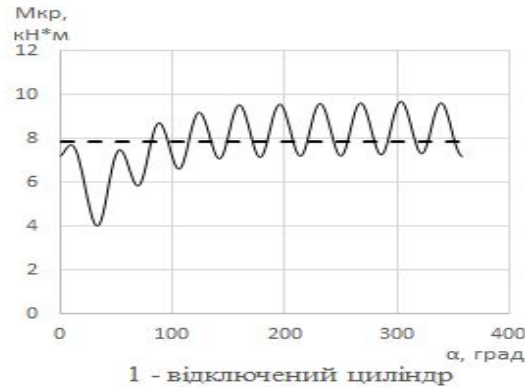
Значення сил у відсіку
КШМ двигуна на режимі
200 кВт.:

-- базовий двигун;
— двигун із системою
відключення циліндрів
(робочий циліндр);
— + — -двигун із системою
відключення циліндрів
(відключений циліндр)

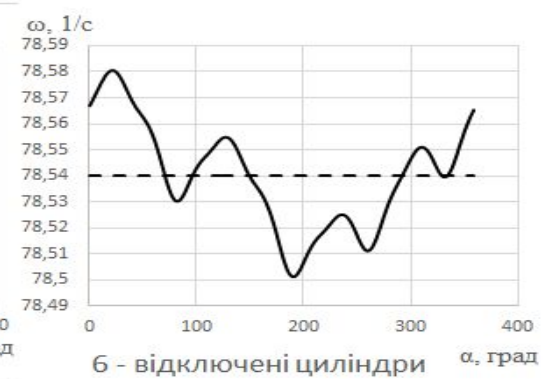
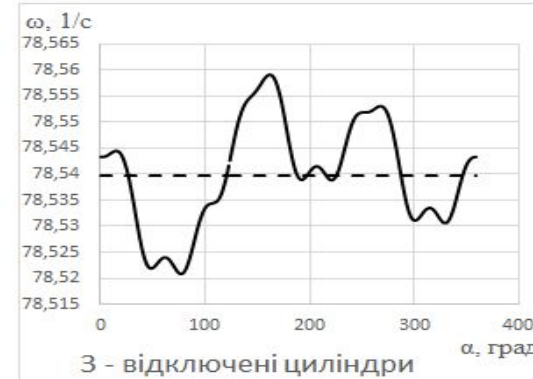
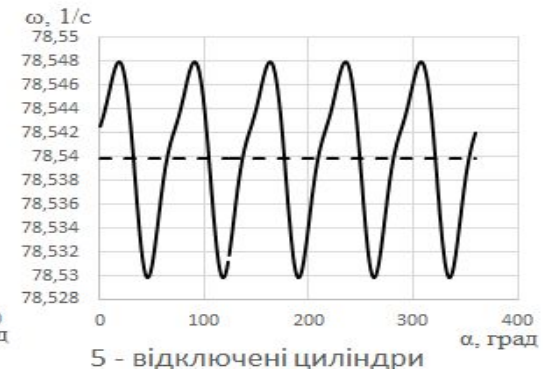
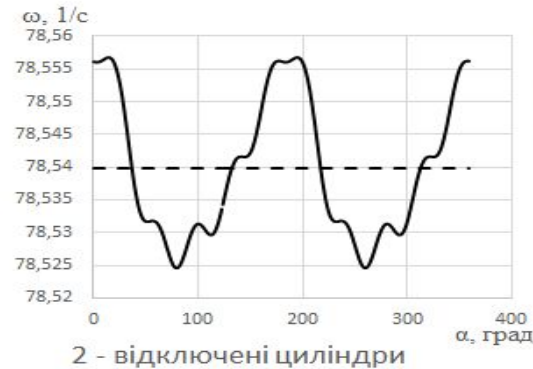
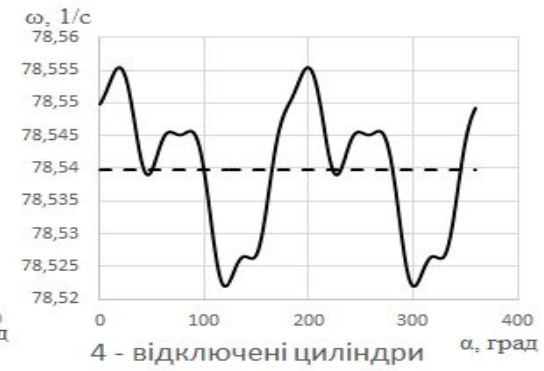


РЕЗУЛЬТАТИ ДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ НИЖНЬОГО КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ

Значення сумарного
крутного моменту на
фланці колінчастого валу
базового двигуна, а також
двигуна із відключеними від
1 до 6 циліндрів на режимах
однакової потужності.

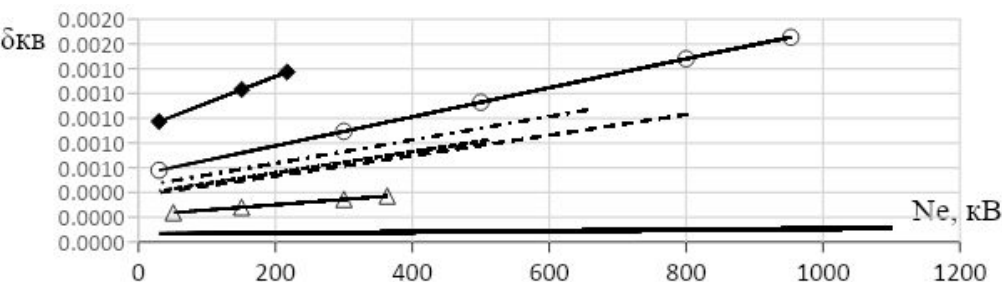
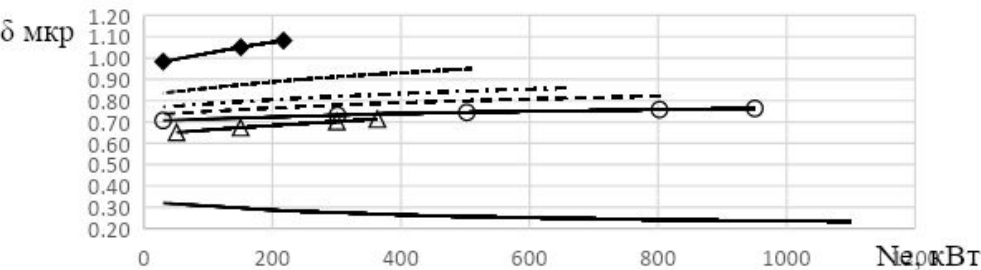
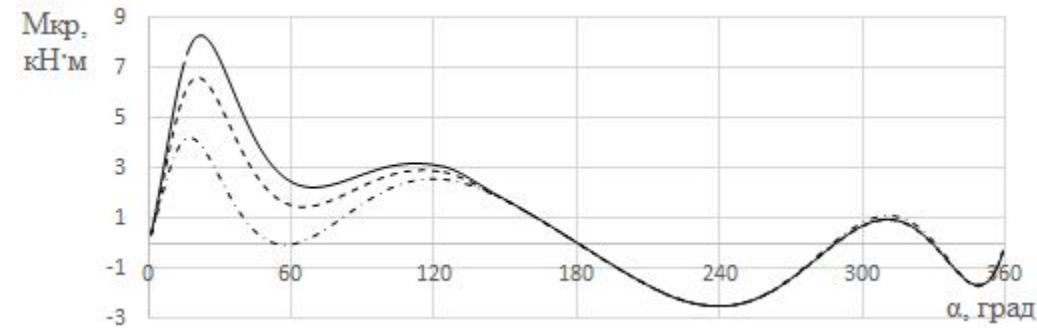


**Значення поточної
кутової швидкості
колінчастого валу**



РЕЗУЛЬТАТИ ДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ НИЖНЬОГО КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ

Значення **поточного крутного моменту** на кривошипі двигуна на режимі $N_e=200\text{кВт}$:
 --- базовий двигун; — двигун із системою відключення циліндрів (робочий циліндр);
 — + — + -двигун із системою відключення циліндрів (відключений циліндр)



Нерівномірність кутової швидкості і крутного моменту двигуна на режимах навантажувальної характеристики при роботі на: — — 10 циліндрах; ○ — — 9 циліндрах; - - - - 8 циліндрах; — · — 7 циліндрах; — 6 циліндрах; Δ—Δ — 5 циліндрах; ◇—◇ — 4 циліндрах



Висновки за результатами динамічного розрахунку кривошипно-шатунного механізму двигуна із відключенням циліндрів



1. При відключенні циліндрів відбувається значне зростання сил, крутних моментів не кривошипних у робочих циліндрах
2. Відключення циліндрів призводить до суттєвого зростання нерівномірності крутного моменту двигуна (до 3,0 та 3,75 разів).
3. При відключенні циліндрів нерівномірність обертання колінчастого валу значно зростає (до 17 і 18 разів). Слід зазначити, що незважаючи на значене зростання нерівномірності обертання при відключенні циліндрів, цей параметр не перевищує допустимих значень для двигунів – генераторів змінного струму ($[\delta_{\text{кв}}]=0,005$).
4. Найбільш сприятливим з точки зору найменшого зростання нерівномірності крутного моменту і кутової швидкості обертання колінчастого валу є відключення п'яти циліндрів. При застосуванні інших варіантів відключення циліндрів нерівномірність ходу двигуна є набагато більшою, проте не перевищує допустимих значень для генераторів струму.



РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ВІДКЛЮЧЕННЯ ЦИЛІНДРІВ НА РЕЖИМАХ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Алгоритм відключення циліндрів - чітка послідовність дій, спрямованих на виключення циліндрів або груп циліндрів залежно від комплексу параметрів робочого процесу двигуна.

Критерій: індикаторний ККД двигуна η_i . На кожному режимі роботи двигуна відбувається порівняння η_i при роботі на різній кількості циліндрів і вибирається та кількість циліндрів, за якої індикаторний ККД є найбільшим.

При цьому в діапазоні зміни потужності при роботі на z циліндрах (де індикаторний ККД є найбільшим) реалізується якісний спосіб регулювання потужності зміною складу суміші.



РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ВІДКЛЮЧЕННЯ ЦИЛІНДРІВ НА РЕЖИМАХ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Обмеження :

- зростання **максимального тиску згоряння** в робочих циліндрах, що призводить до збільшення жорсткості згоряння і навантажень на деталі кривошипно-шатунного механізму двигуна. Прийнято, що цей тиск не повинен перевищувати значень, що досягаються на режимі номінальної потужності двигуна і дорівнюють 8 МПа;
- необхідність забезпечення **ступеня нерівномірності кутової швидкості колінчастого валу δ** не більше 0,005;
- остигання відключеного циліндра**. Це призводить до підвищеного зносу циліндра, погіршення умов змащування пар тертя в КШМ, зростання механічних втрат. Для зменшення негативного впливу від остигання циліндру двигуна рекомендується здійснювати по-циклове відключення циліндрів в ПРЦД. Наприклад, якщо потрібно відключити один циліндр, то в першому циклі відключається перший циліндр, в другому циклі – шостий циліндр, в третьому – десятий і т.д. в послідовності порядку роботи циліндрів двигуна.

Алгоритми циклів

відключення

Діапазон потужності	Число відключених циліндрів	Число робочих циліндрів	Номери циліндрів у порядку їх роботи									
			1	6	10	2	4	9	5	3	7	8
			Номери відключених циліндрів									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	«Алгоритм 1»											
200-1100 кВт	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0-200 кВт	5	5	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	«Алгоритм 2»											
425-1100 кВт	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300-425 кВт	1	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220-300 кВт	2	8	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
150-220 кВт	3	7	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
73-150 кВт	4	6	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
0-73 кВт	5	5	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

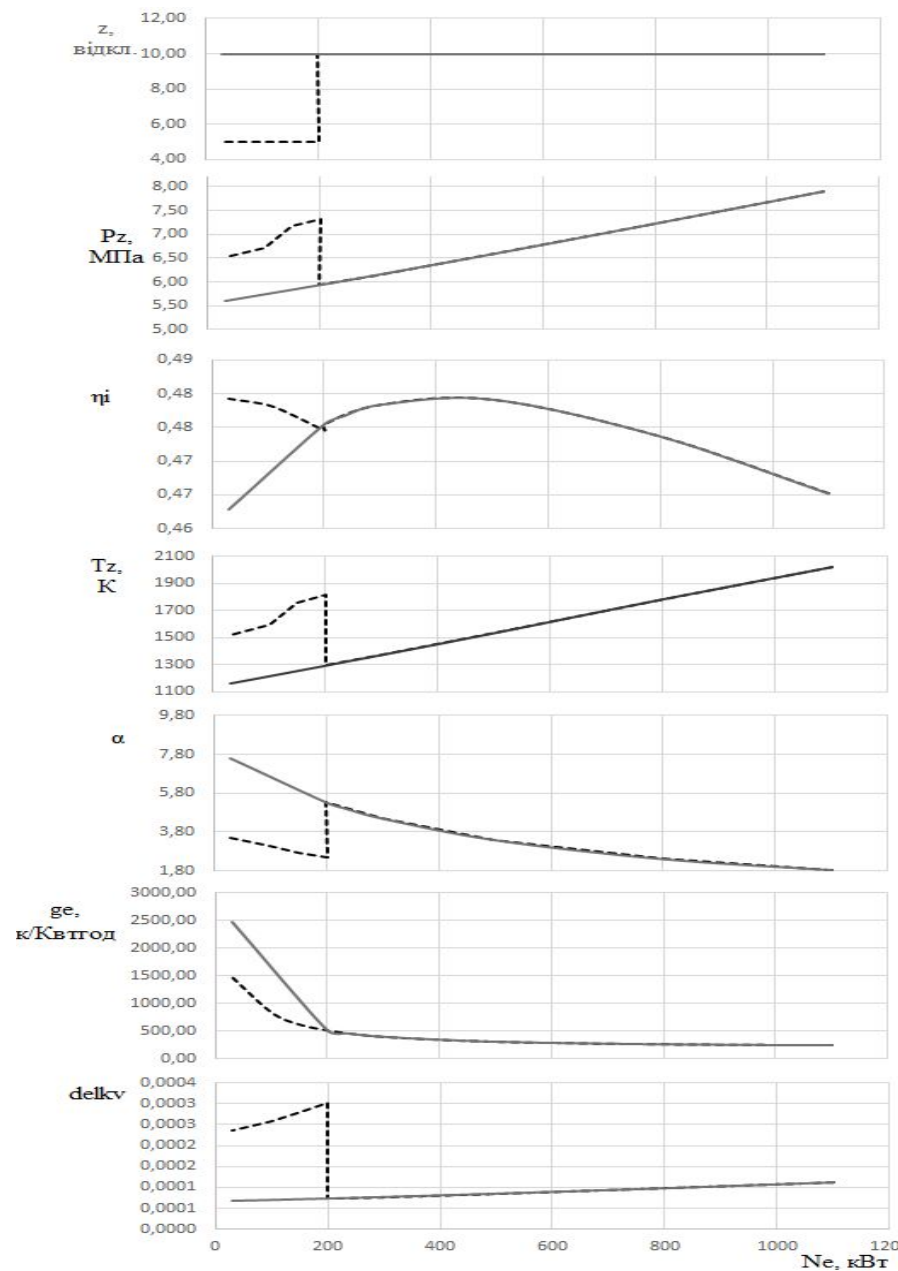
* В таблиці позначено: «1» – відключені цикли; «0» – робочі цикли.

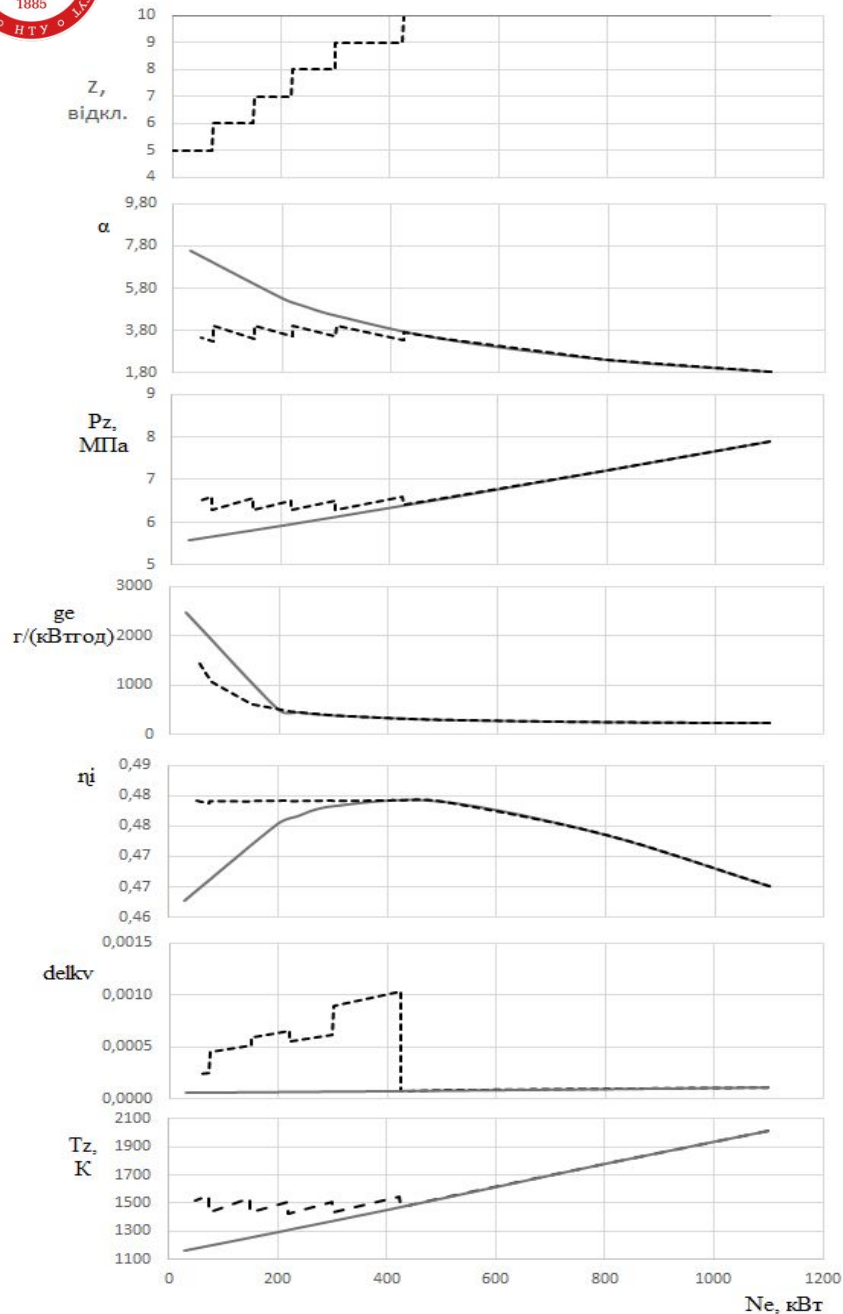
Алгоритми відключення циклів

“Алгоритм 1” запропонований забезпечити найкращу нерівномірність ходу двигуна при одночасному підвищенні індикаторного ККД.

При відключенні п'яти циліндрів, «робочі» циліндри в порядку роботи працюють через один, чим досягається найкраща серед інших варіантів відключення циліндрів нерівномірність ходу двигуна. Крім того, цей алгоритм відрізняється простотою реалізації і конструктивного забезпечення.

- - - двигун із системою відключення циліндрів за алгоритмом 1; — базовий двигун.





Використання

“Алгоритму 2”

забезпечує найкращу

паливну економічність за

прийнятими значеннями

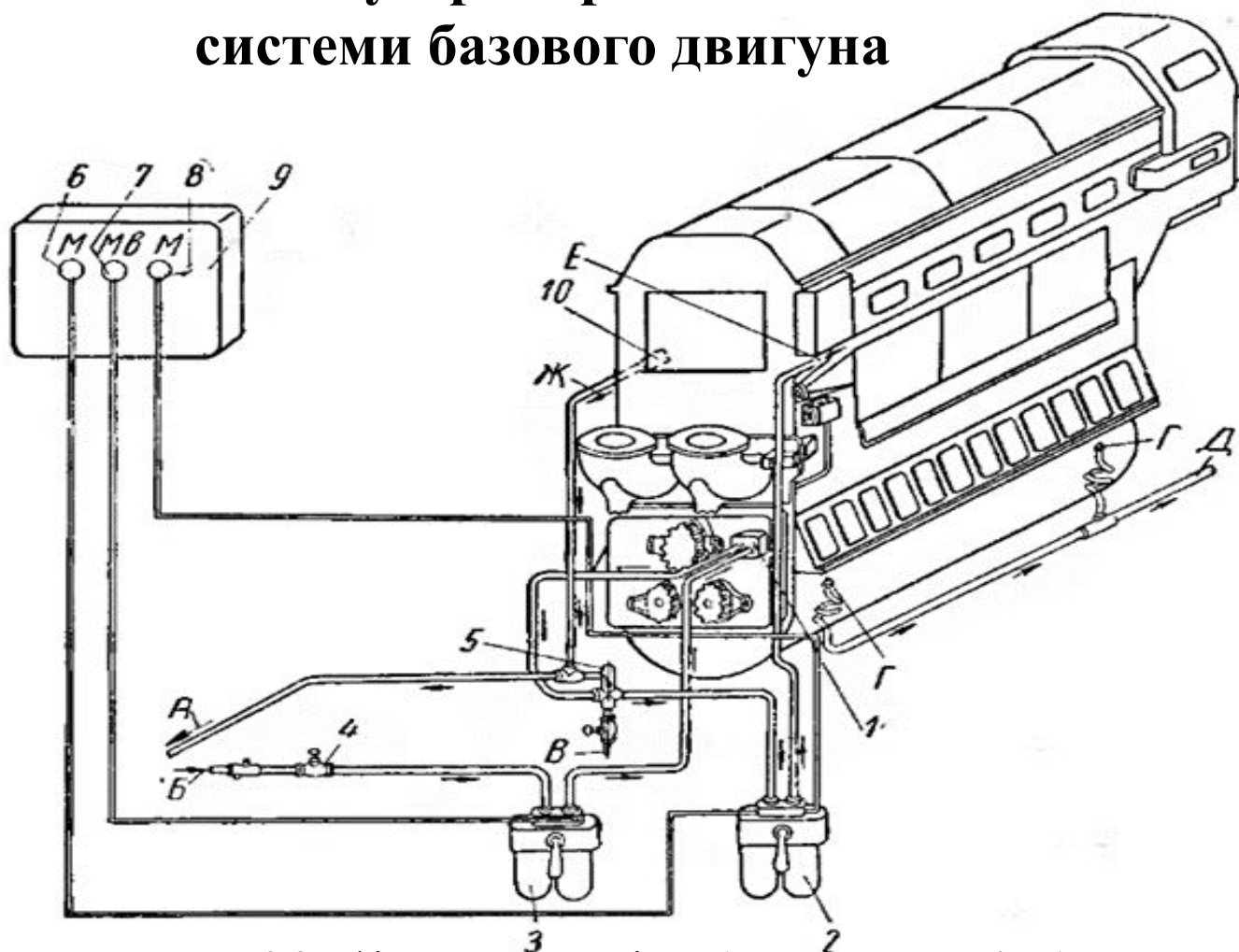
ступеня нерівномірності

обертання колінчастого

валу двигуна

- - - двигун із системою
відключення циліндрів за
алгоритмом 2;

Загальний устрій і робота паливної системи базового двигуна

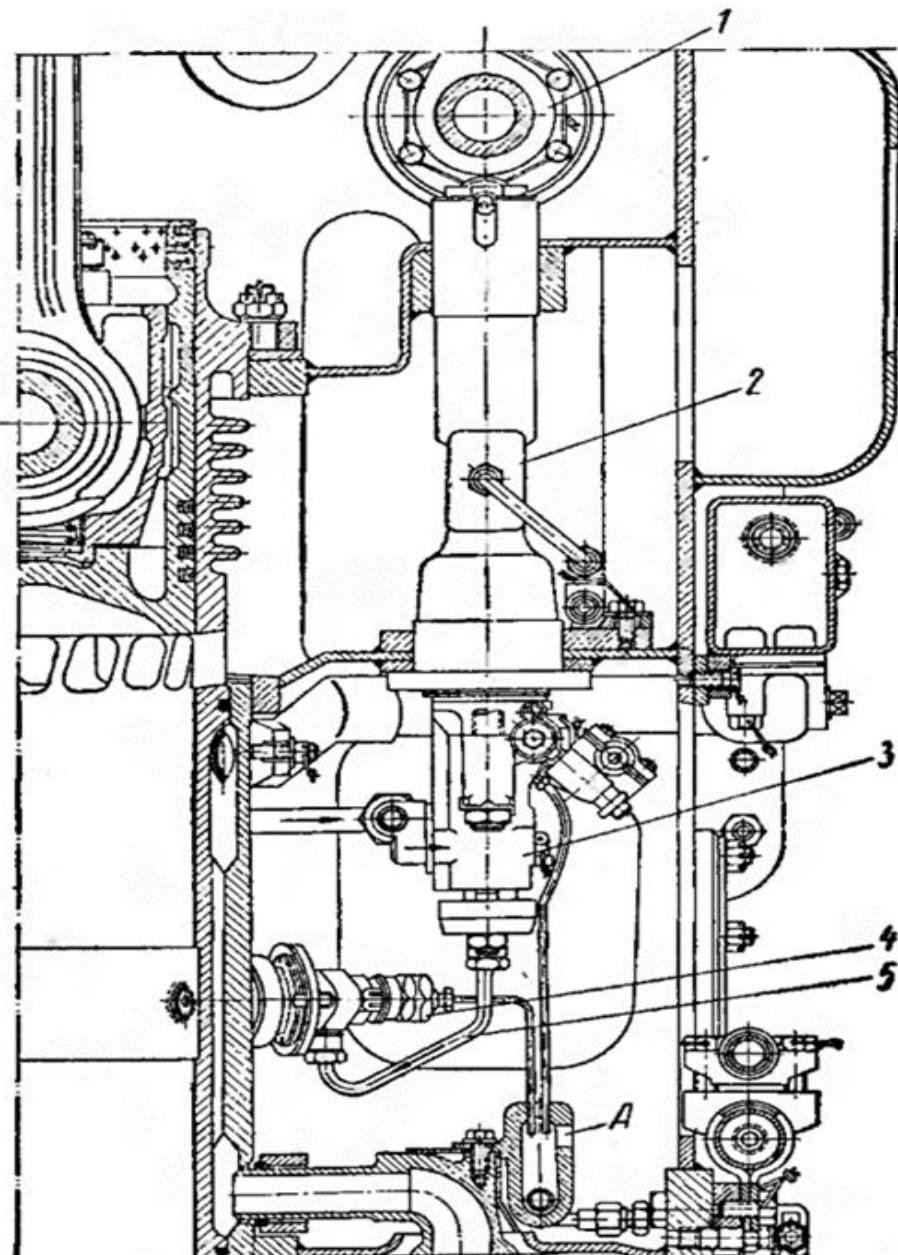


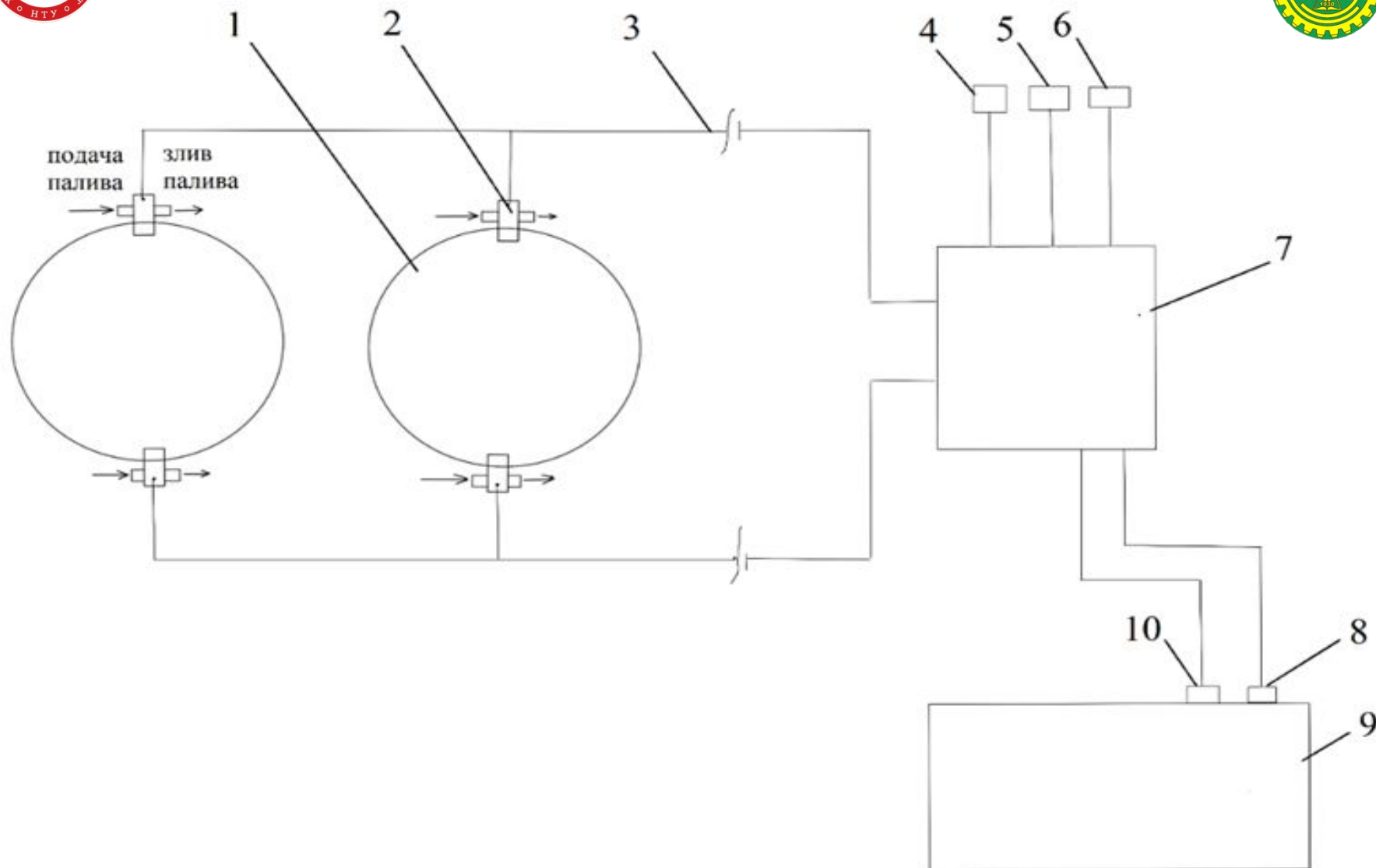
1 - паливopодкaчyвaльний нacoc; 2,3 - фільтри тонкого і грубого очищення; 4 - безповоротний клапан; 5 - запобіжний клапан; 6,8 - манометри; 7 - мановакууметри; 9 - щит приладів; 10 - перепускний клапан на $1,1 \pm 0,15$ кг/см²; А - в цистерну чистого палива; Б - з витратного бака; В - приєднується до ручного насосу; Г - злив палива, що просочилося з насосів, форсунок і помпи; Д - в стічну цистерну брудного палива; Е - до магістралі паливних насосів; Ж - надлишок палива з магістралі паливних насосів.

Внутрішня система чистого палива

Кожен циліндр дизеля обслуговується двома паливними насосами 3, симетрично розташованими по осі циліндра і приводяться в рух кулачковими валами 1 через штовхачі 2. Кожен паливний насос нагнітає паливо по трубці 5 високого тиску в форсунку 4.

1 - кулачковий вал; 2 – штовхач; 3 – паливний насос; 4 – форсунка; 5 - трубка високого тиску.



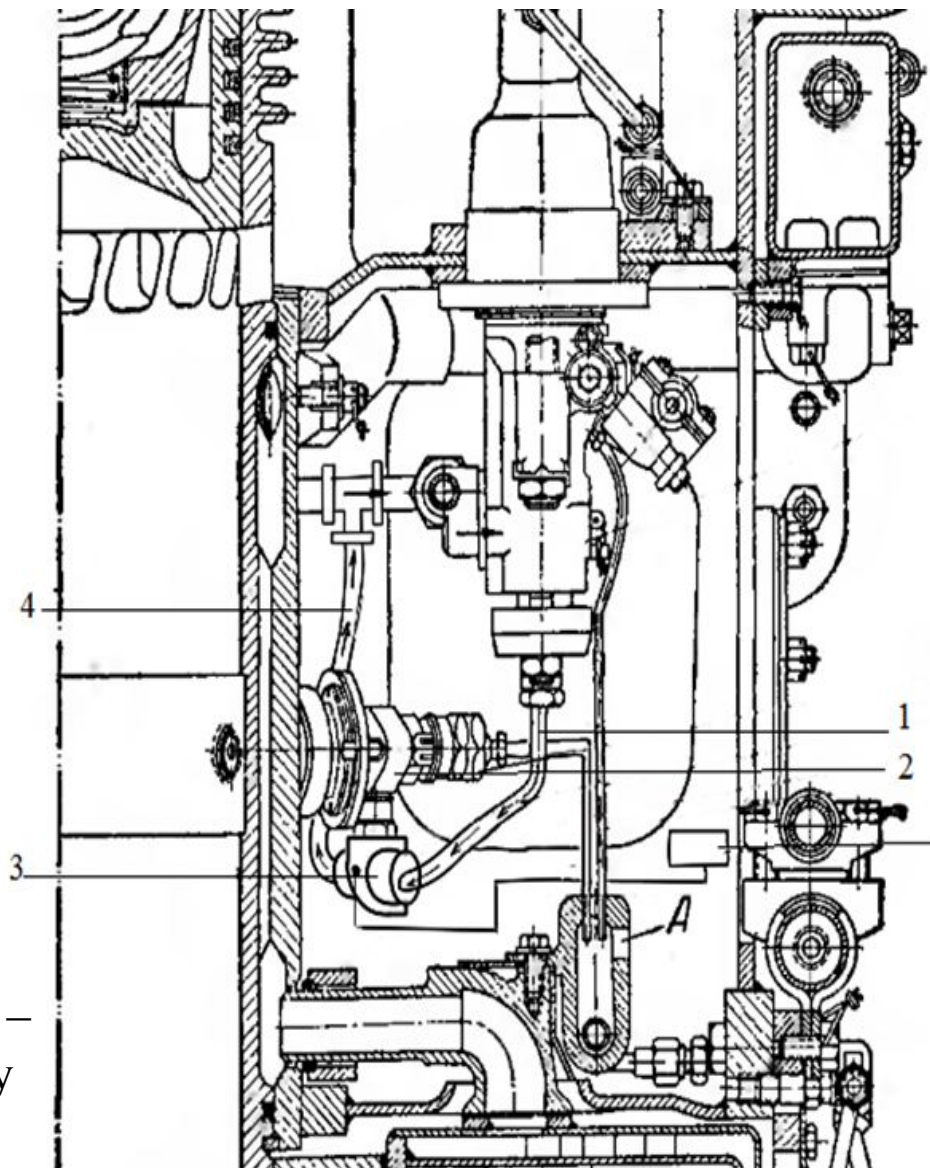


1 – циліндр двигуна; 2 – форсунка з електромагнітним клапаном; 3 – передача даних по шині CAN; 4 – датчик частоти обертання; 5 – датчик вібрацій; 6 – датчик температури охолоджувальної рідини; 7 – електронний блок керування; 8 – амперметр; 9 – генератор; 10 – вольтметр.

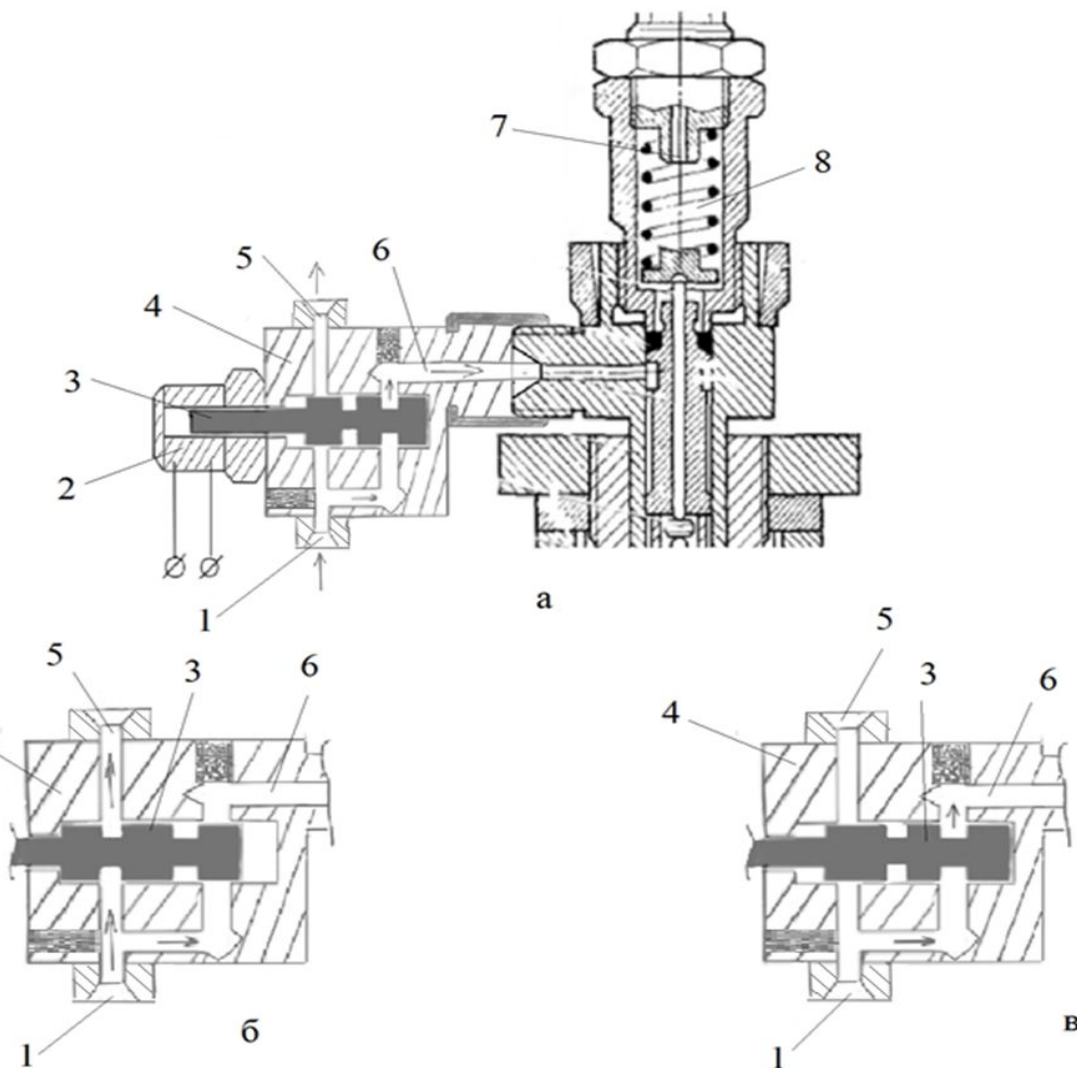
Модернізована внутрішня система чистого палива

На рисунку показано розташування електромагнітного клапану відключення подачі палива 3. Цей клапан встановлюється на форсунці і з'єднується з трубою високого тиску 1, що виходить з паливного насосу. Трубка перепуску палива 4 повз форсунки 2 з'єднується з магістраллю низького тиску підводу палива до паливного насосу

1 - трубка високого тиску; 2 – форсунка; 3 – електромагнітний клапан; 4 – трубка зливу палива у систему низького тиску.



При відключенні подачі палива до форсунки золотник 3, керований електромагнітом 2, займе положення, показане на (рис. б). В цьому випадку підвідний канал 6 до розпилювача форсунки перекривається золотником 3, а паливо, що надходить в вимикач, проходить до відвідного каналу 5 на злив, і далі по трубці 4 (слайд 27) повертається до паливного насосу високого тиску.



а-пристрій вимикача; б-подача; в - відключення подання; 1 – підвідний канал; 2 – електромагніт; 3 – золотник; 4 – корпус; 5 – відвідний канал; 6-канал до розпилювача форсунки; 7 - зливний канал; 8- порожнина роботи пружини



Калькуляція собівартості дипломної роботи та економічного ефекту модернізації



29

№п/п	Найменування статті витрат	Сума, грн.
1	Вартість матеріалів і напівфабрикатів	350
2	Транспортно-заготівельні витрати	42
3	Основна заробітна плата	19600
4	Додаткова заробітна плата	1960
5	Відрахування на соціальні заходи	4743
6	Амортизація	4060
7	Загальновиробничі витрати	6468
8	Виробнича собівартість	37223
9	Адміністративні витрати	4312
10	Прибуток (10% від суми пунктів 8,9)	4541,6
11	Повна собівартість	46076,6
12	Вартість додаткового обладнання	57970
13	Експлуатаційні витрати виробу базового двигуна	27973106
14	Експлуатаційні витрати виробу модернізованого двигуна	26800283,5
15	Економічний ефект від використання відключення циліндрів дизеля	1053260
16	Термін окупності	33 дні.



ВИСНОВКИ



30

1. Розраховано навантажувальні характеристики двигуна при роботі на різній кількості циліндрів. Показано, що при відключенні циліндрів на режимах малих навантажень покращуються індикаторний та ефективний ККД двигуна, зменшується питома ефективна і годинна витрати палива. Однак при цьому збільшується максимальний тиск в камері згоряння, що призводить до зростання навантажень на деталі КШМ та зниження їх надійності.

2. За результатами динамічного розрахунку визначено вплив кількості циліндрів на сили і моменти в кривошипно-шатунному механізмі двигуна, нерівномірність крутного моменту і кутової швидкості колінчастого валу. Показано що відключення циліндрів призводить до збільшення нерівномірності крутного моменту і кутової швидкості колінчастого валу двигуна. Найбільшою є нерівномірність обертання при відключенні одного і шести циліндрів, найменшою – при відключенні п'яти циліндрів. Незважаючи на значене зростання нерівномірності обертання при відключенні циліндрів, цей параметр не перевищує допустимих значень для двигунів – генераторів змінного струму (0,005).

3. Запропоновано критерій, за яким потрібно відключати циліндри (індикаторний ККД двигуна), обмежувальні параметри робочого процесу, які не повинні виходити за визначені межі (максимальний тиск згоряння, коефіцієнт надлишку повітря, нерівномірність ходу двигуна).

4. Розроблено два алгоритми відключення циліндрів, визначено показники двигуна при роботі за пропонованими алгоритмами. Показано ефективність цього способу регулювання потужності.

5. Запропоновано схему і принцип роботи системи електронного керування відключенням циліндрів. Наведено опис роботи електричного клапану, що перепускає паливо з порожнини високого тиску в порожнину низького тиску.

6. Виконано економічне обґрунтування запропонованих рішень.

7. Розглянуто питання охорони праці та навколишнього середовища.

**Дякую за співпрацю.
Вдалого дня !**

