

УДК 621.03

В.Г. Рикун, О.С. Савостьянов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

**ДІАГНОСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ**

В даній статті показаний аналіз зв'язків між відмовами дизеля та параметрами робочого процесу, який дозволяє не тільки визначити виникнення несправності, але й виконати прогнозування технічного стану та прийняти рішення на локалізацію несправності.

**Ключові слова:** двигун внутрішнього згорання, діагностика, несправність дизель-генераторів.

**Вступ**

Визначимо вплив різного роду факторів на характер протікання тепломеханічних процесів, що відбуваються в двигунах внутрішнього згорання. Найбільш усього виявляється такі дефекти у дизель-генераторі, як:

- поломка поршневих кілець;
- порушення рухливості поршневих кілець;
- сполучення замків поршневих кілець;
- знос поршневих кілець;
- порушення герметичності впускних і вихлопних клапанів у закритому положенні;
  - зміна зазору між тильною частиною кулачків і тарілками усмоктувальних і вихлопних клапанів;
- порушення фаз газорозподілу;
- порушення початку подачі палива;
- знос розпилювача і розрегулювання натяжіння пружини форсунки;
  - нерівномірність подачі палива по циліндрах;
  - закоксовування соплових отворів розпилювача форсунки;
  - втрата здатності конуса, що ущільнює, голки розпилювача форсунки;
- тріщини циліндрових гільз;
- задири третьових деталей руху.

- ушкодження ізоляції роторних та статорних кіл;
- відмова системи керування.

Перераховані несправності дизель-генератора у найбільшому ступені характерні для швидкохідних форсованих дизелів. Зміна перерахованих дефектів в процесі експлуатації дизеля характеризується їхнім поступовим проявом, що супроводжується погіршенням техніко-економічних показників і вигідності дизеля. Проте, несвоєчасне усунення цих несправностей може привести до аварійних станів дизеля, що раптово з'являються. Це такі як:

- обрив вихлопних і впускних клапанів;
- розбивання поршневих канавок;
- задир поршня й обривши шатуна;
- удар поршня по клапанах;
- прогорання поршня;
- прогин і обривши шатунів;
- гідроудар.

Прояв цих змін позначається на ефективній потужності та частоті обертання дизеля, а також на:

1. Температурі гасів, що відробили,  $T_T$ .
2. Тиску гасів у циліндрах у момент початку згорання,  $P_c$ .
3. Максимальний тиск згорання,  $P_z$ .
4. Максимальна швидкість наростання тиску в період згорання,  $(d_p/d_\phi)_{\max}$ .
5. Кут випередження подачі палива,  $\phi_{оп}$ .

6. Період затримки самоzapалювання палива,  $\varphi_i$ .
7. Тривалість впрыскування палива,  $\varphi_{вп}$ .
8. Максимальний тиск уприскування палива,  $P_T$ .
9. Середнє індикаторне впрыскування,  $P_i$ .
10. Кугова координата максимального тиску згоряння відносно моменту подачі згоряння (тривалість першої фази активного згоряння),  $\varphi_z$ ;
11. Фактори динамічного циклу:  

$$\beta = \varphi_i / \varphi_{вп} \quad \lambda_r = P_z / P_c \quad \gamma = (P_z - P_c) / \varphi_z. \quad (1)$$
12. Механічний ККД дизеля,  $\eta_M$ .
13. Тиск наддування,  $P_K$ .
14. Питома витрата палива,  $g_e$ .

### Результати досліджень

В ході експериментальних досліджень, проведених для двигунів 12ЧН8/20 і 1Д6, особлива увага зверталася на такі несправності, що найбільше часто виявляються в експлуатації. У ході випробувань визначались значення параметрів робочого процесу для граничних діапазонів їхньої зміни. Крім того були обумовлені результати статистичних даних про несправності двигунів по рекламціям, що надходила на заводи-виготовлювачі. Результати експериментальних досліджень приведені у таблиці 1. За даними експерименту визначений ступінь впливу різних параметрів на виникнення тих чи інших несправностей. Однак за даними експерименту важко визначити закономірності виникнення та проявлення несправностей. Для встановлення істинних причиннослідчих зв'язків між відмовами дизеля та параметрами робочого процесу необхідно мати аналітичні та інші залежності, які дозволяють не тільки визначити виникнення несправності, але й виконати прогнозування технічного стану та прийняти рішення на локалізацію несправності. Крім того, необхідно врахувати і можливі зміни умов експлуатації дизелів.

Перед тим як в'яснити причину виникнення тих чи інших поломок необхідно в'яснити діапазони зміни параметрів робочого процесу і в'яснити вишли вони чи ні за грані допустимих при експлуатації показників. Цю задачу можна вирахувати з допомогою процесу аналізу переробки енергії в дизель – генераторі, який характеризується показниками активної міцності генератора і питомої ефективної витрати палива, які визначаються по даному виразу:

$$P_a = Q_n \cdot \eta_e \cdot \eta_r \cdot G_T; \quad (2)$$

$$g_e = \frac{G_T \cdot \eta_r}{1,36 \cdot P_a}, \quad (3)$$

де  $P_a$  – активна потужність синхронного генератора;  $\eta_e$  і  $\eta_r$  – ефективний ККД дизеля і ККД генератора;  $G_T$  і  $Q_n$  – витрата і нижня теплотворна здібність палива.

В цих відношеннях значення  $\eta_e$  та  $\eta_r$  залежать від таких факторів як атмосферні умови, тепловий стан дизеля, гідравлічний опір газоповітряних трактив, величина і характер потужності.

Інформацію про  $\eta_e$  та  $\eta_r$  отримують експериментальним шляхом. Крім того необхідно мати й інші експериментальні значення, а саме:

- еталонну характеристику  $g_e = f(P_a)$ , зняту при нормальних атмосферних умовах;
- характеристику генератора  $\eta_r = f(P_a, \cos\varphi)$ ;
- активне навантаження генератора  $P_a$ ;
- тиск газів в циліндрах;
- частота обертання колінчатого вала;
- питома витрата палива при даних атмосферних умовах;
- параметри атмосферних умов, які треба приводити до нормальних умов.

Приведена до нормальних атмосферних умов питома витрата палива з урахуванням поправок обчислюється по формулі:

$$g_{eП} = g_{e3} \cdot L, \quad (4)$$

де  $g_{e3}$  – заміряний діагностичний параметр.

Величина  $L$  визначається залежністю:

$$L = K - 0,7 \cdot (1 - K) \cdot \left( \frac{1}{\eta_M} - 1 \right), \quad (5)$$

де  $\eta_M$  – механічний ККД дизеля;  $K$  – відношення індикаторної потужності дизеля при поточних і нормальних атмосферних умовах.

У загальному випадку

$$\eta_M = \frac{P_e}{P_{i\text{cp}}}, \quad (6)$$

де  $P_e$  та  $P_{i\text{cp}}$  – середній ефективний і середній індикаторний тиск.

Величина  $P_e$  розраховується по величині заміряної активної потужності генератора  $P_a$  [2]:

$$P_e = \frac{225 \cdot m \cdot P_a \cdot 1,36}{\eta_r \cdot i \cdot V_h \cdot n}, \quad (7)$$

де  $m$  – коефіцієнт тактності (для 4-х тактних дизелів  $m = 4$ );  $i$ ,  $V_h$  – кількість робочих циліндрів і обсяг одного циліндра;  $n$  – частота обертання колінчатого вала.

Середнє значення величини  $P_{i\text{cp}}$  визначається шляхом обробки індикаторних діаграм кожного  $i$ -го циліндра.

$$P_{i\text{до}} = \sum_{i=1}^{\ell} P_i / i, \quad (8)$$

де  $\ell$  – число циліндрів.

Середній індикаторний тиск  $P_i$  кожного циліндра 4-х тактного дизеля обчислюється по формулах:

$$P_{i\text{cp}} = \frac{\sum_{\varphi_i=0^\circ}^{\varphi_i=180^\circ} P_{\varphi_i} \cdot (S_{\varphi} - S_{\varphi-1}) - \sum_{\varphi_i=180^\circ}^{\varphi_i=360^\circ} P_{\varphi_i} \cdot (S_{\varphi} - S_{\varphi-1})}{S_{(-180^\circ-360^\circ)}}; \quad (9)$$

Таблиця 1

Вплив основних несправностей дизеля на параметри робочого процесу

№	Дефекти	Параметри робочого процесу																		Рекомендації
		P <sub>к</sub>	P <sub>тi</sub>	g <sub>e</sub>	φ <sub>опi</sub>	φ <sub>ii</sub>	φ <sub>впi</sub>	φ <sub>i</sub> /φ <sub>впi</sub>	T <sub>гi</sub>	P <sub>сi</sub>	P <sub>z<sub>i</sub></sub>	φ <sub>z<sub>i</sub></sub>	(P <sub>z</sub> /P <sub>с</sub> ) <sub>i</sub>	((P <sub>z</sub> - P <sub>с</sub> )/φ <sub>z</sub> ) <sub>i</sub>	P <sub>ii</sub>	(dP/dφ) <sub>max</sub>	η <sub>м</sub>	n		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	Злам поршневого компресійного кільця	Δ	Δ	o+	Δ	o+	o+	o+	o+	●-	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	o-	!	
2	Зміщення замків поршневих компресійних кілець	Δ	Δ	o+	Δ	o+	Δ	o+	o+	●-	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	Δ	o-	↑
3	Знос поршневого компресійного кільця	Δ	Δ	o+	Δ	o+	Δ	o+	o+	●-	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	o+	Δ	↑
4	Порушення герметичності клапану	●-	Δ	o+	Δ	o+	Δ	o+	o+	●-	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	o-	Δ	!
5	Змінювання зазорів клапанів	Впускного	●+	Δ	Δ	Δ	o-	Δ	o-	●+	●+	o+	o-	o-	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	!
		Випускного	●+	Δ	o+	Δ	o-	o+	o-	●+	o+	o+	o-	o-	Δ	●-	Δ	Δ	Δ	!
6	Порушення початку подачі палива	Збільшення кута	o-	●+	o-	●+	o+	o-	o+	o-	o-	o+	o-	o+	o+	o+	o+	o-	Δ	↑
		Зменшення кута	o+	●-	o+	●-	o-	o+	o-	o+	o+	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	o+	o-
7	Знос розпилувача форсунок	o+	●-	o+	o+	o+	o+	o+	o+	o-	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	o+	o-	↑
8	Послаблення пружини форсунки	Δ	o+	o+	o+	o+	o+	o+	o+	Δ	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	o+	o-	↑
9	Нерівномірність подачі палива по циліндрах	Збільшення	Δ	●+	Δ	Δ	o-	●+	Δ	o+	Δ	o+	o-	o+	o+	o+	o+	Δ	Δ	?
		Зменшення	Δ	●-	Δ	Δ	o+	●-	Δ	o-	Δ	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	Δ	Δ
10	Закоксовування соплових отворів розпилувача	Δ	●+	o+	Δ	o+	Δ	o+	o-	Δ	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	Δ	Δ	↑
11	Втрата герметичності розпилувача	o+	●-	●+	o+	o+	Δ	o+	o+	o+	o-	o+	o-	o-	o-	o-	o-	Δ	o-	?
12	Задири деталей руху	Δ	Δ	o+	Δ	o-	o+	Δ	o+	Δ	o+	o-	o+	o+	o+	o+	o+	●-	o-	!
13	Тріщина циліндрової гільзи	o-	Δ	o+	Δ	o+	Δ	o-	●-	●-	o-	o+	●-	o-	o-	o-	o-	Δ	o-	!

Примітка: Δ – практично не впливає; ● – безпосередньо впливає; o – непрямо впливає; + - призводить до зростання величини; - - призводить до зменшення величини; ↑ – дозволяється короткочасна робота без обмеження; ? – дозволяється короткочасна робота зі зменшенням навантаження; ! – робота не дозволяється.

$$S_{\phi_i} = \frac{S}{2} \cdot \left[ \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left( \cos \phi_i + \sqrt{1 + \lambda^2 \cdot \sin^2 \phi_i} \right) \right], \quad (10)$$

де Δφ = 2° – крок інтегрування; λ – відношення довжини шатуна до радіуса кривошипа; S – хід поршня.

Величина K у співвідношенні (5) визначається по формулі:

$$K = \frac{(B - P_{II})^a}{748} \cdot \left( \frac{293}{T} \right)^B, \quad (11)$$

де B – барометричний тиск, мм.рт.ст.; T – температура повітря, K; P<sub>II</sub> – парціальний тиск водяних пар при реальній температурі й відносній вологості повітря, мм.рт.ст.

$$P_{II} = \varphi \cdot P_s /$$

Тут  $\varphi$  – відносна вологість повітря на впуску, %;  $P_s$  – тиск насичення водяних пар при реальній температурі, мм.рт.ст.

Показники  $a$  й  $b$  вибираються залежно від величини сумарного коефіцієнта надлишку повітря згідно з табл. 2.

Таблиця 2

:Вибір показників

Сумарний коефіцієнт надлишку повітря, $\alpha_\Sigma$	$a$	$b$
$> 2,1$	0,1	0,2
$1,7 \div 2,1$	0,1	0,35
$< 1,7$	0,3	0,55

Сумарний коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha_\Sigma$  визначається по формулі:

$$\alpha_\Sigma = 1,43 \cdot \frac{V_h \cdot i \cdot d \cdot n}{G_T} \cdot \frac{P_0}{T_0} \cdot \left( \frac{P_k}{P_0} \right)^{0,71}, \quad (12)$$

де  $d = \frac{1}{2}$  – для 4-х тактного дизеля.

Технічний стан дизель-генератора оцінюється по величині відносного відхилення приведеної питомої витрати палива від еталонного значення при заданій потужності:

$$\delta g_e = \frac{g_{eII} - g_{eЭ}}{g_{eЭ}} \cdot 100\%. \quad (13)$$

Технічний стан окремих робочих циліндрів дизеля, його паливної апаратури й системи повітропостачання оцінюється інтегральними методами, наприклад, по ступеню відхилення параметра по кожному каналу від середнього значення:

$$\delta k = \frac{k_i - k_{cp}}{k_{cp}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

де  $k_i$  – параметр робочого процесу в  $i$ -у циліндрі;  $k_{cp}$  – середнє значення цього параметра по дизелю.

Даний підхід до оцінки стану цих вузлів дозволяє виключити фактори зовнішніх умов, які важко враховуються, і значно підвищити вірогідність процесу діагностики.

У якості приватних діагностичних параметрів, що характеризують якість протікання робочого процесу в циліндрі дизеля можуть бути використані середній індикаторний тиск і температура газів на виході із циліндрів, величини яких у свою чергу залежать від параметрів дизеля:

$$P_i = f(g_{ц}; \alpha; P_k; \varepsilon; \varphi_{OP}; P_T; \lambda_{Г}; \rho; \delta; \varphi_i; P_{Г}; P_c; P_z); \quad (15)$$

$$T_{Г} = f(g_{ц}; \alpha; T_k; \varphi_a; P_i), \quad (16)$$

де  $\varepsilon; \lambda_{Г}; \rho; \delta$  – ступені стиску, підвищення тиску,

попереднього й наступного розширення;  $g_{ц}; P_T; \varphi_{OP}; \varphi_i$  – циклова подача палива, тиск вприскування, періоди випередження подачі й затримки самозапалювання палива;  $P_k; P_c; P_{Г}; P_z$  – тиск наддуву, наприкінці стискання, на впуску й максимальний тиск згорання;  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;  $P_i$  – середній індикаторний тиск;  $T_k; T_{Г}$  – температура повітря на впуску й випускних газів;  $\varphi_a$  – коефіцієнт продувки.

Використовуючи дані про величини  $P_i$  й  $T_{Г}$ , вираз (14) можна представити у вигляді наступних двох відносин:

$$\delta P_i = \frac{P_{i_i} - P_{i_{cp}}}{P_{i_{cp}}}; \quad (17)$$

$$\delta T_i = \frac{T_{i_i} - T_{i_{cp}}}{T_{i_{cp}}}. \quad (18)$$

Враховуючи, що величини максимального тиску згорання  $P_z$  й температури випускних газів  $T_{Г}$  характеризують напруженість дизеля по механічних і теплових навантаженнях, вони можуть служити як самостійні структурні обмежувальні параметри:

$$P_{zi} \leq [P_z]_{\max}; \quad (19)$$

$$T_{Gi} \leq [T_z]_{\max}. \quad (20)$$

## Висновки

За допомогою залежностей (2) – (20) можна встановити діапазони зміни діагностичних параметрів і визначити поточний стан як об'єкта діагностики в цілому, так і окремих його ланок. Наведені співвідношення враховують реальні умови роботи дизель-генератора й у зв'язку із цим дозволяють одержати реальну оцінку його технічного стану.

## Список літератури

1. Калявин В.П. *Технические средства диагностики* / В.П. Калявин, А.В. Мозгалевский. – Л.: Судостроение, 1984. – 208 с.
2. Брук М.А. *Работа дизеля в нестандартных условиях* / М.А. Брук, А.С. Вискман, Г.Х. Левин. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1981. – 304 с.
3. *Теплообмен в двигателях и теплонапряженность их деталей* / А.К. Костин и др. – Л.: Машиностроение, 1969. – 185 с.
4. *Технические средства диагностирования: справочник* / В.В. Клюев, П.П. Пархоменко, В.А. Абрамчук и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
5. *Влияние технического состояния цилиндропоршневой группы на показатели дизеля* / Л.В. Станиславский, Э.А. Улановский, О.Р. Игнатов, Н.Э. Нестеров // *Двигателестроение*. – М., 1983. – № 11. – С. 37-38.

Надійшла до редколегії 3.11.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В.Г. Рыкун, А.С. Савостьянов

*В данной статье показан анализ связей между отказами дизеля и параметрами рабочего процесса, который позволяет не только определить возникновение неисправности, но и выполнить прогнозирование технического состояния и принять решение на локализацию неисправности.*

**Ключевые слова:** *двигатель внутреннего сгорания, диагностика, неисправность дизель-генераторов.*

## DIAGNOSTIC PARAMETERS OF COMBUSTION ENGINES

V.G. Rykun, A.S. Savost'yanov

*In this article the analysis of connections is shown between the refusals of diesel and parameters of working process, which allows not only to define the origin of disrepair but also execute prognostication of the technical state and make decision on localization of disrepair.*

**Keywords:** *combustion engine, diagnostics, disrepair of diesel-generator set.*