

Подальша декомпозиція моделі теплообмінного апарату та елемента теплообмінної поверхні – термосифона, відкриває можливості у розвитку цього дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников // Автоматизация в промышленности, 2020. № 9. с. 3-11
2. Dolganov Y.A., Yepifanov A.A., Patsurkovskiy P.A., Sorokina T.N., Lychko B.M. Study of Prospects of Two-Phase Gravity Thermosiphons Used in Waste Heat Boilers of Cogeneration Units. Problemele energeticii regionale, Republic of Moldova, 2020 – № 1 (45).
3. Епифанов А.А., Дымо Б.В., Долганов Ю.А., Анастасенко С.Н. Экспериментальное исследование двухфазных закрытых термосифонов для экономайзеров котлов. Problemele energeticii regionale, Republic of Moldova, 2020 – № 2 (46)
4. Термосифонный экономайзер-воздухоподогреватель для котельных агрегатов малой мощности / Ю.А. Долганов, А.А. Епифанов, Б.В. Дымо// Збірник наукових праць НУК. Миколаїв: Видавництво НУК, 2012. №1. с.14-20

Analysis of the possibilities of creating a digital twins prototype of a two-phase thermosiphons heat exchanger

Iurii Dolganov, National University of Shipbuilding

Annotation: The possibility of using digital twin technology to create a prototype of a two-phase thermosiphons heat exchanger was analyzed. The tasks of decomposition of the mathematical model of the heat exchanger are formed, and the main criteria and engineering/digital tools for determining the characteristics and coefficients describing the operation of the thermosiphon are identified.

Keywords: digital twins, thermosiphon, heat exchanger

УДК 621.436:629.128.6:656.6

ТЕХНОЛОГІЯ ДІАГНОСТИКИ СУЧАСНИХ ДВОТАКТНИХ ДВИГУНІВ ТА КОМПРЕСОРІВ

**Варбанець Р. А.¹, Мальчевський В. П.², Мінчев Д. С.³, Залож В. І.⁴, Кирица В. І.⁵,
Александровська Н. І.⁶, Воловик К. В.⁷**

¹ д-р техн. наук, проф., зав. каф. Суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський Національний Морський Університет,
Одеса, Україна, roman.varbanets@gmail.com

² канд. техн. наук, доц. каф. суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет,
Одеса, Україна, valentinmalchevsky@gmail.com

³ канд. техн. наук, доц. каф. двигунів внутрішнього згорання, установок та технічної експлуатації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,

Миколаїв, Україна, misaidima@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доц. каф. інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Україна, zalozh@dinuoma.com.ua

⁵ канд. техн. наук, доц. каф. суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, kirnacsvlad@gmail.com

⁶ канд. техн. наук, доц. каф. суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, a.nadegda@gmail.com

⁷ аспірант Одеського національного морського університету, Одеса, Україна, Kateryna_volovyk@ukr.net

Анотація. Застосування вібродатчика разом з датчиком тиску газів у робочому циліндрі розширює можливості діагностики двигунів та компресорів у різних сферах експлуатації: морських дизелів, поршневих компресорів холодильних установок та авіаційних двигунів при їх випробуваннях на спеціальних стендах. Відомо, що експлуатаційні дефекти паливної апаратури високого тиску та механізму газорозподілу виявляються на індикаторних діаграмах $P(V)$, $P(deg)$ робочих циліндрів, змінюючи їх форму та значення основних параметрів робочого процесу. Однак відомо також, що деякі дефекти можуть мати однаковий вплив. Наприклад, пізній кут впорскування та знос паливної апаратури практично однаково спотворює індикаторну діаграму та значення параметрів. Причиною зниження компресії в циліндрах та зниження P_{comp} можуть бути як знос втулки або поломка кілець, так і нещільність закриття або дефект клапанів газорозподілу. У багатьох випадках вплив дефектів може бути не явним. **Ключові слова:** діагностика паливної апаратури, морський дизельний двигун, компресор, газорозподіл, моніторинг робочого процесу.

Вступ. Періодичний аналіз параметрів робочого процесу в циліндрах двигунів дає можливість оптимізувати їхню роботу, рівномірно розподіляти навантаження між циліндрами та вчасно виявляти небезпечні тенденції у зміні технічного стану основних систем та вузлів. В авіації, на морі та на інших видах транспорту безаварійну роботу двигунів та компресорів можна забезпечити шляхом регулярного контролю параметрів робочого процесу в окремих циліндрах. Періодичний контроль дозволяє виявити дефекти циліндрів, що зароджуються під час експлуатації і обслуговуючих двигун систем. Деякі дефекти можуть бути виявлені шляхом аналізу індикаторних діаграм $P(^{\circ}CA)$, аналізу їхньої форми на ділянках стиснення і згоряння, а також аналізу основних параметрів робочого процесу (P_{max} , P_{comp} , MIP , *ignition points* та інших.) [1]. Прикладами таких дефектів є зниження MIP , P_{max} або тиску кінця стиснення P_{comp} . На морі контроль робочого процесу дозволяє здійснювати регулювання двигунів так, щоб забезпечити низький рівень емісії шкідливих викидів, насамперед NO_x , відповідно до вимог ІМО [2].

Метою даної роботи є представлення технології діагностики паливної апаратури, роботи форсунки, приводу клапанів газорозподілу сучасних двотактних двигунів за допомогою паралельного аналізу вібродіаграм та індикаторної діаграми.

При аналізі одного з найбільш характерних дефектів ЦПГ – зниження компресії в робочому циліндрі і як наслідок P_{comp} – існує неоднозначність при аналізі одних лише індикаторних діаграм. Зменшення величини P_{comp} може бути викликано декількома причинами: зносом втулки циліндра, зносом та/або залипанням поршневих кілець, нещільністю закриття клапанів або *valves timing malfunction*. Всі ці фактори спричинять один наслідок – зниження параметра P_{comp} і потім P_{max} та MIP [2]. Таким чином, справжня причина дефекту може залишитись нез'ясованою.

Крім дефекту зниження компресії, деякі інші експлуатаційні дефекти, що виявляються на індикаторних діаграмах, можуть бути викликані різними причинами. В першу чергу це

дефекти паливної апаратури високого тиску та дефекти механізму керування клапанами газорозподілу. Необхідно підкреслити, що саме ці дефекти найчастіше виникають у процесі експлуатації морських двигунів. Особливо це стосується дефектів паливної апаратури високого тиску. Наприклад, пізнє згоряння палива в циліндрі, виявлене шляхом аналізу *ignition points* на індикаторних діаграмах $P(^{\circ}CA)$, також може бути наслідком декількох причин: пізнього кута впорскування палива та/або зносу прецизійних вузлів паливної апаратури високого тиску та зниження тиску палива перед форсунками під час впорскування. Тому виявити окремі експлуатаційні дефекти за допомогою одного лише аналізу індикаторних діаграм досить складно. Також на ряд показників робочого процесу двигуна, серед яких затримка самозаймання та деякі характеристики згоряння палива у циліндрі двигуна впливає температура палива перед паливним насосом високого тиску (ПНВТ), що регулюється системою стабілізації температури палива. Основним вузлом цієї системи є компресор холодильної установки, що підтримує необхідну температуру охолоджувальної води. Своєчасне виявлення несправностей клапанів компресорів систем стабілізації температури палива, що проявляються досить часто, дозволяє уникнути багатьох аварійних ситуацій у роботі дизелів, пов'язаних із раптовою зміною температури палива.

Безпосередні вимірювання та аналіз діаграм тиску впорскування палива перед форсунками могли б дати повну діагностичну інформацію про технічний стан паливної системи високого тиску. Однак такі вимірювання неможливо проводити за допомогою переносних пристроїв в умовах експлуатації. Це пов'язано з високим ризиком виникнення пожежі при протіканні палива у місцях встановлення датчиків в системі високого тиску. Тому такі вимірювання обмежені сучасними вимогами *IMO* та більшістю морських сертифікаційних суспільств [1, 5].

Альтернативою прямим вимірам є застосування вібродатчиків на магнітній платформі [5-8]. Такі датчики повністю відповідають сучасній стратегії неруйнівного контролю параметрів при діагностуванні морських двигунів. Магнітні вібродатчики можуть бути швидко встановлені на обране місце, що скорочує загальний час вимірів і дає можливість витримати умови псевдостационарного режиму навантаження під час діагностування двигунів. Вібродіаграми та індикаторні діаграми $P(^{\circ}CA)$ записуються одночасно та аналізуються паралельно. Такий паралельний аналіз дозволяє з'ясувати точну причину дефекту чи уточнити її. Особливо чутливим запропонований метод виявився для аналізу дефектів паливної апаратури високого тиску (*injectors, HPFP*), клапанів газорозподілу, а також впускних та випускних клапанів компресорів холодильних установок. Використання магнітних вібродатчиків для контролю роботи паливної апаратури високого тиску та клапанів дають цінну інформацію про технічний стан основних вузлів, таймінгу паливоподачі та таймінгу газорозподілу двигунів.

Вібродіаграма форсунки та випускного клапана. Нормальний технічний стан.

Індикаторна діаграма та вібродіаграма форсунки та клапана, що відповідають нормальному технічному стану двигуна для режиму *MCR*, показані на рис. 1. Індикаторна діаграма $P(^{\circ}CA)$ записується за допомогою датчика тиску (*HTT pressure sensor*), встановленого на індикаторний кран за допомогою *Thomson adapter* [5].

Для вимірювання та аналізу діаграм впорскування палива необхідно встановити магнітний вібродатчик на вільну частину торця форсунки. Для отримання вібродіаграми закриття клапану точка установки вібродатчика – на кришці циліндра приблизно напроти місця контакту тарілки клапану з кришкою, як показано на рис. 1.

Випробування на двотактних дизелях показали, що в більшості випадків з торця форсунки може бути записана вібродіаграма закриття клапана [5], тому часто достатньо використовувати тільки цю одну точку установки – торець форсунки. В результаті змін з двох

датчиків та подальшого розрахунку ВМТ [4,5,7,8] інженер отримує записані одночасно індикаторну діаграму $P(^{\circ}CA)$ – (див. рис.1) *red line* та оброблену вібродіаграму форсунки та випускного клапану – *green line*. Обидві діаграми і поєднані по кутку повороту колінчастого валу.

Високий тиск палива під час впорскування створює зусилля, що перевищує силу затягнутої пружини голки форсунки, голка піднімається вгору, ударяючись об верхній упор. Внаслідок цього удару вібродатчик фіксує імпульс з характерними загасаючими коливаннями (див. рис.1). Після амплітудної демодуляції вібросигналу отримуємо перший імпульс, що відповідає підйому голки форсунки (*Needle Up*). Наприкінці впорскування, після відсічки та припинення подачі палива з боку паливного насоса високого тиску, тиск перед форсункою падає, і пружина повертає голку на місце. Удар голки в посадкове місце розпилювача форсунки створює другий віброімпульс (*Needle Down*). Необхідно зазначити, що передні фронти віброімпульсів відповідають повному підйому і повній посадці голки. При цьому впорскування палива в циліндр починається трохи раніше, в момент початку підйому голки. Фазова тривалість підйому голки варіюється для різних типів двигунів і становить менше 0.3° колінчастого валу для більшості морських двотактних двигунів, протягом якої в циліндр впорскується менше 3% від циклової порції палива [2,5]. Таким чином, фазу моменту повного підйому голки та удару її об верхній упор (*Needle Up* на рис.1) можна вважати фазу дійсного кута впорскування палива в циліндр двигуна.

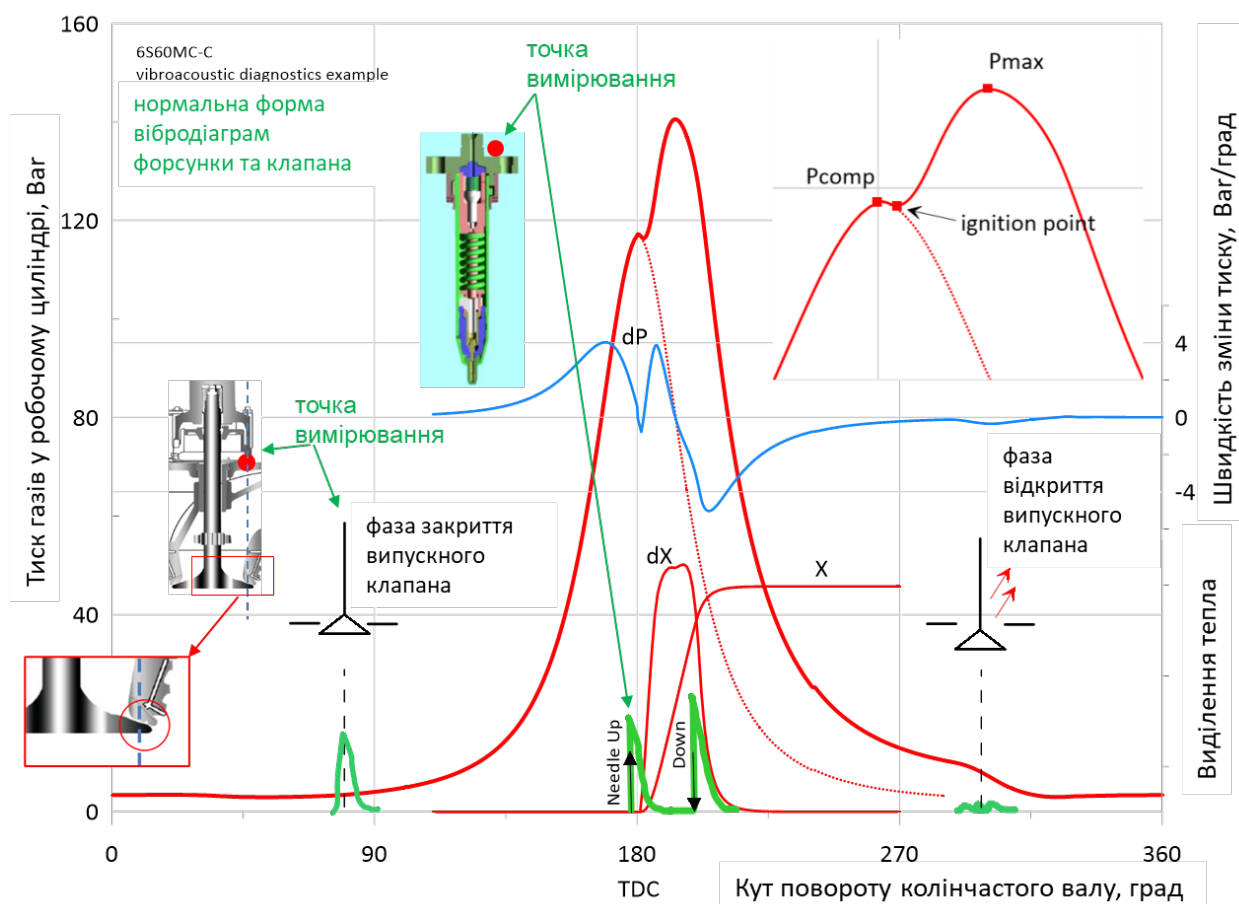


Рисунок 1. Вібродіаграми форсунки та випускного клапана в поєднанні з індикаторною діаграмою

Висновки. Досвід авторів у проведенні *performance analysis* двигунів показав, що аналіз вібродіаграм паливної апаратури та механізму газорозподілу двигуна, записаних паралельно з індикаторними діаграмами, дає хороші діагностичні результати.

За допомогою вібродатчика на магнітній платформі можна визначити:

- фази підйому та посадки голки форсунки, експлуатаційні дефекти форсунки;
- початок та кінець циркуляції палива в паливній системі;
- фази початку подачі та відсічення палива паливним насосом високого тиску;
- фази закриття і, в деяких випадках, відкриття клапанів газорозподілу;
- частоти та амплітуди коливань при роботі впускних та випускних клапанів

компресорів холодильних установок;

- фази упорскування масла в системі циліндрового змащування та експлуатаційні дефекти масляної форсунки.

Можлива також опосередкована оцінка гідросільності паливної апаратури і тиску впорскування палива. Таку інформацію можна отримати безпосередньо під час експлуатації за допомогою магнітного вібродатчика. Розглянутий спосіб отримання інформації доступний та зручний у процесі експлуатації. Разом з алгоритмічним методом розрахунку та корекції ВМТ, аналіз вібродіаграм паралельно з індикаторними діаграмами $P(CA, deg)$, дозволяє отримати таку інформацію, яка раніше була доступна тільки в лабораторних умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Heywood. Internal combustion engine fundamentals [Text] / J.B. Heywood. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 930 p.
2. Resolution MEPC.317(74). 2019. Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines. International Maritime Organization (IMO) [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.319\(74\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.319(74).pdf) (дата звернення: 28.06.2022)
3. Neumann, S. High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control [Text] / S. Neumann // CIMAC Congress. – Hamburg: Digest, 2001. – pp. 1–12.
4. Neumann, S. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data / S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash et al. // Diagnostyka. – 2019. – № 20(2). – pp. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/104516>.
5. Варбанец, Р. А. Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации [Текст]: дис. ... докт. техн. наук : 05.05.03 / Варбанец Роман Анатольевич ; Одес. национ. морск. акад., 2010. – 314 с.
6. Varbanets, R. Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters / R. Varbanets, O. Fomin, V. Pištěk et al. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – V. 9(3), №. 321. – 13 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>
7. Varbanets, R. Analyse of marine diesel engine performance / R. Varbanets, A. Karianskiy // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects. – Gdansk: Faculty of Ocean Engineering and Ship Tech: Gdansk University of Technology, 2012. – p. 269–275.
8. Varbanets, R. Improvement of diagnosing methods of the diesel engine functioning under operating conditions / R. Varbanets, S. Karianskiy, S. Rudenko, I. Gritsuk et al. // SAE Technical Paper. – 2017. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-01-2218>.
9. Minchev, D. Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues / D. Minchev, R. Varbanets, N. Aleksandrovska, L. Pisintaly // Acta Polytechnica. – 2021. – № 3(61). – pp. 428–440. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>

10. Minchev, D. S. Blitz-PRO User's manual [Електронний ресурс] / D. S. Minchev – Режим доступу: <http://blitzpro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf> (дата звернення: 27.06.2022)

Diagnostic Technology Of Modern Two-Stroke Engines And Compressors

Roman Varbanets¹, Valentyn Malchevskyi¹, Dmytro Minchev², Vitalii Zalozh³, Vladislav Kyrnats¹, Nadezhda Alexandrovskaya¹, Kateryna Volovyk¹

¹ Odessa National Maritime University, Department of Ship Power Plants and Technical Operation, Odessa, Ukraine

² Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Department of Internal Engines, Installations and Technical Operation, Mykolaiv, Ukraine

³ Danube institute of National university «Odessa maritime academy», Department of Engineering Sciences, Izmail, Ukraine

Abstract. The application of a vibration sensor with an in-cylinder pressure sensor extends the capabilities of internal combustion engines and compressor diagnostics for various types of plants and installations, such as marine diesel engines, refrigeration piston compressors, aircraft engines. The fuel injection equipment malfunctions as valve as valve train system malfunctions could be detected from the experimental indicated diagrams $P(V)$, $P(deg)$ of the engine cylinder operating process as it is known. The main indicators are the following: the shape of the diagram and the parameters of working cycle – the maximum combustion pressure P_{max} , the compression pressure P_{comp} , mean indicated pressure IMEP, etc. However, it should be considered that different types of malfunctions could have the same reflection on the indicated diagram.

Keywords: turbocharger diagnostics; marine diesel engine; compressor; gas distribution, monitoring working process

УДК 621.438 (075)

THERMAL CALCULATION OF GAS TURBINE UNIT WITH EJECTION OVER-EXPANSION OF GAS

Patlaichuk V. M. Head of the Department of Turbines, **Borschov O. M.** student,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Mykolayiv, Ukraine
volodymyr.patlaichuk@nuos.edu.ua

Abstract. The issues of thermal calculation of gas turbine unit with ejection over-expansion of gas in the turbine are considered. The peculiarities of the design and calculation of the parameters of the air-jet ejector are analyzed. The influence of the main parameters on its efficiency is determined.

Keywords: gas turbine unit; air-jet ejector; gas over-expansion; design features; thermal calculation.

The thermal calculation of a gas turbine unit with ejection over-expansion of gas will be carried out for the two-spool gas turbine unit with a free power turbine. This design has found wide application as part of marine propulsion systems of various manufacturers [1].

It is assumed that the air intake to the ejection device is carried out from the intermediate stages of the compressor part of gas turbine unit (more precisely, from the intermediate stages of the low-pressure compressor). The ring-shaped air jet ejector is located directly behind the power turbine