

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-32-39

ARTICLE HISTORY

Received 20.02.2026

Accepted 20.03.2026

Горб Сергій Іванович¹, Будуров Микола Ігорович²
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса, Україна
gs@onma.edu.ua¹, budurovuk@gmail.com²

Забезпечення регламентованого перевантаження головних дизелів на суднах із гвинтами, крок яких регульований

Gorb Sergii¹, Budurov Mykola²
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
gs@onma.edu.ua¹, budurovuk@gmail.com²

Ensuring Prescribed Overload of Main Diesel Engines on Vessels with Controllable Pitch Propellers

Резюме. Проаналізовано вимоги щодо забезпечення короточасного перевантаження головних суднових дизелів понад номінальну потужність у критичних навігаційних ситуаціях, а також практична реалізація цих вимог при комбінаторному керуванні частотою обертання двигуна та кроком гребного гвинта. Розрахунковим дослідженням встановлено, що режим регламентованого перевантаження на 10 % від номінальної потужності доцільно здійснювати з пріоритетом у збільшенні частоти обертання, а не збільшенням кроку гвинта. Це забезпечить зменшення теплового навантаження деталей циліндро-поршневої групи дизеля за критерієм мінімуму температури газів на лінії розширення та підвищить надійність рушійної установки при регламентованому перевантаженні.

Summary. The requirements for ensuring short-term overloading of main marine diesel engines beyond their rated power in critical navigational situations have been analyzed, along with the practical implementation of these requirements under combinatorial control of engine rotational speed and propeller pitch. A computational study has established that the regulated

overload mode by 10 % of the rated power should preferably be achieved by prioritizing an increase in rotational speed rather than propeller pitch. This approach will reduce the thermal load on the cylinder-piston group components of the diesel engine based on the criterion of minimum gas temperature along the expansion line and improve the reliability of the propulsion plant during overload prescribed by regulations.

Морським суднам періодично може знадобитися розвинути швидкість, що перевищує штатну експлуатаційну. Подібна необхідність виникає в критичних ситуаціях: ухилення від зіткнення або несанкціонованого переслідування, виконання екстреного розвороту, маневри у вузькостях і при сильній течії, при роботі в льодових водах, а також для виходу із серії послідовних ударів хвиль об борт судна.

У зв'язку з цим на морських судах передбачається можливість короточасного перевантаження головних двигунів (ГД) понад номінальну потужність за рішенням капітана. Відповідно, даний режим закладається в системи керування ГД та активується капітаном у разі загрози безпеці судна.

Уніфікованими вимогами The International Association of Classification Societies –

пункт 3.3 M51 (Rev. 4 Feb 2015, corr. 1 Oct. 2018),

пункти 7.2 і 8.4 M71 (Corr. 1 June 2016),

пункт 5.3.3 M88 (Apr. 2025) –

передбачено типове схвалення ГД внутрішнього згоряння після випробувань із потужністю 110 % від номінальної, яка може досягатися збільшенням частоти обертання на 3,2 % понад номінальну (якщо двигун працює за гвинтовою залежністю) або збільшенням навантаження на 10 % при номінальній частоті обертання, якщо двигун може використовуватися/використовується на судах з гвинтами, крок яких регульований (ГРК). Причому, якщо двигун випробовується на судні під час роботи за гвинтовою залежністю, тривалість перевантажувального режиму повинна бути 30 хвилин (п. 5.3.3 M88).

Аналогічні чи близькі вимоги до режимів перевантаження головних судових дизелів є у Правилах класифікаційних товариств (табл. 1).

Вимоги до випробувань ГД не поширюються на вибір режимів дизелів під час їх експлуатації на судах, однак виробники двигунів у конструкторській документації враховують регламентовані випробування і зазвичай обмежують перевантажувальні режими допустимою потужністю 110 %, при цьому обумовлюючи максимальну тривалість роботи з такою потужністю.

Таблиця 1

Вимоги деяких Класифікаційних товариств щодо режимів
перевантаження ГД

Правило	Вимога
American Bureau of Shipping, Rules for building and classing of marine vessels. Part 4. Chapter 2. Section 1. January 2025.	п. 13.5.4 – ГД мають працювати при заданих навантаженнях, які обираються з урахуванням сфери застосування та мають охоплювати як нормальний, так і аварійний режими роботи, включаючи режим 110 % номінальної потужності за паспортною гвинтовою характеристикою та при постійній номінальній частоті обертання (при використанні ГРК); п. 13.5.4 (b) – ГД має забезпечувати режим із максимально допустимим крутним моментом 110 % при 100 % частоті обертання для ГД із ГРК або з максимально допустимою виробником потужністю 110 % при 103,2 % номінальної частоти обертання відповідно до паспортної гвинтової характеристики для ГД із гвинтами, крок яких фіксований (ГФК) – із тривалістю, затвердженою виробником для короточасного використання.
Det Norske Veritas, Rules for classification of ships. Part 4. Chapter 3. Section 1. July 2025.	п. 2.1.3 – максимальна безперервна потужність ГД має бути визначена таким чином, щоб можна було досягти перевантажувальної потужності у 110 % від номінальної.
Lloyd's Register, LR-RU-001: Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 5, Chapter 2, Section 11. July 2025.	table 2.11.1, 2.11.2 – випробування ГД на судні з потужністю 110 % від номінальної; на судні з ГФК при 103,2 % номінальної частоти обертання тривалістю 30 хвилин; на судні із ГРК тривалістю, погодженою з виробником.
Bureau Veritas, Rules for classification of steel ships. Part C. Chapter 1. Section 2. July 2025.	п. 4.1.2 (d) – розширений звіт про прийнятно-здавальні випробування має включати випробування при максимально допустимому крутному моменті (110 %) при 100 % частоті обертання для ГД із ГРК ... тривалістю не менше 1/2 години.

Наприклад, у технічній документації головних малообертових дизелів MAN B&W S70MC6 (2009 р.) та G70ME-C10.5-GI (2025 р.) зазначено, що перевантаження, яке відповідає 110 % номінальної потужності, може бути дозволене протягом обмеженого періоду часу – однієї години кожні 12 годин. Така ж вимога міститься в технічній документації головного середньообертового дизеля Wärtsilä L20 (2002 р.). Частота обертання двигуна, за якої може досягатися потужність 110 %, зазвичай не регламентується, однак мається на увазі, що вона не може бути меншою за номінальну.

На судах із ГФК, перевантажувальна потужність 110 % досягається збільшенням частоти обертання двигуна понад номінальну на 3,2 %.

На судах із ГРК така потужність може досягатися як збільшенням частоти обертання, так і збільшенням кута повороту гвинта. Проте фактично для вибору співвідношення частоти обертання двигуна і кроку гвинта використовується комбінаторне керування (комбінаторні діаграми), яке на ходових режимах судна передбачає задання максимального кроку гвинта та зміну швидкості судна за рахунок зміни частоти обертання двигуна [1, 2]. Якщо обмежувачем навантаження двигуна задано часткове навантаження, крок гребного гвинта зменшується до значення, що відповідає цьому навантаженню.

Наближення кроку гвинта до максимального значення забезпечує найвищу економічність установки, оскільки при великому кроці зменшується витрата палива на мильо шляху [3, 4].

Якщо використовується комбінаторне керування спільно з обмежувачем навантаження двигуна, перевантажувальна потужність в екстремальних навігаційних ситуаціях забезпечується вимкненням на містку обмежувача навантаження. При такому відключенні ГД не може розвинути потужність понад 110 %, оскільки відповідно до резолюції МЕРС.335(76) від 17.06.2021 з поправками у нього повинен бути обмежувач, який блокує подачу палива (паливний індекс/хід рейки паливних насосів) понад допустиме максимальне значення (як правило, це 1,065 від номінальної подачі, якщо ГД працює за гвинтовою залежністю, або 1,1 від номінальної подачі, якщо частота обертання ГД неспроможна збільшуватися понад номінальне).

При відключенні обмежувача навантаження є можливість коригувати крок гвинта потенціометром на пульті керування містка [2]. Потенціометр дає змогу зменшити крок, якщо навантаження двигуна стало надмірним, і збільшити крок, якщо вимкнення обмежувача не забезпечило необхідного перевантажувального режиму.

Таким чином, у практиці експлуатації суден з комбінаторним керуванням перевантажувальні режими, як правило, забезпечуються додатковим розворотом лопатей ГРК без зміни частоти обертання ГД. Це зберігає максимальну економічність рушійної установки, але ставиться під сумнів прагнення покращувати економічність установки, коли на перевантажувальних режимах з урахуванням їх короткочасності в балансі тривалості ходових режимів судна важливіше забезпечити задовільний перебіг робочих процесів у ГД і відповідно – надійність рушійної установки.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження варіантів режимів перевантаження ГД при різних поєднаннях навантаження на дизель розворотом лопатей гвинта та частоти обертання. **Мета роботи** полягає у визначенні найкращого поєднання кроку гребного гвинта та частоти обертання ГД при навантаженні 100 ... 110 %.

Як об'єкт дослідження обрано ГД МаК 9М25С судна "TIMBER NAVIGATOR" з електронним регулятором Regulateurs Europa Viking 35 із логічним пристроєм, який впливає на крок гвинта та дозволяє задавати до п'яти точок для формування криволінійної залежності обмеження навантаження ГД. На даному судні використовується комбінаторне керування, відповідно до якого на ходових режимах крок гребного гвинта встановлюється максимальним у межах обмеження навантаження ГД, а швидкість судна регулюється зміною частоти обертання ГД шляхом переміщення рукоятки керування на містку в діапазоні 6 ... 10 умовних одиниць.

Технічні характеристики та показники робочих процесів ГД представлені в [5]. В якості оцінювання теплової напруженості деталей циліндро-поршневої групи дизеля обрана температура газів на лінії розширення [6]. Для моделювання використано методику чисельного моделювання [7] та дані ходових випробувань судна [8].

У табл. 2 порівняно режими перевантаження 110 % потужності для двох варіантів поєднань частоти обертання ГД та подачі палива:

режим 1 – частота обертання 750 хв^{-1} (100 %) та подача палива 0,002545 кг/цикл (110 %);

режим 2 – частота обертання 774 хв^{-1} (103,2 %) та подача палива 0,002712 кг/цикл (106,5 %), що також забезпечує перевантаження за потужністю 110 %.

Таблиця 2

Результати моделювання режимів перевантаження ГД МаК 9М25С

№ з/п	Показник	Режим 1	Режим 2
1	Максимальний тиск циклу, кгс/см ²	206,2	203,7
2	Максимальна температура циклу, К	2033,4	2008,1
3	Температура в циліндрі на момент початку випуску, К	818,8	813,2
4	Частка тепла, що відводиться у стінки циліндра на робочих ходах, %	9,4	9,3
5	Середня умовна температура стінок циліндра, К	646,6	642,0
6	Дійсний коефіцієнт надлишку повітря	1,60	1,64
7	Сумарний коефіцієнт надлишку повітря	2,14	2,17
8	Середня температура газів перед турбіною, К	838,5	833,2
9	Сумарний індикаторний ККД	0,473	0,475

Із табл. 2 випливає, що на режимі 2 порівняно з режимом 1 покращується наддування циліндрів, внаслідок чого максимальна температура циклу і відповідно температури газів на лінії розширення зменшуються на 25 К. Одночасно зменшується на 5 К середня температура газів перед турбіною. Це означає, що режим обмеженого часу перевантаження ГД доцільніше забезпечувати за рахунок пріоритету у збільшенні частоти обертання, а не збільшенням кроку гвинта.

У результаті дослідження пропонується на судах із ГРК для перевантаження ГД до потужності 110 % збільшувати частоту обертання дизеля до 103,2 %. Така рекомендація має виконуватися з одночасним налаштуванням обмежувача, який блокує подачу палива (паливний індекс/хід рейки паливних насосів) понад допустиме максимальне значення 106,5 %.

Також слід врахувати, що при великому опорі руху судна обмеження подачі палива 106,5 % може не дозволити збільшити частоту обертання ГД до 103,2 %. У такому випадку, щоб не зменшувати крок вручну, рекомендується виконати конструкторське опрацювання автоматизації процесу коригування кроку гребного гвинта. Відповідний пристрій має зменшувати крок гребного гвинта, якщо частота обертання ГД не досягла 103,2 %.

Таким чином, для ГД, які працюють на ГРК, встановлено, що регламентований режим перевантаження 110 % доцільно здійснювати

з пріоритетом у збільшенні частоти обертання, а не збільшенням кроку. Це забезпечить зменшення теплового навантаження деталей циліндро-поршневої групи дизеля за критерієм мінімуму температури газів на лінії розширення та підвищить надійність рушійної установки у критичних навігаційних ситуаціях.

Наступні дослідження плануються в області обґрунтування доцільності інтеграції засобів автоматизації процесу коригування кроку гребного гвинта у програмне забезпечення систем автоматичного керування.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Pitch Control System QTAGG. – Västerås: Q-TAGG R&D AB, 2023. – 2 р.
2. Горб С. И., Лялькин А. С., Чертков Г. И., Верлатый Н. И. Опыт эксплуатации и настройки системы управления главными двигателями и винтами регулируемого шага KAMEWA на судах типа "Юлиус Фучик": Морской транспорт. Серия "Техническая эксплуатация флота". Экспресс-информация. – Вып. 3(599). – М.: В/О "Мортехинформреклама", 1985. – 35 с.
3. Moon J., Je M., Hwang S. A study on performance and exhaust emission characteristics according to the controllable pitch propeller operation of two-stroke diesel engine in sailing condition. // Journal of Advanced Marine Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 48. – No. 6. – P. 384 – 391.
4. Tian W., Lang X., Zhang C., Yan S., Li B., Zang S. Optimization of Controllable-Pitch Propeller Operations for Yangtze River Sailing Ships. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – Iss. 9, 1579. – 21 p.
5. Горб С. И., Будуров М. И. Вибір режимів перевантаження головного дизеля на судні із гвинтом, крок якого регульований. // Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика: матеріали XII Міжнар. наук.-техн. конф., м. Одеса, 22 – 23 листоп. 2022 р. / Нац. ун-т "Одес. морська акад.". – Одеса, 2023. – С. 101 – 107.
6. Gorb S. I., Budurov M. I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor. // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15. – № 3. – P. 115 – 121.
7. Горб С. И., Карпілов О. Ю. Розрахунок робочих процесів суднового дизеля: навч. посіб. – Одеса: НУ "ОМА", 2020. – 88 с.

8. Acceptance test record № 271204 of engine MaK 9M25C. – 2011. – № 45229. – 21 p.

Abstract. The study examines the problem of ensuring a regulated short-term overload mode of main marine diesel engines on vessels equipped with controllable pitch propellers in situations where the vessel must temporarily develop a speed higher than its normal operating speed, for example, when avoiding a collision, performing an emergency maneuver, navigating in confined waters, operating in strong currents, or sailing in ice conditions.

The regulatory prerequisites for such an operating mode are considered, and it is shown that the possibility of overloading the main engine up to 110 % of its rated power is stipulated by the requirements of classification and regulatory documents, as well as by the manufacturers' technical documentation for marine diesel engines.

The main focus is placed on selecting the most rational method of implementing overload operation on vessels with controllable pitch propellers, where the required power can be achieved either by increasing engine speed, by increasing propeller pitch, or by a combined use of both. It is noted that in actual practice, under combinator control, priority is usually given to increasing propeller pitch. However, such an approach is not optimal from the standpoint of the diesel engine's thermal stress and the reliability of the propulsion plant.

To substantiate the optimal solution, a computational study was carried out using the MaK 9M25C main engine of the vessel TIMBER NAVIGATOR equipped with a combinator control system as an example.

As an evaluation criterion, the gas temperature along the expansion line of the working cycle was selected, since it characterizes the thermal load on the components of the cylinder-piston group. A comparison of two variants of the 110 % overload mode showed that the preferable option is the one in which priority is given to increasing engine speed to 103,2 % while limiting fuel supply to 106,5 %, rather than to increasing propeller pitch at nominal engine speed. This option improves cylinder charging, reduces gas temperatures along the expansion line and before the turbine, and thereby decreases the engine's thermal stress.

The practical value of the study lies in the fact that its conclusions make it possible to improve the reliability of the main diesel engine in critical navigational situations. The article is of applied significance for the design and adjustment of automatic control systems for ship propulsion plants equipped with controllable pitch propellers.