

## **ВИЗНАЧЕННЯ ГВИНТОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВОГО ГОЛОВНОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ НА ТРЕНАЖЕРІ МАШИННОГО ВІДДІЛЕННЯ TRANSAS ERS 5000 TECHSIM**

Богдан Ю.О., Манжелей В.С., Сатулов А.І., Худяков І.В.  
Херсонська державна морська академія (Україна)

Судновласники і оператори суден торгового флоту зацікавлені у зниженні своїх експлуатаційних витрат: палива, що споживається двигуном під час руху судна, часу необхідного на перехід до місця призначення, часу простою із-за некоректної експлуатації енергетичної установки та ін. Це ставить задачі оптимального вибору робочих параметрів пропульсивної установки. В залежності від різноманітних умов навігації і технічної експлуатації прийняття рішення досить ускладнено, особливо це пов'язано з невизначеністю метеорологічних умов у районі плавання судна. У зв'язку з цією і іншими експлуатаційними причинами судовому механіку слід мати повну інформацію про роботу пропульсивної установки у реальних умовах.

Для того, щоб судовий механік мав повну інформацію про роботу пропульсивної установки, вмів технічно грамотно обґрунтовувати вибір режиму роботи двигуна в конкретних умовах плавання, технічного стану судна і двигуна, необхідно володіти знаннями з побудови і аналізу гвинтових характеристик працюючого дизеля. Ці вимоги регламентуються Міжнародною Конвенцією і Кодексом з підготовки, дипломування і несення вахти, з поправками (табл. АІІ/2) і типовими модельними курсами Міжнародної морської організації (IMO Model Courses 2.07, 7.02) [1-4].

З метою коректного навчання, формування і визначення компетентності судового механіка найбільш раціонально використовувати тренажер машинного відділення (МВ) фірми TRANSAS ERS 5000 TechSim [5], модель танкера LCC (типа Aframax) з дизельною енергетичною установкою і прямою передачею потужності на гвинт фіксованого кроку [6]. Суднова пропульсивна установка з малообертовим дизельним двигуном, з прямою безпосередньою передачею потужності на гребний гвинт фіксованого кроку являється найбільш поширеною на торгових судах світового флоту. В склад пропульсивної установки моделі танкера LCC (типа Aframax) входить двотактний, малообертовий, реверсивний, дизельний двигун з турбонадувом MAN B&W 6S60MC-C з максимальною тривалою потужністю (MCR) 13736 кВт при частоті обертання колінчатого вала  $105 \text{ хв}^{-1}$  і номінальною тривалою потужністю (NCR, 85% MCR) 12364 кВт при  $101,4 \text{ хв}^{-1}$ , валопровід і гвинт фіксованого кроку діаметром 6 м і кроком  $H = 5,6 \text{ м}$ .

Характеристики двигуна представляють собою аналітичні або графічні залежності різних показників від одного з параметрів дизеля, що приймається за незалежну змінну величину [7, 8]. Основними експлуатаційними характеристиками являються навантажувальні і швидкісні [8]. Вони вказують, як на зміну енерго-економічних показників, так і на стан регулювання двигуна і систем, що його обслуговують. Однією з основних швидкісних характеристик роботи судового двигуна, що працює безпосередньо на гребний гвинт, являється гвинтова характеристика, що представляє залежність потужності і крутного моменту, а також інших показників працюючого двигуна від частоти обертання його колінчатого вала при змінній цикловій подачі палива  $N_e = f(n)$ ;  $M_e = f(n)$ . При безпосередній передачі потужності (пряма передача) навантаження двигуна за потужністю і моментом однозначно визначається частотою обертання його колінчатого вала  $n$  або швидкістю судна  $v_c$ , оскільки при незмінних умовах плавання  $v_{c1} / v_{c2} = n_1 / n_2$ . Звідси якщо необхідно збільшити швидкість судна в  $x$  разів, у стільки ж разів повинна бути підвищена частота обертання гребного гвинта і

двигуна. При цьому потрібно мати на увазі, що збільшення частоти обертання колінчастого валу двигуна вимагає збільшення в  $x^2$  разів крутного моменту і в  $x^3$  разів його потужності.

Гвинтова характеристика формується у результаті поєднання характеристик гвинта, корпусу, головної суднової передачі і валопроводу і визначає режими роботи головного двигуна при забезпеченні різних швидкостей судна.

Гребний гвинт обертається і одночасно переміщується разом з судном вздовж вісі обертання. Якщо б гвинт обертався у твердому середовищі, за один оберт він би перемістився на відстань рівну його кроку. Працюючи у рідкому середовищі, гвинт проходить шлях менший, чим його крок, оскільки під час свого вивільняє об'єм витісненої їм води, заповнення якого утворює супутній потік. Крім цього, в результаті тертя води о корпус судна має місце рух рідини в межах пограничного шару. Таким чином, гвинт переміщується у супутньому потоці. Поступальна швидкість гвинта  $v_p$ , м/с відносно води менше швидкості судна і визначається з виразу:

$$v_p = v_c (1 - \psi), \quad (1)$$

де  $v_c$  – швидкість судна, м/с;

$\psi$  – коефіцієнт супутнього потоку.

За формулою Тейлора для одногвинтового судна  $\psi = 0,5\delta - 0,1$  і залежить від коефіцієнта повноти водотоннажності:

$$\delta = \frac{V}{L \cdot B \cdot Dr}, \quad (2)$$

де  $V$  – об'ємна водотоннажність, м<sup>3</sup>;

$L$  – довжина судна між перпендикулярами, м;

$B$  – ширина судна у районі мідель шпангоуту, м;

$Dr$  – осадка судна, м.

Переміщення гвинта характеризується його ходом і виражається відношенням поступальної швидкості до частоти його обертання:

$$\Lambda_p = \frac{v_p}{n_s} \quad (3)$$

Відношення ходи гвинта до його діаметру називається відносною ходом:

$$\lambda_p = \frac{v_p}{n_s \cdot D}, \quad (4)$$

де  $D$  – діаметр гвинта, м.

Різниця між геометричним кроком (відстанню, що проходить гвинт за один оберт у твердому середовищі) і ходом (відстанню, що проходить гвинт у рідкому середовищі) називається ковзанням гвинта  $S$ , яке визначається з виразу:

$$S = H - v_p / n_s, \quad (5)$$

де  $H$  – крок гвинта, м.

Відношення ковзання до кроку гвинта називається відносним ковзанням  $s$ :

$$s = 1 - v_p / (n_s \cdot H). \quad (6)$$

Відношення відносного ковзання до діаметру можна виразити формулою:

$$\lambda_p = \frac{H}{D} (1 - s). \quad (7)$$

При відносній ході рівній нулю (судно не рухається), ковзання тоді максимальне (одиниця). Це режим швартовних випробувань.

Максимального значення  $\lambda_p$  можна було б досягнути тільки при умові, що  $s$  рівне нулю, але це неможливо, так як  $v_p$  завжди менше  $v_c$ .

Практично на судні ковзання гвинта розраховується наступним чином. Замірюються покази лічильника сумарної кількості обертів колінчатого валу двигуна, початкове і через 24 години роботи (найбільш оптимальний час, але можливий і експрес розрахунок). Отримавши покази лічильника і знаючи крок гвинта (дані судна) розраховується теоретична відстань, яку пройшло судно, в милях, за формулою:

$$D_t = (n \cdot H \cdot 60) T / 1852, \quad (8)$$

де  $n$  – частота обертання гребного гвинта,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$H$  – крок гвинта, м;

$T$  – інтервал часу заміру показів сумарного лічильника обертів колінчатого валу двигуна, год.

Дійсна відстань (в милях), яку пройшло судно за даними з містка.

Таким чином, процентне ковзання гвинта розраховується як відношення різниці теоретичної і дійсної відстаней до теоретичної відстані, яку пройшло судно і помноженому на 100 %:

$$S = \left( \frac{D_t - D_r}{D_t} \right) \cdot 100, \quad (9)$$

Значення ковзання може мати як додатне, так і від'ємне значення. Підвищене додатне значення свідчить про те що гвинтова характеристика «важкого» гвинта. Від'ємне значення вказує на характеристику «легкого» гвинта.

Реально в процесі експлуатації величина буксирувального опору судна змінюється в залежності від завантаження судна (його посадки), характеристик форватера, метеорологічних умов (вітру, хвилювання), стану поверхні корпусу, що також можливо моделювати на тренажері. Експлуатаційні гвинтові характеристики зазвичай являються дещо «важкими» внаслідок впливу морського хвилювання, обростання корпусу та інших впливів. Розрізняють наступні гвинтові характеристики: теоретичну або номінальну, характеристику «важкого» гвинта і характеристику «легкого» гвинта. Гвинтова характеристика називається теоретичною або номінальною, коли гвинт при номінальній частоті обертання споживає номінальну потужність двигуна.

При зміні відносною ходи гвинта (шлях, що проходить гвинт за один оберт  $\lambda_p$  вираз 4), а це можливо при зміні опору руху судна, гвинтова характеристика змінює своє положення і вигляд, змінюється значення коефіцієнта  $s$  у рівнянні потужності 10. Так, при збільшенні опору внаслідок збільшення осадки судна, посиленні зустрічного вітру або хвилювання, буксирування, обростання корпусу швидкість судна і хода гвинта зменшуються, тому гребний гвинт при тій самій частоті обертання поглинає більший крутний момент. Така характеристика часто називається характеристикою «важкого» гвинта. В умовах експлуатації обтяжування гвинта може бути внаслідок збільшення шорсткості лопатей із-за корозії, обростання, ерозії (кавітаційних каверн). При зменшенні опору руху судна, що можливо при супутньому вітрі або зменшенні осадки (плавання в баласті), швидкість судна і хода гвинта зростають. Тоді така гвинтова характеристика має назву характеристики «легкого» гвинта. При роботі двигуна в умовах «легкої» характеристики завантаження його виявляється значно меншим ніж у попередніх випадках. Зокрема для підтримання номінальної частоти обертання від двигуна потребується значно менша потужність і середній ефективний тиск. У цьому випадку потужність двигуна використовується не повністю, а робота на високих обертах спряжена з надмірним зношуванням деталей.

Зміна параметрів дизеля MAN B&W 6S60MC-C при роботі за гвинтовою характеристикою наведена на рисунку 1.

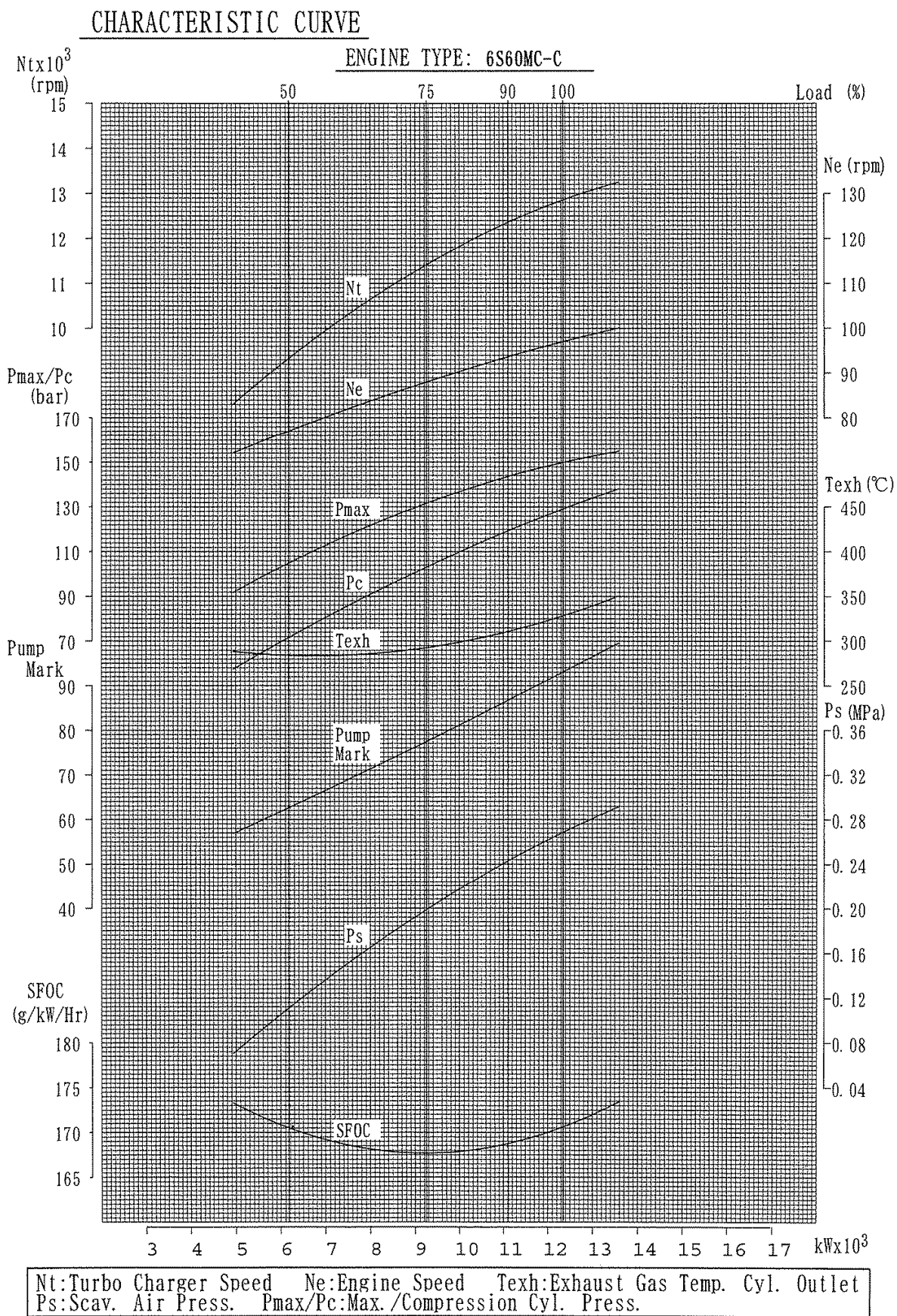


Рисунок 1. Зміна параметрів дизеля MAN B&W 6S60MC-C при роботі за гвинтовою характеристикою [10].

Перехід з режиму повного навантаження до малого здійснюється шляхом скорочення циклової подачі палива. Найбільш економічна робота двигуна забезпечується у області навантаження двигуна 72...85% від MCR. Зменшення навантаження і скорочення витрати палива призводить до падіння температури випускних газів і максимального тиску цикла, тобто зменшуються теплові і механічні навантаження двигуна.

Для моделі танкера типу LCC потужність, що споживається гребним гвинтом, визначається з виразу 10 і підпорядковується закону кубічної параболи, що являється теоретичною гвинтовою характеристикою.

$$N_a = N_e = c \cdot n^3. \quad (10)$$

У ході роботи на тренажері машинного відділення проведені випробування дизеля MAN B&W 6S60MC-C моделі танкера LCC при різних умовах роботи пропульсивного комплексу (мілководдя, супутній вітер, нормальні умови та ін.) та отримані гвинтові характеристики (Рис. 2).

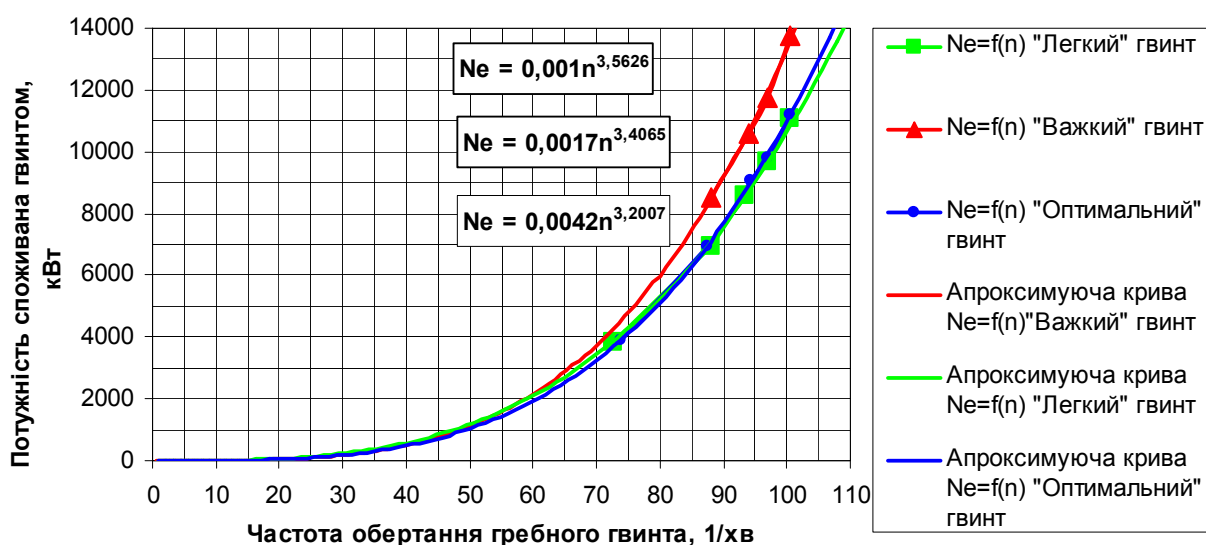


Рисунок 2. Гвинтові характеристики дизеля MAN B&W 6S60MC-C отримані на тренажері машинного відділення TRANSAS ERS 5000 TechSim

З побудови гвинтових характеристик дизеля авторами розроблено практичне заняття під час якого група курсантів (слухачів) збирає параметри (частота обертання, потужність, витрата палива та ін.) роботи пропульсивного комплексу при різних обертах двигуна і власне кожен індивідуально будує гвинтові характеристики.

Оволодіння курсантами (слухачами) навиками з побудови гвинтових характеристик і розрахунку значення ковзання гвинта дозволяє: краще розуміти співвідношення потужності двигуна і витрати палива для різних режимів роботи двигуна/ швидкості судна; отримати можливість прогнозувати потужність двигуна і витрату палива при різних режимах роботи / швидкості судна; розуміти особливості та відмінності гвинтових характеристик та ін.

Таким чином на тренажері побудовані гвинтові характеристики, визначено, що пропульсивна установка найбільш ефективно працює при навантаженні 75 % MCR, підвищення навантаження більше 75 % MCR призводить до зростання питомої ефективної витрати палива, теплових і механічних навантажень деталей дизеля. Робота двигуна за гвинтовою характеристикою зі зменшенням навантаження менше 75 % MCR супроводжується зменшенням теплового і механічного навантаження дизеля. Робота на малих навантаженнях не бажана не тільки з точки зору економічності двигуна, але і з точки зору технічного обслуговування. Малі циклові порції палива і змінний надлишок

повітря зменшують температуру в циліндрі, що викликає утворення нагарів, низькотемпературної корозії у циліндрі і вихлопному тракті.

Застосування тренажера дозволяє закріпити теоретичні знання і здійснити оцінку компетентності судового механіка. Навики отримані при визначенні гвинтових характеристик і розрахунку значення ковзання гвинта на тренажері являються гарним підґрунтям для практичного застосування на реальному судні

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року, (International Seafarers' Training, Certification and Watchkeeping (STCW-78)).
2. Міжнародний Кодекс про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1995 року з Манільськими поправками 2010 (International Seafarers' Training, Certification and Watchkeeping Code (STCW-95) with Manila Amendments 2010).
3. Модельний курс ІМО 2.07 "Тренажер машинного відділення" (Model course 2.07 Engine-Room Simulator).
4. Модельний курс ІМО 7.02 "Старший механік та другий механік" (Model course 7.02 Chief Engineer Officer and Second Engineer Officer).
5. Богдан Ю.А. Тренажер машинного відділення на путі становлення компетентного судового механіка / Ю.А. Богдан, В.С. Манжелей // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 8-ої Міжнародної науково-практичної конференції, 28-29 вересня 2017 року. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2017. – С. 481-483.
6. Тренажер TechSim 5000. ERS 5000 TechSim. MAN B&W 6S60MC-C Diesel Engine – Tanker LCC (Aframax). – 2014, 11. – 279 с.
7. Возницкий И.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания: [в 2 т.] / И.В. Возницкий, А.С. Пунда. – М.: МОРКНИГА, 2010. – Т.1. – 260 с.; Т.2. – 382 с.
8. Малиновский М.А. Обеспечение надежности судовых дизельных установок на эксплуатационных и особых режимах работы / Малиновский М.А., Фока А.А., Ролинский В.И., Вахрамеев Ю.З. – Одесса: Фенікс, 2007. – 150 с.
9. Суворов П.С. Рабочие процессы и режимы судовых двигателей внутреннего сгорания / П.С. Суворов. – Одесса: ОНМА, 2007. – 192 с.
10. MITSUBISHI-MAN B&W 6S60MC-C. Instruction book. Operation and Data. Volume 1. – 491 p.