

UDC 656.61:629.5.026.2

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-106-0-6>

## ЗАСТОСУВАННЯ І РОЗВИТОК ТРЕНАЖЕРУ МАШИННОГО ВІДДІЛЕННЯ У НАПРЯМКУ АКАДЕМІЧНОЇ ТА ПРАКТИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ СУДНОВИХ МЕХАНІКІВ

### APPLICATION AND EVOLUTION OF AN ENGINE ROOM SIMULATOR IN THE FIELD OF MARINE ENGINEERS ACADEMIC AND PRACTICAL TRAINING



**Yurii Bohdan**

Candidate of Engineering Sciences, Ph.D.,  
Associate Professor of Vessel's Power Plant  
Operation Department,  
Kherson State Maritime Academy, Ukraine  
e-mail: [bohdayurii09@gmail.com](mailto:bohdayurii09@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-3178-1941>



**Anatoliy Satulov**

2Senior Lecturer of Vessel's Power Plant Operation  
Department, Chief Engineer,  
Kherson State Maritime Academy, Ukraine  
e-mail: [anasat@ukr.net](mailto:anasat@ukr.net)

**Annotation.** The work is devoted to the application and development of the engine room simulator in the field of marine education and training. The factors of expediency of using an engine room simulator, the purpose and advantages of simulator training are given. The use of the engine room simulator in the training of marine engineers as a technical means of training in the study of certain topics and sections of special disciplines for the vessel's power plants operation is substantiated. As a result, the propeller curves of the main low-speed cross-head diesel engine with direct power transmission to the fixed pitch propeller and the propeller and load characteristics of the main medium-speed diesel engine with reduction gear and power transmission to the controllable pitch propeller using engine room technological simulator WÄRTSILÄ ERS 5000 TechSim are simulated. The characteristics and features of operation of such

propulsion plants under different operating conditions (shallow water, accompanying wind, contrary wind, normal conditions, change of operating modes, etc.) are obtained. The authors developed laboratory classes on the main engines' propeller curve charting. Engine room simulator utilization allows to consolidate theoretical knowledge and competence assessment of the marine engineers. The skills gained in determining the propeller characteristics and calculating the value of the propeller slip on the simulator are a good basis for practical application on a real ship.

It is determined that working on the engine room simulator by applicants for higher education and marine engineers' tests of the main engine, charting diagrams, simulation and analysis of operational and special modes of operation of the main engine significantly deepens their level of competence.

The analysis of a condition of modern engine room simulators, directions and tendencies of their development is carried out. Nowadays development of simulator training is characterized by the expansion of the library of ship models, equipped with the latest technology, strengthening the elements of virtual, augmented or mixed reality. The tendency of modelling on the simulator, operations and procedures of the machinery equipment maintenance is noted.

**Keywords:** engine room simulator, marine engineers, seafarers training.

## 1. Вступ

Машинне відділення (МВ) сучасних суден, оснащене високотехнологічним обладнанням з високим ступенем автоматизації, як правило з безвахтовим режимом обслуговування. У зв'язку з цим судновласники, затребують на свої судна добре підготованих фахівців морської галузі – механіків, електромеханіків, при цьому скорочуючи час для підготовки на борту судна. В наш час, стрімкого технологічного розвитку, виникає гостра необхідність у підготовці, перепідготовці суднових механіків компетентних з технічної експлуатації енергетичних установок сучасних суден у відносно скорочений термін. Таку підготовку майже не можливо здійснювати без використання тренажеру МВ, що націлений на полегшення процесу навчання, одночасно покращуючи ступінь готовності до практичної діяльності курсантів і компенсації зменшення часу практичної підготовки на борту судна. Тренажерна підготовка являється досить ефективною у плані підвищення компетентності суднових механіків та їх навичок при технічній експлуатації енергетичної установки і управлінні машинною командою у штатних і аварійних ситуаціях.

Мета роботи полягає у визначенні переваг та факторів доцільності застосування тренажерів МВ при академічній та практичній підготовці морських фахівців. Обґрунтуванні тренажерної підготовки компетентних суднових механіків та використанні тренажеру МВ у якості технічного засобу навчання

при вивченні окремих тем і розділів спеціальних дисциплін з експлуатації суднових енергетичних установок. Аналізі стану і тенденцій розвитку тренажерів машинного відділення.

## **2. Застосування тренажеру машинного відділення при підготовці компетентних суднових механіків**

На сьогоднішній день тренажери машинного відділення різних виробників (KONGSBERG, WÄRTSILÄ, UNITEST та ін.) [1] ґрунтовно закріпились у навчанні, підготовці, перепідготовці і підвищенні кваліфікації суднових механіків [2; 3]. Морські навчальні заклади у всьому світі визнають цінність тренажерної підготовки при навчанні курсантів і оцінці їх рівня компетентності. Міжнародна морська організація (International Maritime Organisation, IMO), найвищий міжнародний морський орган, офіційно сприяє використанню тренажерів при підготовці суднових механіків [4]. Його схвалення закріплено в міжнародній конвенції про стандарти навчання, сертифікацію і несення ваhti для моряків 1978 року, міжнародного кодексу про підготовку, стандарти навчання, сертифікацію і несення ваhti для моряків з манільськими поправками, внесеними у 2010 році (Конвенція та кодекс STCW 78) [5, 7]. Конвенція STCW 78 рекомендує використовувати тренажери як для навчання, так і для тренінгів та оцінки компетентності. Тренажерна підготовка, що здійснюється у контрольованому середовищі за допомогою викладача (інструктора) дає здобувачам вищої освіти (діючим фахівцям) можливість практичного вивчення управління елементами енергетичної установки, безпосередньо в різних варіантах ситуацій, котрі можуть бути небезпечними, складними або фінансово затратними при їх реальному виконанні на борту теплохода, щоб виконати їх реально. Підготовка на тренажері машинного відділення має наступні переваги:

1. Підвищення безпеки несення машинної ваhti.
2. Накопичення попереднього досвіду з експлуатації типових суднових енергетичних установок.
3. Можливість спеціалізованої підготовки суднових механіків.
4. Поглиблення розуміння вимог міжнародних регламентуючих документів [5–7].
5. Зниження експлуатаційних витрат.
6. Зменшення страхових виплат.
7. Застосування для оцінки компетентності з метою прийняття на роботу.

Доцільність застосування тренажерів МВ при навчанні морських фахівців визначається наступними основними факторами: по-перше, на тренажерах можливе моделювання роботи дорогих, складних енергетичних установках, підготовка на яких пов'язана з певним ризиком, особливо на початку навчання; по-друге використання тренажерів дозволяє представляти інформацію слухачам про коректність їхніх, що значно прискорює і якісно покращує процес навчання; по-третє тренажери сприяють активізації слухачів, підвищують їхній інтерес до навчання і тим самим забезпечують прискорення формування навичок. Також застосування тренажерів МВ сприяє кращій орієнтації здобувачів вищої освіти та морських фахівців при переході від вивчення теорії на заняттях до оволодіння практичними діями, активізує процес навчання; дозволяє наблизити здобувачів до виробничої обстановки, у той же час виключає небезпеку реальних аварій, поломок устаткування; дає можливість задавати слухачам і повторювати потрібні режими роботи у будь-який момент, що найчастіше у виробничих умовах неможливо, моделювати складні умови роботи, у тому числі не штатні (аварійні) ситуації, з якими слухачі при роботі на діючому устаткуванні ознайомитися не можуть; допомагає розвивати прийоми самоконтролю – вирішального фактора при навчанні багатьом навичкам, особливо при оснащенні тренажерів спеціальними засобами і пристроями зворотного зв'язку; у ряді випадків робить навчання економічно більш вигідним, чим у виробничих умовах, на діючому устаткуванні.

Тренажер МВ розроблений для навчання, підготовки, перепідготовки, підвищення кваліфікації та оцінки компетентності суднових механіків з експлуатації суднових енергетичних установок та безпечного несення вахти у МВ з високим рівнем автоматизації. Метою підготовки на тренажері МВ є:

- вивчення і аналіз схем суднових систем;
- контроль і управління роботою систем, механізмів і обладнання;
- вивчення принципів роботи систем управління, автоматизації і аварійно-попереджувальної сигналізації;
- відпрацювання операцій з підготовки, пуску, експлуатації під час роботи і зупинки головного і допоміжного обладнання;
- маневрування пропульсивною установкою;
- контроль шкідливих викидів, способи оптимізації шкідливих речовин і економії палива;
- управління судновою електроенергетичною системою;
- відпрацювання зв'язку (комунікації) між членами екіпажу;

- експлуатація і несення вахти у штатних та аварійних умовах роботи, пошук і видалення несправностей;
- відпрацювання навичок з оцінки та управління ризиками;
- виконання аналізу аварійних ситуацій;
- аналіз людського фактору у машинному відділенні;
- можливість визначення реакції екіпажу в надзвичайних ситуаціях;
- підвищення кваліфікації суднових механіків шляхом попередньої кваліфікованої тренажерної підготовки на суднах оснащених новим обладнанням;
- відпрацювання вправ з управління ресурсами машинної відділення;
- ретельне відпрацювання спеціальних експлуатаційних питань, питань з енергоефективності з наступним детальним аналізом, тобто формування аналітичних навичок обробки інформації.

Для здійснення тренажерної підготовки у Херсонській державній морській академії встановлений та успішно застосовується у навчальному процесі тренажер машинного відділення фірми WÄRTSILÄ ERS 5000 TechSim – версія тренажера, моделі якої являються точними і детальними копіями сучасних суден, їх систем та обладнання. Дана версія тренажера призначена для проведення поглибленої та розширеної підготовки в умовах штатної або аварійної ситуації. На тренажері встановлені наступні моделі суден: танкер LCC (типу Aframax) з дизельною енергетичною установкою і прямою безпосередньою передачею потужності на гвинт фіксованого кроку, пором типу Ro-Pax з двомашинною двовальною дизельною енергетичною установкою з редукторною передачею потужності на гвинти регульованого (Twin Medium Speed Engine + CPP – Ro-Pax Ferry), круїзний лайнер з дизель-електричною енергетичною установкою (AZIPOD Diesel-Electric Cruise Ship), танкер-газовоз з дизель-електричною енергетичною установкою, що працює на двох видах палива (Dual Fuel Diesel-Electric LNG Carrier). Загальний вигляд тренажера машинного відділення фірми WÄRTSILÄ ERS 5000 TechSim встановленого у Херсонській державній морській академії показано на рис. 1.

Тренажер WÄRTSILÄ ERS 5000 TechSim охоплює важливі напрями морського навчання у повній відповідності з вимогами Конвенції STCW 78/95, частина A-1/12 і частина B-1/12 [5]; Міжнародного Кодексу з управління безпекою (ISM Code) частина 6 і частина 8 [8]; задовольняє вимогам конвенцій [6, 7], резолюцій IMO та модельних курсів IMO Model Courses 2.07, 7.02, 7.04 [4, 9, 10]; стандартам IEC; сертифікований норвезьким класифікаційним товариством DNV згідно Стандарту на сертифікацію морських тренажерів № 2.14 (2011). В процесі підготовки є необхідним



**Рисунок 1 – Загальний вигляд центрального поста управління  
тренажера МВ фірми WARTSILA ERS 5000 TechSim**

відпрацювання різних сценаріїв з наступним аналізом виконаних дій і помилок, як у режимі навчання, так і в екзаменаційному режимі. Хоча найкращий спосіб оволодіння практичним досвідом експлуатації і безпечного управління ресурсами МВ це навчання у реальному житті, на реальному судні, де все обладнання реальне і у дії, а також виникає періодична необхідність прийняття зважених коректних рішень, все ж таки актуальним і ефективним для отримання такого досвіду є тренажер. Тренажерна підготовка дозволяє морякам йти через розуміння енергетичної установки та вирішення порушень сучасним і ефективним чином, працювати у реальному часі, або коли масштаб часу задається у відповідності з виконанням завдання. Тренажер також дозволяє створити різні проблеми з експлуатації енергетичної установки, з якими можна зіткнутися у морі. Як відомо у професійних колах проблема, що виникла при експлуатації енергетичної установки судна може призвести до виникнення інших проблем, аж до незапланованого або аварійного виведення з дії головної енергетичної установки. Застосування тренажера машинного відділення при підготовці суднових механіків, призводить до кращого їх розуміння суднових енергетичних установок, суднових систем, процедур з управління, експлуатації та обслуговування машинного обладнання і в результаті підвищує безпеку, сприяє зменшенню людського фактору, ризиків ушкодження персоналу машинної команди, мінімізує ризики нанесення шкоди навколишньому середовищу і судновим системам. Технічно грамотна експлуатація компетентними судновими механіками обладнання машинного відділення підвищує енергоефективність суднової енергетичної установки.

## 2.1 Моделювання гвинтових характеристик суднового головного малообертового дизеля на тренажері машинного відділення WÄRTSILÄ ERS 5000 TechSim

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. АIII/2) і типовими модельними курсами Міжнародної морської організації (IMO Model Courses 2.07, 7.02, 7.04) [4; 7; 9; 10].

З метою коректного навчання, формування і визначення компетентності суднового механіка найбільш раціонально використовувати тренажер MB фірми WÄRTSILÄ ERS 5000 TechSim [11], модель танкера LCC (типа Aframax) з дизельною енергетичною установкою і прямою передачею потужності на гвинт фіксованого кроку [12]. Суднова пропульсивна установка з малообертовим дизельним двигуном, з прямою безпосередньою передачею потужності на гребний гвинт фіксованого кроку являється найбільш поширеною на торгових суднах світового флоту. В склад пропульсивної установки моделі танкера LCC (типа Aframax) входить двотактний, малообертовий, реверсивний, дизельний двигун з турбонаддувом MAN B&W 6S60MC-C з максимальною тривалою потужністю (MCR) 13736 кВт при частоті обертання колінчатого вала 105 хв-1 і номінальною тривалою потужністю (NCR, 85 % MCR) 12364 кВт при 101,4 хв-1, валопровід і гвинт фіксованого кроку діаметром 6 м і кроком  $H = 5,6$  м.

Характеристики двигуна представляють собою аналітичні або графічні залежності різних показників від одного з параметрів дизеля, що приймається за незалежну змінну величину [13; 14]. Основними експлуата-

ційними характеристиками являються навантажувальні і швидкісні [15]. 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 суднового 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 валу 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 валу  $n$  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:

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



де  $V$  – об'ємна водотоннажність,  $\text{м}^3$ ;  
 $L$  – довжина судна між перпендикулярами,  $\text{м}$ ;  
 $B$  – ширина судна у районі мідель шпангоуту,  $\text{м}$ ;  
 $Dr$  – осадка судна,  $\text{м}$ .

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,  $\text{м}$ .

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,  $\text{м}$ .

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:

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

де  $n$  – частота обертання гребного гвинта, 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%:

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

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 відносної 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 рис. 2.

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.

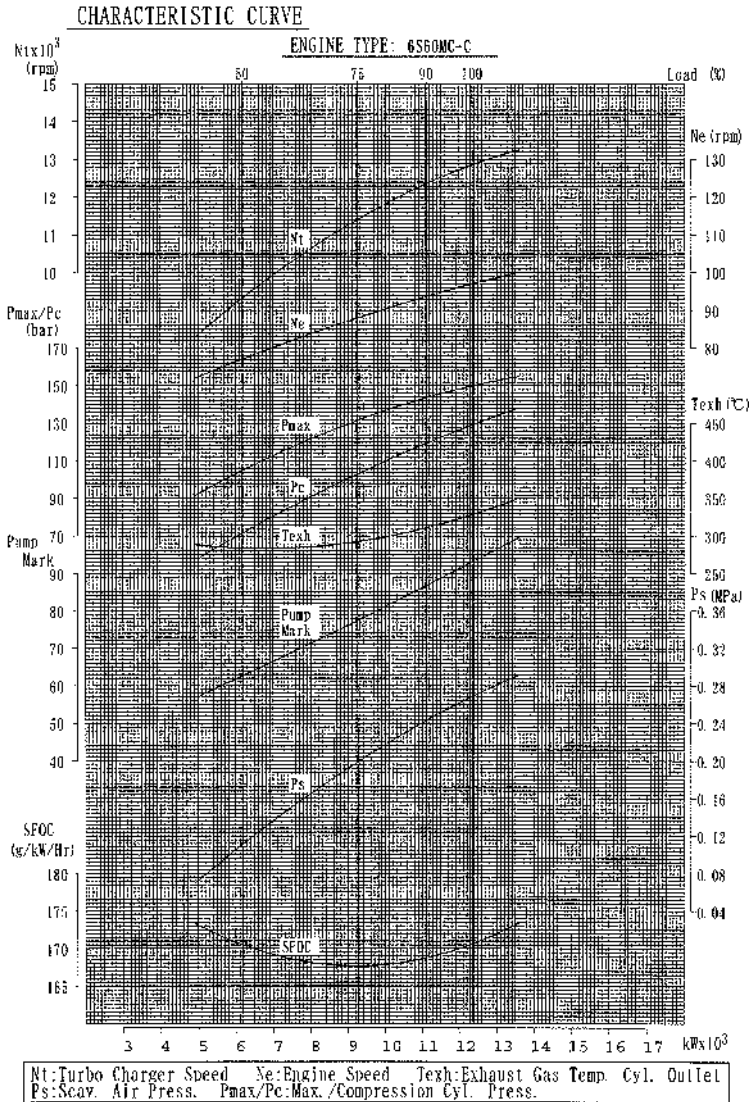
Для моделі танкера типу LCC потужність, що споживається гребним гвинтом, визначається з виразу 10 і підпорядковується закону кубічної параболи, що являється теоретичною гвинтовою характеристикою.

$$N_{\text{гв}} = N_e = c \cdot n^3. \quad (10)$$

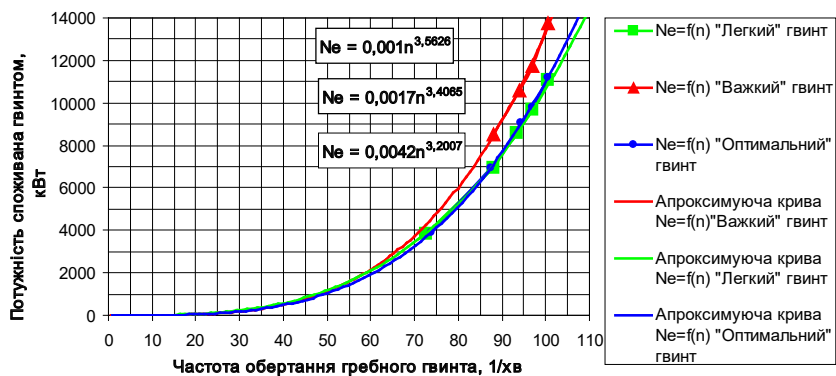
У ході роботи на тренажері машинного відділення проведені випробування дизеля MAN B&W 6S60MC-C моделі танкера LCC при різних умовах роботи пропульсивного комплексу (мілководдя, супутній вітер, нормальні умови та ін.) та отримані гвинтові характеристики (рис. 3).

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.



**Рисунок 2 – Зміна параметрів дизеля MAN B&W 6S60MC-C при роботі за гвинтовою характеристикою [16]**



**Рисунок 3 – Гвинтові характеристики дизеля MAN B&W 6S60MC-S отримані на тренажері машинного відділення WARTSILA ERS 5000 TechSim**

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 суднового механіка. Навички отримані при визначенні гвинтових характеристик і розрахунку значення ковзання гвинта на тренажері являються гарним підґрунтям для практичного застосування на реальному судні.

## 2.2 Моделювання гвинтових і регуляторної характеристик суднового головного середньообертового двигуна на тренажері машинного відділення WÄRTSILÄ ERS 5000 TechSim

Двигуни внутрішнього згоряння у складі пропульсивного комплексу судна при експлуатації у багатьох випадках сприймають значні навантаження, що подекуди перевищують обмеження визначені виробником. З практичного

досвіду відомо, що оптимальний рівень технічної експлуатації суднової дизельної пропульсивної установки може бути досягнутий тільки при умові дотримання допустимих потужностей та швидкостей ходу, обмеження перенавантажень головного двигуна (ГД) на усіх його режимах роботи, що призводять до його теплового і механічного перенавантаження, зниженню ресурсу та надійності. Тому в практиці з технічної експлуатації сучасних судових дизельних установок питання завдання, утримання і оптимізації робочих режимів повинні враховуватись активним удосконаленням процесу підготовки фахівців морського і річкового флоту.

Ефективним засобом у процесі підготовки компетентних фахівців з вищезазначених питань являється моделювання характеристик дизелів на тренажері машинного відділення Wärtsilä ERS 5000 TechSim [11; 17]. Таким чином навчання здобувачів вищої освіти та покращення обізнаності фахівців судномеханіків у плані моделювання і аналізу характеристик двигуна поглиблюють знання та навички з практичної оцінки властивостей двигуна у складі пропульсивного комплексу.

В роботі приводиться методика моделювання гвинтових і регуляторної характеристик судового головного середньообертового двигуна на тренажері машинного відділення WÄRTSILÄ ERS 5000 TechSim. За прототип взято модель судна – пором типу Ro-Pax з двомашинною двовальною дизельною енергетичною установкою з редукторною механічною передачею потужності на гвинти регульованого кроку (ГПК) [18]. Подібні пропульсивні установки окрім поромів також широко застосовуються на контейнеровозах (типу Feeder) малотоннажних суднах багатопільового призначення, суднах рибпромислового флоту та ін. В склад пропульсивної установки моделі Ro-Pax Ferry входять два восьми циліндрових, рядних, чотиритактних, простої дії, середньообертових, тронкових, з двоступеневим турбонадувом, нереверсивних ГД MAN B&W 8L32/40 з максимальною тривалою потужністю (MCR)  $2 \times 4000$  кВт (при  $n = 750$  хв<sup>-1</sup>), два редуктори з передаточним числом 4,28:1 та два ГПК діаметром 4,0 м.

На відміну від пропульсивного комплексу з ГФК [17], пропульсивний комплекс з ГПК має суттєву перевагу в тому що зміна кроку гвинта при будь-якій зміні зовнішніх умов, що впливають на величину опору руху судна, дозволяє узгодити роботу двигуна з гвинтом, тобто повністю використовувати допустиму потужність двигуна при заданій частоті обертання [19]. Застосування ГПК у складі пропульсивного комплексу дозволяє: застосовувати на суднах нереверсивні двигуни, здійснювати реверс без зміни напрямку обертання колінчатого валу двигуна, покращити маневрені якості

судна (регулювання швидкістю судна і навіть його зупинка при номінальних потужностях і частоті обертання колінчатого валу двигуна), використовувати частину потужності ГД на спеціальні і допоміжні потреби. До основних недоліків застосування ГРК у складі пропульсивного комплексу можна віднести складність конструкції і більш низьким пропульсивними показниками на основному режимі.

Вибір оптимального режиму пропульсивного комплексу з ГД та ГРК згідно [14] полягає у наступному: частота обертання колінчатого валу і крок гвинта повинні виключати перенавантаження двигуна, забезпечуючи найбільший ККД; найбільша швидкість судна має бути у відповідності з найменшою ефективною питомою витратою палива шляхом регулювання частоти обертання і кроку гвинта. Найбільш економічний режим роботи дизельної енергетичної установки отримується за рахунок програмного управління від рукоятки телеграфу (з містка або центрального посту управління) через систему дистанційного керування одночасно на регулятор обертів двигуна і на механізм зміни кроку ГРК (комбінаторний режим).

На рис. 4а наведені гвинтові, обмежувальні і регуляторна характеристики ГД, що працює на ГРК. Зона можливих в експлуатації режимів роботи двигуна обмежена знизу характеристикою нульового кроку гвинта, зверху – комбінаторною характеристикою, ліворуч – точкою режиму мінімально допустимих обертів і праворуч – регуляторною характеристикою.

В процесі виконання роботи на тренажері машинного відділення проведено випробування ГД MAN B&W 8L32/40 моделі Ro-Pax Ferry при різних режимах управління з містка (комбінаторного “combinant”, забезпечення постійних обертів “constant”) та центрального поста управління (“Engine RPM NFU control”) та отримані гвинтові і регуляторна характеристики дизеля MAN B&W 8L32/40 (Рис. 4b). Дані необхідні для побудови характеристик дизеля знімалися авторами, як в ручну з вкладки “Propulsion overview” системи контролю і моніторингу енергетичної установки судна “CMS” (рис. 5) у попередньо підготовлені таблиці, так і автоматично за допомогою вбудованої у тренажер функції побудови графіків “Trend Manager” (рис. 6) з подальшою обробкою у MS Excel (рис. 4b). З рисунків 4а та 4b видно що характеристики якісно подібні, що свідчить про коректність виконаного моделювання.

Можливість відпрацювання на тренажері машинного відділення здобувачами вищої освіти та фахівцями судномеханіками випробувань ГД, побудови характеристик, імітування і аналізу експлуатаційних і особливих режимів роботи ГД суттєво поглибить їх рівень компетентності.







**Рисунок 6 – Графічне зображення параметрів ГД, що працюють на ГРК від часу, необхідних для побудови регуляторної характеристики**

### **3. Тенденції розвитку тренажерів машинного відділення**

Стрімкий технологічний прорив, екологічна та пандеміологічна (COVID-19) ситуації змінили традиційні підходи у морській освіті і підготовці. В наслідок між традиційною освітою і потребами морської індустрії утворився розрив отриманих спеціалістами навичок та затребуваними відповідно [21]. Суднові механіки мають бути ознайомлені з сучасними технологіями, оволодіти навичками з технічної експлуатації новітніх складних енергетичних систем та відповідати міжнародним вимогам з підготовки, що не можливо без використання тренажерного обладнання. Очевидно зміни, що відбуваються у світі, морській індустрії, освіті являються стимуляторами подальшого розвитку тренажерного обладнання. Суттєвий поштовх розвитку тренажерів та онлайн-підготовки спричинила пандемія COVID-19. В результаті чого світові виробники симуляторів MB такі як KONGSBERG, WÄRTSILÄ створили можливість онлайн роботи на тренажері. Так компанія WÄRTSILÄ реалізувала хмарний симулятор “Voyage Cloud Simulation”, а KONGSBERG – модуль дистанційної роботи з тренажером “eLearning” через платформу “K-Sim Connect”, що мають наступні переваги: можливість індивідуального навчання за власним графіком; виконання завдань з будь-якого місця і у будь-який час, за умови, що наявні належні засоби комунікації (комп’ютер та інтернет); можливість роботи з симулятором на своєму

власному комп'ютері; завдання можуть виконуватись із супроводом інструктора або за інструкцією індивідуально. Подальший розвиток тренажерів у цьому напрямку в основному полягає у збільшенні бібліотеки моделей суден, реалізації тривимірної візуалізації та покращенні швидкодії процесів.

Окремим напрямком розвитку тренажерів машинного відділення являється їх оснащення елементами віртуальної реальності, доповненої реальності або змішаної реальності [22-24]. У наведених статтях викладено порівняльний аналіз на основі експериментальних даних застосунку різних видів реальності при підготовці фахівців морської індустрії, наведено можливості та обмеження, наприклад, відсутність можливості виконання командних завдань.

Окрім вищезазначених напрямків розвитку тренажерів машинного відділення слід відмітити застосування новітніх технологій (електронне управління двигуном, мультипаливність, очищення відпрацьованих газів, очищення баластних вод), гібридних енергетичних установок, альтернативних видів палива та альтернативних джерел енергії.

Тренажери МВ широко знайшли своє застосування у галузі морської освіти та підготовки, та детально з високою точністю імітують процеси технічного використання судових технічних засобів, що не можна сказати про виконання їх технічної експлуатації. На сьогодні процедури з технічної експлуатації частково реалізовані для регулювання паливної апаратури зі змінним кутом випередження паливоподачі (VIT), очищення газотурбонагнітача, як компресорної, так і турбінної частини, очищення охолоджувача наддувочного повітря, очищення/заміни фільтрувальних елементів дуплекс та автоматичних фільтрів, очищення пластинчатих теплообмінних апаратів. Подальший розвиток моделювання процедур з технічної експлуатації на тренажері МВ потребує деталізованої реалізації елементів технічного обслуговування для всього машинного обладнання починаючи від насосів, сепараторів, компресорів і закінчуючи котельною установкою та головним двигуном.

#### **4. Висновки**

Виконано аналіз факторів доцільності використання тренажера, наведено мету і переваги тренажерної підготовки.

Обґрунтовано застосування тренажера машинного відділення при підготовці судових механіків у якості технічного засобу навчання при вивченні окремих тем і розділів спеціальних дисциплін з експлуатації судових енергетичних установок. В результаті проведено моделювання гвинтових характеристик головного малообертового дизеля з прямою безпосередньою передачею потужності на гвинт фіксованого кроку та гвинтових і регуляторної

характеристик головного середньообертового двигуна з редукторною передачею потужності на гвинт регульованого кроку на тренажері машинного відділення WÄRTSILÄ ERS 5000 TechSim. Побудовані характеристики та проаналізовано особливості роботи таких пропульсивних установок.

Аналіз стану сучасних тренажерів вказує на подальше розширення бібліотеки моделей суден, оснащених обладнанням, що працює за новітніми технологіями, оснащення елементами віртуальної, доповненої або змішаної реальності. Відзначено тенденцію моделювання на тренажері, операцій з технічного обслуговування обладнання машинного відділення.

### Список літератури:

1. Соболенко А.Н. Обобщение опыта эксплуатации тренажеров машинного отделения морского судна / А.Н. Соболенко, Ю.А. Корнейчук, Д.К. Глазюк // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология, 2016, № 2. – С. 59–69.
2. Сафин И.В. Анализ опыта и технологии организации тренажерной подготовки по повышению компетенции инженерно-технического персонала судна на уровне управления в предрейсовый период / И.В. Сафин, К.Л. Обертюр // Судовые энергетические установки, 2011, № 28. – С. 92–98.
3. Unlugencoglu K. Engine room simulator and importance of applied maritime education / Kaan Unlugencoglu, Burak Yildiz, Eda Turan // The Online Journal of Science and Technology, 2011, Vol.1, Issue 4, p. 10–16.
4. Модельный курс IMO 2.07 “Тренажер машинного отделения” (Model course 2.07 Engine-Room Simulator).
5. The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, STCW-78/95 with Manila Amendments 2010.
6. MARPOL 73/78. Consolidated Edition. – London: IMO, 2002. – 511 p.
7. 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).
8. International Safety management Code (ISM Code).
9. Model course 7.04 Officer in Charge of an Engineering Watch.
10. Model course 7.02 Chief Engineer Officer and Second Engineer Officer.
11. Богдан Ю.А. Тренажер машинного отделения на пути становления компетентного судового механика / 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.
12. Тренажер TechSim 5000. ERS 5000 TechSim. MAN B&W 6S60MC-C Diesel Engine – Tanker LCC (Aframax). – 2014, 11. – 279 с.

13. 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.
14. 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.
15. Суворов П.С. Рабочие процессы и режимы судовых двигателей внутреннего сгорания / П.С. Суворов. – Одесса: ОНМА, 2007. – 192 с.
16. MITSUI-MAN B&W 6S60MC-C. Instruction book. Operation and Data. Volume 1. – 491 p.
17. Визначення гвинтових характеристик суднового головного малооборотного дизеля на тренажері машинного відділення TRANSAS ERS 5000 TechSim / Богдан Ю.О., Манжелей В.С., Сатулов А.І., Худяков І.В. // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 9-ої Міжнародної науково-практичної конференції, 13-14 вересня 2018 року. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2018. – С. 329–334.
18. Тренажер TechSim 5000. ERS 5000 TechSim. MAN Diesel 32/40 Twin Medium Speed Engine + CPP – Ro-Pax Ferry. – 2014, 10. – 217 с.
19. Суворов П.С. Режимы работы судовых дизелей / П.С. Суворов. – Одесса: ОНМА, 2007. – 384 с.
20. MAN B&W Diesel AG L32/40 CD. Technical Documentation. Engine Operating Instruction. B1. – 362 p.
21. Ergun Demirel, “Maritime Education and Training in the Digital Era,” *Universal Journal of Educational Research*, Vol. 8, No. 9, pp. 4129–4142, 2020. <https://doi.org/10.13189/ujer.2020.080939>
22. Tan Y., Niu C., Zhang J. Head-Mounted, Display-Based Immersive Virtual Reality Marine-Engine Training System: A Fully Immersive and Interactive Virtual Reality Environment // *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, Vol. 6 No. 1, pp. 46–51, 2020. <https://doi.org/10.1109/MSMC.2019.2948654>
23. Hjellvik S. et al. Immersive Virtual Reality in Marine Engineer Education.
24. Steven C. Mallam, Salman Nazir and Sathiya Kumar Renganayagalu, Rethinking Maritime Education, Training, and Operations in the Digital Era: Applications for Emerging Immersive Technologies // *J. Mar. Sci. Eng.* 2019, 7, 428; <https://doi.org/10.3390/jmse7120428>

#### References:

1. Sobolenko A.N. Obobshchenie opyita ekspluatatsii trenazherov mashinnogo otdeleniya morskogo sudna / A.N. Sobolenko, Yu.A. Korneychuk, D.K. Glazyuk // *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tehnika i tehnologiya*, 2016, no. 2, pp. 59–69.

2. Safin I.V. Analiz opyita i tehnologii organizatsii trenazhernoy podgotovki po povysheniyu kompetentsii inzhenerno-tehnicheskogo personala sudna na urovne upravleniya v predreysovyiy period / I.V. Safin, K.L. Obertyur // Sudovyye energeticheskie ustanovki, 2011, no. 28. – Pp. 92–98.

3. Unlugencoglu K. Engine room simulator and importance of applied maritime education / Kaan Unlugencoglu, Burak Yildiz, Eda Turan // The Online Journal of Science and Technology, 2011, Vol. 1, Issue 4, pp. 10–16.

4. Model course 2.07 Engine-Room Simulator.

5. The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, STCW-78/95 with Manila Amendments 2010.

6. MARPOL 73/78. Consolidated Edition. – London : IMO, 2002. – 511 p.

7. International Seafarers' Training, Certification and Watchkeeping Code (STCW-78) as amended.

8. International Safety management Code (ISM Code).

9. Model course 7.04 Officer in Charge of an Engineering Watch.

10. Model course 7.02 Chief Engineer Officer and Second Engineer Officer.

11. Bohdan Yu. Trenazher mashinnogo otdeleniya na puti stanovleniya kompetentnogo sudovogo mehanika / Yu. Bogdan, V. Manzheley // Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti i tekhnologii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia. Materialy 8-oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 28-29 veresnia 2017 roku. – Kherson: Khersonska derzhavna morskakademia, 2017, pp. 481–483.

12. Engine Room Simulator TechSim 5000. ERS 5000 TechSim. MAN B&W 6S60MC-C Diesel Engine – Tanker LCC (Aframax). – 2014, 11. – 279 p.

13. Voznitskiy I.V. Sudovyye dvigateli vnutrennego sgoraniya: [II parts] / I.V. Voznitskiy, A.S. Punda. – M.: MORKNIGA, 2010. – P. I. – 260 p.; P. II. – 382 p.

14. Malinovskiy M.A. Obespechenie nadezhnosti sudovykh dizelnykh ustanovok na ekspluatatsionnykh i osobykh rezhimakh raboty / Malinovskiy M.A., Foka A.A., Rolinskiy V.I., Vahrameev Yu.Z. – Odessa : Feniks, 2007. – 150 p.

15. Suvorov P.S. Rabochie protsessyi i rezhimy sudovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya / P.S. Suvorov. – Odessa : ONMA, 2007. – 192 p.

16. MITSUI-MAN B&W 6S60MC-C. Instruction book. Operation and Data. Volume 1. – 491 p.

17. Vyznachennia hvyntovykh kharakterystyk sudnovoho holovnoho maloobertovoho dyzela na trenazheri mashynnoho viddilennia TRANSAS ERS 5000 TechSim / Bohdan Yu.O., Manzhelei V.S., Satulov A.I., Khudiakov I.V. // Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti i tekhnologii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia. Materialy 9-oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 13-14 veresnia 2018 roku. – Kherson: Khersonska derzhavna morskakademia, 2018. – Pp. 329–334.

18. Engine Room Simulator TechSim 5000. ERS 5000 TechSim. MAN Diesel 32/40 Twin Medium Speed Engine + CPP – Ro-Pax Ferry. – 2014, 10. – 217 p.
19. Suvorov P.S. Rezhimy roboty sudovyh dizeley / P.S. Suvorov. – Odessa: ONMA, 2007. – 384 p.
20. MAN B&W Diesel AG L32/40 CD. Technical Documentation. Engine Operating Instruction. B1. – 362 p.
21. Ergun Demirel, “Maritime Education and Training in the Digital Era,” *Universal Journal of Educational Research*, Vol. 8, No. 9, pp. 4129–4142, 2020. <https://doi.org/10.13189/ujer.2020.080939>
22. Tan Y., Niu C., Zhang J. Head-Mounted, Display-Based Immersive Virtual Reality Marine-Engine Training System: A Fully Immersive and Interactive Virtual Reality Environment // *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, Vol. 6 No. 1, pp. 46–51, 2020. <https://doi.org/10.1109/MSMC.2019.2948654>
23. Hjellvik S. et al. Immersive Virtual Reality in Marine Engineer Education.
24. Steven C. Mallam, Salman Nazir and Sathiya Kumar Renganayagalu, Rethinking Maritime Education, Training, and Operations in the Digital Era: Applications for Emerging Immersive Technologies // *J. Mar. Sci. Eng.* 2019, 7, 428; <https://doi.org/10.3390/jmse7120428>