

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ КОМЕРЦІЙНОЇ ШВИДКОСТІ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

Гончаренко А.В.,

Херсонський державний морський інститут

За технічними даними на судно та його двигун розглянуто економічні режими експлуатації суднової енергетичної установки з головним двигуном 6S50MC-C. Проведено математичне моделювання оптимальної комерційної швидкості судна. У якості критерію оптимізації обрано мінімум експлуатаційних витрат за рейс. До уваги бралися питома ефективна витрата палива та постійні загальносуднові витрати. Отримано аналітичні вирази параметрів, що використовуються для оптимізації. Залежності проілюстровано графіками.

Ключові слова: комерційна швидкість, оптимальні значення, експлуатація суднової енергетичної установки, головний двигун, математичне моделювання.

Вступ. Проблема оптимізації режимів роботи суднової енергетичної установки (СЕУ) пов'язана з край важливими науковими техніко-економічними завданнями. Показники економічності експлуатації СЕУ свідчать про неухильне прагнення судноплавних компаній до зменшення витрат, через поглиблення енергетичної кризи, насамперед на паливо. Пошуку додаткових джерел економії сприяє наявність фінансово-економічної кризи. При цьому, безумовним пріоритетом має бути безаварійна робота устаткування. Для прийняття управлінських рішень потрібно мати науково обґрунтовані теоретичні критерії.

Актуальність досліджень. На теперішній час, для морського транспортного флоту, в умовах фінансово-економічної кризи та посилення тенденцій до зростання цін на нафтопродукти, дуже гостро стоять питання економії взагалі та мінімізації експлуатаційних витрат зокрема. Новий імпульс задає брак коштів на сплату заробітної плати моряків та загальносуднові потреби. Тому актуальною стає задача виконання транспортних перевезень з мінімумом рейсових витрат при відповідному моніторингу та підтриманні стану головного двигуна та суднової енергетичної установки.

Постановка даної проблеми у загальному вигляді має зв'язок з оптимізацією техніко-економічної політики транспортної компанії в умовах обмеженості ресурсів при обранні альтернативної стратегії задля заощадження коштів та при збереженні належного технічного стану СЕУ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [1, с. 114] йдеться про оптимізацію потужності встановленого на судні головного двигуна (ГД). Там же [1, с. 152-156] розглядається зміна показника теплової економічності – питомої ефективної витрати палива (ПЕВП) для малообертового двигуна (МОД) за номограмою фірми МБД. За результатами визначення зниження ПЕВП, для відповідних потужностей оптимізованого у

певних точках двигуна, будується графік, показаний на рисунку 1 [1, с. 156, рис. 51], який демонструє характер залежності ПЕВП від навантаження.

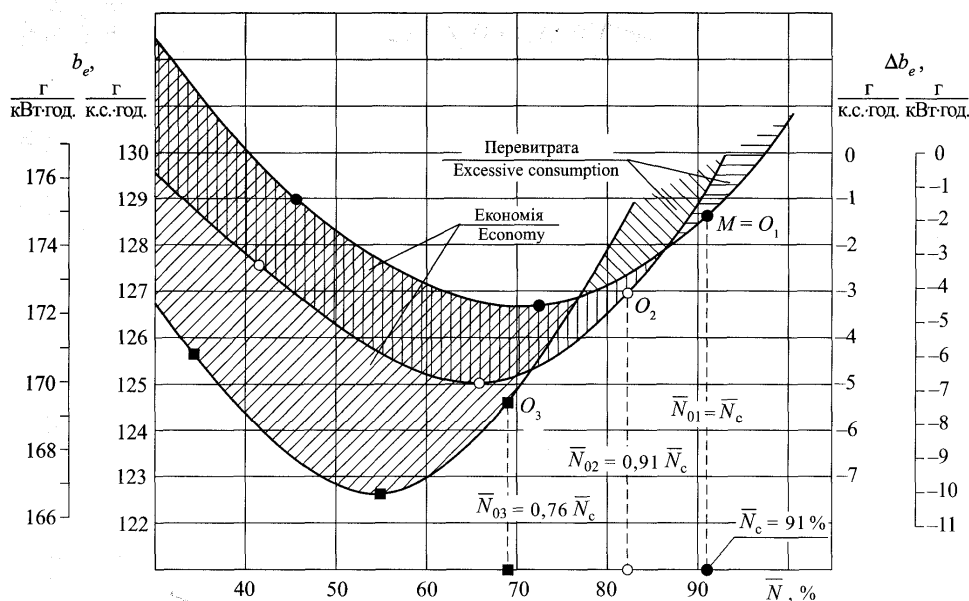


Рисунок 1. Питома витрата палива залежно від ступеня навантаження МОД, оптимізованого у точках O_1 , O_2 або O_3 (відносно потужності у точці L_1)

Питома витрата палива (ПВП) установки на одиницю здоланого шляху, як один із техніко-економічних показників енергоефективності та автономності експлуатації СЕУ, розглядається в роботі [2, с. 15-18]. Тут, так само [2, с. 17, рис. 1.1], простежуються мінімальні значення витрати палива, а також максимальні – коефіцієнту корисної дії (ККД).

За інформацією, наведеною у роботі [3, с. 189-190], останніми роками почали застосовуватися на морському флоті «... системи електронного керування (з мікропроцесорами) робочим процесом судових дизелів, котрі, забезпечують їхню роботу на оптимальних (з точки зору питомої витрати палива на 1 милю шляху при заданій швидкості судна) режимах».

Невирішеною частиною загальної проблеми оптимізації експлуатаційних витрат залишається поєднання у єдиному техніко-економічному критерії концепцій паливозаощадження за рахунок енергоефективності та збереження, забезпечення належного технічного стану СЕУ та ГД, а також врахування фінансової складової загальносуднових витрат.

Постановка завдання. Метою даної статті є пошук оптимуму комерційної швидкості морського транспортного судна на прикладі навалочника дедвейтом 75 000 т, швидкість 14,4 вузла, з ГД 6S50MC-C, максимальна тривала потужність 9480 кВт, частота обертання 127 об./хв., за умови мінімальних експлуатаційних витрат за рейс при постійних доходах.

Основний матеріал. Після побудови та апроксимації залежності ПЕВП від навантаження ГД за номограмами для МОД, визначається годинна

витрата палива при певному навантаженні та відповідній частоті обертання колінчастого валу двигуна. Далі здійснюється перехід з апроксимацією до залежностей між витратами та швидкістю ходу судна. Причому, спочатку розглядаються дві складові годинних витрат. А саме, такі, що залежать від швидкості ходу судна, та інші, котрі не залежать від неї. Знаючи дальність рейсового переходу, отримуємо тривалість рейсу. У найпростішій постановці, при постійній швидкості ходу судна та незмінних у часі доходах, мінімум рейсових витрат показує оптимальну комерційну швидкість транспортного перевезення вантажу, яку слід розглянути на предмет можливості прийняття у даному рейсі за умови її прийнятності з огляду на технічну можливість та фактичний стан СЕУ.

Постановка задачі. Мета експлуатації транспортного судна – це отримання прибутку. Прибуток визначається як різниця між доходами та витратами

$$Pr = D - R, \quad (1)$$

де Pr – прибуток, D – доходи, R – витрати.

Мінімізуючи витрати на експлуатацію при заданих доходах від неї, отримується максимум прибутку

$$Pr_{\max} = \arg \min_{Pr} R. \quad (2)$$

Так само при заданих обсягах витрат, для максимального прибутку потрібно збільшувати доходність експлуатації

$$Pr_{\max} = \arg \max_{Pr} D. \quad (3)$$

У даній постановці приділяється увага розгляду впливу на прибутковість експлуатації саме витратної складової формули для формування прибутку (1), оскільки експлуатація СЕУ пов'язана із витратами палива, що є одним з питань, котрі підлягають розробці, і які було здійснено у [1].

Розглядається вартісна оцінка годинної

$$\$_{G_t} = f_1(G_t), \quad (4)$$

та питомої ефективної витрати палива

$$\$_{g_e} = f_2(g_e), \quad (5)$$

їхня залежність від швидкості ходу судна

$$G_t = f_3(v_s), \quad (6)$$

де v_s – швидкість ходу судна,

$$\$_{G_t} = f_1(f_3(v_s)) = f_4(v_s). \quad (7)$$

Визначивши структуру та обсяги загальносуднових витрат та виділивши складову, що не залежить від швидкості ходу судна,

$$\$_1(v_s) = \$_1 = const, \quad (8)$$

склавши її з витратами, що залежать від швидкості ходу судна

$$\$(v_S) = k \cdot v_S^m, \quad (9)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, m – показник ступеня, отримуємо формулу загальної залежності швидкості вартості витрат від швидкості ходу судна

$$\$(v_S) = \$_1 + \$_2(v_S) = \$_1 + k \cdot v_S^m. \quad (10)$$

Сумарні експлуатаційні витрати за рейс у функції від швидкості ходу судна становитимуть

$$\Sigma\$(v_S) = \$(v_S) \cdot t = \$_1 \cdot t + \$_2(v_S) \cdot t = \$_1 \cdot t + k \cdot v_S^m \cdot t, \quad (11)$$

де t – тривалість рейсу.

Тривалість рейсу

$$t = \frac{Dis}{v_S}, \quad (12)$$

де Dis – дистанція або дальність рейсу або переходу.

Тоді

$$\Sigma\$(v_S) = \$_1 \cdot \frac{Dis}{v_S} + k \cdot v_S^m \cdot \frac{Dis}{v_S} = \$_1 \cdot \frac{Dis}{v_S} + k \cdot v_S^{m-1} \cdot Dis. \quad (13)$$

Звідки, вочевидь, перша складова буде гіперболічною залежно від швидкості ходу судна, тобто зі збільшенням швидкості ходу вона зменшуватиметься, друга ж складова збільшуватиме сумарні експлуатаційні витрати за рейс, оскільки $m \approx 3$. Тому сумарні експлуатаційні витрати за рейс матимуть екстремум за швидкістю ходу судна у вигляді мінімуму. Відповідна швидкість буде оптимальною комерційною. Вона може бути обрана у даному рейсі, виходячи із рейсового завдання, але при цьому потрібно враховувати обмеження на прийнятні діапазони параметрів при експлуатації СЕУ. Насамперед робоча точка ГД повинна знаходитися у полі вибору робочих параметрів відповідно до навантажувальної діаграми, як показано у [1].

Такі теоретичні міркування проілюстровано графіками, показаними на рисунку 2.

Відшукати оптимальну комерційну швидкість, маючи фінансово-економічні дані з експлуатаційних витрат на судно, можна графічним, як це продемонстровано на рисунку 2, так і аналітичним способами.

При використанні аналітичного способу знаходження оптимальної комерційної швидкості застосовується необхідна умова існування екстремуму функції

$$\frac{d\Sigma\$(v_S)}{dv_S} = 0. \quad (14)$$

Перша похідна сумарних експлуатаційних витрат з (11-13) за швидкістю ходу судна:

$$\frac{d\S$(v_S)}{dv_S} = -\$_1 \cdot \frac{Dis}{v_S^2} + k \cdot (m-1) \cdot v_S^{m-2} \cdot Dis. \quad (15)$$

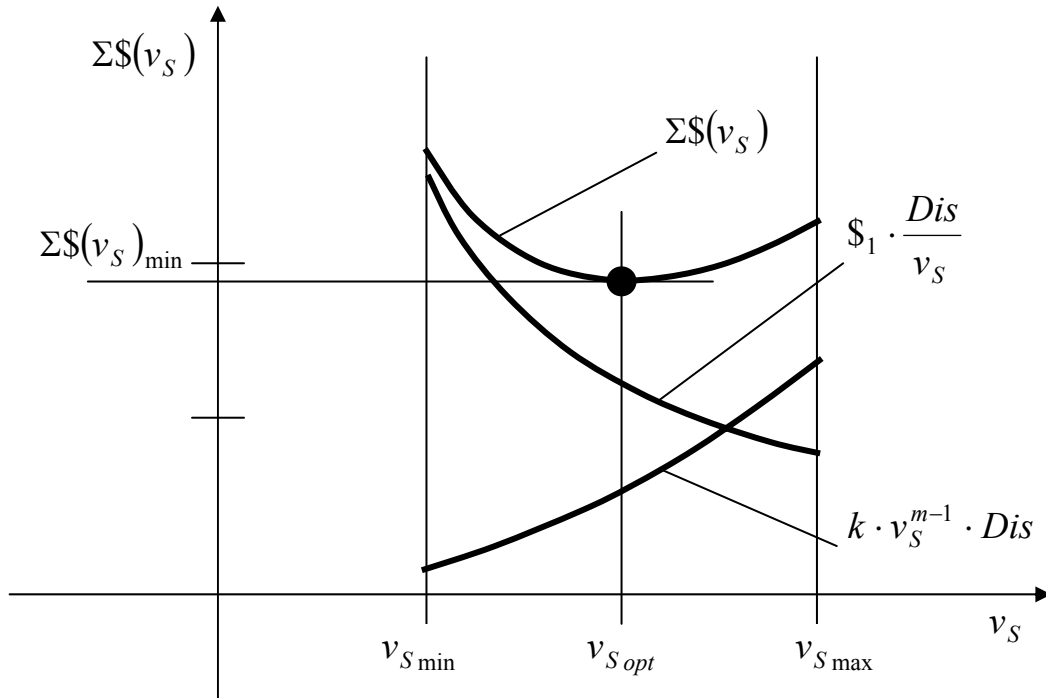


Рисунок 2. Залежності сумарних експлуатаційних витрат за рейс від швидкості ходу судна та оптимальна комерційна швидкість

Звідки, застосувавши (14) після порівнювання нулеві, отримаємо

$$\$_1 \cdot \frac{Dis}{v_{S_{opt}}^2} = k \cdot (m-1) \cdot v_{S_{opt}}^{m-2} \cdot Dis. \quad (16)$$

Скоротивши вираз (16) на

$$\frac{Dis}{v_{S_{opt}}^2}, \quad (17)$$

матимемо

$$v_{S_{opt}}^m = \frac{\$_1}{k \cdot (m-1)}. \quad (18)$$

Звідки оптимальна комерційна швидкість

$$v_{S_{opt}} = \sqrt[m]{\frac{\$_1}{k \cdot (m-1)}}. \quad (19)$$

Розв'язання задачі. Для визначення залежності (9) потрібно знайти ПЕВП. Застосовуючи положення [1], знаходимо залежність ПЕВП від

потужності при оптимізації у певній точці. Для двигуна 6S50MC-C, оптимізованого у точці L_1 поля вибору робочих параметрів, ПЕВП залежно від відносного навантаження апроксимується рівнянням

$$g_e = -0,0394 \cdot \bar{N}_e^5 + 0,155 \cdot \bar{N}_e^4 - 0,229 \cdot \bar{N}_e^3 + 0,2053 \cdot \bar{N}_e^2 - 0,1233 \cdot \bar{N}_e + 0,2024. \quad (20)$$

Достовірність апроксимації $R^2 = 1$.

Годинна витрата палива

$$G_t = N_e \cdot g_e. \quad (21)$$

Апроксимаційний поліном для залежності від частоти обертання колінчастого валу

$$G_t = 0,001030 \cdot n^3 - 0,052890 \cdot n^2 + 2,905047 \cdot n - 1,275962. \quad (22)$$

Достовірність апроксимації $R^2 = 0,999549$.

Годинна витрата палива залежно від швидкості ходу судна апроксимована поліномом

$$G_t = 0,7066 \cdot v_s^3 - 4,1139 \cdot v_s^2 + 25,62 \cdot v_s - 1,276. \quad (23)$$

Достовірність апроксимації $R^2 = 1$.

Для отримання вартісної оцінки годинних витрат від швидкості ходу судна ціна враховує всі витрати, пов'язані зі швидкістю. Результати, при приведеній ціні 500 \$ за тону палива, апроксимуються рівнянням

$$\$_2(v_s) = 0,3533 \cdot v_s^3 - 2,057 \cdot v_s^2 + 12,81 \cdot v_s - 0,638. \quad (24)$$

Достовірність апроксимації $R^2 = 1$.

Сумарні експлуатаційні витрати за рейс відповідно до формул (8-13) у функції від швидкості ходу судна становитимуть

$$\Sigma\$(v_s) = \$_1 \cdot \frac{Dis}{v_s} + (0,3533 \cdot v_s^3 - 2,057 \cdot v_s^2 + 12,81 \cdot v_s - 0,638) \cdot \frac{Dis}{v_s}. \quad (25)$$

Після очевидних перетворень рівняння (25) набуває вигляду

$$0,3533 \cdot v_s^2 - 2,057 \cdot v_s + 12,81 + \frac{\$_1 - 0,638}{v_s} = \frac{\Sigma\$(v_s)}{Dis}. \quad (26)$$

Перша похідна рівняння (26)

$$2 \cdot 0,3533 \cdot v_s - 2,057 - \frac{\$_1 - 0,638}{v_s^2} = \frac{d\left(\frac{\Sigma\$(v_s)}{Dis}\right)}{dv_s}. \quad (27)$$

Після порівнювання першої похідної виразу (27) нульові

$$2 \cdot 0,3533 \cdot v_{Sopt}^3 - 2,057 \cdot v_{Sopt}^2 - (\$_1 - 0,638) = 0. \quad (28)$$

Отримано кубічне рівняння. З метою спрощення розв'язання корені можливо відшукати графічним способом, обравши ті, що мають фізичний сенс.

Постійну складову (8), яка не залежить від швидкості ходу судна, знайдемо за спрощеною структурою. При витратах, приведених до кількості

членів екіпажу у розмірі 50 \$/(год.×чл. екіп.) та для кількості членів екіпажу, котра становить 25 осіб, постійна складова

$$\$_1 = 50 \text{ $/(год.} \cdot \text{особу)} \cdot 25 \text{ осіб} = 1250 \text{ $/год.} \quad (29)$$

Результати розв'язання рівняння (28) після підстановки до нього (29) проілюстровано на рисунку 3.

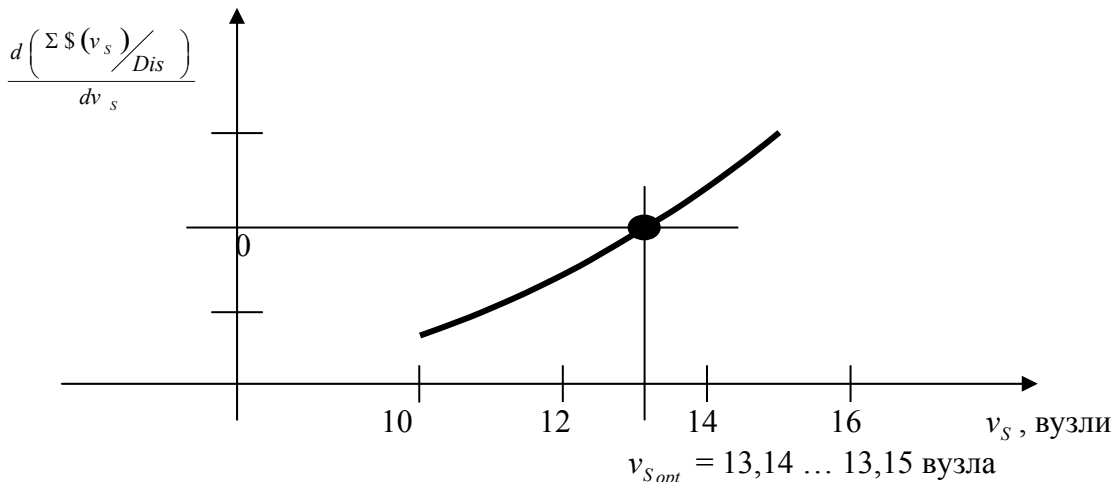


Рисунок 3. Графічний розв'язок рівняння оптимальної швидкості

При дальності переходу 10 000 миль сумарні витрати за рейс у залежності від швидкості ходу судна проілюстровано графіком на рисунку 4.

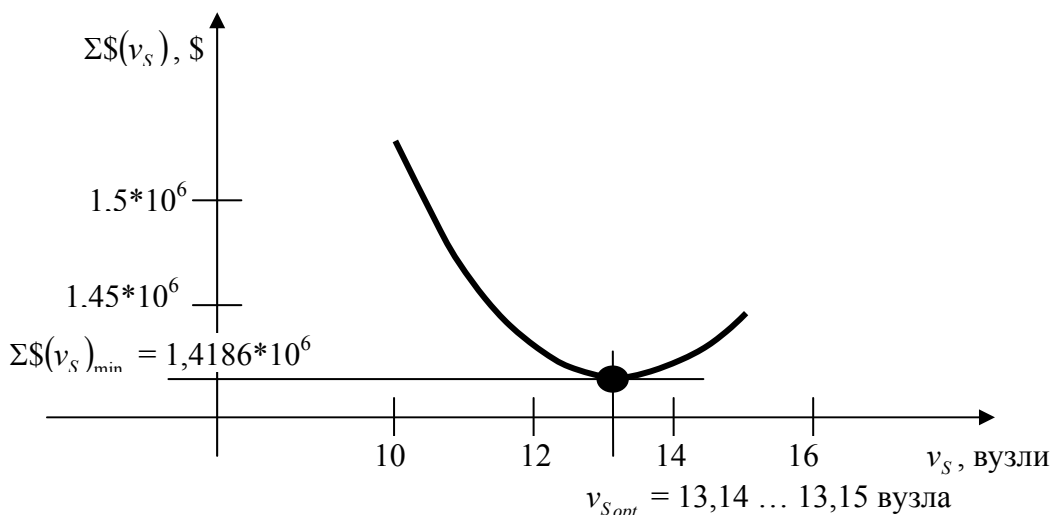


Рисунок 4. Графік сумарних витрат залежно від швидкості

Практичне застосування розв'язку задачі. Згідно з полем вибору робочих параметрів приблизний діапазон потужності ГД 6S50MC-C при роботі за номінальною гвинтовою характеристикою становить

$$N_e \approx 5\,000 \dots 9\,480 \text{ кВт.} \quad (30)$$

При цьому відповідна швидкість руху

$$v_s \approx 11,5 \dots 14,4 \text{ вузла.} \quad (31)$$

Знайдена оптимальна комерційна швидкість ходу судна, вказана на рисунку 4.

$$v_{S_{opt}} = 13,14 \dots 13,15 \text{ вузла.} \quad (32)$$

Вона не виходить за граничні допустимі значення, обмежені середнім ефективним тиском та частотою обертання колінчастого валу двигуна.

Якщо, до того ж, знайдена оптимальна комерційна швидкість ходу балкера DWT 75 000 т не потрапляє до заборонених зон за швидкістю ходу судна; оскільки обмеження можуть бути накладені ще й з огляду на технічний стан та досконалість елементів СЕУ, їхню узгодженість для роботи на обраних режимах, наприклад, зони критичних обертів ГД, помпажу турбокомпресорів, температурні діапазони та тиски тощо; то тоді, така швидкість ходу є прийнятною з точки зору моніторингу та підтримки технічного стану СЕУ. Таким чином, слід обрати оптимальну комерційну швидкість (32).

Результати досліджень. За даними на судно та двигун розглянуто економічні режими експлуатації енергетичної установки з ГД 6S50MC-C. Оптимальна комерційна швидкість, знайдена за умови мінімальних експлуатаційних витрат, не виходить за межі діапазону, обумовленого середнім ефективним тиском та частотою обертання колінчастого валу двигуна для стійкої та надійної роботи головного суднового двигуна 6S50MC-C. Режими роботи елементів СЕУ вважаються прийнятними з технічної точки зору.

У результаті проведеного математичного моделювання ефективності виконання морських транспортних вантажоперевезень на прикладі навалочника дедвейтом 75 000 т, швидкість 14,4 вузла, з ГД 6S50MC-C, максимальна тривала потужність 9480 кВт, частота обертання 127 об./хв., за умови мінімальних експлуатаційних витрат за рейс при постійних прибутках отримано оптимальну комерційну швидкість судна.

Задача у найпростішій постановці передбачала роботу ГД за номінальною гвинтовою характеристикою, оптимізацію суднового дизеля у точці L_1 поля вибору робочих параметрів, постійну у часі швидкість судна та незмінні прибутки за рейс, що відповідає умовам сьогодення за наявної енергетичної та фінансово-економічної кризи.

Комплексний критерій мінімальних рейсових експлуатаційних витрат, заданий виразами (1, 2) після застосування процедур (4-7), (8-13), (14-19), (20-24), (25-28), з урахуванням (29), при виконанні умов (30-32) призводить до оптимальної комерційної швидкості.

Висновки. За наведених умов та накладених обмежень оптимальна комерційна швидкість ходу судна навалочника дедвейтом 75 000 т, з ГД

6S50MC-C, яка складає $v_{S_{opt}} = 13,14 \dots 13,15$ вузла, може бути обрана у даному рейсі. Робоча точка двигуна не виходить за межі діапазону вибору робочих параметрів МОД.

Врахована робота дизеля за номінальною гвинтовою характеристикою, ПЕВП, а також модельовані у явному вигляді загальносуднові витрати, величина яких не залежить від швидкості ходу судна.

У подальших дослідженнях доцільно розглянути комплексний критерій рівняння (2), змінні швидкості, зміну прибутковості рейсу залежно від швидкості, прибутковість з урахуванням кількості рейсів за певний час експлуатації, роботу ГД за неномінальною гвинтовою характеристикою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Проектування пропульсивної установки суден з прямою передачею потужності на гвинт / [В.П. Шостак, В.І. Гершанік, В.П. Кот, М.С. Бондаренко]; за ред. В.П. Шостака : навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 500 с.

2. Артемов Г.А., Горбов В.М. Суднові енергетичні установки: навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 356 с.

3. Суворов П.С. Рабочие процессы и режимы судовых двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие. – Одесса: ОНМА, 2007. – 192 с.

Гончаренко А.В. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОММЕРЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

По техническим данным на судно и его двигатель рассмотрены экономичные режимы эксплуатации судовой энергетической установки с главным двигателем 6S50MC-C. Проведено математическое моделирование оптимальной коммерческой скорости судна. В качестве критерия оптимизации выбран минимум эксплуатационных расходов за рейс. Во внимание приняты удельный эффективный расход топлива и постоянные общесудовые расходы. Получены аналитические выражения параметров, используемых для оптимизации. Зависимости проиллюстрированы графиками.

Ключевые слова: коммерческая скорость, транспортное судно, оптимальные значения, эксплуатация судовой энергетической установки, главный двигатель, математическое моделирование.

Goncharenko A.V. A CHOICE OF OPTIMAL COMMERCIAL SPEED OF A TRANSPORT VESSEL

According to the ship's and her engine technical data, economical modes of the ship's power plant operation with the main engine of 6S50 MC-C are considered. A mathematical modeling of the ship's optimal commercial speed has been carried out. Minimum of the operational expenses for a voyage was chosen as the criterion of the optimization. Attention was paid to specific fuel consumption and constant general ship's expenditures. Analytical expressions of parameters used for the optimization have been obtained. Dependences are illustrated by graphs.

Key words: commercial speed, transport vessel, optimal values, ship's power plant operation, main engine, mathematical modeling.