УДК 629.424.1:621.436-61.004
DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-2/22>

Дакі О.А.

Державний університет інфраструктури та технологій

Ткаченко В.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Будолак С.Ю.

Державний університет інфраструктури та технологій

МЕТОД УПРАВЛІННЯ ВИТРАТОЮ ПАЛИВА НА РІЧКОВИХ СУДНАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СПЛАЙН-ФУНКЦІЙ

Нові технології ресурсозбереження, управління рухом річкових суден, процеси стабілізації суден на курсі, маневрування, забезпечення стійкості їхнього руху, повороткості, керованості, руху на міліні, циркуляції, що реалізовані з урахуванням вимог безпеки, системності та забезпечення життєдіяльності екіпажів суден, повинні стати визначальними в забезпеченні конкурентоздатності річкового транспорту. Потреба в нових технічних рішеннях визначена необхідністю підвищення економічності суднових енергетичних установок та їхніх елементів. Вона визначена також значними змінами, що відбуваються в останні роки в економічній, екологічній, соціальній та іншій сферах людської діяльності. Потреба зумовлена також і кризовими явищами у світовій економіці, вихід з яких полягає в якісно нових структурах і методах управління. Для отримання адекватних технічних рішень потрібно створювати моделі та алгоритми оптимізації та автоматизації суден і суднових технічних засобів, розвивати методи для підвищення економічності суднових енергетичних установок і їхніх елементів шляхом ефективного використання різних видів ресурсів у кожному рейсі.

Одним із найважливіших технічних ресурсів, що визначають реальні терміни безпечної і надійної роботи судна під час навігації, є моторесурс судових енергетичних установок. Він залежить значним чином від умов експлуатації, режимів роботи, впливу зовнішніх факторів, технічного стану. Витрата моторесурсу значно підвищується на несталих режимах роботи. Негативно позначаються на збереженні моторесурсу перехідні режими, режими маневрування, режими руху по мілководних і вузьких фарватерах, на шлюзованих ділянках шляху. Зменшення витрати моторесурсу можна забезпечити за рахунок раціонального використання палива в рейсі, необхідного для виконання транспортної роботи, зниження часу роботи двигунів у несталих режимах, раціонального управління потужністю суднових енергетичних установок.

У статті доведено, що проблема економії палива та енергоресурсів на річкових суднах може вирішуватися шляхом моделювання характеристик судна за допомогою сплайн-функцій, які забезпечують точне проходження відповідного сплайна через вузли інтерполяції і рівність похідних від сплайна по аргументу ліворуч та праворуч від інтерполяційного вузла. За допомогою сплайн-функцій отримано розв'язання задачі економії палива головними двигунами.

Ключові слова: витрата палива, економія ресурсів, енергоефективність, сплайн-функції, суднові енергетичні установки.

Постановка проблеми. Сучасні технології ресурсозбереження і безпосередньо ощадливої витрати палива на суднах транспортного і технічного флоту відрізняються від попередніх технологій фундаментальними інноваційними рішеннями та широким застосуванням сучасних інформаційних технологій. Засновані на інноваційних рішеннях підвищення енергоефективності суднових дизелів і дизель-генераторних агрегатів, вони дозволяють якісно вирішувати завдання заощадження паливно-енергетичних ресурсів, забезпечення ефективної роботи суднових енерге-

тичних комплексів за мінімальних матеріальних і фінансових витрат, раціонально використовувати наявні запаси палива під час кризових явищ в економіці, а також в екстремальних ситуаціях [1].

Поступове вичерпання природних енергетичних ресурсів, а також недостатні темпи відновлення флоту, слугують могутнім поштовхом до розвитку інформаційних і енергоефективних технологій, які реалізують методи і моделі дослідження операцій, алгоритми прийняття оптимальних рішень в умовах невизначеності. Найбільш затребуваними для рішення завдань забезпечення

енергоефективності річкового флоту стають варіаційні методи пошуку ефективних рішень, що означає їхню наукову обґрунтованість [2; 3]. Вони утворюють фундамент методів і засобів досягнення практичних результатів ресурсозбереження на судах річкового флоту.

Робота на ринку транспортних послуг поєднана з аналізом стану ринку, пошуком найвигідніших варіантів розподілу наявних ресурсів: паливних, фінансових, товарних, технічних та інших. Одним із найважливіших технічних ресурсів, що визначають реальні терміни безпечної і надійної роботи судна під час навігації, є моторесурс суднових енергетичних установок (далі – СЕУ), у тому числі головних двигунів (далі – ГД) і суднових дизель-генераторних агрегатів (далі – ДГА). Він залежить значним чином від умов експлуатації, режимів роботи, впливу зовнішніх факторів, технічного стану. Витрата моторесурсу значно підвищується на несталих режимах роботи СЕУ. Негативно позначаються на збереженні моторесурсу перехідні режими, режими маневрування, режими руху по мілководних і вузьких фарватерах, на шлюзованих ділянках шляху. Дослідження низки авторів [4–6] доводять, що підвищена витрата моторесурсу спостерігається на режимах пуску і зупинки двигунів внутрішнього згоряння.

Зменшення витрати моторесурсу можна забезпечити за рахунок раціонального використання в рейсі палива, необхідного для виконання транспортної роботи, зниження часу роботи двигунів у несталих режимах, раціонального управління потужністю СЕУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвитку алгоритмів пошуку оптимальних рішень для класу динамічних задач управління витратою палива методами математичного моделювання приділяється значна увага, оскільки їх застосування дозволяє спростити пошук оптимальних параметрів управління і запропонувати способи рішення двоточкових граничних задач ефективними обчислювальними методами. У розробку різних аспектів проблеми управління витратою палива та, як наслідок, комплексної автоматизації систем управління СЕУ внесли вклад відомі вчені: П.І. Бажан, А.М. Басин, А.С. Бутов, Є.М. Климов, Ю.М. М'яников, Ю.А. Лисняк, Ю.П. Петров, А.В. Попов, Т.В. Тарасенко, М.М. Чиркова, І.А. Фейгин, Ю.С. Федосенко та інші. Результати досліджень вищезгаданих науковців стали основою якісно нового рівня автоматизації СЕУ, в тому числі – в частині оптимізації витрати палива та енергії на річкових судах.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення методу управління витратою палива на річкових судах шляхом побудови адекватних математичних моделей з використанням сплайн-функцій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Головним експлуатаційним складником, що визначає витрату палива річковим судном, є його ходовий час у рейсі й обсяг вантажу, тобто виконана транспортна робота протягом ходового часу. Режим руху судна на всіх ділянках суднового ходу з максимально можливими (за технічними умовами) швидкостями забезпечує мінімальний час проходження до пункту призначення. Проте даний режим є найменш економним, з максимально можливою витратою палива в рейсі. Рух судна на максимально можливій швидкості в термінах оптимального управління [7; 8] забезпечує максимальну швидкодію. Водночас максимальна швидкодія завжди пов'язана з максимальними витратами енергії на управління. Крім того, за великих витрат палива зростає рівень забрудненості атмосфери вихлопними газами та виникає негативний вплив на експлуатаційні показники СЕУ, що в комплексі призводить до зниження показників енергоефективності.

Натепер витрати на забезпечення судна паливом становлять до 40% від суми всіх експлуатаційних витрат. Отже, від ефективності використання палива в рейсі безпосередньо залежить прибуток транспортної компанії. Паливо є ресурсом, що має бути раціонально розподілений між відповідними процесами (ділянками шляху) для забезпечення максимального прибутку. Прибуток, що отримується в умовах ринку за рахунок зниження витрат, забезпечується шляхом реалізації економічних режимів на окремих ділянках шляху в разі дотримання обмежень: вантаж повинен бути доставлений замовнику в заданий диспетчером час у цілісності.

Досвід [9] і математичне моделювання [10] свідчать, що за рахунок раціонального використання ходового резерву часу і його накопичення, з урахуванням умов руху на лінії і далі в пункті прибуття, можна одержати порейсову економію палива від 5% до 35%. Водночас запланований обсяг транспортної роботи не зменшується. У статті для оптимізації режимів руху річкових суден запропоновано використовувати сплайн-метод, що дозволяє оптимально розподіляти основний ресурс (час руху) за ділянками маршруту з різними шляховими умовами (за процесами).

Структура методу складається з етапів, сутність яких розкрита далі.

Етап 1. Весь шлях руху річкового судна з різними шляховими умовами розділимо на n ділянок з відповідними розхідними характеристиками.

Етап 2. Побудова математичної моделі. Для ділянок розраховуються характеристики витрати палива як функції часу руху за такими формулами:

– для безперервних моделей:

$$F(i) = k(i) \times S(i)^{p(i)} \times t(i)^{-(p(i)-1)}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

де $F(i)$ – обсяг палива, що споживає СЕУ під час проходження i -го відрізка шляху $S(i)$ за час $t(i)$; $k(i)$ та $p(i)$ – коефіцієнти, що оцінюються за моделлю пропульсивного комплексу [10] або іншими методами [11, 12];

– для дискретних моделей оцінка функції $F(i)$ здійснюється за експериментальними точками (k – кількість таких точок) вектора виду: $[F_1(i, t_1), F_2(i, t_2), F_3(i, t_3), \dots, F_k(i, t_k)]$.

Формується сплайн-функція за допомогою оператора:

$$g(i) = \text{spline}([t_1, t_2, \dots, t_k], [F_1, F_2, \dots, F_k]). \quad (2)$$

Розрахункові значення функції $F(i)$ утворюються за допомогою оператора витрати палива:

$$F(i) = PV(g(i), t(i)) \quad (3)$$

за виконання обмеження на час виду:

$$t_{\min}(i) \leq t(i) \leq t_{\max}(i), i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Етап 3. Розв'язання оптимізаційної задачі.

Нелінійна задача мінімальної витрати палива СЕУ річкового судна в рейсі розв'язується чисельними методами (наприклад, із застосуванням пакету Matlab):

$$L(n, \tau) = \min_{t(i)} \sum_{i=1}^n F(i) = \sum_{i=1}^n F(i) PV(g(i), t(i)) \quad (5)$$

з обмеженнями виду (4), де

$$S = \sum_{i=1}^n S(i), \quad \tau = \sum_{i=1}^n t(i), \quad (6)$$

де τ – час ходу річкового судна до пункту призначення, S – довжина шляху.

Основна перевага сплайн-метода розподілу ресурсів полягає в його інваріантності щодо видів ресурсів. Ресурсами можуть бути запаси сировини і матеріалів, час завантаження обладнання, час обслуговування судна, робочий час, моторесурс головних і допоміжних двигунів, час технічного обслуговування суден, грошові інвестиції тощо. Тому в процесі розрахунку за сплайн-методом зручно використовувати прийняті в дослідженні операції та терміни практич-

ної оптимізації. До них відносяться: функція цілі (критерій якості), обчислювальний алгоритм, процес, ресурс, обмеження.

Способи розподілу ресурсів залежать від конкретних критеріїв і технологічних режимів функціонування об'єктів. Назвемо ці способи процесами. Спосіб застосування процесів характеризує дохід, який оцінюється в одиницях самих ресурсів або в еквіваленті, зазвичай у грошовому. Введення однієї одиниці доходу до всіх процесів дозволяє привести багатокритеріальну задачу оптимізації до проблеми розподілу тільки одного виду ресурсів. Проблема розподілу полягає в отриманні максимуму доходу або мінімуму витрат. Для проблеми отримання мінімуму споживаного палива функцією цілі, відповідно до співвідношення (5), є $L(n, \tau)$. Зумовленими формулами (1)–(3) процесами варто вважати режими руху судна на різних ділянках шляху $i=1, 2, \dots, n$ з різними $F(i)$. Систему обмежень устанавлюють співвідношення (4) та (6). Ресурсом, який розподіляється за процесами, є час τ . Чим більше резерв часу, тим більше можна зекономити палива.

Як чисельний метод оптимізації сплайн-метод застосуємо для рішення класу задач динамічного програмування, без складання рекурентних співвідношень, з необхідною логікою використання функцій математичного програмування інструментарію Optimization Toolbox.

Розглянемо алгоритм економічної роботи ДГА в режимах зміни в часі навантаження на суднову мережу в діапазоні від нуля до максимуму.

Для оптимізації необхідно мати аналітичні залежності витрати палива, що приходить на одиницю потужності, що генерується для кожного ДГА. Параметри моделей характеристик ДГА за експериментальними точками з високою точністю оцінюються за допомогою кубічних сплайнів. Це дозволяє апроксимувати множину гладких нелінійних функцій, спираючись тільки на функції сплайнів, без виводу коефіцієнтів. Сплайни забезпечують точне проходження відповідної характеристики через інтерполяційні вузли, а також рівність похідних за аргументом у кожному інтерполяційному вузлі.

Апроксимація видаткових характеристик ДГА виконується з використанням нелінійних функцій:

$$F_j = f_j(P_j), j = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

де P_j – потужність j -го агрегату, який може працювати на визначеному паливі; F_j – годинна витрата палива, що вимірюється в функції потужності P_j ; m – кількість агрегатів, що працюють

паралельно в мережі суднових споживачів електроенергії.

Оскільки в будь-який час t сумарна потужність паралельно працюючих ДГА дорівнює сумарній потужності $P(t)$ споживачів, то повинне використовуватися обмеження-рівність:

$$P(t) = \sum_{j=1}^k P_j(t), k = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

де k – кількість одночасно працюючих ДГА.

Критерієм якості, що визначає мінімальну вартість електроенергії, яка виробляється ДГА, представимо функціоналом:

$$F(t) = \sum_{j=1}^k f_j(P_j(t)), k = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

Мінімізація функціоналу виду (9) виконується у заданому поточному значенні $P(t)$ шляхом варіації потужності між k генераторними агрегатами з урахуванням обмежень з використанням сплайн-методу.

Як приклад, оптимальні за сумарною витратою палива в рейсі режими розраховані під час руху судна маршрутом довжиною 162,5 км річкою Дніпро. З урахуванням змінюваних умов руху маршрут умовно розділений на три ділянки: 68,7 км, 51,4 км, та 42,4 км. З урахуванням обмежень мінімальний час судна в рейсі становив 12,36 год., максимальний час руху прийнятий 16,25 год. Видаткові характеристики оцінені на кожній ділянці по дев'ятьох експериментальних точках. Виходячи з умов експлуатації СЕУ, визначені максимальні значення допустимих швидкостей на ділянках шляху: $V_1=12,15$; $V_2=13,14$; $V_3=14,64$ (км/год).

Вибрана структура моделі витратних характеристик судна:

$$G(i) = k(i) \times V(i)^{p(i)},$$

де $i=1, \dots, 9$ – кількість експериментальних точок, які прийняті за інтерполяційні вузли під час побудови сплайнів; $G(i)$ – годинна витрата палива; $V(i)$ – швидкість руху судна. При цьому отримані такі чисельні моделі витратних характеристик на ділянках шляху: $k_1=0,04$; $k_2=0,039$; $k_3=0,037$; $p_1=3,340$; $p_2=3,294$; $p_3=3,146$.

Результат розрахунків оптимальних за витратою палива режимів руху річкових суден представлено залежностями, які наведено на рис. 1, 2.

На рис. 1 наведено графіки розподілу ходового часу за трьома ділянками як функції часу перебування судна в рейсі. За такого розподілу буде реалізований найбільш економний режим витрати палива. Представлені залежності на рис. 2 показують, яка витрата палива повинна бути в рейсі, і як витрати розподілені по ділянках, якщо підтримуються режими, що відповідають оптимальному розподілу ходового часу.

Характеристика $L(n, \tau)$, яка відповідає мінімальній сумарній витраті палива в рейсі, залежить від часу руху судна до пункту призначення та може використовуватися для оцінки якості управління і порівняння із встановленими нормами витрати палива в конкретному рейсі.

Характеристика $L(n, \tau)$ може також використовуватися для оцінки коефіцієнта енергоефективності судна, відповідно до паспорта енергоефективності.

Аналіз залежностей, що наведені на рис. 2, дає змогу отримати прогностичні значення витрати палива під час виконання річковим судном рейсу, висунути вимоги до часу руху та вибрати оптимальні швидкості на кожній ділянці руху для мінімізації функції витрат.

Рис. 1. Оптимальний розподіл ходового часу за трьома ділянками маршруту

Рис. 2. Витрати палива під час проходження судна трьома ділянками маршруту

Висновки. У статті доведено, що проблема економії палива та енергоресурсів на річкових суднах може вирішуватися шляхом моделювання характеристик судна за допомогою сплайн-функцій, які забезпечують точне проходження відповідного сплайна через вузли інтерполяції і рівність похідних від сплайна по аргументу ліворуч та праворуч від інтерполяційного вузла. За допомогою сплайн-функцій отримано розв'язання задачі економії палива ГД. Економічні режими руху річкового судна визначалися під час руху судна водним шляхом зі змінними шляховими умовами на трьох його ділянках. Розрахунки виконані по дев'ятьох точках витратних характеристик на кожній із трьох ділянках. Результати моделювання опти-

мальних режимів руху річкового судна для чотирьох значень ходового часу підтверджують можливість реалізації високоточного управління СЕУ їхнім зворотнім зв'язком за наявності поточної інформації про положення судна на маршруті та швидкості його руху. Метод сплайн-функцій, крім управління технологічними процесами в режимі онлайн, можна успішно використовувати для вибору структури систем СЕУ на етапах планування, моніторингу й реалізації технологічних рішень з їх автоматизації, а також планування роботи флоту. Він може застосовуватися для складання плану енергоефективності на кожному об'єкті, з урахуванням технічного стану та умов експлуатації.

Список літератури:

1. Сахаров В.В., Таранин А.Г., Чертков А.А. Алгоритм энергоэффективного управления курсом судна. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2013. № 3 (22). С. 38–46.
2. Григорьев Е.А. Экономическая оценка ресурсосберегающих технологий работы речных судов : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05. Новосибирск, 2014. 151 с.
3. Тарасенко Т.В. Підвищення енергоефективності суден при роботі на коротких морських лініях (на прикладі суден з гвинтом регульованого кроку) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20. Одеса, 2015. 24 с.
4. Пунда А.С. Численное моделирование рабочих процессов судовых дизелей : учебное пособие. Москва : МорТех, 2015. 64 с.
5. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. Харьков : ХНДАУ, 2008. 169 с.
6. Кирпичников А.Ю. Обеспечение надежности технической эксплуатации машинных парков в транспортном строительстве : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.05.04. Новосибирск, 2013. 16 с.
7. Математичне та комп'ютерне забезпечення розробок випробувальних стендів силових установок енергетичного і транспортного призначення. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин* : збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010-2012 рр. / А.Ф. Верлань та ін. Київ : Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2012. С. 310–315.
8. Ковалюк Д.О. Москвіна С.М. Моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. 182 с.
9. Лисняк Ю.А. Повышение эффективности использования топлива на морском флоте. Севастополь : СевНТУ, 2005. 38 с.
10. Платов А.Ю. Методы оперативного планирования работы речного грузового флота на основе оптимального нормирования ходовой операции : монография. Нижний Новгород : ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2009. 155 с.
11. Тверитин В.Н. Способ нормирования расхода топлива. *Проблемы транспорта*. 2017. № 7. С. 12–13.
12. Michalsky Jan P. A method for selection of parameters of ship propulsion system fitted with compromises crew. *Polish Maritime Research*. 2007. 4 (54). Vol. 14. P. 3–6. DOI: 10.2478/v10012-007-0032-y

Daki O.A., Tkachenko V.V., Budolak S.Yu. FUEL CONSUMPTION CONTROL METHOD ON RIVER SHIPS USING SPLINE FUNCTIONS

New technologies for saving resources, managing the movement of river vessels, the processes of stabilizing ships on the course, maneuvering, ensuring the stability of their movement, maneuverability, controllability, aground movement, circulation, implemented taking into account the requirements of safety, consistency and ensuring the vital activity of ship crews, should become the determining factors in ensuring the competitiveness of river transport. The need for new technical solutions is determined by the need to improve the efficiency of ship power plants and their elements. It is also determined by significant changes that have taken place in recent years in the economic, environmental, social and other spheres of public activity. The need is also due to the crisis phenomena in the world economy, the ways out of which lie in qualitatively new structures and methods of management. To obtain adequate technical solutions, it is necessary to create models and algorithms for the optimization and automation of ships and ship technical equipment, to develop methods to

increase the efficiency of ship power plants and their elements by efficiently using different types of resources on each voyage.

One of the most important technical resources that determine the real terms of safe and reliable operation of a vessel during navigation is the service life of ship power plants. It depends significantly on the operating conditions, operating modes, the influence of external factors, and the technical condition. The motor resource consumption increases significantly in transient and limiting modes of operation. Transient modes, modes of maneuvering, modes of movement along shallow and narrow fairways, on locked sections of the route have a negative effect on the preservation of the motor resource. Reducing the cost of motor resources can be achieved due to the rational use of fuel during the voyage, which is necessary for carrying out transport work, reducing the operating time of engines in unsteady modes, and rational control of the power of ship power plants. The article proves that the problem of saving fuel and energy resources on river vessels can be solved by modeling the characteristics of the vessel using spline functions that ensure the exact passage of the corresponding spline through the interpolation nodes and equality of the derivatives of the spline with respect to the argument on the left side and on the right side of the interpolation node. Using spline functions, a solution to the problem of fuel economy for main engines is obtained.

Key words: *energy efficiency, fuel consumption, resource saving, spline functions, ship power plants.*