

УДК 629.12-8:629.12.037

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-167-181

ARTICLE HISTORY

Received 21.04.2026

Accepted 11.05.2026

Яровенко Володимир Олексійович¹, Іовчев Сергій Іванович²
Єрпельова Анна Вікторівна³
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
yarovenko@3g.ua², iovchev.odessa@gmail.com²,
ann.v.fedorenko@gmail.com³

Оптимальне управління гребними двигунами електроходів при гальмуванні

Yarovenko Volodymyr¹, Iovchev Serhii², Yerpelova Anna³
Odesa National Maritime University, Odessa, Ukraine
yarovenko@3g.ua², iovchev.odessa@gmail.com²,
ann.v.fedorenko@gmail.com³

Optimal control for electric ships' propulsion motors during braking

Резюме. Запропоновано метод розрахунку оптимальних законів управління гребними електродвигунами під час гальмування. Удосконалено процедуру гальмування. Розроблено процедуру пошуку оптимального закону управління напругою живлення гребного електродвигуна під час переходу його в режим динамічного гальмування. Оцінено вплив зовнішніх факторів та конструктивних параметрів суднового пропульсивного комплексу на отримані оптимальні рішення. Виявлено параметри, вплив яких є суттєвим. За результатами оптимізаційних розрахунків побудовано оптимальні закони управління гребними електродвигунами. Вони забезпечують мінімальний час гальмування електродвигунів з допустимими діапазонами змін режимних показників усіх складових електроенергетичної установки електроходу.

Summary. A method for calculating the optimal control laws for propulsion electric motors during braking has been developed. The braking procedure has been improved. A procedure has been developed for determining the optimal control law for the supply voltage of the propulsion

electric motor during its transition to dynamic braking mode. The influence of external factors and design parameters of the ship propulsion system on optimal solutions is assessed. The parameters that have a significant influence have been identified. Based on the results of optimization calculations, optimal control laws for propulsion electric motors were constructed. These laws ensure a minimum braking time of the propulsion electric motors with acceptable ranges of changes in the operating parameters of all components of the electric ship electric power plant.

До основних критеріїв оцінки ефективності роботи гребних електричних установок електроходів (ГЕУ) відносяться показники, що в першу чергу характеризують безпеку виконання судами маневрених операцій. Відповідно до Стандартів маневреності суден, схвалених 04.12.2002 Комітетом безпеки на морі ІМО (Резолюція MSC.137(76)), до основних маневрів, показники яких контролюються, відносяться, у тому числі, випробування активним гальмуванням з контролем дальності шляху судна з моменту, коли дається команда на повний назад до зупинки судна у воді. Стосовно суден з електрорухом, до таких показників відноситься, перш за все, тривалість гальмування гребних електродвигунів (ГЕД). Саме цей показник впливає на тривалість гальмування самого електрохода і на величину гальмівного шляху. Для оцінювання цих показників відповідно до Стандартів, можуть бути використані два методи: випробування масштабної моделі або комп'ютерні прогнози з використанням математичних моделей для прогнозування відповідності показників на етапі проектування гребних електричних установок. Таким чином, тривалість гальмування ГЕД – T_M – можна використовувати як основний критерій оцінки ефективності управління гребними електродвигунами електроходів на гальмівних режимах роботи. Пошук найкращих для забезпечення мінімального часу гальмування T_M законів управління гребними електродвигунами електроходів є метою цієї роботи.

В основі математичного опису роботи гребних електродвигунів у гальмівних режимах покладено основне рівняння динаміки

$$J_M \frac{d\omega_M}{dt} = M_M - M_P,$$

де J_M – приведений до валу гребного двигуна момент інерції двигуна, гребного гвинта і приєднаних до нього мас води;

M_M та ω_M – обертовий момент та кутова швидкість обертання ГЕД;

M_P – момент опору гребного гвинта.

Як гребні електродвигуни в гребних електричних установках найчастіше використовують асинхронні частотно-керовані

електродвигуни. В основі побудови математичного опису процесів в таких двигунах покладено точну класичну схему заміщення АД. Напруга на затискачах статора вважається синусоїдальною, насичення сталі машини не враховується, розподіл потоку по повітряному зазору приймається синусоїдальним, втрати в сталі враховуються приблизно, у роторі не враховуються [1]. З урахуванням таких припущень обертовий момент частото-керованого електродвигуна визначається співвідношенням

$$M_M = k_M I_M \Phi_M \cos \varphi_M,$$

де I_M – струм електродвигуна;

Φ_M – магнітний потік;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності електродвигуна;

k_M – коефіцієнт пропорційності.

Система управління перетворювачами частоти (ПЧ), від яких одержують живлення гребні електродвигуни, формує два сигнали – по відносній частоті α та відносній напруги γ .

Момент опору гребного гвинта M_P є складною функцією частоти обертання ω_P ($\omega_P = \omega_M$) та швидкості руху судна v , і визначається реверсивною гідродинамічною характеристикою гвинта [2]:

$$M_P = a_2 (\omega_P / \omega_{P0})^2 + b_2 (\omega_P / \omega_{P0}) (v / v_0) + c_2 (v / v_0)^2,$$

де a_2 , b_2 , c_2 – коефіцієнти універсальної характеристики гвинта (постійні у певних діапазонах зміни ω_P та v ;

індекс «0» відповідає значенням режимних показників (зокрема – ω_P і v) при русі судна з номінальною швидкістю, при номінальній частоті обертання гребного гвинта.

Відмінною особливістю роботи електроходів на маневрах є те, що тривалість перехідних процесів у гребній електричній установці виявляється порівнянною з тривалістю перехідних процесів у русі самого судна. Тому припущення про сталість швидкості руху при аналізі перехідних процесів у ГЕУ (як і навпаки – припущення про сталість ω_P при оцінці швидкості судна) не прийнятні. При маневруванні всі складові пропульсивного комплексу електрохода працюють у нестановлених режимах, перебуваючи в тісному взаємозв'язку. Це означає те, що при аналізі гальмівних режимів роботи гребних електродвигунів їх слід розглядати в єдності з іншими елементами суднового пропульсивного комплексу, що включає в себе і електроенергетичну установку, і гребні гвинти, і корпус судна [3]. Лише в такій постановці можна провести докладний аналіз процесів гальмування гребних електродвигунів і спробувати відшукати найкращі закони управління ГЕД з метою мінімізації тривалості гальмування T_M .

На першому етапі гальмування електроходу гребний електродвигун переводиться в режим динамічного гальмування. Для цього перетворювач частоти переводиться у випрямляючий режим і в статор ГЕД подається постійний струм. При переведенні ПЧ в режим випрямлення в обмотках ГЕД деякий час зберігається змінна напруга, що впливає на процес гальмування ГЕД, тому напруга постійного струму на статор ГЕД повинна подаватися із затримкою в часі та з кінцевою швидкістю наростання [3, 4].

У загальному випадку закон зміни відносної напруги можна представити у вигляді експоненційної залежності:

$$\gamma = \gamma_{st}(1 - \exp(-k_\gamma t)),$$

де γ_{st} – значення відносної напруги, що встановилося;

k_γ – коефіцієнт, що визначає швидкість наростання напруги.

Наявність зворотних зв'язків за швидкістю та моментом ГЕД і безінерційність зміни постійної складової струму на виході перетворювача частоти дають можливість знайти та реалізувати оптимальний режим динамічного гальмування, що забезпечує найкращі значення відповідних показників якості.

Завдання пошуку оптимальних законів управління об'єктів подібного типу відноситься до області нелінійного програмування і полягають у знайденні екстремуму цільової функції $f(\mathbf{k})$ при заданих обмеженнях $g(\mathbf{k})$ у вигляді нерівностей. Необхідно мінімізувати певну цільову функцію $f(\mathbf{k})$, $\mathbf{k} \in E^n$ при p лінійних обмеженнях у вигляді $g_j(\mathbf{k}) \geq 0$, $j = 1, \dots, p$, де E^n – допустима область n -мірного простору. Оптимальне рішення складається з оптимальної точки $\mathbf{k}^* = [\mathbf{k}_1^*, \mathbf{k}_2^*, \dots, \mathbf{k}_n^*]$ та відповідного їй значення цільової функції $f(\mathbf{k}^*)$ [5].

Під $f(\mathbf{k}^*)$ в даному випадку слід розуміти неявно виражені залежності критерію оптимальності T_M від оптимізованих параметрів γ_{st} та k_γ . Обмеження $g(\mathbf{k})$ забезпечують допустимі діапазони зміни режимних показників всіх складових частин електроенергетичної установки електрохода.

Значення T_M знаходяться в результаті розрахунку маневрів, що описуються складною системою алгебраїчних та диференціальних рівнянь. Система визначає перехідні режими роботи всього суднового пропульсивного комплексу, який включає первинні двигуни, синхронні генератори, перетворювачі частоти, гребні електродвигуни, гребні гвинти, корпус електрохода. Математична постановка задач, які вирішуються, процедури та алгоритми розробленого методу оптимізації запропоновані в роботі [3, 6]. Вони показали свою ефективність під час розв'язання задач такого типу. У цій роботі

представлені результати оптимізаційних розрахунків, проведених за допомогою цих методів, стосовно розглянутої задачі.

Оптимізація управління гребною енергетичною установкою в режимі динамічного гальмування зводиться до пошуку оптимального рішення

$$\gamma^* = \gamma_{st}^* (1 - \exp(-k_Y^* T));$$

$$T_{Mmin}^* = T(\gamma^*),$$

де γ_{st}^* та k_Y^* – оптимальні значення параметрів γ_{st} та k_Y ; $T = v_0 t / L$ – безрозмірний відносний час; v_0 – швидкість руху судна; L – довжина судна по КВЛ; t – поточний час; T_{Mmin}^* – значення цільової функції – T_M – в оптимальній точці.

У процесі пошуку оптимального рішення велика увага приділяється обмеженням $g(k)$, що забезпечують допустимі значення основних параметрів електроенергетичної установки [1, 7].

Найважливішим завданням, яке доводиться вирішувати під час пошуку оптимальних законів керування гребними електродвигунами, є дотримання енергетичного балансу режиму динамічного гальмування. Суть його полягає в наступному.

Повна енергія гальмування – енергія, що надійшла в гребну установку при гальмуванні ГЕД від початкової швидкості його обертання до нуля визначається як

$$W_B = \int_0^T dW,$$

де

$$dW = M_M \omega_M dt + J_\Sigma \frac{d\omega_M}{dt} \omega_M dt = M_M \omega_M dt + J_\Sigma \omega_M d\omega_M \quad (1)$$

Перший доданок правої частини рівняння (1) відповідає енергії, отриманої від гвинта, що працює в режимі гідравлічної турбіни, другий – кінетичної енергії, запасеної частинами двигуна, валопроводу і гребного гвинта з приєднаними до нього масами води.

У свою чергу, енергія, що надійшла до ГЕУ, має бути витрачена у вигляді втрат у системі електроруку

$$W_{PEP} = \int_0^T (\Delta P_{PEP}) dt,$$

де

$$\Delta P_{PEP} = \sum P_M \left(\frac{I_{DB}}{I_{DBn}} \right)^2 + A(\omega_M)^2;$$

$\sum P_M$ – сумарні втрати у міді у номінальному режимі з урахуванням опору динамічного гальмування;

I_{DB} – наведений струм двигуна у режимі динамічного гальмування;

A – сумарні втрати тертя в ГЕД.

Сумарні втрати в міді

$$\Sigma P_M = P_{M0} + P_{DB} = P_{M0} + k_{DB} \cdot P_{PEPn},$$

де P_{DB} – потужність втрат у опорах динамічного гальмування;

P_{PEPn} – номінальна потужність на валу ГЕД;

k_{DB} – кратність опору динамічного гальмування,

$$k_{DB} = \frac{P_{DB}}{P_{PEP}}.$$

Якщо виключити можливість передачі енергії рекуперації до первинних двигунів, умовою дотримання енергетичного балансу буде

$$W_B \leq W_{ГЕУ}. \quad (2)$$

Таким чином, коефіцієнт k_{DB} – найважливіший параметр, що впливає на організацію процесу динамічного гальмування. Він оцінює можливість розсіювання потужності рекуперації на активних опорах системи електроруху, тобто оцінює можливість реалізації режиму динамічного гальмування без перегріву основних складових частин електроприводу.

Оцінити вплив цього найважливішого параметра (а разом і призначити допустимі діапазони зміни його значень) можна за результатами додаткових досліджень, результати яких представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Вплив кратності k_{DB} на оптимальне рішення

Початкова швидкість v_{in}	Кратність опору динамічного гальмування k_{DB}	Оптимальні рішення		
		γ_{st}^*	k_{γ}^*	T_M^*
0,367	0,15	0,685	3,055	0,55
0,367	0,12	0,685	3,055	0,55
0,367	0,10	0,455	2,99	1,03
0,367	0,09	0,40	2,99	1,67
0,771	0,15	0,68	3,085	1,94
0,771	0,11	0,68	3,085	1,94
0,771	< 0,11	немає рішення: енергія рекуперації не може бути розсіяна на активних опорах ГЕУ		

У табл. 1 наведено результати оптимізації законів управління гребними електродвигунами при різних значеннях k_{DB} на малих та

великих швидкостях v_{in} руху судна. Аналіз їх показує таке. При малих швидкостях руху явно простежується вплив k_{DB} і на оптимальні параметри законів управління, і на T_M^* . При великих швидкостях параметр k_{DB} «працює» у режимі «так-ні» – або дозволяючи реалізувати режим динамічного гальмування, або ні (за умовою (2)), не впливаючи при цьому на оптимальні закони.

Однак слід мати на увазі, що k_{DB} – це конструктивний параметр гребної електричної установки, який підбирається таким чином, щоб полегшити можливість реалізації режиму динамічного гальмування у всьому діапазоні зміни швидкості v_{in} . Виходячи з цього, а також зважаючи на те, що при $k_{DB} < 0,12$ стрімко зростає (див. табл. 1) тривалість гальмування T_M^* , доцільно прийняти величину k_{DB} такою, яка дорівнює мінімально допустимому значенню – $k_{DB} = 0,12$ (за умовою (2) максимального значення швидкості v_{in}).

На пошук оптимальних параметрів законів управління впливає низка зовнішніх факторів, обумовлених умовами виконання маневрів та конструктивними параметрами судна й параметрами його гребної установки. Ступені їхнього впливу виявлено додатковими розрахунками, результати яких наведені нижче.

Найважливішим параметром, який впливає на тривалість процесу, динамічного гальмування є, як було зазначено вище, швидкість судна v_{in} у момент переходу гребної установки в гальмівний режим [8]. Цілком природно слід очікувати істотного впливу цього параметра і на оптимальні рішення, що отримуються в ході оптимізації. Для аналізу характеру та ступеню впливу швидкості v_{in} на оптимальні рішення, проведено серію розрахунків при різних значеннях v_{in} . Результати розрахунків наведено у табл. 2

Таблиця 2
Вплив початкової швидкості v_{in} на оптимальне рішення

Початкова швидкість v_{in}	Оптимальні рішення		
	Оптимальні параметри		Значення T_M^* в оптимальній точці
	γ_{st}^*	k_{γ}^*	T_M^*
0,253	0,710	3,0	0,44
0,336	0,689	3,055	0,55
0,472	0,68	3,045	0,69
0,568	0,685	3,045	0,86
0,729	0,68	3,075	1,46
0,771	0,68	3,085	1,94

Як видно з табл. 2, початкова швидкість судна впливає на оптимальне рішення. Зі зміною v_{in} оптимальні параметри закону управління відносною напругою $\gamma^* = \gamma(\gamma_{st}^*, k_\gamma^*, T)$ змінюються, але незначно, тоді як тривалість гальмування (значення T_M^* у оптимальній точці – $T_M^* = T(\gamma^*)$) дуже суттєво залежить від v_{in} . Це дає підставу віднести v_{in} до суттєвих чинників.

Наступним фактором, вплив якого на закони управління гребними електродвигунами необхідно оцінити, є відносна глибина води

$$h_T = \frac{h}{H},$$

де h – глибина води; H – осадка судна.

Необхідність врахування h_T обумовлена тим, що при маневруванні судна на воді кінцевої глибини суттєво змінюються сили та моменти, що діють як на корпус судна, так і на його рушії [9]. Враховувати вплив глибини води доцільно при докритичних швидкостях

$$F_r = \frac{v_0}{\sqrt{gh}} < 0,6.$$

Врахувати вплив глибини води можна [8, 9]:

– введенням поправочних коефіцієнтів χ_{vh} і χ_{th} , які враховують вплив мілководдя на коефіцієнти попутного потоку та засмоктування гідродинамічної характеристики рушіїв –

$$\chi_{\psi_h} = 1 - \psi_h / 1 - \psi_\infty; \chi_{t_h} = 1 - t_h / 1 - t_\infty,$$

де ψ_h , і ψ_∞ – коефіцієнти попутного потоку на мілководді і на глибокій воді; t_h , і t_∞ – коефіцієнти засмоктування за тих же умов;

– уточненням сили опору води на рух судна: стосовно використовуваної моделі, це можна зробити за методом П.А. Апхутіна, який дозволяє розраховувати втрату швидкості ходу судна під час руху на мілководді;

– перерахуванням коефіцієнтів гідродинамічних сил та моментів (у загальноприйнятих позначеннях) на відповідну глибину;

– коригуванням величин приєднаних до судна мас води λ_{11} , λ_{22} , λ_{66} , що може бути виконано за методикою, запропонованою в роботі [3].

У якості прикладу, якій ілюструє вплив глибини води на результати пошуку оптимальних законів управління ГЕД, в табл. 3 наведено результати оптимізації при гальмуванні ГЕД на глибокій воді (h_∞) і при $h_T = 2$. Результати, які наведені, відповідають руху електроходу на малих та середніх швидкостях.

Таблиця 3

Вплив глибини води h_T на оптимальне рішення

Початкова швидкість v_{in} судна	Глибина води h_T	Оптимальні рішення		
		γ_{st}^*	k_γ^*	T_M^*
0,771	∞	0,68	3,045	1,94
0,690	2	0,675	3,065	0,91
0,336	∞	0,685	3,02	0,53
0,340	2	0,68	3,03	0,51

Порівняння результатів, наведених у табл. 3, показує наступне.

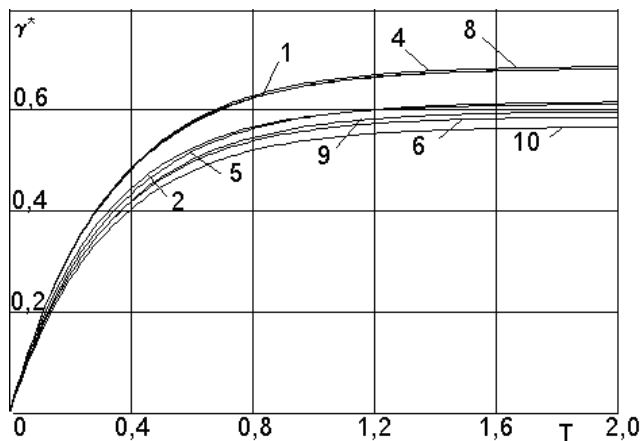
Глибина води h_T незначно впливає на оптимальний закон $\gamma^*(T)$, але суттєво впливає на результат оптимізації – тривалості гальмуванні T_M^* . При цьому ступінь впливу h_T залежить від швидкості судна, при якій виконується маневр – на середніх швидкостях обмеження в глибині відчутно впливає на оптимальне рішення, а при малій швидкості – практично ні (що цілком узгоджується з теоретичними міркуваннями).

Ще одним важливим критерієм, за яким оцінюється якість гальмування ГЕД, є відносна зміна напруги ΔU_G головних генераторів при гальмуванні гребних електродвигунів. Вагомість цього критерію залежить від того, до якого типу гребної установки відноситься електропривод. Для ГЕУ з єдиною електроенергетичною системою цей параметр регламентований – $\Delta U_G=11-15\%$, що накладає додаткові (і дуже жорсткі за критеріями оцінки показників роботи ГЕУ) обмеження цільової функції. Для ГЕУ з автономною системою електроруху вимоги до величини ΔU_G істотно «м'якше», внаслідок чого з'являється певна свобода у пошуку оптимальних законів управління та підвищення ефективності гальмування (за обраним критерієм оптимальності).

Вплив ΔU_G на оптимальні рішення можна оцінити за результатами, наведеними в табл. 4, на рис. 1 та на рис. 2.

Тут показані результати оптимізації при різних значеннях ΔU_G , для декількох значень швидкості судна v_{in} .

Оптимальні закони управління наведено на рис. 1. Криві на рисунку відповідають номеру варіанта в табл. 4

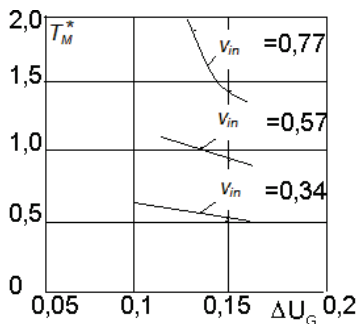
Рис. 1. Вплив ΔU_G на оптимальні закони управління

Таблиця 4

Вплив ΔU_G на оптимальне рішення

Номер варіанта (крива на рис. 1)	Початкова швидкість v_{in}	ΔU_G	Оптимальні рішення		
			γ_{st}^*	k_γ^*	T_M^*
1	0,771	0,15	0,68	3,075	1,46
2		0,13	0,61	3,235	1,87
3		0,11	Рішення немає		
4	0,568	0,15	0,68	3,045	0,86
5		0,13	0,615	3,03	1,01
6		0,11	0,585	3,11	1,1
7		0,09	Рішення немає		
8	0,336	0,15	0,685	3,055	0,55
9		0,12	0,595	3,03	0,65
10		0,09	0,565	3,105	0,68
11		0,08	Рішення немає		

Вплив ΔU_G на значення цільової функції в оптимальній точці (T_M^*) показано на рис. 2.

Рис. 2. Вплив ΔU_G на тривалість гальмування T_M^*

З табл. 4 та рис. 1 і 2 випливає, що на відміну від швидкості руху судна v_{in} , глибини води h_T і кратності опору динамічного гальмування k_{DB} , відносна зміна напруги ΔU_G впливає при оптимальному управлінні і на оптимальний закон управління γ^* , і на тривалість гальмування T_M^* . Причому вплив на T_M^* дуже значний і зростає зі збільшенням v_{in} . Виходячи з цього, ΔU_G має бути включений до групи значущих факторів.

Розглянуті вище параметри характеризують вплив на оптимальне управління гребними електродвигунами зовнішніх умов виконання маневру та можливості реалізації режиму динамічного гальмування, виходячи з дотримання енергетичного балансу цього процесу. Однак як показали проведені дослідження [3, 6, 8], крім них, на закони управління ГЕД істотно впливають і узагальнені безрозмірні параметри пропульсивного комплексу C_{G8} , C_{G5} і C_{G10} . Це ті параметри, які кількісно характеризують ступінь:

зниження поздовжньої складової результуючої ЕРС генератора, яке викликане реакцією якоря синхронної машини – C_{G8} ;

падіння напруги на реактивних опорах обмоток генератора під час роботи під навантаженням – C_{G5} ;

вплив навантаження генератора (за величиною та за характером) на кут зсуву фаз між струмом та поздовжньою ЕРС – C_{G10} .

Співвідношення для розрахунку цих параметрів за конструктивними параметрами ГЕУ та можливі діапазони зміни їх значень наведені у [4, 5].

Проведений вище аналіз впливу різних факторів (включаючи конструктивні параметри ГЕУ) на оптимальні рішення дозволяє зробити такі висновки. Усі чинники можна поділити на дві групи. До першої відносяться ті, які практично не позначаються на оптимальних

параметрах законів управління $\gamma^* = \gamma(\gamma_{st}^*, k_\gamma^*, T)$, але впливають на результат виконання маневру – T_M^* . До другої групи відносяться параметри, які впливають і на оптимальні параметри законів управління, і на тривалість гальмування – T_M^* .

З урахуванням завдання пошуку оптимальних законів управління $\gamma^* = \gamma(\gamma_{st}^*, k_\gamma^*, T)$ для різних (у конструктивному виконанні) пропульсивних комплексів, до значущих факторів (при фіксованих значеннях k_{DB} і h_T) слід віднести v_{in} , ΔU_G , C_{G8} , C_{G5} та C_{G10} . Серії оптимізаційних розрахунків дали можливість знайти оптимальні закони управління для різних варіантів сполучення значущих факторів. Як приклад, нижче наведені результати пошуку оптимальних законів управління відносною напругою ГЕД з фіксованими значеннями $k_{DB} = 0,12$ і h_∞ при різних швидкостях v_{in} для різних поєднаннях значущих факторів, ΔU_G , C_{G8} , C_{G5} та C_{G10} . Деякі варіанти поєднань та знайдені оптимальні рішення наведено у табл. 5.

Таблиця 5
Поєднання значимих факторів та знайдені оптимальні рішення

Варіант (крива)	Значення значимих факторів					Оптимальні рішення		
	v_{in}	ΔU_G	C_{G8}	C_{G5}	C_{G10}	γ_{st}^*	k_γ^*	T_M^*
1	0,4	0,25	0,86	0,05	0,572	0,935	3,010	0,39
2	0,4	0,05	0,86	0,05	0,572	0,545	3,020	0,66
3	0,6	0,25	0,86	0,05	0,572	0,745	3,07	0,67
4	0,6	0,07	0,86	0,05	0,572	0,63	3,0	0,84
5	0,8	0,25	0,86	0,05	0,572	0,655	3,27	1,30
6	0,8	0,07	0,86	0,05	0,572	0,63	3,055	1,39
7	0,4	0,25	1,11	0,05	0,572	1,035	3,015	0,39
8	0,4	0,12	1,11	0,05	0,572	0,610	3,06	0,60
9	0,6	0,25	1,11	0,05	0,572	0,895	3,215	0,62
10	0,6	0,13	1,11	0,05	0,572	0,63	3,04	0,93
11	0,8	0,25	1,11	0,05	0,572	0,75	4,925	1,14
12	0,8	0,25	1,11	0,05	0,572	0,63	3,05	1,65
13	0,4	0,25	1,35	0,05	0,572	0,845	3,041	0,47
14	0,4	0,16	1,35	0,05	0,572	0,615	3,09	0,63
15	0,6	0,25	1,35	0,05	0,575	0,845	3,015	0,71
16	0,6	0,16	1,35	0,05	0,572	0,58	3,36	1,18
17	0,8	0,25	1,35	0,05	0,572	0,805	3,535	1,24
18	0,8	0,20	1,35	0,05	0,572	0,68	3,185	1,65

За наслідками розрахунків на рис. 3 побудовані графіки з оптимальними законами управління $\gamma^* = \gamma(\gamma_{st}^*, k_{\gamma}^*, T)$ для перших шести варіантів розрахунків.

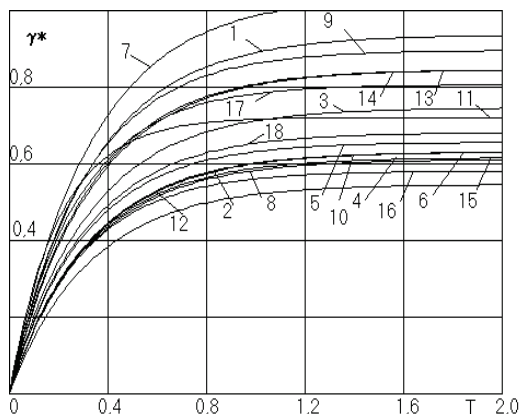


Рис. 3. Оптимальні закони управління при гальмуванні ГЕД

На рис. 4 представлені залежності $T_M^* = T(v_{in})$ для визначення тривалості гальмування гребних двигунів в функції початкової швидкості.

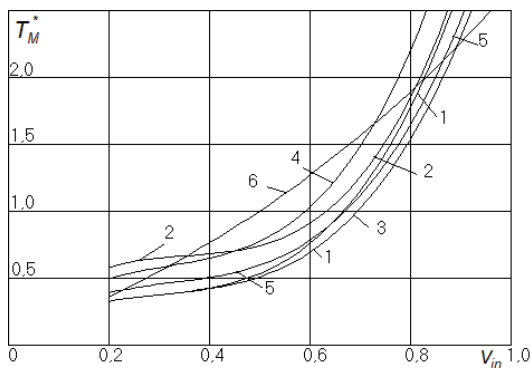


Рис. 4. Залежність T_M^* від швидкості судна v_{in}

Аналіз отриманих результатів показує наступне. Найбільший вплив на оптимальні закони управління та тривалість гальмування надає допустиме значення провалів напруги ΔU_G . З посиленням вимог за

допустимим значенням ΔU_G , як і слід було очікувати, необхідно знижувати інтенсивність гальмування, що відбилося в зменшенні γ_{st}^* і k_{γ}^* . Одночасно із цим, цілком природно, зростає тривалість гальмування ГЕД.

Висновки.

1. Отримані результати ілюструють можливість підвищення ефективності роботи гребних електричних установок електроходів на маневрених режимах роботи. За рахунок оптимізації законів управління гребними електродвигунами можна суттєво скоротити тривалість гальмування ГЕД і, відповідно, тривалість гальмування самого електроходу.

2. Розроблено діаграми з оптимальними законами управління гребними електродвигунами, які забезпечують мінімальну тривалість гальмування.

3. Для будь-якого електроходу (з відповідними безрозмірними параметрами) з розглянутим типом ГЕД рекомендується зафіксувати коефіцієнт k_{γ}^* постійною величиною та закласти його як параметр задатчика інтенсивності наростання сигналу управління. Після цього стає можливим вибір найкращих законів управління при різних значеннях v_{in} і ΔU_G .

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Woud H. K., Stapersma D. Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems. London : IMarEST, 2002. – 510 p.
2. Carlton J. Marine Propellers and Propulsion. 4th ed. Kidlington: Butterworth-Heinemann, 2019. – 585 p.
3. Яровенко В.О. Розрахунок та оптимізація перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів. - Одеса: Маяк, 1999. – 188 с.
4. J.M. Apsley; A. Gonzalez Villasenor; M. Barnes; A. C. Smith; S. Williamson; J.D. Schuddebeurs (2007) Propulsion Drive Models for Full Electric Marine Propulsion Systems. //Published by Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) conference paper –2008.–Vol. 1 – P. 118 – 123.
5. Bertsekas D. P. Nonlinear Programming. 3rd ed. Belmont, MA: Athena Scientific, 2016. – 1100 p.
6. Yarovenko, V. A., Chernikov, P. S. (2017). A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants. //Electrical Engineering & Electromechanics. – 2017. – № 6. – P. 32 – 41.

7. Inoue S., Hirano M., Kijma K., Takashina J. (1981). A practical calculation method of ship manoeuvring motion. //Int. Shipbuild. Progr. – 1981. – Vol. 28. – N 325. – P. 207 – 222.

8. Шуміло О.М. Вплив геометричний параметрів корпусу електрохода на інерційні характеристики. //Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2023. – №71. – С. 36 - 48.

9. Principles of Naval Architecture: Ship Resistance and Flow / Ed. by L. Larsson, H. C. Raven. Jersey City, NJ : SNAME, 2010. – 224 p.

Abstract. A method for finding optimal control laws for ship propulsion electric motors for braking modes of electric ships has been developed. The propulsion electric motor is considered as an integral part of a single ship propulsion system. The necessity of such an approach is substantiated. The braking procedure has been refined. The duration of the propulsion electric motor braking process was chosen as an optimality criterion. A control law for electric motors during dynamic braking has been formulated. A method for finding optimal parameters of the control law has been developed. An objective function has been formed and constraints have been defined. Based on the results of the braking mode energy balance, a ratio has been found between the power loss in dynamic braking resistances and the propulsion electric motor power. It has been shown that this ratio determines whether dynamic braking can be implemented in practice. Recommendations for the purpose of this ratio have been formulated. The influence of maneuvering conditions, external factors, electric ships' design parameters and their electric power plants on optimal solutions has been assessed. Factors with a significant influence have been identified. The influence of the vessel's initial speed, water depth, acceptable voltage drops in the ship's electrical system, and the design parameters of the propulsion system on the optimal solution were assessed. Factors that significantly influence both the optimal control law parameters and the optimality criterion value at the optimal point were identified. Based on the results of optimization calculations, optimal control laws for propulsion electric motors were found for various combinations of propulsion system design parameters with different initial braking conditions. These laws ensure minimal braking time with acceptable ranges of parameter variation for all components of the ship's electric power plant. Recommendations for implementing these laws are proposed.