

П. С. ЧЕРНІКОВ, В. О. ЯРОВЕНКО, О. І. ЗАРИЦЬКА

ВПЛИВ ЗАКОНІВ УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАНИМИ ГРЕБНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ НА МАНЕВРЕНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОХОДІВ

Розглянуто електроходи з єдиною судовою електроенергетичною системою. Проаналізовано вплив законів управління частотно-регульованими гребними електродвигунами на маневрені характеристики електроходів. В якості критеріїв обрані показники, що характеризують маневрені характеристики електроходів, якість перехідних процесів в гребній електроенергетичній установці і параметри електроенергії судової мережі. На прикладі реального електроходу розраховані маневрені режими, кількісно оцінені основні показники якості їх виконання і за результатами порівняльного аналізу зроблені висновки на користь поліноміального з оптимізованими коефіцієнтами закону управління.

Ключові слова: гребні електроенергетичні установки; маневрені характеристики пропульсивних комплексів електроходів; закони частотного управління гребними електродвигунами.

Рассмотрены электроходы с единой судовой электроэнергетической системой. Проанализировано влияние законов управления частотно-регулируемыми гребными электродвигателями на маневренные характеристики электроходов. В качестве критериев выбраны показатели, характеризующие маневренные характеристики электроходов, качество переходных процессов в гребной электроэнергетической установке и параметры электроэнергии судовой сети. На примере реального электрохода рассчитаны маневренные режимы, количественно оценены основные показатели качества их выполнения и по результатам сравнительного анализа сделаны выводы в пользу полиномиального с оптимизируемыми коэффициентами закона управления.

Ключевые слова: гребные электроэнергетические установки; маневренные характеристики пропульсивных комплексов электроходов; законы частотного управления гребными электродвигателями.

Relevance. In shipbuilding, there have been trends in the use of electric motion. The most important advantages of electric vessels are the high maneuverability, which contributes to the safety of maneuvering operations. Electric propelling power plants (EPPP) are most often built on the basis of asynchronous frequency-controlled electric motors (EM). More and more attention is being paid to electric vessels with a unified electric power system. Electric propelling plant (EPP) is the largest power consumer. The transient modes of its operation significantly affect the parameters of the electric power of the ship network, which raises the requirements for the quality of transient processes in the EPP. On this basis, both the indicators of maneuverability and the quality of electric power of the ship network should be the quality indicators of the control of the EPP on maneuvers. **Status of the issue under consideration.** Three laws of control of frequency-regulated electric motors are used in the theory of electric motion: at a constant moment; at constant power; at quadratic load. For a real engine, deep frequency control according to one of these laws is not possible, since the motor overload capacity will either be lowered at low frequencies or overestimated in nominal mode. Constant overload capability can only be ensured if there is a variable correlation between voltage and frequency. In the case of frequency control of electric ships' electric motors, the task becomes more difficult, since a set of indicators characterizing the ship's maneuvering characteristics, transient processes in the EPPP and the parameters of electric power of the ship network should be chosen as the criteria of regulation quality. This leads to the need to clarify the control laws. The purpose of the work is the search for frequency control laws of electric motors that are able to provide better maneuverability of electric vessels. **Research results.** A structural diagram of EPPP as part of an electric ship's propulsive complex has been made. A mathematical model of transient operation modes has been worked out on its basis. An algorithm and a package of application programs for calculating the basic mode indices of the complex have been developed. The estimation procedure of the basic indicators of quality of maneuver operation performance is worked out. The model and method of calculation make it possible to study the influence of EM control laws on the electric ships' maneuvering characteristics, on transient processes in the EPPP and on the parameters of electric power of the ship network. The research was carried out on the example of the science-research vessel MV SANCO STAR. Maneuver modes for various control laws are calculated and the performance indicators of maneuver operations are evaluated. A comparative analysis of the results made it possible to find the best EM control laws on maneuverers. **Conclusions.** With respect to electric vessels with frequency-controlled electric motors, the proportional control law has significant advantages over other control laws. At the same time, increasing the supply voltage of the EM in transient modes opens the possibility of increasing the efficiency of performing maneuver operations. It is recommended to form the control laws of the EM voltage as analytical dependencies, in which the correlation between the relative voltage and the relative frequency changes gradually depending on the depth of regulation. Specific analytical dependencies are obtained from the results of optimization calculations of control laws.

Keywords: electric propelling power plants; maneuvering characteristics of electric ships' propulsive complexes; the laws of frequency control of electric motors.

Актуальність. Тенденції розвитку суднобудівництва все більш пов'язані з використанням електродвигунів в судових пропульсивних установках. Такий тип приводу гребних рушіїв є доцільним для: суден-криголомів, гребні гвинти яких працюють в надважких умовах; круїзних суден; великотоннажних танкерів, газозовів зрідженого природного газу (LNG), які відрізняються гнучкістю щодо швидкості й дальності ходу, типу палива; паромів; науково-дослідницьких суден та інш. Найважливішими перевагами електроходів є високі маневрені властивості, що в першу чергу сприяє безпеці виконання маневрених операцій. Інтерес до використання електродвигунів незмінно росте.

Гребні електроенергетичні установки (ГЕЕУ) частіше за все будуються на основі асинхронних частотно-керованих гребних електродвигунів (ГЕД). ГЕЕУ

електрохода представляє собою складну електромеханічну систему, яка є невід'ємною частиною єдиного судового пропульсивного комплексу. У склад комплексу входять: теплові двигуни, синхронні генератори, перетворювачі енергії, гребні електродвигуни, рушії, кермо та корпус судна.

В останні роки все більша увага приділяється електроходам з єдиною судовою електроенергетичною системою (ЄЕЕС). Така установка забезпечує живленням і систему електродвигунів (гребну електричну установку), і загальносуднові споживачі. Пропульсивний комплекс електрохода з єдиною судовою електроенергетичною системою надано на рис. 1.

Як показує практика, ЄЕЕС мають низку незаперечних переваг перед автономними системами електродвигунів. Найбільшою мірою ці переваги проявляються

© П. С. Черніков, В. О. Яровенко, О. І. Заричька. 2020

на: суднах, у яких є потужні споживачі, що працюють у режимі, роздільному в часі від системи електроруху; на судах, що працюють у режимі позиціонування. Застосування єдиних систем електроруху дозволяє: скоротити кількість генераторних агрегатів, зменшити масогабаритні характеристики джерел електроенергії,

знизити витрати енергії і шкідливих викидів у навколишнє середовище, поліпшити компонування енергетичного обладнання (звільнивши при цьому додаткові площі), підвищити надійність суднової електроенергетичної установки.

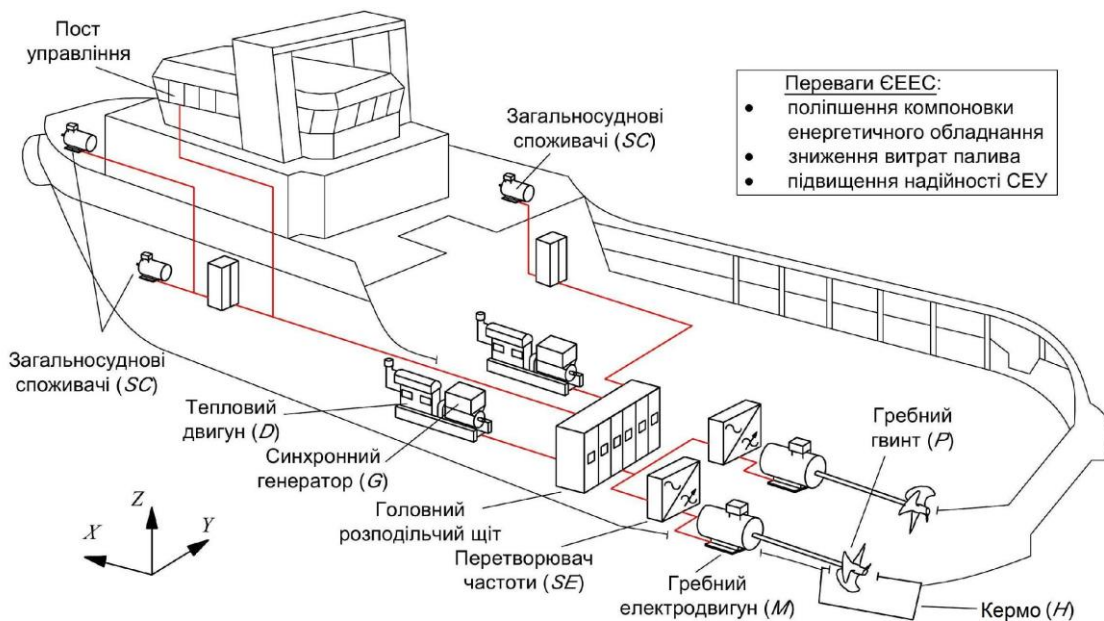


Рис. 1 – Пропульсивний комплекс електрохода з єдиною електроенергетичною системою

Гребна електрична установка – найбільший по потужності споживач, тому перехідні режими її роботи неминуче позначаються на параметрах електроенергії суднової мережі. Той факт, що загальносуднові споживачі електроенергії отримують живлення від загальних шин суднової електростанції, істотно підвищує вимоги до якості протікання перехідних процесів в ГЕУ і параметрів електроенергії суднової мережі. Відповідно до вимог міжнародного стандарту [1], ця якість визначається насамперед:

- частотними характеристиками;
- характеристиками напруги;
- пусковими характеристиками генераторних агрегатів;
- характеристиками паралельної роботи генераторних агрегатів.

Виходячи з цього, показники якості маневрування і показники якості електроенергії повинні розглядатися як єдиний комплекс показників роботи СЕЕС. Підвищення маневреності електроходів із забезпеченням при цьому відповідної [1] якості електроенергії є досить актуальним завданням.

Управління рухом електрохода здійснюється з поста управління (на містку). Положення рукоятки визначає відносну частоту напруги живлення ГЕД α , і відносну напругу живлення – $\gamma = \gamma(\alpha)$. Від цих двох сигналів управління у великій мірі і залежить якість перехідних процесів в ГЕЕУ, маневрені якості електрохода, параметри електроенергії суднової мережі й, відповідно, якість роботи загальносуднових споживачів.

Стан питання, що розглядається. Закон управління відносно напругою $\gamma = \gamma(\alpha)$ частотно-регульованими асинхронними електродвигунами визначається характером навантаження на валу $M_C(\omega)$. Відповідно до принципу побудови суднової електроенергетичної системи і характеру навантаження на ГЕД, в теорії електроруху використовують три закони управління [2]:

- а) при постійному моменті – $\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$;
- б) при постійній потужності – $\frac{\gamma}{\alpha^{0,5}} = \text{const}$;
- в) при вентиляторному навантаженні – $\frac{\gamma}{\alpha^2} = \text{const}$.

При частотному регулюванні реальним асинхронним двигуном доводиться враховувати зміну параметрів схеми заміщення (через насичення головного магнітного кола), витиснення струму в роторі і насичення зубцевого шару потоками розсіювання [2]. Найбільш істотний негативний вплив на характеристики асинхронного двигуна вносить падіння напруги в активному опорі статора r_1 . Зі зменшенням частоти струму і індуктивних опорів цей вплив різко зростає.

У зв'язку з цим, для реального двигуна глибоке регулювання частоти ($\alpha < 0,3$) за допомогою одного з вказаних законів управління стає неможливим. У цьому разі перевантажувальна здатність буде або занижена на малих частотах, або завищена в номінальному

режимі. Постійна перевантажувальна здатність може бути забезпечена тільки при змінному співвідношенні між напругою і частотою [2]

$$\frac{\gamma}{\alpha^v} = \text{const.}$$

При зменшенні частоти показник ступеню v в цьому вираженні повинен теж плавно змінюватися, тобто при регулюванні частоти один закон управління плавно перетікає у другий.

Таким чином, не існує однозначної залежності показника ступеню v від частоти струму. І це все при тому, що критеріями якості управління вибираються показники, що оцінюють показники роботи саме електродвигунів. При частотному управлінні гребними електродвигунами електроходів задача стає складнішою, оскільки критеріями якості регулювання слід

оби рати показники, які в першу чергу характеризують маневрені характеристики судна, перехідні процеси в ГЕЕУ і параметри електроенергії суднової мережі. Зміна критеріїв оптимальності неминуче приведе до необхідності зміни законів управління. Пошук законів частотного управління гребними електродвигунами, які здатні забезпечити найліпші значення цих показників є **метою роботи**.

Метод рішення задачі.

Структурна схема гребної електроенергетичної установки «тепловий двигун – синхронний генератор – перетворювач частоти – асинхронний двигун» у складі пропульсивного комплексу електрохода представлена на рис. 2. Вона відповідає загальноприйнятому в теорії електрорухоу варіанту компоновання електроенергетичної установки [3 – 4] з класичним варіантом приводу гребних гвинтів.

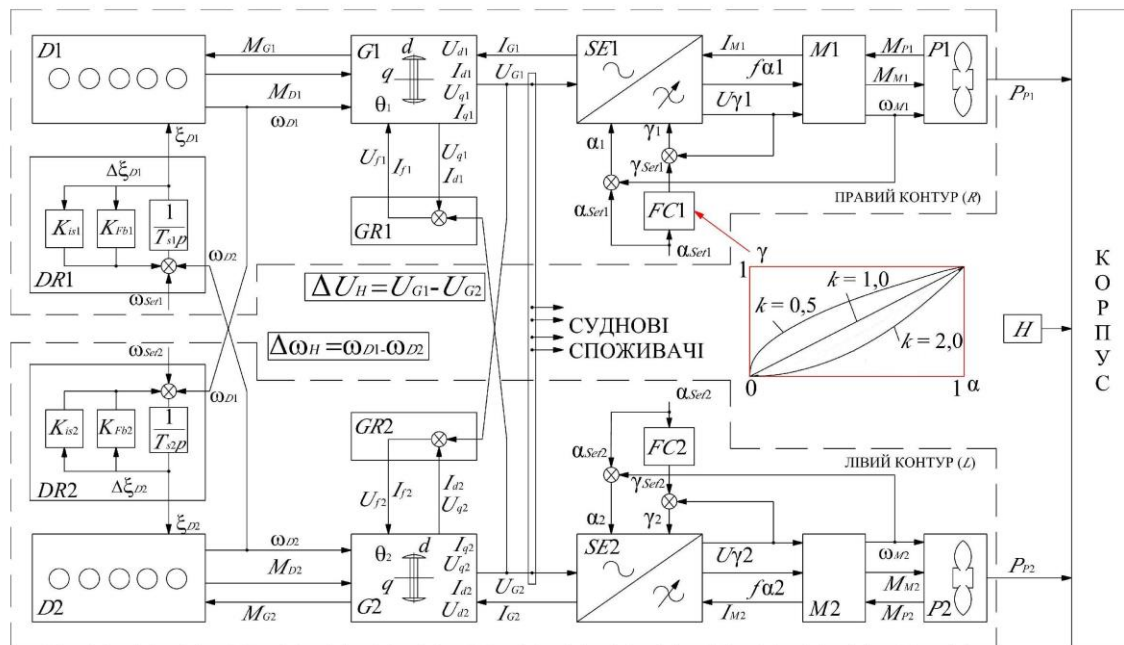


Рис. 2 – Структурна схема пропульсивного комплексу електрохода

До складу пропульсивного комплексу входять два контури. На рис. 2:

- D – теплові двигуни;
- G – синхронні генератори (СГ);
- SE – частотні перетворювачі електроенергії;
- M – асинхронні гребні електродвигуни;
- P – гребні гвинти;
- H – кермо;
- $КОРПУС$ судна.

На схемі також показані елементи системи автоматичного регулювання й основні параметри, що зв'язують силові блоки та управляючі сигнали:

- DR – регулятори частоти обертання первинного двигуна;
- GR – автоматичні регулятори напруги генератора;
- M_D – обертаючий момент теплового двигуна;
- ω_D – кутова швидкість обертання теплового

двигуна;

- M_G – момент опору генератора;
- U_d – напруга генератора по поздовжній осі (внутрішня координата);
- U_q – напруга генератора по поперечній осі (внутрішня координата);
- I_d – струм генератора по поздовжній осі (внутрішня координата);
- I_q – струм генератора по поперечній осі (внутрішня координата);
- U_G – напруга на виході генератора;
- ω_{Set} – уставка кутової швидкості обертання регулятора швидкості обертання теплового двигуна;
- ξ_D – хід рейки паливного насоса;
- $\Delta\xi_D$ – приріст ходу рейки паливного насоса;
- $1/T_{sp}$ – ланка сервомотора;
- K_{Fb} – коефіцієнт підсилення ланки жорсткого зворотнього зв'язку;

- K_{is} – коефіцієнт підсилення гнучкого (іздромного) зворотнього зв'язку;
- U_f – напруга збудження синхронного генератора;
- I_f – струм збудження синхронного генератора;
- I_G – струм синхронного генератора;
- I_M – струм гребного електродвигуна;
- α_{Set} – відносна частота перетворювача (значення, що задається);
- γ_{Set} – відносна напруга перетворювача (значення, що задається);
- α – відносна частота на виході перетворювача (з урахуванням зворотних зв'язків);
- γ – відносна напруга на виході перетворювача (з урахуванням зворотних зв'язків);
- FC – функціональний перетворювач, що формує закон частотного управління $\gamma = \gamma(\alpha)$;
- M_p – момент гребного гвинта;
- P_p – упор гребного гвинта;
- M_M – обертаючий момент гребного електродвигуна;
- ω_M – кутова швидкість обертання гребного електродвигуна.

Управління рухом судна (управління гребними електродвигунами) в режимі реального часу здійснюється з поста управління. Положення задатчика ПУ визначає відносну частоту напруги живлення ГЕД α , яка формує (за допомогою функціонального блоку FC перетворювача частоти) відносну напругу живлення ГЕД $\gamma = \gamma(\alpha)$.

На базі структурної схеми розроблена математична модель перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів. Вона представлена у роботі [5].

Для аналізу маневрених режимів роботи розроблено алгоритм (та пакет прикладних програм) розрахунку основних режимних показників пропульсивних комплексів електроходів на маневрах та процедура оцінки основних показників якості виконання маневрених операцій.

Базовою є програма, що дозволяє розраховувати поточні значення відносних режимних показників всіх складових частин суднового пропульсивного комплексу під час виконання різноманітних маневрених операцій. Відповідно до неї, при аналізі маневрених режимів:

- розраховуються безрозмірні параметри складових частин комплексу;
- для маневру, який досліджується, вводяться параметри управління відповідно до положень рукояток постів управління та перекладки керма;
- задаються початкові умови;
- відповідно до обраних маневрів формуються сигнали управління кожним силовим контуром;
- розраховуються поточні значення основних режимних показників кожного силового контуру електроенергетичної установки по ходу виконання маневру;
- визначаються гідродинамічні сили й моменти, що діють на судно; розраховуються поточні значення параметрів руху судна в пов'язаній із ним системі координат, а потім – у незв'язаній системі координат.

Остаточні результати розрахунків представляються в числовому вигляді й у вигляді готових графіків зміни в часі режимних показників:

- а) по кожному силовому контуру:
 - кутової швидкості обертання теплового двигуна – ω_D ,
 - обертаючого моменту теплового двигуна – M_D ;
 - потужності теплового двигуна – P_D ;
 - напруги на виході генератора – U_G ;
 - струму генератора – I_G ;
 - струму збудження генератора – I_{fG} ;
 - відносної напруги керування перетворювача – γ ;
 - напруги гребного електродвигуна – U_M ;
 - струму гребного електродвигуна – I_M ;
 - обертаючого моменту гребного електродвигуна – M_M ;
 - кутової швидкості обертання гребного електродвигуна – ω_M ;
- б) по параметрах руху судна:
 - швидкості руху – v ;
 - складової швидкості v по поздовжній осі X – v_X ;
 - складової швидкості v по поперечній осі Y – v_Y ;
 - кутової швидкості обертання навколо осі Z – Ω_Z ;
 - кута дрейфу – β_{DR} ;
 - кута курсу – ψ .

Розроблена математична модель і метод розрахунку основних режимних показників комплексу дають можливість провести дослідження впливу законів управління гребними електродвигунами на маневрені характеристики електроходів, на перехідні процеси в ГЕЕУ і на параметри електроенергії суднової мережі. Це дозволить знайти найкращі закони управління ГЕД на маневрах.

Результати досліджень.

Закони частотного управління для основних типових видів навантаження наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Закони управління для типових видів навантаження

	Вид навантаження		
	Статичне	Постійна потужність	Вентиляторне
Закони управління	$\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$	$\frac{\gamma}{\alpha^{0,5}} = \text{const}$	$\frac{\gamma}{\alpha^2} = \text{const}$

Ці закони є фактичним стандартом. Саме вони закладені в системи управління перетворювачами частоти. Отже, управляючим сигналом від поста управління виступатиме частота α . Відповідно до обраного закону частотного управління, функціональний перетворювач FC (рис. 2) формує сигнал управління відносною напругою $\gamma = \gamma(\alpha)$.

Відповідно до поставленої мети, при пошуку найкращого управління $\gamma = \gamma(\alpha)$ гребними електродвигунами критеріями оцінки треба, у першу чергу, обирати показники, що оцінюють ефективність роботи самого судна, як «старшої» системи. Так може бути забезпеченим системний підхід до пошуку оптимальних параметрів законів управління. Це:

- тривалість виконання маневру – T_M ;
- пройдений судном шлях по закінченню маневру – X_1 ;
- відносні витрати енергії на виконання маневру – W .

Показники, які характеризують якість протікання перехідних процесів в ГЕЕУ:

– максимальне збільшення потужності первинних двигунів $P_{Dm} = P_{Dmax} / P_{Dstd}$;

– відхилення кутової швидкості обертання первинних двигунів від номінального значення

$$\Delta\omega_D = (\omega_{Dmax} - \omega_{Dmin}) / \omega_{Dstd};$$

– кидки обертаючого моменту ГЕД при розгоні

$$M_{Macc} = M_{Macc max} / M_{Macc std};$$

– кидки обертаючого моменту ГЕД при реверсі

$$M_{Mrev} = M_{Mrev max} / M_{Mrev std};$$

– кидки струму ГЕД при розгоні

$$I_{Macc} = I_{Macc max} / I_{Macc std};$$

– кидки струму ГЕД при реверсі

$$I_{Mrev} = I_{Mrev max} / I_{Mrev std}.$$

Основні показники, що характеризують динамічні параметри напруги й частоти суднової мережі (відповідно до стандарту ISO 8528-5):

– відносне відхилення частоти суднової мережі при підвищенні і зниженні навантаження

$$\delta f_{dyn}^- = [(f_{dyn min} - f_{Gstd}) / f_{Gstd}] 100 \%,$$

$$\delta f_{dyn}^+ = [(f_{dyn max} - f_{Gstd}) / f_{Gstd}] 100 \%;$$

– відносне відхилення напруги суднової мережі при підвищенні і зниженні навантаження

$$\delta U_{dyn}^- = [(U_{dyn min} - U_{Gstd}) / U_{Gstd}] 100 \%,$$

$$\delta U_{dyn}^+ = [(U_{dyn max} - U_{Gstd}) / U_{Gstd}] 100 \%;$$

– час відновлення частоти при підвищенні – t_{fin} і зниженні – t_{fde} потужності;

– час відновлення напруги при підвищенні – t_{uin} і зниженні – t_{ude} потужності.

Дослідження впливу законів управління на показники якості маневрування виконано на прикладі науково-дослідного судна MV SANCO STAR. Це –

дизель-електроход з ЄЕЕС. Основні характеристики судна представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Головні елементи та характеристики судна

Довжина найбільша	80,5 м
Кількість гребних гвинтів	2
Швидкість руху	14 вузлів
Гребні електродвигуни	2 x 2,5 МВт

Розглядався комбінований маневр – «розгін ГЕЕУ – реверс ГЕЕУ до зупинки електрохода». Управління розгоном здійснювалося переключкою рукоятки поста управління від нуля до положення повного ходу (режимні показники виходять у відносну одиницю). Управління реверсом – переключкою рукоятки поста управління на «малий хід». Момент реверсу означимо часом в 16 безрозмірних одиниць (б.о.), що відповідає 176 с – в абсолютних одиницях.

Дослідження такого комбінованого маневру проведено для різних законів частотного управління – різних залежностей $\gamma = \alpha^v$ (v – показник ступеню). Для значень (відповідно табл.1) показника ступеню $v = 0,5$, $v = 1$ і $v = 2$ розраховані маневрені режими, отримані поточні значення обраних режимних показників та оцінені показники якості маневрених операцій.

На рисунку 3, у якості прикладу, представлені поточні значення режимних показників та значення деяких показників якості маневрування у відносних одиницях (в.о.) при управлінні за пропорційним законом $\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$.

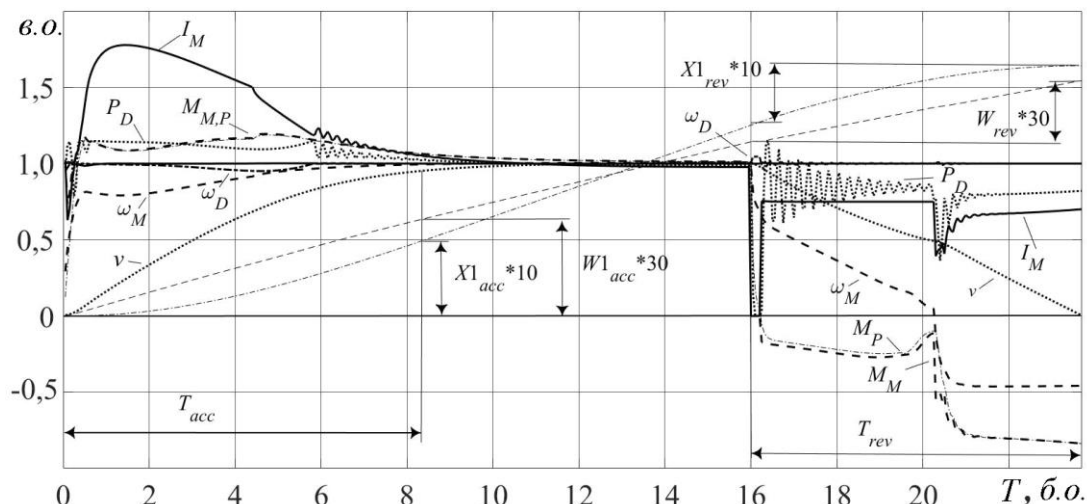


Рис. 3 – Поточні значення режимних показників комбінованого маневру при пропорційному управлінні

Результати аналізу впливу закону частотного управління на маневрені характеристики електроходів зведені у табл. 3 (показники якості маневрування судна), у табл. 4 (показники якості перехідних процесів в ГЕЕУ) і у табл. 5 (показники якості параметрів електроенергії суднової мережі).

Порівняння результатів аналізу показує наступне:

1. Перехід від закону $\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$ до закону

$\frac{\gamma}{\alpha^{0.5}} = \text{const}$ призводить до збільшення часу розгону

на 2,8 %, а реверса – на 12 %. Відносні витрати палива для розгону зростають на 3,6 %. Пройдений судном шлях та відносні витрати палива для реверса збільшуються на 5,8 % та 18 % відповідно. Зростають

стрибки струму ГЕД (50 %) та максимальне збільшення потужності первинних двигунів (16,8 %) на частот-

но-керованому етапі реверса. Решта показників ГЕЕУ – не змінна.

Таблиця 3 – Показники якості маневрування судна

Функціональна залежність $\gamma = \gamma(\alpha)$	Розгін			Гальмування		
	T_{acc}	$X1_{acc}$	W_{acc}	T_{rev}	$X1_{rev}$	W_{rev}
$\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$	8,35	4,88	18,93	7,7	3,94	12,17
$\frac{\gamma}{\alpha^{0,5}} = \text{const}$	8,6	4,9	19,61	8,6	4,17	14,38
$\frac{\gamma}{\alpha^2} = \text{const}$	8,85	4,9	19,79	12,05	5,11	19,82

Таблиця 4 – Показники якості перехідних процесів в ГЕЕУ

Функціональна залежність $\gamma = \gamma(\alpha)$	I_{Macc}	M_{Macc}	I_{Mrev}	M_{Mrev}	P_{Dm}	$\Delta\omega_D$
$\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$	1,77	1,187	0,7	0,6	14,8	8,6
$\frac{\gamma}{\alpha^{0,5}} = \text{const}$	1,79	1,189	1,05	0,65	17,3	8,6
$\frac{\gamma}{\alpha^2} = \text{const}$	1,8	1,19	0,9	0,2	14,9	8,6

Таблиця 5 – Показники якості параметрів електроенергії суднової мережі

Функціональна залежність $\gamma = \gamma(\alpha)$	δf_{dyn}^-	δf_{dyn}^+	δU_{dyn}^-	δU_{dyn}^+	t_{fin}	t_{de}
$\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$	4,91	4,6	1,5	0,7	2,15	0,4
$\frac{\gamma}{\alpha^{0,5}} = \text{const}$	4,03	4,6	1,07	0,7	2,1	0,4
$\frac{\gamma}{\alpha^2} = \text{const}$	4	4,6	0,4	0,7	2,04	0,4

2. Перехід від закону $\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$ до закону

$\frac{\gamma}{\alpha^2} = \text{const}$ призводить до збільшення часу розгону на

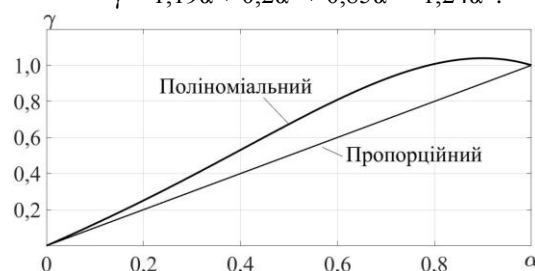
6 %, а реверса – на 37 %. Відносні витрати палива для розгону зростають на 4,5 %. Пройдений судном шлях та відносні витрати палива для реверсу збільшуються на 29 % та 62 % відповідно. Зростають стрибки струму ГЕД (28,5 %) на частотно-керованому етапі реверсу. Решта показників ГЕЕУ залишається майже не змінною.

3. Показники якості електроенергії суднової мережі залишаються майже не змінними і не виходять за межі, які встановлені ДСТУ.

Таким чином, проведені дослідження показали, що найліпші результати дає пропорційний $\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$ закон управління. У той же час, аналіз результатів розрахунків показує, що є можливість підвищити ефективність виконання маневрених операцій за рахунок підвищення напруги живлення ГЕД на перехідних режимах. Спробуємо довільно задати

залежність $\gamma = \gamma(\alpha)$ кривою, як зображено на рис. 4.

Апроксимація цієї кривої $\gamma = \gamma(\alpha)$ – поліном 4-го ступеню дозволила розрахувати відповідні коефіцієнти та отримати наступне рівняння $\gamma = 1,19\alpha + 0,2\alpha^2 + 0,85\alpha^3 - 1,24\alpha^4$.

Рис. 4 – Закони управління $\gamma = \gamma(\alpha)$

Результати порівняльного аналізу розрахунків тих самих маневрів (розгін і реверс), виконаних при управлінні за пропорційним і за поліноміальним законами наведені у таблиці 6.

Критеріями якості обрані показники маневрування судна. Показники якості перехідних процесів в ГЕЕУ і показники якості електроенергії суднової мережі, як показали розрахунки, істотно не змінилися.

Таблиця 6 – Показники якості маневрування судна при пропорційному та поліноміальному законі управління

Закон управління	Розгін			Гальмування		
	T_{acc}	$X1_{acc}$	W_{acc}	T_{rev}	$X1_{rev}$	W_{rev}
пропорційний	8,35	4,88	18,93	7,7	3,94	12,17
поліноміальний	7,96	4,62	17,41	6,65	3,26	10,1
поліпшення показників якості, %	4,6	5,3	8,0	14,0	17,0	17,0

Порівняльний аналіз даних у табл. 6 показує, що перехід до поліноміального закону управління дозволяє поліпшити основні показники якості маневрування електроходів.

Висновки.

1. Стосовно до електроходів з частотно-керованими гребними електродвигунами пропорційний закон управління має істотні переваги у порівнянні з іншими законами управління.

2. Підвищення напруги живлення ГЕД на перехідних режимах відкриває можливість підвищення ефективності виконання маневрених операцій.

3. Рекомендується на перехідних режимах ГЕЕУ формувати закони управління $\gamma = \gamma(\alpha)$ аналітичними залежностями, в яких зв'язок відносної напруги з відносною частотою плавно змінюється в залежності від глибини регулювання.

4. Конкретні аналітичні залежності $\gamma = \gamma(\alpha)$ можна отримати по результатам оптимізаційних розрахунків законів управління за показниками якості маневрування електроходів.

Список литературы

1. DSTU ISO 8528-5:2005 Установки генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Черніков П. С. Вплив законів управління частотнорегульованими гребними електродвигунами на маневрені характеристики електроходів / П. С. Черніков, В. О. Яровенко, О. І. Зарицька // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 45-51. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.08.

Черников П. С. Влияние законов управления частотнорегулируемыми гребными электродвигателями на маневренные характеристики электроходов / П. С. Черников, В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 45-51. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.08.

Chernikov P. S. The influence of control laws of frequency-regulated electric motors on electric ships' maneuvering characteristics / P. S. Chernikov, V. A. Yarovenko, E. I. Zaritskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3 (1357). – P. 45-51. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.08.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Черніков Павло Сергійович (Черников Павел Сергеевич, Chernikov Pavel Sergeevich), кандидат технічних наук, Одеський національний морський університет, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, (099)711-07-00; ORCID: 0000-0002-3280-9889; e-mail: chernikov@onmu.odessa.ua.

Яровенко Володимир Олексійович (Яровенко Владимир Алексеевич, Yarovenko Vladimir Alekseevich), доктор технічних наук, професор, Одеський національний морський університет, завідувач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, ORCID: 0000-0003-3183-6583; (050)598-06-83; e-mail: yarovenko@3g.ua.

Зарицька Олена Ігорівна (Зарицкая Елена Игоревна, Zaritskaya Elena Igorevna), кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, ORCID: 0000-0003-0009-3502; (093)368-49-16; e-mail: zarickayalena74@mail.ru.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії № 3 (1357) 2020