

УДК 621.12-8:629.12.037

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-129-142

**МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ
ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
ГРЕБНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОХОДІВ**

В.О. Яровенко

д.т.н. завідувач кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3183-6583>

yarovenkovladimir2309@gmail.com

Н.В. Савчук

ст. викладач кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5508-0200>

onmu.kaf.fiz@gmail.com

Г.М. Акопян

ст. викладач кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5709-9594>

amaolo@ukr.net

Д.Ю. Криворучко

ст. викладач кафедри «Суднова електроенергетика, фізика,
експлуатація електрообладнання»

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0987-1624>

Dkr5261@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Метою дослідження є розроблення узагальненої математичної моделі перехідних режимів роботи джерел електроенергії гребних електричних установок.

Методика. Обґрунтовано необхідність уніфікованого опису електроенергетичних процесів в джерелах енергії будь-якого типу у складі гребної електричної установки. В основу опису покладено єдиний підхід до побудови математичної моделі перехідних режимів джерела електроенергії як складової частини гребної електричної установки пропульсивного комплексу електрохода.

Результати. Запропоновано універсальну форму запису перехідних режимів в джерелах електроенергії. Виявлено основні співвідношення між вхідними та вихідними параметрами джерела під час його роботи з будь-яким перетворювачем електроенергії та будь-якими гребними електродвигунами.

© Яровенко В.О., Савчук Н.В., Акопян Г.М., Криворучко Д.Ю., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Запропоновано універсальний варіант формування сигналів керування перетворювачами електроенергії для різних типів гребних електродвигунів. Проілюстровано можливість використання розробленого математичного апарату під час розрахунків основних режимних показників електромашиинних генераторних агрегатів на маневрових режимах роботи електроходів.

Наукова новизна та практична значимість. Модель є універсальною. Як окремі випадки, з неї випливають математичні моделі перехідних режимів всіх наявних і перспективних типів джерел електроенергії в гребних електроенергетичних установках електроходів.

Єдиний математичний апарат дає змогу проводити порівняльний аналіз показників якості роботи джерел електроенергії будь-якого типу та оцінювати перспективи їхнього використання в системах електроруху.

Ключові слова: електроходи, електроенергетичні установки, джерела електроенергії, узагальнена математична модель перехідних режимів, критерії оцінки показників якості роботи.

UDC 629.12-8:629.12.

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-129-142

MODELING TRANSIENT OPERATION MODES OF ELECTRIC POWER SOURCES OF PROPELLER ELECTRIC PLANTS ON ELECTRIC SHIPS

Volodymyr Yarovenko

Doctor of Engineering Sciences, Head of the Department of Marine Electric Power Engineering, Physics, Electrical Equipment Operation
ORCID ID 0000-0003-3183-6583
yarovenkovladimir2309@gmail.com

Nina Savchuk

Senior Lecturer, Department of Marine Electric Power Engineering, Physics, Electrical Equipment Operation
ORCID ID 0009-0008-5508-0200
onmu.kaf.fiz@gmail.com

Hanna Akopian

Senior Lecturer, Department of Marine Electric Power Engineering, Physics, Electrical Equipment Operation
ORCID ID 0009-0009-5709-9594
amaolo@ukr.net

Dmitry Krivoruchko

Senior Lecturer, Department of Marine Electric Power Engineering, Physics, Electrical Equipment Operation
ORCID ID 0009-0005-0987-1624
amaolo@ukr.net

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. The aim of the study is to develop a generalized mathematical model of transient operating modes of electric power sources in propulsion electric plants.

Methodology. The need for a unified description of electric power processes in energy sources of any type, included in a propulsion electric plant, is substantiated. The description is based on a unified approach to constructing a mathematical model of transient modes of an electric power source as an integral part of the propulsion electric plant of the electric ship propulsion system.

Results. A universal form of recording transient modes in electric power sources is proposed. The main relationships between the input and output parameters of the source are identified when it is operating on any electric power converters and on any propulsion electric motors. A universal option of generating control signals for electric power converters for different types of propulsion electric motors is proposed. The possibility of using the developed mathematical apparatus in calculating the main operating parameters of electric machine generator units in maneuvering modes of electric ships is illustrated.

Scientific novelty and practical significance. The model is universal. As specific cases, mathematical models of transient processes for all existing and prospective types of power sources in electric ship propulsion systems follow from it. A unified mathematical apparatus allows carrying out a comparative analysis of the performance indicators of any type of power source and evaluating the prospects of their use in electric propulsion systems.

Keywords: electric ships, electric power plants, power sources, generalized mathematical model of transient processes, evaluation criteria of performance indicators.

Актуальність та постановка задачі. Відмінною особливістю гребних електричних установок (ГЕУ) сучасних і перспективних електроходів є велике різноманіття можливих варіантів систем і схем електрорушення.

До складу гребної електричної установки електрохода входять:

G – генератори електричного струму;

C – перетворювачі електроенергії;

M – гребні електродвигуни.

Джерелами електроенергії в загальному випадку можуть бути електромашинні генератори постійного (ГПС) або змінного (СГ) струму, валогенератори (ВГ) та безпосередні перетворювачі енергії (термoeмісійні – ТЕМГ, термоелектричні – ТЕГ, електрохімічні – ЕХГ, магнітогідродинамічні – МГДГ).

Перетворювачами електроенергії (SE) можуть бути некеровані (ВНК) або керовані (ВК) випрямлячі, автономні інвертори напруги (АІН) або струму (АІС) з широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) або з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), безпосередні перетворювачі частоти (БПЧ) та перетворювачі частоти інверторного типу (ПЧ з АІ).

У якості гребних електродвигунів на сучасних електроходах встановлюють синхронні (СД), асинхронні (АД), а також вентильні (ВЕД) гребні електродвигуни. Останній варіант гребного електродвигуна — це комплекс, що складається із

синхронного електродвигуна, безпосереднього перетворювача частоти та датчика положення ротора.

Велика кількість електротехнічних пристроїв, що використовуються в гребних електричних установках, породжує значну кількість варіантів системи електрорушення. Це ускладнює вибір оптимального варіанту компонування ГЕУ стосовно конкретного типу судна. Обґрунтований аналіз показників якості роботи можливих варіантів компонування ГЕУ передбачає проведення порівняльного аналізу поведінки гребних установок на різних режимах роботи.

Відмінною особливістю суден з електрорушенням є те, що до основних маневрових режимів їхньої роботи належать розгін, гальмування, реверс та вихід на циркуляцію. Висока маневреність електроходів є однією з основних якостей, що зумовили такий високий інтерес до застосування сучасних систем електрорушення на судах. Результати порівняльного аналізу свідчать, що маневрові характеристики електроходів суттєво кращі, ніж у суден із традиційними типами суднових енергетичних установок.

Питанням надійності та безпеки виконання маневрових операцій приділяється особлива увага. Аналіз маневрових характеристик судна та всіх компонентів його гребної електричної установки може бути проведений за наявності єдиного уніфікованого математичного опису перехідних та сталих режимів роботи ГЕУ [1]. Цей опис має охоплювати всі можливі варіанти побудови гребних електричних установок. Ухвалення обґрунтованого рішення під час вибору того чи іншого конструкторського варіанта можливе лише на основі системного підходу до проектування гребної електричної установки. Відповідно до нього, в основу розроблення комплексного критерію оцінювання якості того чи іншого варіанта компонування має бути покладено системний принцип, що передбачає таку побудову будь-якої системи, яка задовольнятиме вимогам системи вищого рівня, для якої її створено [1; 2]. Відповідно до цього, порівняльне комплексне оцінювання варіантів побудови гребних електричних установок має здійснюватися насамперед за критеріями судна як системи вищого рівня, для забезпечення функціонування якої призначена гребна електрична установка. Спроби отримання будь-яких позитивних властивостей елементів ГЕУ без урахування їхнього впливу на систему вищого рівня можуть призвести до негативного кінцевого результату.

Побудова математичного опису перехідних і сталих режимів роботи гребних електричних установок у складі пропульсивних комплексів електроходів є **метою цієї роботи.**

Основний матеріал. На сучасних електроходах як з автономною, так і з єдиною електроенергетичною системою джерелом електроенергії для гребних електродвигунів є комплекс, що складається з електромашинного генераторного агрегату та перетворювача електроенергії. У подібних системах найбільшу складність становить математичний опис перехідних процесів у синхронних генераторах, що працюють на «несинусоїдальне навантаження», яким для генератора є комплекс «перетворювач електроенергії – гребний електродвигун». Математичний опис цих процесів насамперед визначається тим, який тип перехідних режимів цікавить дослідника: електродинамічні чи електромеханічні.

Нижче пропонується добре апробований варіант опису, який може бути використаний для аналізу електромеханічних перехідних процесів у системах «джерело електроенергії – перетворювач електроенергії – навантаження» [3; 4].

У загальному випадку напруга на виході джерела електроенергії визначається співвідношенням

$$U_G = \begin{cases} \frac{1}{\cos\theta_G} [E_G - I_G(r_G \cos\psi_G + f_G X_G \sin\psi_G) - L_G \frac{dI_G}{dt}], & \text{СГ} \\ E_G - I_G r_G - L_G \frac{dI_G}{dt}, & \text{ГПС при } \theta_G = 0, \psi_G = 0 \\ E_G - I_G r_G & \text{МГДГ, ТЕГ, ТЕМГ, ЕХГ} \end{cases}$$

де E_G – електрорушійна сила щодо генераторів постійного струму, безпосередніх перетворювачів енергії та поздовжня складова результуючої електрорушійної сили синхронного генератора;

r_G та x_G – активний та реактивний опір джерела електроенергії;

L_G – індуктивність якоря СГ;

I_G – струм генератора.

ψ_G , θ_G – кути зсуву фаз між векторами електрорушійної сили намагнічування E_{0G} та векторами струму I_G та напруги U_G відповідно.

Активний опір джерела електроенергії

$$r_G = \begin{cases} r_G; & \text{СГ, ГПС} \\ (1 + \alpha_{RT} \Delta T_{CP}^0) r_{G10} \left(\frac{I_G}{I_{GH}} \right)^{K_{R1}}; & \text{ТЕМГ, ТЕГ, ЕХГ} \\ r_{G10} \left(\frac{T^{\Pi}}{T_H^{\Pi}} \right)^{K_{R2}} \left(\frac{I_G}{I_{GH}} \right)^{K_{R3}}, & \text{МГДГ} \end{cases}$$

де α_{RT} – температурний коефіцієнт опору;

ΔT_{CP}^0 – різниця між середньою температурою в номінальному та будь-якому іншому режимах роботи ТЕГ;

r_{G10} – повний внутрішній опір одного ТЕГ у режимах номінальної потужності (за максимального ККД);

K_{R1} – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу термоелектродів;

T^{Π} – температура плазми;

T_H^{Π} – температура плазми в номінальному режимі;

K_{R2} – коефіцієнт, що залежить від ступеня іонізації плазми;

K_{R3} – показник ступеня, що залежить від властивостей і параметрів плазми.

Використання безпосередніх перетворювачів енергії відкриває широкі можливості у сфері вдосконалення систем електрорушення суден. При цьому суттєво зменшуються масогабаритні характеристики найважливіших суднових механізмів, зростає коефіцієнт корисної дії самого процесу перетворення енергії. Проте практичне впровадження систем електрорушення на базі таких джерел можливе лише за умови використання надпровідників. Системи електрорушення на основі надпровідності — це перспективні варіанти побудови гребних електричних установок.

Сучасні електроходи побудовані на базі електромеханічних перетворювачів енергії, роль яких виконують електромашинні генераторні агрегати. Під час математичного опису електромеханічних перехідних процесів у таких генераторних агрегатах (як таких, що найчастіше застосовуються в автономних електроенергетичних установках) виходимо з наступних міркувань [1; 5]. У генераторах постійного струму (які використовуються рідко, тому розглядаються винятково для повноти аналізу) коефіцієнти самоіндукції якорів залишаються незмінними протягом усього робочого циклу машини. Щітки генераторів розміщені на нейтралі, через що поздовжня, поперечна та комутаційна реакції якоря не враховуються; магнітний зв'язок між обмотками якоря та збудження відсутній.

У синхронних генераторів передача енергії від генератора до приймача здійснюється першими гармоніками, тобто приймачем енергії основної хвилі є споживач, а приймачем вищих гармонічних складових — система живлення. З огляду на це, у загальному випадку реальний генератор замінимо джерелом еквівалентної синусоїдальної ЕРС (через розкладання в ряд Фур'є та виокремлення перших гармонік) і будемо вважати комутаційні процеси в перетворювачі короткочасними порівняно зі сталими часу контурів генераторів. Тоді для опису перехідних процесів у генераторі можна скористатися його спрощеною векторною діаграмою струмів і напруг. [5]. Математичний опис перехідних режимів генератора залежить від типу перетворювача електроенергії.

З огляду на наведені вище міркування, узагальнений математичний опис процесів, що відбуваються в генераторі електричного струму, можна подати в наступному вигляді.

Момент опору генератора первинному двигуну

$$M_G = K_{G1} \Phi_{0G} I_G \cos \psi_G + K_{G2} \frac{U_G^2}{f_G} \sin(2\theta_G), \quad (1)$$

де Φ_{0G} — магнітний потік збудження;

I_G, U_G, f_G — струм, напруга, частота струму генератора;

ψ, θ — кути зсуву фаз між вектором ЕРС намагнічування E_{0G} та векторами струму I_G і напруги U_G відповідно;

K_{G1}, K_{G2} — сталі коефіцієнти.

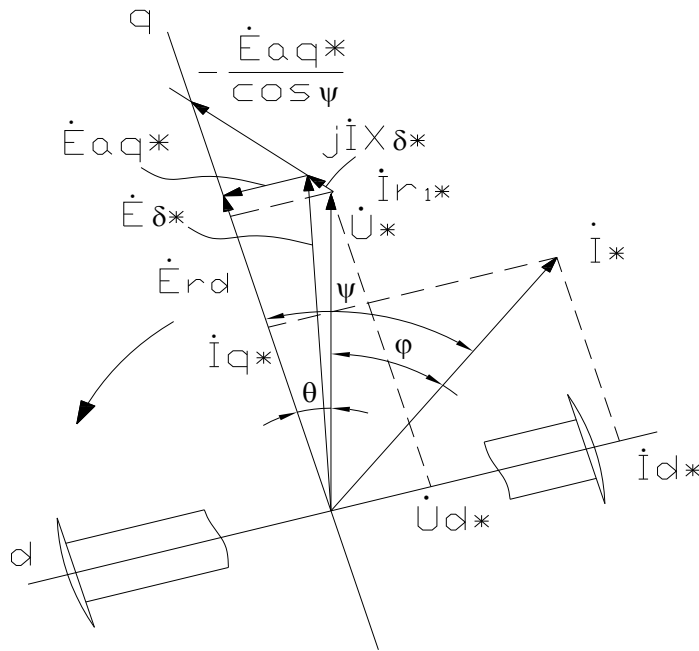


Рис. 1. Векторна діаграма синхронного генератора

Напруга на виході генератора

$$U_G = \frac{1}{\cos \theta_G} \left[E_G - I_G (r_G \cos \psi_G + f_G x_G \sin \psi_G) - L_G \frac{d I_G}{dt} \right], \quad (2)$$

де E_G – поздовжня складова результуючої ЕРС;

r_G і x_G – активний і реактивний опори якоря;

L_G – індуктивність якоря.

Магнітний потік збудження Φ_{0G} , що визначається характеристикою намагнічування генератора, можна подати [1] у вигляді полінома

$$\Phi_{0G} = a_\Phi I_{VG} + b_\Phi I_{VG}^2 + c_\Phi I_{VG}^3, \quad (3)$$

де I_{VG} – струм збудження генератора;

a_Φ, b_Φ, c_Φ – сталі коефіцієнти апроксимуючого полінома.

Поздовжня складова результуючої ЕРС

$$E_G = E_{0G} - E_a \sin \psi_G,$$

де E_{0G} – ЕРС намагнічування $E_{0G} = k_{G1} \omega_D \Phi_{0G}$;

E_a – ЕРС реакції якоря $E_a = k_{G2} \omega_D \Phi_a$;

ω_D – кутова швидкість обертання первинного двигуна.

Магнітний потік реакції $\Phi_a = A_{G\Phi}(I_G)$ якоря визначається аналогічно до потоку намагнічування.

Кути ψ , θ та φ розраховуються за співвідношеннями

$$\psi_G = \arccos \left(\frac{U_G \cos \varphi_G + I_G r_G}{E_{0G}} \right),$$

$$\theta_G = \psi_G - \varphi_G,$$

$$\varphi_G = \alpha_G + \frac{\gamma_G}{2},$$

де α_G – кут керування вентилями перетворювача;

γ_G – кут комутації

$$\gamma_G = \arccos \left(\cos \alpha_G - \frac{2I_M x_G}{\sqrt{3}U_G} \right) - \alpha_G.$$

Як окремий випадок, при $\theta = 0$ і $\psi = 0$, зі співвідношення (2) отримуємо рівняння для генератора постійного струму

$$U_G = E_G - I_G r_G - L_G \frac{dI_G}{dt}.$$

Струм генератора в загальному випадку можна записати в такому вигляді [6; 7]:

$$I_G = K_{GI} \left| \frac{\sin \frac{\gamma_G}{2}}{\frac{\gamma_G}{2}} \right| \mu_C(t) I_M \frac{\cos \varphi_M}{\cos \varphi_G}, \quad (4)$$

де I_M – струм гребного електродвигуна;

$\cos \varphi_M$ і $\cos \varphi_G$ – коефіцієнти потужності гребного електродвигуна і генератора;

$\mu_C(t)$ – керуючий сигнал на вході перетворювача;

K_{GI} – сталий коефіцієнт.

У рівнянні (4) коефіцієнт K_{GI} визначається конкретною схемою електроруку

$$K_{GI} = \begin{cases} k_{ГД}, & ГПС \\ \frac{4\sqrt{3}J_m}{2\sqrt{2}\pi}, \text{ при } \cos\varphi_M=1, \cos\varphi_G=1, \mu_C=1, \text{ } CT \text{ с } BK \text{ та } BHK \\ \frac{\sqrt{3}J_m}{2} \frac{1}{\cos(\pi/6+\psi_0/2)}, \text{ при } \cos\varphi_M=1, \cos\varphi_G=1, \mu_C=1, \text{ } CT \text{ з } AIC \\ \frac{\sqrt{2}\pi}{4} \frac{1}{\cos(\pi/6+\psi_0/2)}, \text{ при } \left| \frac{\sin\gamma_G/2}{\gamma_G/2} \right| = 1, \cos\varphi_M=1, \cos\varphi_G=1, \mu_C=1, AIC \\ \frac{3\sqrt{3}J_m}{2\pi}, \text{ при } \cos\varphi_G=1, \text{ } CT \text{ та } AIH \\ \frac{3\sqrt{2}}{4}, \text{ при } \left| \frac{\sin\gamma_G/2}{\gamma_G/2} \right| = 1, \cos\varphi_G=1, \text{ } AIH \\ \frac{m_2}{m_1} K_{C1}, \text{ при } \left| \frac{\sin\gamma_G/2}{\gamma_G/2} \right|, \text{ } БПЧ \end{cases} \quad (5)$$

де $k_{ГД}, K_{C1}$ – сталі коефіцієнти;

J_m – коефіцієнт, що залежить від схемного рішення перетворювача електроенергії;

m_1 і m_2 – кількість фаз на вході та на виході БПЧ.

Тоді струм генератора, стосовно конкретних схем електроруку, можна записати [5] у вигляді

$$I_G = \begin{cases} k_{ГД} I_M, & ГПС \\ \frac{4\sqrt{3}J_m}{2\sqrt{2}\pi} \left| \frac{\sin \gamma_G/2}{\gamma_G/2} \right| I_M, & CT - BHK(BK) \\ \frac{\sqrt{3}J_m}{2} \frac{1}{\cos([\pi/6] + [\psi_0/2])} \left| \frac{\sin \gamma_G/2}{\gamma_G/2} \right| I_M, & CT - AIC - B \\ \frac{\sqrt{2}\pi}{4} \frac{1}{\cos([\pi/6] + [\psi_0/2])} I_M, & CT - AIC \\ \frac{3\sqrt{2}}{4} \mu_G(t) I_M \cos \varphi_M, & CT - AIH \\ \frac{3\sqrt{3}J_m}{2\pi} \left| \frac{\sin \gamma_G/2}{\gamma_G/2} \right| \mu_C(t) I_M \cos \varphi_M, & CT - AIH - B \\ \frac{m_2}{m_1} K_{C1} \mu_C(t) I_M \frac{\cos \varphi_M}{\cos \varphi_G}. & CT - БПЧ \end{cases} \quad (6)$$

Перетворювач електроенергії SE «розташовується» між генератором електричного струму та навантаженням. Відносно перетворювача перший є вхідним, а другий – вихідним блоками.

Під час розроблення узагальненого математичного опису перетворювачів, як складової частини «джерел електроенергії» в електроенергетичній системі, доцільно ввести такі припущення:

- передавання електроенергії від генератора до споживача, як було зазначено вище, здійснюється першими гармонійними складовими;
- перетворювач розглядається як безінерційний «квантувач» енергії з ідеальними вентилями;
- електромагнітні перехідні процеси в перетворювачі не враховуються;
- втратами енергії у вентилях можна знехтувати;
- струм на виході перетворювача безперервний;
- під час роботи перетворювач не виходить за межі області допустимих навантажень.

У результаті аналізу наявних способів математичного опису процесів, що відбуваються в перетворювачах розглянутого типу, та їх узагальнення (з урахуванням уведених вище припущень), пропонується подавати напругу на виході перетворювача такою узагальноною залежністю:

$$U_{вих} = K_1 \frac{\sin \frac{\pi}{m_1}}{\frac{\pi}{m_1}} \frac{1}{\sin \frac{\pi}{m_{шир}}} \frac{1}{\cos \frac{\alpha_3}{2}} \mu(t) U_{вх}, \quad (7)$$

де $U_{вих}$ – напруга на виході перетворювача (вона ж – напруга на вході U_M) у режимі холостого ходу;

$U_{вх}$ – напруга на вході перетворювача (вона ж – напруга на виході генератора U_G);

K_1 – сталий коефіцієнт, значення якого визначається типом та електричною схемою перетворювача;

m_1 – кількість фаз на вході перетворювача для випрямлячів і БПЧ; для автономних інверторів напруги із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) $m_1 = 3$;

$$m_{шир} = \frac{2}{3} K_{л};$$

$K_{л}$ – кількість імпульсів у кривій лінійної напруги АІ із ШІР;

α_3 – кут затримки між позитивними та негативними напівхвилями вихідної напруги АІС;

$\mu(t)$ – параметр керування, що є функцією керуючого сигналу та залежить від типу перетворювача й обраного закону керування.

Оскільки параметри m_1 , $m_{\text{шп}}$, K_L та α_3 величини постійні ($m_{\text{шп}}$ і α_3 – є постійними на окремих етапах регулювання), рівняння (13) можна подати у вигляді

$$U_M = K \mu_{SE}(t) U_G, \quad (8)$$

де K – сталий коефіцієнт, величина якого залежить від типу перетворювача та його схемного рішення.

У кожному конкретному випадку коефіцієнт K обчислюється за залежностями

$$K = \begin{cases} K_B \frac{\sin(\pi/m_1)}{(\pi/m_1)}; & BHK (BBK) \\ K_{IT} \frac{1}{\cos(\alpha_3/2)}; & AIC \\ K_{IH} \frac{1}{\pi} \frac{\sin(\pi/3)}{\sin(2\pi/K_{IT})}; & AIH \text{ з ШПР} \\ 1; & AIH \text{ у ШІМ} \\ \sin(\pi/m_1)/(\pi/m_1), & ППЧ \\ K_{IB}(\sin(\pi/m_1)/(\pi/m_1)), & IB \end{cases}, \quad (9)$$

де K_B , K_{IT} , K_{IH} та K_{IB} – постійні коефіцієнти, що визначаються типом перетворювача електроенергії.

Керуючий сигнал $\mu_{SE}(t)$ формується в системі автоматичного керування СЕУ. Залежно від типу перетворювача та параметра керування він задається у вигляді

$$\mu(t) = \begin{cases} \cos \alpha_\theta; & BHK, BK \\ 1; & \\ \frac{1}{\cos \beta_u}; & AIC \\ \sin \frac{\theta_{\text{шп}}}{2}; & AIH \text{ з ШПР} \\ \frac{\theta_{\text{max}}}{T_k}; & AIH \text{ з ШІМ} \\ \mu_{SE}(t); & БПЧ \\ \cos \beta_{iB}; & IB \end{cases}, \quad (10)$$

де β_u – кут випередження АІС;

$\theta_{\text{шп}}$ – тривалість імпульсів в ІН із ШПР;

θ_{max} – максимальна ширина імпульсів ІН із ШІМ;

T_k – період квантування ІН із ШІМ;

β_{iB} – кут випередження інвертора, веденого мережею ВІ.

Рівняння (1)-(10) являють собою узагальнений математичний опис перетворювачів електроенергії у складі джерел електроенергії для дослідження електромеханічних перехідних процесів.

Як окремі випадки з нього можна отримати відомі математичні вирази $U_M = U(U_G)$ для розглянутих перетворювачів: випрямлячів, інверторів, перетворювачів частоти.

Як приклад використання розробленого математичного опису перехідних режимів генераторних агрегатів ГЕУ електроходів, на рис. 2 наведено результати розрахунків основних режимних показників генераторів ГЕУ під час маневрування електрохода.

Розглянуто судно з основними технічними характеристиками: водотоннажність 1763 т; довжина 51,7 м; ширина 15 м; осадка 4,2 м; швидкість руху 7 м/с.

До складу силової установки входять два дизель-генераторні агрегати з дизелями ефективною потужністю 1100 кВт при 750 об/хв і синхронними генераторами потужністю 1000 кВт при 750 об/хв.

Як перетворювачі електроенергії використано перетворювачі частоти. Як гребні електродвигуни – асинхронні частотно-керовані ГЕД потужністю 1000 кВт. Струм гребного електродвигуна 1100 А, крутний момент 10670 Н·м, кутова швидкість обертання $93,67 \text{ c}^{-1}$.

Розглянуто поведінку головних генераторів під час виконання судном кількох маневрів, що чергуються: розгін ($0 < t \leq 111$) – реверс із переднього ходу на задній ($111 < t \leq 150$) – реверс із заднього на передній ($150 < t \leq 222$).

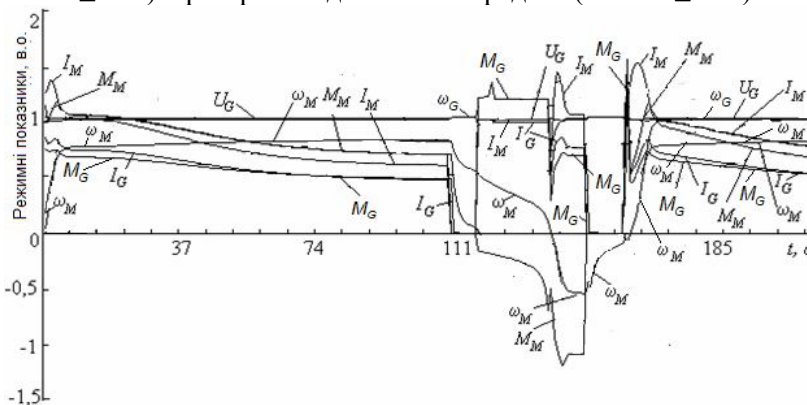


Рис. 2. Режимні показники генераторного агрегату в ГЕУ електрохода

Відносній одиниці по осі ординат відповідають: $\omega_D = 78,5 \text{ c}^{-1}$; $U_G = 400 \text{ В}$; $I_M = 1206 \text{ А}$; $M_P = 10840 \text{ Нм}$; $v = 7 \text{ м/с}$; $P = 30 \text{ в.о.}$ (відносних одиниць); $P_D = 1100 \text{ кВт}$; $I_G = 1800 \text{ А}$; $M_M = 10840 \text{ Нм}$; $\omega_M = 25,12 \text{ c}^{-1}$; $X_1 = 517 \text{ м}$. Одна поділка на осі часу відповідає 7,4 с.

Проведені розрахунки наочно ілюструють працездатність розробленого математичного апарату для дослідження перехідних режимів роботи генераторних агрегатів електрохода під час виконання судном маневрових операцій.

Висновки

1. Запропоновано узагальнений математичний опис перехідних режимів роботи джерел електроенергії в гребних електричних установках суден з електро-рухом. Розроблена математична модель охоплює всі можливі варіанти компо-нування гребної установки з різними перетворювачами енергії, що працюють на будь-який тип гребного електродвигуна.

2. Узагальнений математичний опис дає змогу виробити єдині критерії оцінки якості роботи джерел енергії у складі гребної електричної установки пропульсивного комплексу електрохода, оцінювати доцільність застосування того чи іншого їхнього типу та давати рекомендації щодо вибору найкращого варіанта компоновання ГЕУ в кожному конкретному випадку.

3. Працездатність розробленого математичного апарату проілюстрована результатами розрахунків перехідних режимів роботи синхронного генератора гребної електричної установки електрохода під час виконання серії послідовних маневрів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яровенко В.О. Розрахунок та оптимізація перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів. – Одеса: Маяк, 1999. – 188 с.
2. Yarovenko V.A. Dynamics of propelling electric power plants of electric ships' propulsive complexes. Development of Scientific Schols of Odessa National Maritime University: collective monograph. Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing». 2020. 500 p. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-86-0.08>
2. Schumylo J.M., Yarovenko V.O., Zarinska O.I. Dynamic similarity of electric ships' propulsive complexes. *Transport Development* – Odesa, ONMU, 2022. – № 4(15). P. 43-57. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.05>.
3. Yarovenko V.O., Chernicov H.S., Schumylo J.M., Zarinska O.I. Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes with thrusters. *Transport Development* – Odesa, ONMU, 2022 – № 3(14). P. 110-129. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.09>.
4. Yarovenko, V.A., & Chernikov, P.S. (2017). A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), P. 32-41. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.05>
5. Shumylo, O., Yarovenko, V., Malaksiano, M., Melnyk, O., & Iovchev, S. (2025). Methods for assessing electric ships' maneuvering and safety indicators based on the theory of the dynamic similarity. In *Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 580, P. 235-255). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82027-4_15.

6. Yarovenko, V.A., Chernikov, P.S., Zaritskaya, E.I., & Schumylo, A.N. (2020). Control of electric ships' propulsion motors when moving on curvilinear trajectory. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (5), P. 58-65. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.09>.

REFERENCES

1. Yarovenko, V.O. (1999). Calculation and Optimization of Transient Modes of Propulsion Complexes for Electric Ships, Odesa: Mayak, 188 p. [in Ukrainian].
2. Yarovenko V.A. (2020). Dynamics of propelling teletric power plants of electric ships' propulsive complexes Development of Scientific Schols of Odessa National Maritime University: collective monograph. Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing». 2020. 500 p <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-86-0.08>.
3. Schumylo J.M., Yarovenko V.O., Zarinska O.I. (2022). Dynamic similarity of electric ships' propulsive complexes. *Transport Development – Odesa, ONMU*, 2022 – № 4(15). P.43-57. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.05> [in Ukrainian].
4. Yarovenko V.O., Chernicov H.S., Schumylo J.M., Zarinska O.I. (2022). Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes with thrusters. *Transport Development – Odesa, ONMU*, 2022 – № 3 (14). P. 110-129. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.09> [in Ukrainian].
5. Yarovenko, V.A., & Chernikov, P.S. (2017). A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), P. 32-41. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.05> [in Ukrainian].
6. Shumylo, O., Yarovenko, V., Malaksiano, M., Melnyk, O., & Iovchev, S. (2025). Methods for assessing electric ships' maneuvering and safety indicators based on the theory of the dynamic similarity. In *Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 580, P. 235-255). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82027-4_15 [in Ukrainian].
7. Yarovenko, V.A., Chernikov, P.S., Zaritskaya, E.I., & Schumylo, A.N. (2020). Control of electric ships' propulsion motors when moving on curvilinear trajectory. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (5), P. 58-65. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.09>.

Дата надходження статті: 27.05.2026

Дата прийняття статті: 30.05.2026

Дата публікації статті: 16.06.2026