

Міністерство освіти і науки України
Державний університет інфраструктури та технологій

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГОЛУБЄВА СВІТЛАНА МИХАЙЛІВНА

УДК 629.5:621.313.84:621:317.38

ДИСЕРТАЦІЯ
ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ГРЕБНОЮ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЮ
УСТАНОВКОЮ МОРСЬКИХ СУДЕН ЗА КРИТЕРІЄМ
ВТРАТ ЕНЕРГІЇ

Спеціальність: 271 Морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань: 27 транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ С.М. Голубєва

Науковий керівник: Тараненко Сергій Володимирович

кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Голубєва С.М. Оптимізація управління гребною дизель-електричною установкою морських суден за критерієм втрат енергії. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Морський та внутрішній водний транспорт. Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2025.

У дисертаційній роботі вирішене актуальне наукове завдання з розроблення перспективного методу управління гребною електричною установкою.

На теперішній час при побудові суднових електроенергетичних систем набувають широкого застосування єдині системи. Вони поєднують у собі пристрої, які забезпечують електроенергією власні потреби судна, та гребні електричні установки. При цьому потужність, що витрачається на власні потреби судна, складає 10..20% у порівнянні з потужністю, переданої на забезпечення руху. Гребні електричні установки мають ряд переваг у порівнянні з установками з механічною передачею енергії від теплового двигуна через валопровід до гвинта. Тому гребні електричні установки знаходять усе більше поширення і використання як рушійний комплекс судна.

Тенденція застосування електрорушійного комплексу особливо яскраво проглядається при будівництві або модернізації в класі суден спеціального призначення. Даний тип суден відрізняється підвищеними вимогами до ходових якостей судна і маневрування. При цьому тільки гребні електричні установки можуть забезпечити всі необхідні експлуатаційні характеристики.

Важливим завданням при проектуванні гребної електричної установки є забезпечення її високої енергоефективності й енергозбереження. Підвищення енергоефективності й енергозбереження є пріоритетним напрямками технічної політики в суднобудуванні.

Технологія передачі енергії від теплового двигуна до рушія складається з вироблення електроенергії, її перетворення та узгодження руху електродвигуна і рушія. На теперішній час найбільш поширеною є така структура передачі енергії: «тепловий двигун» – «електричний генератор» – «електричний перетворювач» – «гребний електродвигун» – «(редуктор)» – «гвинт».

Однак, при збільшенні потужності енергоустановки структура стає громіздкою та важко реалізованою. Тому в останні роки шукають альтернативні варіанти побудови більш компактних та енергоефективних структур суднових енергосистем. Одним з перспективних варіантів побудови гребних електричних установок є застосування замість машин змінного струму, уніполярних машин Фарадея, Барлоу. Запропоновані різні методи оптимізації та управління гребними електричними установками. Але відсутні єдині підходи до управління за критерієм втрати енергії, що обумовлює *актуальність дисертаційного дослідження*.

Метою дослідження є підвищення енергоефективності гребної дизель-електричної установки за рахунок оптимального управління за критерієм втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачі палива до теплового двигуна.

Поставлена мета досягається вирішенням таких *часткових завдань*:

1. Аналіз основних розробок і схем побудови силових ланцюгів для систем постійного, постійно-змінного та змінно-змінного струмів.
2. Розробка методу розрахунку систем автоматичного управління з регулюванням параметрів.
3. Розробка математичної моделі гребної електричної установки з уніполярними машинами.
4. Розробка методу оптимального управління гребною електричною установкою шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачі палива до теплового двигуна.
5. Синтез регуляторів оптимального управління гребною електричною установкою з уніполярними машинами.

6. Оцінка ефективності застосування оптимального управління гребною електричною установкою з уніполярними машинами.

За *об'єкт дослідження* розглядається гребна дизель-електрична установка з уніполярними машинами.

Предметом дослідження є електромагнітні та електромеханічні процеси при передаванні енергії від первинного теплового двигуна та створення рушійного моменту на валу гребного електродвигуна.

Поставлені у дисертаційній роботі завдання вирішені із використанням інструментарію теорій автоматичного й оптимального управління, динамічних систем, електричних ланцюгів, магнітних ланцюгів, електричних машин.

При дослідженні застосований математичний апарат векторного та матричного обчислення, методів прикладної математики й оптимізації. Аналіз математичних моделей, чисельна та графічна реалізація виконані з використанням ЕОМ із застосуванням пакетів математичного програмного забезпечення Simulink, MathCAD, Maple.

Наукова новизна отриманих результатів дисертації полягає в такому:

1. *Удосконалено динамічну модель* гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, яка, на відміну від існуючих, враховує наявність трьох керуючих контурів, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну, швидкість обертання гвинта, що дозволяє виконати синтез регуляторів контурів управління із заданими динамічними характеристиками.

2. *Удосконалено метод* оптимального управління гребною дизель-електричною установкою, який, на відміну від існуючих, враховує вплив на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна для підвищення енергетичної ефективності.

3. *Отримав подальший розвиток метод* компоновання та топології електрообладнання гребних електричних установок, що дозволило обґрунтувати перспективний обрис судна.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується чіткою і виваженою постановкою наукового завдання, коректним використанням у процесі досліджень відомих теоретичних положень автоматичного й оптимального управління, динамічних систем, електричних ланцюгів, магнітних ланцюгів, електричних машин, зокрема, методів векторного та матричного обчислення, прикладної математики й оптимізації, математичного моделювання на всіх етапах виконання дисертації й аналізу результатів досліджень, використанням тільки перевірених методик і програмних продуктів, використанням для синтезу й оцінювання якості роботи моделей актуальних вихідних даних з одночасним оцінюванням якості роботи моделей, задовільним збігом результатів, одержаних в дисертації, з відомими положеннями сучасної науки у досліджуваній галузі знань, а також апробацією результатів на наукових конференціях і їх публікацією у визнаних наукових виданнях.

Наукове значення роботи полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ синтезу енергоефективних систем управління гребною дизель-електричною установкою.

Практичне значення отриманих результатів полягає у зменшенні втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта за рахунок енергозберігаючого оптимального управління шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна.

Проведено синтез оптимальних регуляторів та імітаційне моделювання паралельно за двома системами. У першій системі з класичним роздільним управлінням гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами управління вироблялося по одній змінній, а інші змінні контурів підтримувалися на номінальних значеннях. У другій системі з оптимальним управлінням за критерієм мінімуму втрат енергії в каналі її перетворення від двигуна до рушія (гвинта) всі змінні управління підтримувалися на оптимальному рівні, а перехід від одного оптимального стану до іншого відбувався за оптимальними динамічними характеристиками. За результатами

імітаційного моделювання доведено, що в залежності від режимів роботи судна зменшення енерговитрат склало від 5% до 13%.

Запропоновані теоретичні методи мають високий ступінь готовності до використання і доведені до практичної реалізації. Застосування розроблених методів дозволяє отримати систему оптимального управління гребною дизель-електричною установкою шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачу палива до теплового двигуна; побудовані регулятори, що згладжують вхідний сигнал, а перерегулювання знижується до 8,1%.

Основні результати досліджень доцільно використовувати при розробці технологій синтезу енергоефективних систем управління гребною дизель-електричною установкою; у науково-дослідних організаціях – для зменшення втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта за рахунок впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачу палива до теплового двигуна; у вищих навчальних закладах – для вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

Основні положення дисертаційної роботи *впроваджені*:

- метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою з урахуванням впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна у Державному підприємстві водних шляхів України «Одеський морський торговельний порт» (акт впровадження від 30.01.2025р. № 15/28-35);

- метод компоновання та топології електрообладнання гребних електричних установок для обґрунтування обрисів судна у Державному підприємстві водних шляхів України «Одеський морський торговельний порт» (акт впровадження від 30.01.2025р. № 15/28-35);

- модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами для вивчення особливостей синтезу регуляторів контурів управління із заданими динамічними характеристиками у навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій факультету експлуатації технічних систем на водному транспорті на кафедрі

електрообладнання та автоматики водного транспорту при викладанні дисциплін «Теорія електроприводу та електричні машини», «Гребні електричні установки» та «Суднові автоматизовані електроенергетичні установки та системи управління» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт впровадження від 07.01.2025р. № 08/01-11).

У роботі показаний зв'язок роботи з науковими програмами, темами, обґрунтована наукова новизна отриманих результатів, відмічений вклад дисертанта в наукові роботи, які написані у співавторстві.

Ключові слова: електротранспорт, силова електроніка, морський та річковий транспорт, енергетична установка, суднові електроенергетичні установки, судно, двигун, асинхронний двигун, судновий дизель, суднові двигуни, електричний кабель, діагностування, засоби водного транспорту, рух судна, енергоефективність, передача потужності, технічний стан, ефективна потужність, екологічність, надійність, моделювання, технічне обслуговування.

ABSTRACT

Golubieva S.M. Optimization of control of diesel-electric propulsion systems of marine vessels based on the criterion of energy losses. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in specialty 271 Maritime and Inland Water Transport. State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, 2025.

The thesis solves an *urgent scientific task* of developing a promising method for controlling a propulsion electric installation.

At present, unified systems are widely used in the construction of ship electric power systems. They combine devices that provide electricity for the ship's own needs and propulsion electric installations. In this case, the power consumed for the ship's own needs is 10...20% compared to the power transferred for propulsion. Propulsion systems have a few advantages over systems with mechanical energy transfer from a heat engine through a shaft to a propeller. Therefore, electric propulsion systems are becoming increasingly common and used as a ship's propulsion system.

The trend towards the use of electric propulsion systems is particularly evident in the construction or modernisation of special-purpose vessels. This type of vessel has increased requirements for the vessel's running and manoeuvring characteristics. In this case, only propulsion systems can provide all the necessary performance characteristics.

An important task when designing a propulsion system is to ensure its high energy efficiency and energy saving. Improving energy efficiency and energy saving is a priority area of technical policy in shipbuilding.

The technology for transferring energy from a heat engine to a propulsion system consists of generating electricity, converting it, and coordinating the movement of the electric motor and the propulsion system. Currently, the following structure of energy transfer is the most common: «heat engine» - «electric generator» - «electric converter» - «propeller motor» - «(gearbox)» - «propeller».

However, as the power of a power plant increases, the structure becomes

cumbersome and difficult to implement. Therefore, in recent years, alternative options for building more compact and energy-efficient ship power system structures have been sought. One of the most promising options for the construction of propulsion electric power plants is the use of unipolar Faraday and Barlow machines instead of alternating current machines. Various methods of optimisation and control of propulsion electric power plants have been proposed. However, there are no unified approaches to control according to the criterion of energy loss, which determines the *relevance of the dissertation research*.

The aim of the study is to increase the energy efficiency of a propulsion diesel-electric installation by optimal control according to the criterion of energy losses during its transfer from the heat engine to the propeller by influencing the magnetic fluxes of unipolar machines and fuel supply to the heat engine.

The goal is achieved by solving the following *partial tasks*:

1. Analysis of the main developments and schemes for constructing power circuits for DC, DC-AC and AC systems.
2. Development of a method for calculating automatic control systems with parameter regulation.
3. Development of a mathematical model of a rowing electric installation with unipolar machines.
4. Development of a method for optimal control of a propulsion electric installation by influencing the magnetic fluxes of unipolar machines and supplying fuel to a thermal engine.
5. Synthesis of regulators for optimal control of a propulsion electric installation with unipolar machines.
6. Evaluation of the effectiveness of the application of optimal control of a propulsion electric installation with unipolar machines.

The object of study is a propulsion diesel-electric installation with unipolar machines.

The subject of the study is electromagnetic and electromechanical processes during the transfer of energy from the primary heat engine and the creation of driving torque on

the shaft of the propulsion motor.

The tasks set out in the thesis were solved using the tools of the theories of automatic and optimal control, dynamic systems, electrical circuits, magnetic circuits, and electric machines.

The study used the mathematical apparatus of vector and matrix calculus, methods of applied mathematics and optimisation. The analysis of mathematical models, numerical and graphical implementation were performed using a computer with the use of mathematical software packages Simulink, MathCAD, Maple.

The scientific novelty of the results of the dissertation is as follows:

1. *The dynamic model* of a diesel-electric propulsion system with unipolar machines *has been improved*, which, unlike the existing ones, takes into account the presence of three control circuits that form the magnetic fluxes of the generator, the propulsion motor, the diesel engine speed and one control (output) variable, the propeller speed, which allows the synthesis of control loop regulators with specified dynamic characteristics.

2. *The improved method* of optimal control of a diesel-electric propulsion system, which, unlike the existing ones, considers the effect on magnetic fluxes of unipolar machines and fuel supply to a thermal engine to increase energy efficiency.

3. *The method* of layout and topology of the electrical equipment of propulsion electric plants *was further developed*, which made it possible to substantiate the perspective shape of the vessel.

The validity and reliability of the scientific positions, conclusions and recommendations are confirmed by a clear and balanced statement of the scientific task, the correct use in the research process of the known theoretical positions of automatic and optimal control, dynamic systems, electrical circuits, magnetic circuits, electrical machines, in particular, methods of vector and matrix calculus, applied mathematics and optimisation, mathematical modelling at all stages of the dissertation and analysis of research results, the use of only proven methods and software products, the use of actual source data for the synthesis and evaluation of the quality of the models with simultaneous evaluation of the quality of the models, satisfactory coincidence of the

results obtained in the dissertation with the known provisions of modern science in the field of knowledge under study, as well as testing the results at scientific conferences and their publication in recognised scientific journals.

The scientific significance of the work lies in the further development of theoretical and applied bases of synthesis of energy-efficient control systems for a propulsion diesel-electric installation.

The practical significance of the results obtained is to reduce energy losses during its transfer from the heat engine to the propeller by means of energy-saving optimal control by influencing the magnetic fluxes of unipolar machines and the fuel supply to the heat engine.

The synthesis of optimal controllers and simulation modelling are carried out in parallel for two systems. In the first system with the classical separate control of a diesel-electric propulsion system with unipolar machines, one variable was controlled, and the other circuit variables were maintained at nominal values. In the second system with optimal control according to the criterion of minimum energy losses in the channel of its conversion from the engine to the propeller (screw), all control variables were maintained at the optimal level, and the transition from one optimal state to another occurred according to optimal dynamic characteristics. According to the results of simulation modelling, it is proved that, depending on the ship's operating modes, the reduction in energy consumption ranged from 5% to 13%.

The proposed theoretical methods have a high degree of readiness for use and have been brought to practical implementation. The application of the developed methods makes it possible to obtain a system of optimal control of a propulsion diesel-electric installation by influencing the magnetic fluxes of unipolar machines and the fuel supply to the heat engine; regulators have been built that smooth the input signal, and the overshoot is reduced to 8.1%.

The main results of the research can be used in the development of technologies for the synthesis of energy-efficient control systems for a propulsion diesel-electric plant; in research organisations - to reduce energy losses during its transfer from the heat engine to the propeller by influencing the magnetic fluxes of unipolar machines and the fuel

supply to the heat engine; in higher education institutions - to improve the system of training specialists in the field of marine and inland water transport.

The main provisions of the dissertation *have been implemented*:

- a method for optimal control of a propulsion diesel-electric installation, taking into account the effect on magnetic fluxes of unipolar machines and fuel supply to a heat engine in the State Waterways Enterprise of Ukraine «Odesa Sea Trade Port» (act implemented of 30.01.2025 № 15/28-35);

- method of layout and topology of electrical equipment of propulsion electric installations for substantiation of the ship's outline in the State Waterways Enterprise of Ukraine «Odesa Sea Trade Port» (act implemented of 30.01.2025 № 15/28-35);

- a model of a diesel-electric propulsion system with unipolar machines for studying the peculiarities of synthesis of control loop regulators with specified dynamic characteristics in the educational process of the of the State University of Infrastructure and Technology, Faculty of Operation technical systems in water transport at the Department of Electrical Equipment and Automation of Water Transport with the following disciplines: "Theory of electric drives and electric machines", "Row electrical installations" and "Ship automated electrical power installations and systems" management" for employees First (bachelor's) level advanced degree in specialty 271 Maritime and inland water transport (act implemented of 07.01.2025, №. 08/01-11).

The work shows the connection of the work with scientific programmes and topics, substantiates the scientific novelty of the results obtained, and notes the contribution of the dissertator to scientific works written in co-authorship.

Keywords: electric transport, power electronics, marine and river transport, power plant, ship electrical power installations, vessel, engine, asynchronous motor, marine diesel engine, ship engines, electric cable, diagnostics, water transport means, vessel movement, energy efficiency, power transmission, technical condition, effective power, environmental friendliness, reliability, modeling, technical maintenance.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Голубєва С.М., Юрченко Є.М. Дослідження технологічних варіантів побудови електричних силових установок на водному транспорті // Водний транспорт. 2025. №1 (42). С. 156-165. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.19>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/409>
2. Голубєва С.М., Бойко С.О., Метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою // Водний транспорт. 2024. №3(41). С. 167-178. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.19>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/382>
3. Голубєва С.М., Гороховська О.К. Динамічна модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. 2024. №2(49). С. 148-158. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.2.2024.321378>
https://journals.urau.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/321378
4. Голубєва С.М., Тараненко С.В., Кириченко О.О та ін. Термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики // Водний транспорт. 2023. № 1(37). С. 201-213. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/270>
5. Голубєва С.М., Морнева М.О., Пастух О.В. Застосування енергозберігаючих та природоохоронних технологій на водному транспорті // Наукові вісті Дніпровського університету. 2023. № 24. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24-4>
<https://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/2023-24-6.pdf>
6. Голубєва С.М., Тараненко С.В. Аналіз показників надійності судових електродвигунів, що використовуються у сучасному судовому

обладнанні // Водний транспорт. 2021. № 2(33). С. 5-12. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01

<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/165>

7. Голубєва С.М., Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В. та ін. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ // Водний транспорт. 2021. № 3(34). С. 13-21. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.02

<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/184>

8. Губаревич О.В., Голубєва С.М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Т.1. №21 С. 55-63.

Наукові публікації у виданнях, що індексуються у наукометричній базі

Scopus:

9. Golubieva S., Gubarevych O., Melkonova I. Comparison of the results of simulation modeling of an asynchronous electric motor with the calculated electrodynamic and energy characteristics // Przegląd Elektrotechniczny. 2022. № 98(10). P. 61-66. doi 10.15199/48.2022.10.11.

<https://sigma-not.pl/publikacja-139655-2022-10.html>

10. Gubarevych O., Goolak S., Golubieva S. Systematization and selection of diagnosing methods for the stator windings insulation of induction motors // Revue Roumane Des Sciences Techniques. Électrotechn. et Énerg. 2022. № 67(4). P. 445-450.

<https://journal.iem.pub.ro/rrst-ee/article/view/175>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Голубєва С.М. Динамічна модель гребної дизель-електричної установки. // Проблеми сталого розвитку морської галузі: зб. матеріалів IV міжн. наук. - практ. конф., 28-29 листопада 2024 р., м. Одеса, 2024. С. 181-184.

12. Golubieva, S., Morneva, M., Deuschle, I. Increase in the efficiency of controlling marine electric engines by optimizing their control systems // 2022 IEEE

8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2022. P. 204-211.
doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969335 (Scopus).

13. Голубєва С.М., Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В.,
Пріступа С.В., Пастух О.В., Суднова пропульсивна установка з частотним
керуванням гребними електродвигунами // Дніпровські читання-2024: зб. тез
V міжн. наук. - практ. конф. 5 грудня 2024 р., м. Київ, 2024. С. 108-110.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ, ТЕРМІНІВ...	188
ВСТУП.....	200
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ ГРЕБНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ СУДНА. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ	29
1.1 Дослідження особливостей, переваг та недоліків гребної електричної установки судна.....	29
1.2 Дослідження гребних електричних установок з уніполярними машинами	388
1.3 Обґрунтування вибору суднового рушія для високооборотних уніполярних машин гребної електричної установки	466
1.4 Постановка наукового завдання енергозберігаючого оптимального управління гребною дизель-електричною установкою	566
Висновки до розділу 1	65
РОЗДІЛ 2 ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ГРЕБНОЮ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ.....	66
2.1 Динамічна модель гребної дизель-електричної установки.....	666
2.1.1 Математична модель навантаження гребної дизель-електричної установки.....	666
2.1.2 Динамічна модель системи «генератор-двигун»	69
2.1.3 Динамічна модель перетворювачів	72
2.1.4 Динамічна модель дизеля.....	75
2.2 Синтез динамічних характеристик гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами.....	78
2.2.1 Динамічні властивості гребної дизель-електричної установки без зворотних зв'язків.....	78

2.2.2 Синтез контуру швидкості обертання махових мас дизеля.....	79
2.2.3 Синтез контуру управління потокозчіпленням ланцюга обмотки збудження гребного уніполярного двигуна	81
2.3 Метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою.....	84
2.3.1 Синтез оптимальних регуляторів змінних станів при управлінні моментом двигуна	84
2.3.2 Синтез оптимальних регуляторів змінних станів при управлінні швидкістю обертання якоря двигуна	88
Висновки до розділу 2	91
РОЗДІЛ 3 МЕТОД КОМПОНУВАННЯ ТА ТОПОЛОГІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ГРЕБНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК	92
3.1 Топологія та компоновка електрообладнання гребних електричних установок.....	92
3.2 Оптимізація системи регулювання гребної електричної установки постійного струму	98
3.3 Моделювання та аналіз режимів оптимального управління гребною дизель-електричною установкою за критерієм мінімізації втрат енергії....	1155
Висновки до розділу 3	122
ВИСНОВКИ.....	123
Список використаних джерел	Ошибка! Закладка не определена.
Додаток А Список опублікованих праць.....	143
Додаток Б Акти реалізації.....	146

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ, ТЕРМІНІВ

ІМО	– Міжнародна морська організація (International Maritime Organization)
ВІРЕМ	– вентильно-індукторна (реактивна) електрична машина;
ВКП	– вентильний керований перетворювач;
ВНП	– вентильний некерований перетворювач;
Г	– генератор;
Г-ВП-ГЕД	– генератор-вентильний перетворювач-гребний електродвигун;
ГГ	– гребний гвинт;
Г-Д	– генератор-двигун;
ГДЕУ	– гребна дизель-електрична установка;
ГЕД	– гребний електричний двигун;
ГЕУ	– гребна електрична установка;
ГРК	– гвинт регульованого кроку;
ГТЕГУ	– газотурбоелектрична гребна установка;
ГФК	– гвинт фіксованого кроку;
ДВЗ	– двигун внутрішнього згоряння;
ДГУ	– дизельна гребна установка;
ДП	– діаметральна площа;
ДПС	– двигун постійного струму;
ЕЕ	– енергоефективність;
ЕЕУ	– електроенергетична установка;
ЕЗ	– енергозбереження;
ЕР	– електричний рушій;
ЕРК	– електрорушійний комплекс;
ЕРС	– електрорушійна сила;
ЗГ	– збудник генератору;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
НПВ	– напівпровідниковий випрямляч;

НПЧ	– напівпровідниковий перетворювач частоти;
ОМ	– обертальний момент;
ПД	– первинний двигун;
ПДУ	– пост дистанційного управління;
ПЕР	– пульт управління електрорухом;
ПУ	– пост управління;
СЕЕС	– суднові електроенергетичні системи;
ТЕГУ	– турбінна електрична гребна установка;
ХР	– ходова рубка;
ЦПУ	– центральний пост управління;
ЩЕР	– щит електроруху;
ЩС	– щиток сигналізації.

ВСТУП

Актуальність теми. На теперішній час при побудові суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) набувають широкого застосування єдині СЕЕС [17, 19, 25, 45, 67, 89, 101]. Єдині СЕЕС поєднують у собі значну сукупність електротехнічних пристроїв, що функціонально можна розділити на пристрої, які забезпечують електроенергією власні потреби судна та системи, які забезпечують рух та називаються гребними електричними установками (ГЕУ). При цьому потужність, що витрачається на власні потреби судна, досить мала, і знаходиться в діапазоні 10..20% у порівнянні з потужністю, переданої на забезпечення руху [29, 47, 56]. У той самий час ГЕУ мають ряд переваг при порівнянні установок з механічною передачею енергії від теплового двигуна через валопровід до гвинта, зокрема, при регулюванні швидкості гвинта і маневруванні судна. Тому ГЕУ знаходять усе більше поширення і використання в якості рушійного комплексу судна [21, 34, 67, 101, 122].

Тенденція застосування електрорушійного комплексу (ЕРК) особливо яскраво проглядається при будівництві або модернізації в класі суден спеціального призначення [85]. Даний тип суден відрізняється підвищеними вимогами до ходових якостей судна і маневрування. При цьому тільки ГЕУ забезпечує всі необхідні експлуатаційні характеристики.

Питанням проектування та експлуатаційних характеристик суден із ЕРК приділяється велика увага. Побудовою перспективних ЕРК суден, їх розвитком та удосконаленням займаються провідні суднобудівні країни: Англія, Австралія, Італія, Канада, Голландія, Німеччина, США, Фінляндія, Франція, Японія, [89, 91, 98, 104, 111, 120]. ЕРК суден широко застосовується у військово-морських силах країн світу, при організації льодового плавання, буксирних суднах та на деяких типах рибпромислових суден [37, 89, 104].

Важливим завданням при проектуванні ГЕУ є забезпечення її високої енергоефективності (ЕЕ) й енергозбереження (ЕЗ) [56, 68, 87, 96]. Підвищення

ЕЕ та збільшення ЕЗ є пріоритетним напрямками технічної політики в суднобудуванні. На світовому рівні підвищенням ЕЕ суден займається Міжнародна морська організація (ІМО – International Maritime Organization). У рамках роботи цієї організації була прийнята резолюція про розробку методології опису ефективності судна з погляду скорочення викидів парникових газів за допомогою прийняття технічних та експлуатаційних заходів. Таким чином, розроблення перспективного методу управління ГЕУ з метою підвищення ЕЕ та ЕЗ є *актуальним науковим завданням*.

Ступінь наукової розробленості завдання. Технологія передачі енергії від теплового двигуна до рушія містить у собі вироблення електроенергії, її перетворення та узгодження руху електродвигуна і рушія. На теперішній час найбільше поширення отримала така структура передачі енергії: «тепловий двигун» – «електричний генератор» – «електричний перетворювач» – «гребний електродвигун (ГЕД)» – «(редуктор)» – «гвинт». Дана структура дозволяє синтезувати саме єдину СЕЕС, реалізація якої стала можливою завдяки значному технічному прогресу в області силової електроніки.

Однак, при збільшенні потужності енергоустановки структура стає громіздкою та важко реалізованою. В останні роки проєктувальники ГЕУ почали шукати альтернативні варіанти побудови структур судових енергосистем, які б дозволили зробити систему більш компактною та енергоефективною [1, 15, 21]. Одним з перспективних варіантів побудови ГЕУ є застосування замість машин змінного струму, уніполярних машин Фарадея, Барлоу [87, 94, 111]. Найбільш детально розглядаються уніполярні машини в якості ГЕУ підводних човнів в розробках американської компанії General Atomics Electromagnetic Systems [111]. Дослідженням уніполярних машин у складі перспективних видів гребних установок займаються такі підприємства та автори як А.Б. Захаренко, А.К. Надкін, Rene Fuger, Arkadiy Matsekh, John Kells, Guina Energy Research Pty Ltd, компанія General Atomics Electric Electromagnetic Systems Division; компанія Guina Energy Technologies Pty Ltd; компанія ThyssenKrupp Marine Systems.

Дані дослідники пропонують різні методи оптимізації та управління ГЕУ, однак відсутні єдині підходи до управління за критерієм втрати енергії.

Об'єктом дослідження є гребна дизель-електрична установка (ГДЕУ) з уніполярними машинами.

Предметом дослідження є електромагнітні та електромеханічні процеси при передаванні енергії від первинного теплового двигуна та створення рушійного моменту на валу гребного електродвигуна.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи* є підвищення енергоефективності гребної дизель-електричної установки за рахунок оптимального управління за критерієм втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачі палива до теплового двигуна.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі *часткові наукові завдання дослідження*:

1) провести аналіз основних розробок та привести основні схеми побудови силових ланцюгів для систем постійного, постійно-змінного та змінно-змінного струмів;

2) розробити метод розрахунку систем автоматичного управління з регулюванням параметрів.

3) розробити математичну модель ГЕУ з уніполярними машинами;

4) розробити метод оптимального управління ГЕУ шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачі палива до теплового двигуна;

5) виконати синтез регуляторів оптимального управління ГЕУ з уніполярними машинами;

6) довести ефективність застосування оптимального управління ГЕУ з уніполярними машинами.

Новими науковими результатами, отриманими у дисертаційній роботі, є:

удосконалено динамічну модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, яка, на відміну від існуючих, враховує наявність трьох керуючих контурів, які формують магнітні потоки генератора, гребного

електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну, швидкість обертання гвинта, що дозволяє виконати синтез регуляторів контурів управління із заданими динамічними характеристиками;

удосконалено метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою, який, на відміну від існуючих, враховує вплив на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна для підвищення енергетичної ефективності;

отримав подальший розвиток метод компоновання та топології електрообладнання гребних електричних установок, що дозволило обґрунтувати перспективний обрис судна.

Практична значимість отриманих результатів складається в зменшенні втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта за рахунок енергозберігаючого оптимального управління шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна, що дозволило зменшити енерговитрати від 5% до 13% в залежності від режимів роботи судна (за результатами імітаційного моделювання).

Методи дослідження. При вирішенні поставлених у дисертаційній роботі завдань використовувалися інструментарій теорій автоматичного й оптимального управління, динамічних систем, електричних ланцюгів, магнітних ланцюгів, електричних машин.

При дослідженні застосований математичний апарат векторного та матричного обчислення, методів прикладної математики й оптимізації. Аналіз математичних моделей, чисельна та графічна реалізація виконані з використанням ЕОМ із застосуванням пакетів математичного програмного забезпечення Simulink (додаток MatLab), MathCAD, Maple [22, 60].

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується чіткою і виваженою постановкою наукового завдання, коректним використанням у процесі досліджень відомих теоретичних положень автоматичного й оптимального управління, динамічних систем, електричних ланцюгів, магнітних ланцюгів, електричних

машин, зокрема, методів векторного та матричного обчислення, прикладної математики й оптимізації, математичного моделювання на всіх етапах виконання дисертації й аналізу результатів досліджень, використанням тільки перевірених методик і програмних продуктів, використанням для синтезу й оцінювання якості роботи моделей актуальних вихідних даних з одночасним оцінюванням якості роботи моделей, задовільним збігом результатів, одержаних в дисертації, з відомими положеннями сучасної науки у досліджуваній галузі знань, а також апробацією результатів на наукових конференціях і їх публікацією у визнаних наукових виданнях.

Наукове значення роботи полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ синтезу енергоефективних систем управління гребною дизель-електричною установкою.

Практичне значення отриманих результатів полягає у зменшенні втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта за рахунок енергозберігаючого оптимального управління шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна.

Проведено синтез оптимальних регуляторів та імітаційне моделювання паралельно за двома системами. У першій системі з класичним роздільним управлінням гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами управління вироблялося по одній змінній, а інші змінні контурів підтримувалися на номінальних значеннях. У другій системі з оптимальним управлінням за критерієм мінімуму втрат енергії в каналі її перетворення від двигуна до рушія (гвинта) всі змінні управління підтримувалися на оптимальному рівні, а перехід від одного оптимального стану до іншого відбувався за оптимальними динамічними характеристиками. За результатами імітаційного моделювання доведено, що в залежності від режимів роботи судна зменшення енерговитрат склало від 5% до 13%.

Запропоновані теоретичні методи мають високий ступінь готовності до використання і доведені до практичної реалізації. Застосування розроблених методів дозволяє отримати систему оптимального управління гребною дизель-

електричною установкою шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачу палива до теплового двигуна; побудовані регулятори, що згладжують вхідний сигнал, а перерегулювання знижується до 8,1%.

Основні результати досліджень доцільно використовувати при розробці технологій синтезу енергоефективних систем управління гребною дизель-електричною установкою; у науково-дослідних організаціях – для зменшення втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта за рахунок впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачу палива до теплового двигуна; у вищих навчальних закладах – для вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

Основні положення дисертаційної роботи реалізовані у навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій (акт впровадження від 07.01.2025 року № 08/01-11) та у Державному підприємстві водних шляхів України «Одеський морський торговельний порт» (акт впровадження від 30.01.2025 року № 15/28-35 (Додаток Б).

Теоретичні результати дисертаційних досліджень *впроваджені*:

– метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою з урахуванням впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна у Державному підприємстві водних шляхів України «Одеський морський торговельний порт» (акт впровадження у Державному підприємстві водних шляхів України «Одеський морський торговельний порт» від 30.01.2025р. № 15/28-35);

– метод компонування та топології електрообладнання гребних електричних установок для обґрунтування обрисів судна у Державному підприємстві водних шляхів України «Одеський морський торговельний порт» (акт впровадження від 30.01.2025р. № 15/28-35);

– модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами для вивчення особливостей синтезу регуляторів контурів управління із заданими динамічними характеристиками Державного університету інфраструктури та технологій факультету експлуатації технічних

систем на водному транспорті на кафедрі електрообладнання та автоматики водного транспорту при викладанні дисциплін «Теорія електроприводу та електричні машини», «Гребні електричні установки» та «Суднові автоматизовані електроенергетичні установки та системи управління» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт впровадження від 07.01.2025р. № 08/01-11).

У роботі показаний зв'язок роботи з науковими програмами, темами, обґрунтована наукова новизна отриманих результатів, відмічений вклад дисертанта в наукові роботи, які написані у співавторстві.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, що становлять основний зміст дисертаційної роботи, опубліковані у 10 роботах, одержані автором самостійно або за його безпосередньої участі.

у статті [10] (фахове видання) розроблена динамічна модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, що є сутністю першого наукового результату;

у роботі [11] (фахове видання) розроблена структура методу компонування та топології електрообладнання гребних електричних установок, що є сутністю третього наукового результату;

у статті [12] (фахове видання) удосконалено метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою, що складає сутність другого нового наукового результату.

у статті [14] (фахове видання) наводиться аналіз методів діагностики стану ізоляції суднових асинхронних двигунів, що необхідно для обґрунтування напрямку дослідження роботи;

у статті [48] (фахове видання) наведено модель стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ, що додатково відображає результати проведених досліджень;

у роботі [66] (Scopus) наведено результати моделювання асинхронних суднових електричних двигунів та їх енергетичних характеристик, що

необхідно для оцінювання результатів проведених досліджень;

у роботі [79] наведено комплексний підхід до діагностики асинхронних електродвигунів засобів водного транспорту;

робота [86] є апробаційного характеру та пов'язана з оприлюдненням отриманих результатів;

у статті [115] (Scopus) вирішена проблема контролю стану ізоляції обмоток статора асинхронних двигунів у процесі експлуатації. Доведено, що підвищення точності діагностики та правильний вибір методу оцінки та прогнозування безвідмовної роботи значно підвищує надійність обладнання;

у статті [125] запропоновано структуру термоелектричних модулів з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики;

у статті [126] наведено напрями застосування енергозберігаючих та природоохоронних технологій на водному транспорті;

у статті [127] проведено аналіз показників надійності суднових електродвигунів, використовуваних у сучасному судновому обладнанні.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 8 наукових працях в українських виданнях, які входять до затвердженого МОН України переліку наукових фахових видань, крім того дві статті опубліковано у наукових виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на:

1. III, IV, V Міжнародна науково-практична конференція «Дніпровські читання», Київ: КІВТ. 2022, 2023, 2024 р.р.

2. 8th International Conference on Energy Smart Systems (IEEE ESS), Kiev, Ukraine. 2022. (Scopus).

3. IV Всеукраїнська науково-технічна інтернет-конференція, Київ: КІЗТ. 17-18 листопада 2022р.

4. Міжнародна мультидисциплінарна науково-практична інтернет-конференція молодих дослідників, здобувачів вищої освіти та науковців

«Сучасна наука: Інновації та перспективи», м.Київ: СНУ ім. В.Даля. 6-7 квітня 2023 р.

5. 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine. 27-30 September, 2023. (Scopus).

6. XIX International Scientific and Practical Conference «Creative Business Management and Implementation of New Ideas». Tallinn, Estonia. 14-17 May, 2024.

7. Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI)». Одеса: ХДМА. 28-29 листопада 2024 р.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації містить 148 сторінок друкованого комп'ютерного тексту. Основний зміст дисертаційної роботи викладено на 109 сторінці. Робота містить 48 рисунків, список використаних джерел із 124 найменувань, що розмішено на 14 сторінках, 2 додатки на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ ГРЕБНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ СУДНА. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ

У даному розділі дисертаційної роботи проводиться аналіз характерних особливостей, виділяються переваги та недоліки ГЕУ судна. Доведено, що на налаштування ГЕУ, на відміну від двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), впливає більша кількість факторів, що дозволяє провести оптимізацію його роботи за критерієм енергоефективності.

Проведена класифікація ГЕУ, сформовано вимоги та досліджені варіанти побудови рушіїв. Наведені характеристики та проведено дослідження різних видів та конструкцій електромеханічних перетворювачів, які використовуються при побудові ГЕУ. Надані кількісні оцінки їх показників ефективності.

Доведено доцільність застосування уніполярних електричних машин.

Виконано постановку наукового завдання оптимального управління ГДЕУ за критерієм мінімізації енерговитрат. Складено схему проведення наукового дослідження.

Основним результатом, отриманим у розділі, є постановка наукового завдання.

1.1 Дослідження особливостей, переваг та недоліків гребної електричної установки судна

Гребна електрична установка – це технічний комплекс, який складається з поєднання первинних двигунів, генераторів, перетворювачів, ГЕД, рушіїв, апаратури управління, регулювання, захисту й блокування і призначений для переміщення судна у просторі [1, 5, 81, 94, 101].

Елементи технічного комплексу, перебуваючи у взаємодії, забезпечують генерування, трансформацію, розподіл й споживання електроенергії. Отже, ГЕУ можна вважати спеціальною СЕЕС. Однак, оскільки вся потужність, що генерується електростанцією ГЕУ, витрачається на забезпечення обертання рушіїв, ГЕУ має властивості електроприводу.

У порівнянні з гребними установками інших типів, ГЕУ мають дві характерні особливості:

- 1) відсутність жорсткого механічного зв'язку між валами первинних двигунів й рушіїв;
- 2) значну кількість факторів, що впливають на вибір оптимальних параметрів установки.

Виявлені особливості за рахунок збільшення факторного простору дають можливість при проектуванні послаблювати негативні та підсилювати позитивні сторони ГЕУ.

Переваги ГЕУ поділяються на дві основні категорії: проектувального (конструктивного) та експлуатаційного характеру [12, 76, 89, 91] (рис. 1.1).

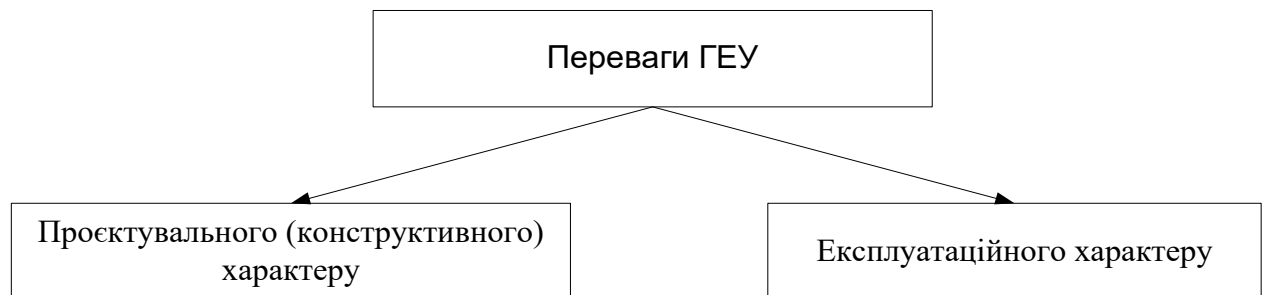


Рисунок 1.1 – Переваги гребних електричних установок

Джерело – [розроблено автором]

Дані переваги дозволяють:

- а) застосувати швидкохідні первинні двигуни (ПД) і головні генератори;
- б) обирати оптимальні параметри первинних двигунів і рушіїв;
- в) широко стандартизувати й уніфікувати окремі частини силової установки;

- г) спрощувати конструкції ПД, використовувати їх нереверсивні типи;
- д) зменшувати довжину гребних валів;
- е) зменшувати довжину головних паропроводів при побудові ГЕУ з паропровідними турбінами;
- є) широко застосовувати системи контролю і автоматики.

Переваги проектувального (конструктивного) характеру.

Швидкохідні первинні двигуни застосовують, головним чином, в ГДЕУ. Їх порівняння проводиться з дизельними гребними установками (ДГУ) безпосереднього з'єднання. При підвищенні частоти обертання дизелів, наприклад, зі 100 до 700 обертів на хвилину відносна маса ГДЕУ зменшується у 5-7 разів [16].

Можливість вибору оптимальних параметрів одночасно первинних двигунів й гребних гвинтів (ГГ) пояснюється такими обставинами. У турбінних електричних гребних установках (ТЕГУ) відсутня необхідність у турбінах заднього ходу. Разом з цим відсутня і небезпека так званого теплового удару, тобто підвищення температури пару в зоні робочих лопаток цих турбін, коли вони в процесі реверсу судна ще продовжують обертатися в напрямку обертання переднього ходу.

Реверсування гвинтів в ГЕУ здійснюється за допомогою гребних електродвигунів. Внаслідок цього первинні двигуни обираються нереверсивними. Це спрощення особливо істотно для ТЕГУ, оскільки при цьому відпадає необхідність в турбінах заднього ходу. Потужність цих турбін становить до 0,4-0,5 від потужності основних турбін, отже при відмові від них спрощується конструкція гребної установки й знижується її маса [15].

Довжина гребних валів зменшується при електрифікації турбінних установок, оскільки в них ГЕД пов'язаний з турбогенераторами лише електрично й може бути розташований в кормі судна. Довжина гребних валів у суден з електричними гребними установками зазвичай не перевищує 0,15-0,25 від довжини судна (у звичайних дизельних установках вона досягає 0,30-0,4 від довжини судна) [21].

Зменшення довжини головних паропроводів в ТЕГУ обумовлюється відсутністю механічного зв'язку між гребними валами й турбінами, що полегшує вирішення завдання ближчого їх розміщення до приміщень, де знаходяться парові котли (відділень-котелень).

Переваги експлуатаційного характеру:

- 1) підвищена надійність і живучість ГЕУ;
- 2) широка можливість дистанційного управління установкою;
- 3) підвищені маневрені якості ГЕУ;
- 4) відносна економічність при роботі її на проміжних режимах;
- 5) можливість підвищити ефективність використання навігаційного часу;
- 6) зручність управління, обслуговування й контролю;
- 7) організація живлення загальних судових механізмів від головних генераторів і можливість подачі електроенергії на берегові об'єкти й інші судна.

Підвищена надійність роботи ГЕУ досягається завдяки нормальним умовам роботи первинних двигунів у маневрених режимах, особливо при реверсах ГГ, оскільки підвищене навантаження отримують більш надійні ГЕД.

Вихід з ладу одного або навіть двох первинних двигунів (як менш надійних елементів системи) знижує швидкість судна з ГЕУ всього на 0,07-0,14, а на неелектрифікованій гребній двохваловій установці дана ситуація призведе до зупинки судна.

У ТЕГУ зазвичай є від двох до чотирьох головних генераторних апаратів. Однак головні турбіни безпосередньо не пов'язані з гребними валами. Це дає можливість жити всі ГЕД від решти в робочому стані головних генераторів, забезпечуючи достатню надійність й живучість гребної установки.

У ГЕУ простіше, ніж у звичайній гребній установці, реалізувати систему дистанційного управління та автоматизації на програмуємих мікроконтролерах. При цьому забезпечується зручність та швидкість управління, підвищена надійність експлуатації судна.

Підвищення маневрених характеристик судна досягається за рахунок зменшення часу підготовки необхідного режиму та збільшення обертаючих

моментів на гребних валах. Дистанційним управлінням з містка або з ходової рубки (ХР) досягається гранична швидкість управління ГЕУ. При цьому виключаються помилки внаслідок невірного відпрацювання команд, переданих у машинне відділення.

Електрифіковані установки мають значні переваги перед неелектрифікованими за рахунок можливості форсувати обертаючі моменти на гребних валах при маневрених режимах. Допустиме перевантаження турбін щодо обертального моменту зазвичай складає 0,4-0,5, а у дизелів – всього 0,1-0,15. Перевантаження асинхронних двигунів може бути доведене до 1,0-1,5, а електродвигунів постійного струму до 1,5-2,0 від номіналу. При швидкоплинних реверсах гальмівні моменти ГГ можуть досягати 2,5-3,0. Тобто гребні двигуни при цьому повинні витримували перевантаження до 1,5-2,0, що в неелектрифікованих установках практично неможливо [21].

Судна з ГЕУ під час реверсування ГГ з повної швидкості ходу вперед зупиняються на відстані, що не перевищує довжину їх корпусу. У той час як судна навіть з турбінними гребними установками проходять до повної зупинки шлях, що перевищує їх довжину в 2-4 рази, а теплоходи з ДВЗ – до 5-7 довжин корпусу.

Гребна електрична установка має широкий діапазон регулювання частоти обертання гребного гвинта при незмінній частоті обертання ПД. Вона економічна при роботі на проміжних рухах [126]. Відсутність жорсткої механічного зв'язку між головними первинними двигунами і гребними валами дає можливість виводити з роботи зайві ПД з їх генераторами при зниженні швидкості руху судна. Дане регулювання сприяє зниженню витрати палива при проміжних рухах в порівнянні з такими при звичайних гребних установках.

У той же час ГЕУ, як і будь-які інші технічні системи, мають низку недоліків. Основні недоліки ГЕУ наведені на рис. 1.2.

На перший погляд може здатися, що дані недоліки мають обмежений характер, тобто притаманними тільки даному типу силових установок. Однак при детальному вивченні ГЕУ виявляється хибність даного твердження. На

відміну від наведених позитивних сторін ГЕУ, які є дійсно характерними, кожен з недоліків при грамотному проєктуванні й належній експлуатації може бути компенсовано і навіть переведено з ряду негативних у ряд позитивних властивостей [12, 14, 48, 76, 79, 89, 91, 115].



Рисунок 1.2 – Основні недоліки гребної електричної установки

Джерело – [розроблено автором]

Проведемо класифікацію гребних енергетичних установок.

Значна різноманітність типів й систем ГЕУ не дозволяє зробити їх сувору класифікацію. Однак за деякими найбільш істотним ознаками всі судна з ГЕУ можуть бути класифіковані так.

За призначенням ГЕУ можуть бути поділені на [15, 48]:

- а) головні;
- б) допоміжні;
- в) комбіновані.

Якщо система електроруху використовується в якості основної рушійної установки, то ГЕУ відносяться до категорії головних. Найбільшого поширення такі установки знайшли на судах допоміжного флоту перш за все на

криголамах, поромах, буксирах й плавучих кранах.

Велику групу становлять допоміжні системи електроруху. До них відносять, зокрема, різні підрулюючі пристрої, які застосовуються на судах великої водотоннажності. Для руху підрулюючих пристроїв використовуються допоміжні гребні гвинти, крильчасті або рідинометальні двигуни, розміщені як в носовій, так і в кормовій частинах суден. До підрулюючих пристроїв відносяться також активні рулі [1, 3, 53].

Комбіновані гребні установки мають дві системи приводу гребних гвинтів: механічну та електричну. Остання призначена для збільшення потужності на гребному валу при одночасній роботі головних та допоміжних двигунів або використовується для отримання малих швидкостей, які повинні бути забезпечені головними двигунами. Як правило, основною є електрична передача від первинного двигуна до гребного вала. Комбіновані гребні установки використовуються також для створення режиму форсування потужності з одночасною роботою на гребний вал первинного двигуна та допоміжних генераторів. Гребний електродвигун у даних установках може бути використаний як валогенератор для живлення судових споживачів.

Особливе місце займають гребні установки з електромагнітними муфтами постійного та змінного струму. Муфта призначена для м'якого зчеплення вала двигуна з валом гребного гвинта. Муфти змінного струму дозволяють також редукувати частоту обертання теплового дизеля й змінювати напрямок обертання гребного гвинта.

За типом первинного джерела енергії ГЕУ можуть бути поділені на:

- а) ГЕУ з тепловими рушіями (дизелі, парові та газові турбіни);
- б) установки зі статичними джерелами електроенергії (аккумуляторні батареї та електрохімічні генератори).

У ГДЕУ первинними джерелами енергії є дизелі, які мають найбільш високий коефіцієнт корисної дії (ККД) серед теплових двигунів. Зазвичай використовуються високооборотні дизелі з частотою обертання 700-1 000 об/хв, із потужністю в агрегаті до 8 МВт.

У ТЕГУ первинним двигуном є турбіна (а первинним джерелом енергії, тобто джерелом пара для турбіни – паровий котел).

Якщо в якості первинного двигуна використовується газова турбіна, то гребна установка носить назву газотурбоелектричної (ГТЕГУ). Зазвичай використовуються турбіни з частотою обертання 3 000-6 000 об/хв. Одинична потужність турбогенератору може досягати 40-75 МВт. Коефіцієнт корисної дії парових турбін (з урахуванням котельної установки) нижче, ніж ДВЗ. Газові турбіни порівнянні з паровими мають менші розміри, великий ККД й економічність. В установках з газовими турбінами відсутня необхідність застосування котельних установок. Турбіни, що використовуються в системах ГЕУ – нереверсивні. Отже (у порівнянні з турбоустановки прямого приводу гребних гвинтів) в ГЕУ не потрібні турбіни заднього ходу [1, 3, 16].

Первинний двигун вибирають з врахуванням вимог, що застосовуються до конкретного судна, до живучості та автономності установки, ККД, масогабаритних характеристик. У загальному випадку для ГЕУ малої потужності в якості первинних двигунів доцільно застосовувати дизелі, для ГЕУ великої потужності – турбіни [1, 29, 84].

За видом струму поділяють установки:

- а) постійного;
- б) змінного;
- в) подвійного роду струму.

Гребні електричні установки постійного струму мають у своєму складі головні генератори та ГЕД постійного струму, які, зазвичай, з'єднуються за схемою “генератор”-“двигун” (Г-Д). Вони поширені на суднах, до яких висуваються вимоги підвищеної маневреності (плавне регулювання частоти обертання гвинта в широкому діапазоні, часті й глибокі зміни моменту, швидкі й багаторазові реверси). До таких суден відносять криголами, буксири, пороми, плавучі крани, транспортні судна льодового плавання.

ГЕУ постійного струму можуть бути поділені на:

- а) установки з регульованою напругою;

- б) установки з нерегульованою напругою;
- в) установки незмінного струму.

Найбільш поширеними є ГЕУ з регульованою напругою. У цих установках управління частотою обертання ГЕД може здійснюватися зміною або напруги генераторів при незмінному потоці збудження або напруги генераторів й потоку збудження ГЕД. Реверс гвинта здійснюється зміною полярності збудження ГЕД або полярності генераторів [83].

У ГЕУ змінного струму використовуються синхронні генератори й ГЕД змінного струму (синхронні або асинхронні). Ці установки знайшли застосування на транспортних, пасажирських і рефрижераторних суднах. На них не потрібні часті реверси ГГ, плавна зміна частоти обертання гребного валу в широкому діапазоні та специфічні властивості електроприводу рушія.

Управління частотою обертання ГЕД здійснюється перемиканням кількості полюсів, зміною частоти напруги, що підводиться до статора або каскадним з'єднанням ГЕД. Якщо регулювання частоти напруги живлення здійснюється зміною частоти обертання ПД, останній повинен бути забезпечений регулятором, який забезпечує регулювання у необхідному діапазоні.

До гребних установок змінного струму також відносяться системи електроруху, в яких використовуються машини змінного струму. Але зміна частоти обертання ГЕД і його реверс здійснюється напівпровідниковими перетворювачами частоти (НПЧ) при незмінній частоті обертання ПД. При застосуванні такої схеми система керування первинними двигунами значно спрощується [4, 15, 84].

У ГЕУ змінного струму з перетворювачами частоти можливе регулювання частоти обертання ГЕД у широкому діапазоні і виключена можливість випадання ГЕД із синхронізму.

У ГЕУ подвійного струму (змінно-постійного) в якості генераторів використовуються синхронні машини, а в якості ГЕД – машини постійного й постійно-змінного струму. Джерелом електроенергії є акумуляторні батареї або електрохімічні генератори, а в якості ГЕД-синхронні або асинхронні

машини. Перетворення змінного струму в постійний здійснюється вентильними керованими (ВКП) або некерованими (ВНП) перетворювачами. Електричні машини й випрямлячі з'єднуються за схемою “генератор”-“вентильний перетворювач”-“гребний електродвигун” (Г-ВП-ГЕД).

Управління частотою обертання ГЕД здійснюється зміною напруги генераторів (в разі некерованих вентилів) або регулюванням напруги на виході керованого перетворювача при незмінному значенні напруги генераторів; потік збудження ГЕД може бути незмінним або регульованими. Реверс гвинта здійснюється зміною напрямку струму збудження ГЕД. Переваги ГЕУ змінного струму особливо проявляються в установках великої потужності з високооборотними первинними двигунами.

За типом рушіїв ГЕУ можна класифікувати так:

- а) установки, які працюють на гвинт;
- б) крильчасті рушії;
- в) підрулюючі пристрої.

Системи електроруху можуть бути класифіковані й за іншими ознаками: за системами збудження, управління.

1.2 Дослідження гребних електричних установок з уніполярними машинами

При побудові ГЕУ структура системи визначається видом струму електричних машин, які використовуються. Вибір типу електричної машини в ГЕУ залежить від множини різних факторів. Серед них: масогабаритні показники, ККД, розташування, потужність ГЕД електроенергетичної установки, частота обертання генератора, ГЕД, гвинта. В якості ГЕД на теперішній час на суднах застосовуються електромеханічні перетворювачі практично всіх типів електричних машин: асинхронні, синхронні, рідше електричні машини постійного струму. Так само у нових розробках застосовують реактивні та уніполярні електричні машини. За електричними параметрами використовують

електричні машини низької та високої напруги як постійного, так і змінного струму, як високооборотні, так і низькооборотні. За конструкцією можуть бути виконані заглибними та незаглибними.

При виборі двигунів необхідно враховувати множину факторів. При цьому не завжди виявляється однозначне рішення, у більшості випадків проводять спрощення та відкидають фактори, що не піддаються аналізу. На початку розвитку систем електричного рушія (ЕР) в ГЕУ застосовувалися електроустановки постійного струму. При відсутності ефективних силових електричних перетворювачів даний тип задовольняв жорстким вимогам експлуатації. Основним технічним недоліком машин постійного струму є наявність колекторно-щіткового апарата, що, крім ускладнення конструкції машини та обслуговування, обмежує максимальну потужність електричних машин через обмеження значень напруги між колекторними пластинами й обмеження допустимих окружних швидкостей.

При сучасному розвитку систем ЕР усе більше поширення отримують електроустановки змінного струму. Їх перевагами, як відомо, є надійність, простота конструкції, прийнятні масогабаритні показники, досить високий ККД, низька вартість. Масогабаритні показники ГЕУ змінного струму у декількох випадках можуть бути менше ніж установки з прямою передачею, особливо турбозубчатих і дизель-редукторних установок, а їх ККД може бути незначно нижче останніх [8, 22, 43, 67].

Двигуни змінного струму з транзисторними напівпровідниковими перетворювачами частоти (НПЧ) за своїми регульовальними характеристиками не поступаються двигунам постійного струму та були найбільш поширеним типом ГЕД у системах ЕР судна. Раніше до серйозного недоліку електроприводу змінного струму відносили складність в управлінні, а так само зниження показників якості електроенергії суднової мережі. Але на сьогоднішній день за рахунок застосування нової силової перетворюючої техніки та мікропроцесорних систем управління даний недолік значно зменшився.

Системи з перетворювачами частоти успішно застосовуються в ГЕУ до

рівнів потужності у 3 МВт. При більшій потужності установки система розподілу та перетворення енергії стає громіздкою, потрібний розподіл і дроблення потужностей двигунів та перетворювачів. Слід зазначити, що проблема створення універсального, якісного та ефективного ГЕУ змінного струму дотепер остаточно не вирішена. Тому по дійсний час у ГЕУ застосовуються практично всі типи машин. Таке різноманіття систем ЕР не випадково, воно обумовлюється пошуками оптимальної системи. Проте, слід зазначити, що основними показниками якості ГЕУ практично для всіх типів суден є:

- а) надійність;
- б) масогабаритні показники;
- в) економічність;
- г) простота обслуговування.

Створення установок на базі електричних машин одного типу приводить до уніфікації установок різних типів судів, зниженню первісної вартості й експлуатаційних витрат. Як основні види електричних машин, що використовуються в ГЕУ, розглянемо асинхронну, синхронну (реактивну машину) й машину постійного струму (уніполярну) (рис. 1.3).

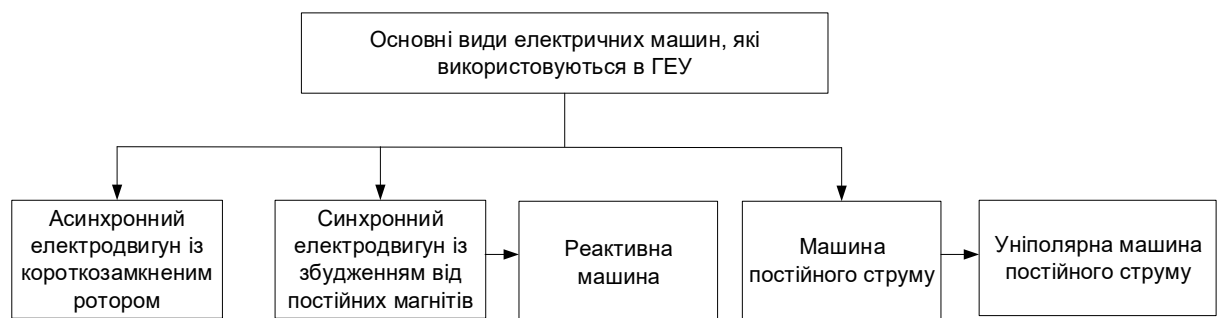


Рисунок 1.3 – Основні види електричних машин, які використовуються в гребній електричній установці

Джерело – [розроблено автором]

Проведемо порівняння даних машин за основними показниками: конструкція і надійність, енергетичні показники, маса і габарити.

Однією з основних переваг синхронної машини є менші маса і габарити

в порівнянні з іншими. Це добре видно при використанні машин потужністю більш 1 МВт [1, 8]. При використанні синхронної машини з електромагнітним збудженням в якості ГЕД одним з істотних недоліків є система електромагнітного збудження та наявність контактних кілець й щіток. Це значно ускладнює конструкцію машини, при цьому знижується її надійність. Присутність системи збудження в синхронній машині приводить до необхідності використання окремого регульованого електричного перетворювача. У підсумку, для управління синхронною машиною необхідно два електричних перетворювачі електричної енергії, що повинні працювати в узгодженому режимі.

Синхронні машини з безконтактним збудженням дають можливість позбутися від контактних елементів, однак при цьому значно ускладнюється конструкція машини. Використання в якості ГЕД двигунів з постійними магнітами дозволило знизити масогабаритні показники у порівнянні з машиною з електромагнітною системою збудження, однак це спричинило до збільшення вартості та ускладнення конструкції машини.

На теперішній час значне розповсюдження отримали вентильно-індукторні (реактивні) електричні машини (ВІРЕМ), що ще часто називають безколекторними машинами постійного струму. Відповідно до джерел [91, 111] існує думка про те, що за конструкцією ВІРЕМ простіші за асинхронні та синхронні машини, мають меншу вартість та більш високу надійність. Але дана електрична машина поступається іншим видам електричних машин за масою й габаритами, має менш високі енергетичні показники.

Найбільш розповсюдженою та широко використовуваною електричною машиною є асинхронна машина з короткозамкненим ротором. Вона має просту конструкцію і високу надійність, низьку вартість та малі експлуатаційні витрати. За даними показникам вона порівнюється з ВІРЕМ. При потужностях до 1 МВт асинхронні електродвигуни не поступаються синхронним машинам за масогабаритними показниками, однак поступаються ним за показником ЕЕ.

Асинхронні електродвигуни з фазним ротором не мають широкого

розповсюдження на суднах у зв'язку зі складністю конструкції: наявністю щіткового струмознімального пристрою й складною обмоткою ротора. Однак установки електроприводів у складі з асинхронним двигуном з фазним ротором надійно й довговічно працюють у багатьох системах [3, 56, 72, 85, 91, 111]. ККД у даного виду машин практично зрівнюється з асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором, а показник ЕЕ більш високий при оптимальному управлінні електричною машиною, ніж у всіх видів електричних машин [91, 111].

Уніполярні машини постійного струму на теперішній час знайшли лише вузьке практичне застосування. Причиною цьому є низька напруга на якорі, необхідність щіткового знімання великих струмів з обертового якоря, велике у порівнянні з напругою якоря спадання напруги на переході «кільце-щітка». За останні роки проблема щіткового струмознімання вирішена за рахунок використання рідкометалевих контактів, струмопровідних ременів та вугільно-волокнистих щіток.

У порівнянні з даною технологією ковзного контакту, яка дозволяє досягти значень щільності струму порядку $90\text{--}150\text{ А/см}^2$, щітки рідкого металу можуть досягти значень до $3\ 000\text{ А/см}^2$ на поверхневих швидкостях до 200 м/с і вище. У порівнянні з попередніми мають більш низьке тертя та електричні втрати [111]. Технологічні досягнення в області створення струмознімальних пристроїв змусили звернути увагу розробників на уніполярні машини постійного струму як на енергетично високоефективні та малогабаритні. В уніполярній машині напруга якоря пропорційна частоті його обертання. Тому застосування високооборотних уніполярних машин є фактором підвищення енергетичних та масогабаритних показників у ГЕУ.

Як відомо, підвищення частоти обертання електричної машини при незмінності її потужності є одним з напрямків підвищення її ЕЕ. При цьому частота обертання ГГ у своїй більшості не перевищує $200\text{--}300\text{ об/хв}$ і залежить від параметрів та технічних характеристик самого гвинта. Отже, при проектуванні приводів електричних машин розглядають кілька варіантів

побудови системи ГЕД, що працює на гвинт. У першому варіанті розглядається система без редуктора: низькооборотний ГЕД з'єднаний через валопровід прямо з гвинтом без механічних перетворювачів. Іншим варіантом є система, коли високооборотний електродвигун підключається на ГГ через редуктор.

Для виключення редуктора логічно застосувати електродвигун з малими оборотами. Однак низькооборотні машини хоч і використовуються без редуктора, мають значні габарити й масу. Цей факт значно ускладнює їх розміщення на судах. Додатково, у зв'язку з малою окружною частотою ротора, необхідно застосовувати додатково примусове охолодження.

Основною перевагою ГЕД із застосуванням низькооборотної електричної машини є тільки відсутність механічного перетворювача (редуктора). При побудові ГЕУ завдання зменшення масогабаритних показників, забезпечення більш високого ККД, збільшення економічних показників електроенергетичної установки (ЕЕУ) вирішуються постійно. Для змінного струму спостерігається тенденція збільшення частоти обертання як у генераторів, так й у ГЕД. Так, збільшення частоти обертання досягається не тільки зменшенням числа пар полюсів p електричних машин, але і підвищенням частоти напруги до 400 Гц.

На сучасних судах знайшли широке застосування високооборотні установки з редуктором навіть в установках малої потужності. При цьому доцільність застосування та ефективність такої системи збільшується зі зростанням потужності. При наявності редуктора простіше вирішується завдання доцільного розміщення агрегатів у просторі.

Слід зазначити, що установкам з редуктором властивий і ряд недоліків. Застосування редуктора вносить у привод, крім своєї маси та об'єму люфту, пружність з'єднань, збільшує момент інерції та інші параметри. Наявність редуктора погіршує умови перехідного процесу та підсилює шум й вібрацію. Проте, проведені фірмою AEG дослідження показали, що установки з високооборотними електродвигунами найбільш доцільні при потужності на валу до 1 470-2 205 кВт. При цьому в 2-3 рази зменшуються вага, габарити і вартість установки в цілому. Аналіз систем з редуктором і без редуктора в ГЕУ

спрямований на виділення областей їх найкращого застосування.

Далі наведемо порівняння за різними показниками в залежності від потужності реальних проектів ГЕУ та альтернативних варіантів редукторного приводу з машинами загального призначення.

Маса, габарити і конструктивні особливості редукторів значно залежать від того, як розподілене загальне передаточне число між ступенями. Для одержання виграшу в масі та габаритах нераціонально використовувати великі передаточні числа. Практикою вироблені такі рекомендації для загальнопромислових та суднових редукторів: одноступінчатих циліндричних $i = 1,8 \dots 6,3$; конічних до 4; циліндричних двох- та триступінчастих $i = 6,3 \dots 40$. Габарити редукторів значно залежать від типу й конструкції, а також умов експлуатації, тому далі приводяться конкретні приклади порівняння редукторного та безредукторного електропривода.

Втрати потужності в редукторі залежать від його конструкції, в'язкості та кількості мастила, яке прокачується через редуктор, а також від частоти обертання, рівня завантаженості, типу підшипників. Точно визначити втрати потужності для кожного конкретного редуктора можна тільки експериментальним шляхом. ККД редуктора у значній мірі залежить від його завантаженості. Це пояснюється тим, що для високошвидкісного редуктора втрати порівняно мало змінюються зі зростанням навантаження. Причому навіть при великій потужності, що передається, втрати на холостому ходу складають 70-75% втрат під навантаженням, що підтверджують випробування натурних редукторів [3, 4, 111].

Проектувальник ГЕУ, проводячи оптимізацію енергоефективності обладнання, прагне покращити значення експлуатаційних показників і використовує високошвидкісні електродвигуни. Однак, збільшуючи частоту обертання двигуна, досягаючи зменшення маси, габаритних розмірів й вартості двигуна, збільшуються габаритні розміри редуктора, його маса, об'єм та вартість (при одній й тій самій заданій частоті обертання вихідного вала приводу). Виникає взаємовиключення: проектувальник, зменшуючи

масогабаритні показники (кг/кВт) й підвищивши ККД ГЕД, збільшуючи частоту його обертання, збільшує масу і вартість редуктора.

Використовуючи статистичні дані, проведемо оцінку маси електродвигунів та побудуємо залежності від потужності, швидкості обертання і типу охолодження.

Масогабаритні характеристики редуктора залежать від величини обертального моменту (ОМ), і матеріалу, з якого він виготовлений. Габарити редукторів також залежать від типу зубчастієї передачі – так, планетарні редуктори мають менші габарити, ніж конічні.

Маса редукторів оцінюється з використанням поняття питомої матеріалоемності, тобто відношенню маси редуктора m до величини ОМ, Mm тихохідного вала при номінальному передаточному числі.

У літературі [7, 19, 34, 46, 58, 93, 114] наведені статистичні дані, які показують, що в кращих зубцюватих редукторах питома маса на одиницю переданого ОМ складає близько 0,1 кг/(кН м) при потужностях 0,2-3 МВт. Питома маса суднового редуктора змінюється в межах 6,5-11 кг/кВт.

На рис. 1.4 наведені залежності відносної маси гребних установок з редуктором та без редуктора, побудовані на основі технічних й статистичних даних. З даних графіків можна зробити узагальнюючий висновок, що безредукторні ГЕУ поступаються за масогабаритним показникам редукторним. Особливо це проявляється в гребних установках при збільшенні потужності. Отже, застосування швидкохідних уніполярних машин у ГЕУ з редуктором є перспективним напрямком.

Отже, застосування високооборотних уніполярних машин у сукупності з редуктором дозволяє частково вирішити проблему низької напруги якоря уніполярної машини. Добрі масогабаритні та об'ємні показники за рахунок активного використання матеріалів, високий ККД через відсутність втрат на вихрові струми і технологічні досягнення в області розробки струмознімальних пристроїв уніполярних машин постійного струму дозволяють вважати застосування таких машин у ГЕУ перспективним напрямком дослідження.

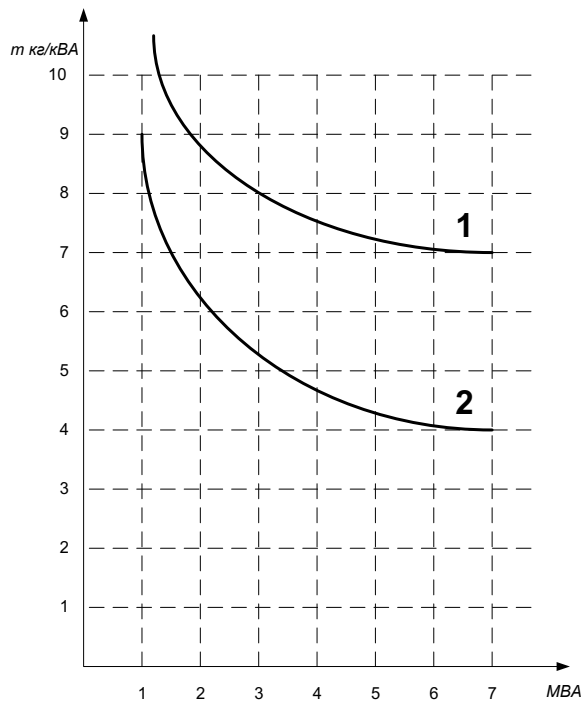


Рисунок 1.4 – Відносна маса: 1 – безредукторної ГЕУ при 300 об/хв;

2 – редукторної ГЕУ при 3 000 об/хв

Джерело – [93]

1.3 Обґрунтування вибору суднового рушія для високооборотних уніполярних машин гребної електричної установки

Опір руху судна. При русі корпус судна відчуває опір силою R , яка складається з сил опору тертя R_f , вихрового R_v , хвильового R_w і повітряного опору R_B . Перші три складові обумовлені в'язкістю води та залежать від швидкості судна, щільності води й площі змоченої поверхні корпусу.

Опір тертя обумовлений тертям корпусу по воді.

Вихровий опір (опір форми) викликаний утворенням вихорів у приграничному шарі води через зміни відносної швидкості частинок води за довжиною корпусу (їх відносна швидкість біля міделя вище, ніж у бокових елементах).

Хвильовий опір обумовлений тим, що при русі судно утворює хвилі, на створення яких витрачається енергія.

Повітряний опір створюється гальмуючою дією повітряного потоку, що обтікає надводну частину судна, і залежить від швидкості вітру і площі парусної поверхні надводної частини судна.

Повний, або буксирний опір руху судна визначається за формулою:

$$R = R_f + R_e + R_w + R_B \quad (1.1)$$

Для тихохідних суден (12-13 вузл.) окремі складові становлять (в частках від повного опору):

$$R_f = 0,7 \div 0,75; R_e = 0,15 \div 0,2; R_w = 0,05 \div 0,1; R_B = 0,01 \div 0,02.$$

Для швидкохідних суден (25-27 вузл.):

$$R_f = 0,45 \div 0,5; R_e = 0,1 \div 0,15; R_w = 0,25 \div 0,35; R_B = 0,02 \div 0,03.$$

Рушії призначені для створення за рахунок енергії ПД сили тяги (упору гвинта), яка прикладена до корпусу судна і викликає його рух [5].

На більшості сучасних суден з ГЕУ застосовуються лопатеві обертові гідравлічні рушії реактивного типу – крильчасті рушії та гребні гвинти. Сила тяги у них створюється лопатями, які при обертанні рушії відкидають маси води у бік, протилежний руху судна, і передають реакцію цих мас упорному підшипнику. Лопатеві рушії розрізняються розташуванням осі обертання щодо діаметральної площини (ДП) судна, а також формою, розташуванням і кількістю лопатей.

Крильчатий рушій (рис. 1.5 а) обертається навколо вертикальної осі й представляє собою горизонтальний диск, по колу якого розташовуються три-сім вертикальних лопатей. При обертанні рушії лопаті спеціальним приводом розгортаються навколо своїх вертикальних осей так, щоб всі лопаті створювали сумарну тягу, спрямовану в бік руху судна. ККД крильчатого рушії складає 50-70%.

Гребний гвинт (рис. 1.5 б) обертається навколо горизонтальної осі, розташованої уздовж ДП, й складається з двох-шести лопатей, розміщених по

колу маточини (підстави) гвинта. У гребних гвинтів фіксованого кроку (ГФК) лопаті нерухомі щодо маточини. У гвинтів регульованого кроку (ГРК) лопаті повертаються спеціальним приводом навколо радіальних осей, кут повороту їх визначається необхідною швидкістю і напрямком руху судна. ККД гребного гвинта складає 60-70% [117].

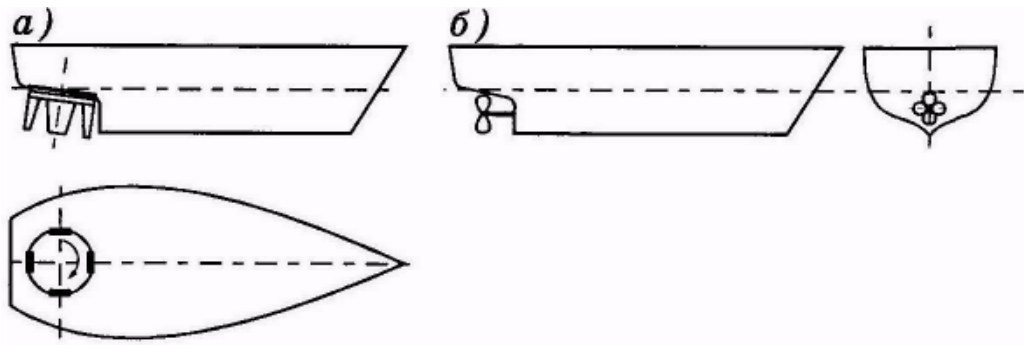


Рисунок 1.5 – Розташування лопатевих гідравлічних рушіїв

Джерело – [117]

У порівнянні з іншими рушіями ГГ має менший розмір, більш високий ККД й може застосовуватися при значній потужності гребної установки. Тому на більшості суден в якості рушіїв застосовуються ГГ.

Відомості про роботу гребного гвинта. Розглянемо роботу ізольованого гребного гвинта у вільній воді. Якщо гребний гвинт розсікти співвісним з ним циліндром з радіусом r , отримаємо поєднання лопаті $I-I$ (рис. 1.6, а). Стінка лопаті, звернена до носу судна, називається засмоктуючою (7), звернена до корми – нагнітаючою (2). Перетин $I-I$ утворює з основою циліндра кроковий кут ν . При обертанні без прослизання кожна точка цього перетину за один оборот гвинта описує на поверхні циліндра гвинтову лінію і переміщується в осьовому напрямку на геометричний крок гвинтової лінії H . Розгорнувши лінії на площину (рис 1.6, б), отримаємо прямокутний трикутник OCD з основою $OD = 2\pi r$ та висотою $DC = H$. При обертанні гвинта у воді відбувається ковзання, яке є необхідною умовою роботи: за один оборот гвинт проходить у своєму напрямку відстань hB , яка є ходою гвинта ($hB < H$).

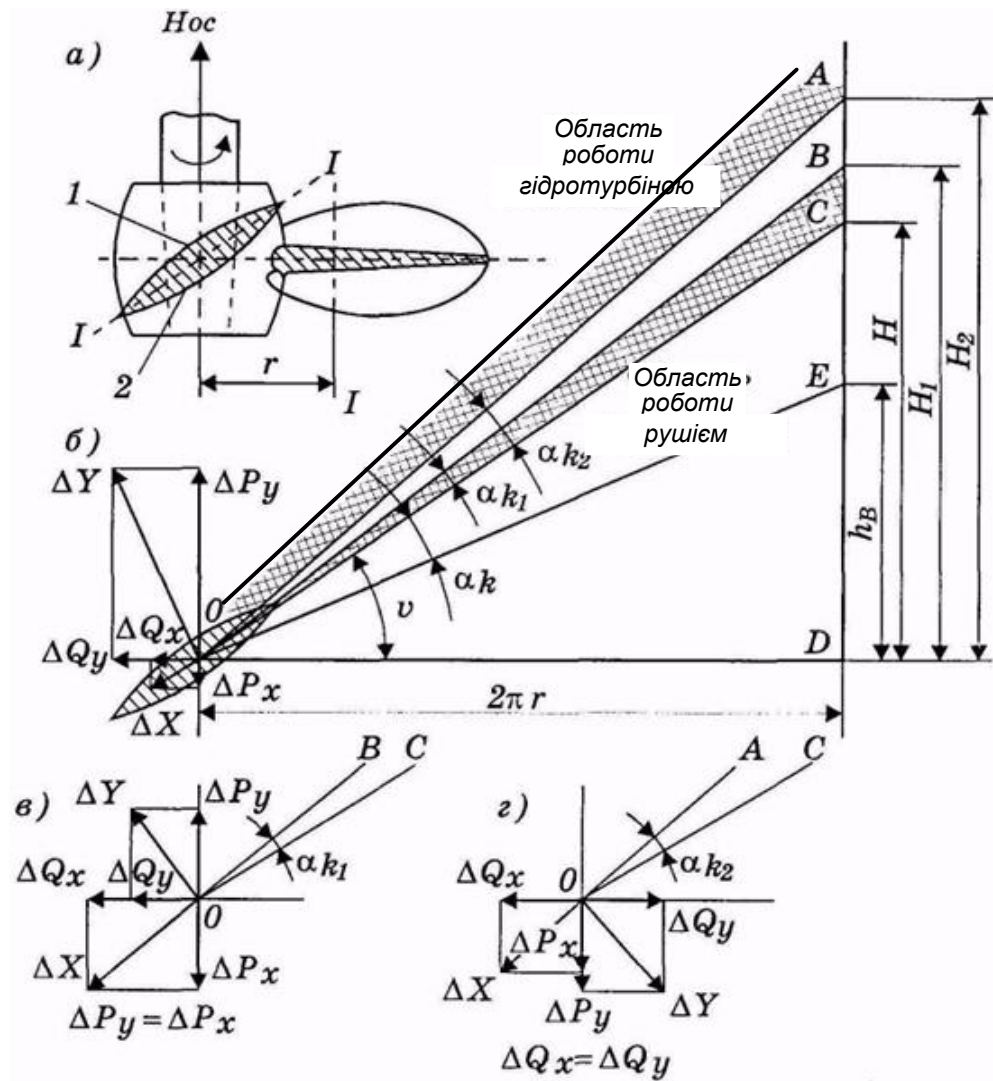


Рисунок 1.6 – Сили, які діють на гвинт

Джерело – [117]

Відносне ковзання:

$$s = \frac{H - h_e}{H}. \quad (1.2)$$

Осьова швидкість переміщення гвинта у вільній воді:

$$v_e = h_e \cdot n_e. \quad (1.3)$$

Відносна хода гвинта:

$$\lambda_e = \frac{h_e}{D_e} = \frac{v_e}{n_e \cdot D_e}. \quad (1.4)$$

де n_e – частота обертання гвинта; D_e – діаметр гвинта.

Кут COE (рис. 1.6) між потоком, що набігає та елементом лопаті (напрямком геометричної гвинтової лінії) називають кутом атаки a_k . Профілі перетинів лопатей побудовані так, що при обтіканні їх потоком під кутом атаки a_k на нагнітаючій стінці виникає підвищений тиск, а на засмоктуючій – знижений. Рівнодіюча цих сил для кожної ділянки лопаті створює елементарну підйомну силу ΔY , перпендикулярну до напрямку потоку, що набігає. Перетин лопаті надає профільний опір ΔX обтічному потоку.

Кожна з сил ΔY та ΔX розкладається на дві взаємно перпендикулярні складові, одна з яких збігається з напрямком руху гвинта (ΔP_y та ΔP_x), а інша протилежна напрямку обертання гвинта (ΔQ_y та ΔQ_x). Сума сил ΔP_y та ΔP_x є упором, а сума сил ΔQ_y та ΔQ_x – силою опору обертового елемента ГГ. Сума елементарних сил для всіх перерізів лопатей гребного гвинта з урахуванням плеча прикладання сили дорівнює відповідно упору гребного гвинта P та моменту опору обертального моменту M_e . Ці величини залежать від щільності води ρ , частоти обертання гвинта n_e та його діаметру D_e :

$$P = K_1 \cdot \rho \cdot n_e^4 \cdot D_e^4; \quad M_e = K_2 \cdot \rho \cdot n_e^2 \cdot D_e^5, \quad (1.5)$$

де K_1 та K_2 – відповідно безрозмірні коефіцієнти упору та моменту, що залежать від конструктивного виконання і геометричних розмірів ГГ.

Коефіцієнт корисної дії ГГ η_e – це відношення корисної потужності (добуток упору на швидкість переміщення гвинта) до повної потужності, що витрачається на обертання гвинта:

$$M_e = K_2 \cdot \rho \cdot n_e^2 \cdot D_e^5. \quad (1.6)$$

Ефективність роботи гвинта на різних режимах (при різних ходах) характеризується кривими дії гвинта (рис. 1.7) – графіками зміни коефіцієнтів упору K_1 та K_2 залежно від відносної ходи λ_B . Зазвичай разом з цими графіками наводиться крива зміни ККД $\eta_B = f(\lambda_B)$. Криві дії гвинта отримують експериментально: гвинт, що обертається з незмінною частотою η_B , примусово переміщують з різною осовою швидкістю v_B і таким чином отримують різну відносну ходу λ_B [55]. Розглянемо характерні режими роботи гвинта, які можливо отримати при цьому експерименті.

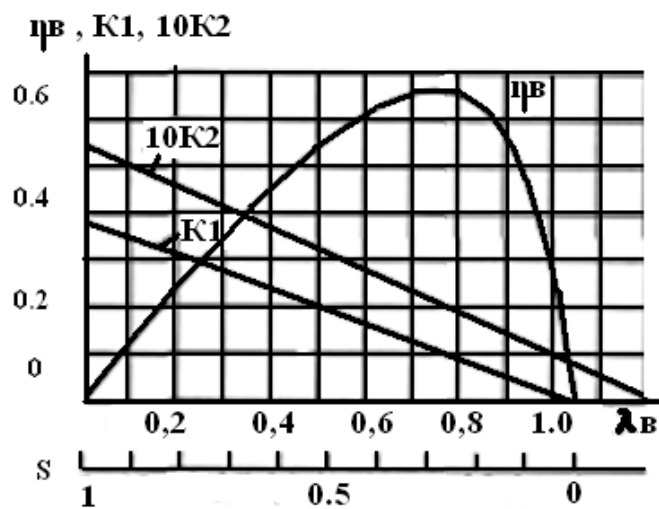


Рисунок 1.7 – Коефіцієнт корисної дії гвинта

Джерело – [55]

При ході (переміщенні) $h_e = 0$ (робота в швартові режимі) відносна хода $\lambda_B = 0$, ковзання $s=1$, упор P й момент M_B мають максимальні значення.

При ході (переміщенні) $h_e = H$ ковзання $s = 0$, кут атаки a_{k1} стає негативним, упор $P = 0$, а момент позитивний; момент опору обертанню гвинта дорівнює профільного опору ΔX . Хода H_1 , при якій упор дорівнює нулю, називається кроком нульового упору.

В області $0 < h_e < H$ гвинт працює рушієм, тобто створює упор, споживаючи потужність первинного двигуна.

В області $h_e > H_2$ гребний гвинт працює в режимі гідротурбіни (момент і упор негативні). Створюється негативний упор за рахунок енергії потоку, що

набігає, гвинт розвиває момент, спрямований у бік його обертання.

Робота ГГ поблизу корпусу судна характеризується їх взаємним впливом й супроводжується виникненням попутного потоку і засмоктуванням води.

Завдяки в'язкості води за судном виникає попутний потік – струмінь, що рухається за напрямком руху судна, але з меншою швидкістю захоплюється корпусом. Через це явище відбувається зміна коефіцієнтів упору K_1 та моменту K_2 при роботі гвинта за корпусом, що впливає на ККД ГГ.

Працюючий в кормовій частині судна гвинт, підсмоктує воду, що призводить до зниження тиску в районі кормовій частині та збільшення опору руху судна. При такому русі упор гвинта P витрачається на подолання опору корпусу R й сили засмоктування [15, 18, 25, 88].

Повний або буксирний опір R врівноважується корисною тягою гвинта P_e ($P_e < P$).

При визначенні ККД гребного гвинта, розташованого за корпусом, попутний потік й засмоктування враховуються за допомогою коефіцієнту впливу корпусу η_{np} . Отриманий з урахуванням цього ККД є пропульсивним коефіцієнтом (або коефіцієнтом просування):

$$n_e = \frac{v_e \cdot P_e}{P_e} = \frac{\lambda_e}{2 \cdot \pi \cdot n_e \cdot M_e}, \quad (1.7)$$

де P_e – буксирувальна потужність (потужність корисної тяги); v_e – швидкість судна:

$$P_e = 2\pi \cdot n_e \cdot M_e, \quad (1.8)$$

потужність, що витрачається на обертання гвинта.

Характеристики ГГ. Залежність моменту опору M_B від частоти обертання n_B є характеристиками ГГ. Іноді користуються залежністю $P_e = f(n_e)$. Характеристики є квазістатичними – кожна точка відповідає сталій

швидкості судна v_c й частоті обертання ГГ.

Момент пропорційний квадрату частоти обертання. Тому при попередніх оцінках можливо застосувати $M_B = A n_B^2$, потужність $P = B n_B^3$, де A та B – коефіцієнти пропорційності.

Залежно від режимів роботи й умов плавання судна розрізняють такі характеристики гвинта (рис. 1.8).

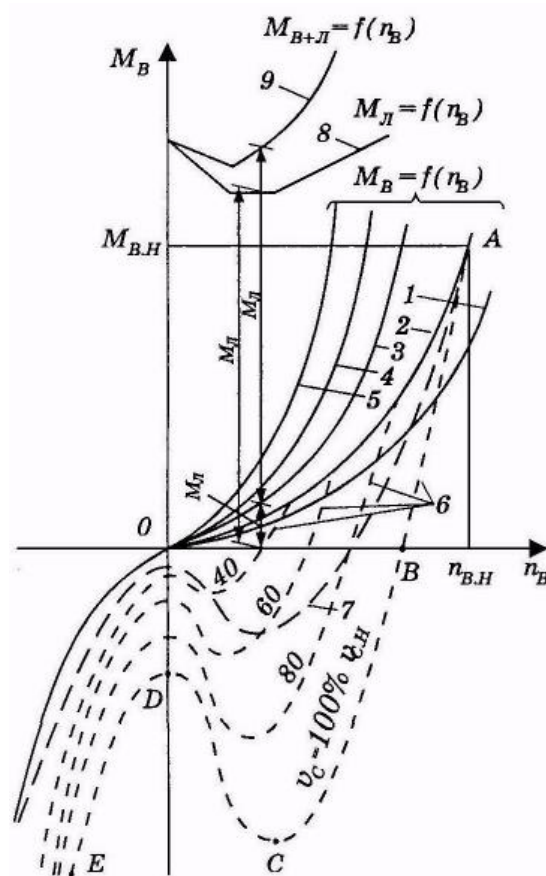


Рисунок 1.8 – Характеристики гребного гвинта

Джерело – [15]

На рис. 1.8 позначено: 1 – рух у вільній воді зі зменшеною осадкою; 2 – рух у вільній воді з номінальною осадкою (з вантажем); 3 – буксирувальний режим руху (при русі судна зі зломом або у льодах); 4 – швартовий режим руху (при працюючих гвинтах та нерухомому судні); 5 – льодова (при обертанні гвинта в дрібному льоду, шузі, “крижаній каші” тощо, що збільшує момент опору); 6 – реверсивні характеристики; 7 – реальна реверсивна

характеристика, що враховує зміну швидкості судна під час реверсу.

Дані характеристики отримуються експериментальним шляхом або математичним моделюванням. Для конкретного судна характеристики гвинта не є постійними, а можуть, в залежності від осадки та умов плавання, змінюватися в діапазоні від характеристики ходу у вільній воді при водотоннажності в порожньому стані до льодової характеристики.

Реверсивна характеристика гвинта – це залежність моменту опору M_B від частоти обертання ГГ при зміні напрямку його обертання на протилежний (під час реверсу). Розрахункова реверсивна характеристика будується при незмінній швидкості руху судна v_c у первісному напрямку, оскільки час реверсу гребного гвинта на порядок менше часу реверсу судна [15].

Вид реверсивних характеристик ГГ для різних значень початкової швидкості судна v_c наведено на рис. 1.8 (криві 6). Точка A відповідає ходу судна в вільній воді з номінальною швидкістю n_{BH} та номінальній частоті обертання гребного гвинта $f(n_B)$. Після припинення подачі енергії до гребного електричного двигуна частота його обертання швидко знижується до значення $(0,6-0,75) n_{BH}$, відповідного кроку нульового моменту (точка B). За рахунок енергії потоку, що набігає, ГГ продовжує обертатися в тій самій бік й на ділянці BCD , розвиваючи обертальний момент (негативний момент опору), працюючи в режимі гідротурбіни. Максимальне значення моменту (до $0,9 M_{BH}$) досягається при частоті обертання близько $0,35 n_{BH}$ (точка C).

Для зупинки гвинта необхідно, щоб привід розвивав гальмівний момент (негативний крутний момент), більший, ніж крутний момент гвинта. Під дією обертального моменту гвинт загальмовується (в точці B $n_B = 0$ при моменті близько $0,4 M_{BH}$) і починає розгортатися в протилежному напрямку (ділянка DE), створюючи ефективне гальмування руху судна в режимі гідравлічного гальма. Під дією оберту в протилежну сторону гвинта судно зупиниться й потім почне розгін заднім ходом.

Як правило, на задньому ході частота обертання ГГ менше при номінальному моменті, ніж на передньому ході через зростання опору руху судна.

Реальна реверсивна характеристика, яка враховує зміни швидкості судна під час реверсу, має вигляд 7 (рис. 1.8).

При реверсі у швартовому режимі ($v_c = 0$) виключається робота гвинта в режимі гідротурбіни, і реверсування відбувається за симетричною кривою, що проходить через початок координат.

Маневрені якості судна визначаються такими характеристиками:

а) часом реверсу (гальмування) гвинта – час від моменту початку перекладки рукоятки поста управління (ПУ) ГЕД до моменту початку обертання гребного гвинта у зворотному напрямку;

б) часом пуску ГЕД у заданому напрямку;

в) часом від моменту початку перекладки рукоятки ПУ до повної зупинки судна;

г) відстанню, що судно долає за час вибігу;

д) повороткістю судна – здатністю швидко змінювати напрямок руху аж до розвороту на одному місці;

е) здатністю швидко змінювати та зберігати незмінною швидкість руху при різких змінах опору руху судна.

Гвинти регульованого кроку мають всередині порожньої маточини механізм (зазвичай з гідравлічним приводом) для повороту лопатей, тобто для зміни кроку (зміни кута атаки α_k). ГРК забезпечують використання потужності двигунів при номінальній частоті обертання у будь-якому режимі роботи судна. Це досягається тим, що відповідні зміни крокового відношення H/D (зміна кута встановлення лопатей) у різних режимах підтримується $K_2 = \text{const}$, а відповідно, при $n_B = n_{BH} = \text{const}$ та моменту $M_B = \text{const}$.

З позиції гідродинаміки дії ГРК на заданому кроці практично не відрізняється від дії ГФК з таким самим кроком. При нульовому кроці потужність, необхідна для обертання гвинта, може становити близько 10% від номінальної потужності приводу.

Застосування ГРК забезпечує зміну швидкості та напряму руху судна при досить плавному регулюванні величини кроку, використання повної

потужності нереверсивних приводних двигунів у діапазоні від характеристики ходу у вільній воді до швартової й дозволяє обирати найбільш вигідні режими роботи судна при найбільшому ККД установки. Однак ГРК в порівнянні з ГФК відрізняються конструктивною складністю гвинта та валу привода, збільшеними діаметром і довжиною маточини, підвищеною вартістю.

Таким чином, в ГЕУ доцільно застосовувати ГРК у поєднанні з синхронними ГЕД, що працюють з постійною частотою обертання.

1.4 Постановка наукового завдання енергозберігаючого оптимального управління гребною дизель-електричною установкою

Підвищити енергетичну ефективність ГЕУ можна за рахунок оптимального управління процесом передачі енергії від дизеля до гвинта [92, 112]. У даному підрозділі наведено постановку задачі оптимального управління гребною дизель-електричною установкою за критерієм втрат енергії. Для розв'язання задачі оптимального управління будується математична модель управляемого об'єкту або процесу, що описує його поведінку з часом під впливом управляючих впливів та власного поточного стану. Математична модель допускає визначення диференціальних (або різницевих) рівнянь, що описують можливі способи руху об'єкта управління в залежності від стану та параметрів управління.

$$\dot{X} = f(U(t), X(t)) \quad (1.9)$$

та визначення обмежень на використанні ресурси у вигляді рівнянь або нерівностей:

$$x(t_0) = x_0^*, x(t_1) = x_1^*, \quad (1.10)$$

де pX – похідна за часом вектора змінних станів; $X(t)$ – вектор змінних стану; $U(t)$ – управління; t_0, t_1 – початковий та кінцевий момент часу.

Оптимальне управління – це задача проєктування системи, яка забезпечує для заданого об’єкту управління або процесу такий закон управління або управляючу послідовність впливів, що забезпечує максимум або мінімум функціоналу якості системи [15].

$$J = \int_{t_0}^{t_1} F(X(\tau), pX(\tau), \tau) \cdot d\tau. \quad (1.11)$$

Завдання оптимального управління полягає в знаходженні функції стану $X(t)$ та управління $U(t)$ для часу ($t_0 \leq t \leq t_1$), які роблять $J \rightarrow \min$.

Найбільше широко при проєктуванні систем управління застосовуються варіаційне обчислення, принцип максимуму Понтрягіна та динамічне програмування Белмана [15]. Розв’язання задачі оптимального управління в даній постановці для ГЕУ є проблематичним за такими умовами:

- а) відсутність аналітичного розв’язання задачі для нелінійних систем;
- б) розв’язання задачі навіть для лінійних систем може бути отримане чисельними методами й тільки для квадратичного критерію якості;
- в) непрозорість критерію якості;
- г) складність розв’язання лінійної задачі при квадратичному критерії якості, що вимагає застосування чисельних методів.

Метод не знайшов застосування на практиці. Формування динаміки за коренями характеристичного рівняння мало відрізняється від оптимального управління [15] та не дає бажаних динамічних процесів. Кореневі методи дають бажані динамічні процеси і, відповідно, суб’єктивно кращу динаміку, але не розв’язують задачу оптимального управління. Отже, її розв’язання для оптимального управління ГДЕУ розглядається у загальній постановці.

Нехай існує динамічна система, яка описується системою

диференціальних рівнянь:

$$pX = f(U, X_1, X_2), \quad (1.12)$$

де U – вектор управляючих дій; $X = X_1 \cup X_2$ – вектор змінних станів; $X_1 \in X$ – вектор з розмірністю вектора U , змінні стани якого доступні для спостереження; $X_2 \in X$ – доповнення вектора X_1 до вектора X .

Методами паралельної або/та послідовної корекції сформуємо динамічні системи з бажаними динамічними процесами (рис. 1.9). Будемо вважати, що перехідна характеристика бажаного динамічного процесу може бути апроксимована експонентною функцією. При цьому вхідні змінні X_1^0 будуть задавати вихідні змінні X_1 .



Рисунок 1.9 – Формування бажаних перехідних характеристик методами послідовної корекції:

W_0 – передаточна функція об’єкта управління; W_p – передаточна функція регулятора; K_{33} – вектор пропорційного зворотного зв’язку

Джерело – [розроблено автором]

У результаті формування бажаної динамічної поведінки системи вихідна система диференціальних рівнянь прийме вигляд:

$$pX = f_0(X_1^0, X_1, X_2), \quad (1.13)$$

де X_1^0 – вектор нових управляючих дій, що задають статистичні значення змінних стану X_1 . Статична помилка змінних стану при другому контурі управління з інтегральними регуляторами буде дорівнює нулю:

$$X_{1onm}^0 - K_{zz} - X_1 = 0. \quad (1.14)$$

Для визначення оптимальних управляючих дій X_{1onm}^0 повинна бути сформована функція оптимального управління:

$$\Delta P = f(X_{11}, X_{12}, X_2). \quad (1.15)$$

Положимо, що задача оптимального управління полягає у формуванні заданого значення цільової функції:

$$M = f_M(X_{11}), \quad (1.16)$$

яка є функцією змінних стану $X_{11} \in X_1$. Доповнення вектора X_{11} до вектора X_1 позначимо $X_{12} : X_{11} \cup X_{12} = X_1$.

З формули (1.16) можна знайти один з елементів вектора X_{11} , наприклад:

$$x_1 = M \cdot f_M^{-1}(X_{11}'), \quad (1.17)$$

де X_{11}' – вектор X_{11} без елементу x_1 ; f_M^{-1} – функція зворотна до f_M .

Використовуючи введені позначення, переформуємо функцію оптимального управління (1.15) до такого вигляду:

$$\Delta P(M \cdot f_M^{-1}(X_{11}'), X_{11}', X_{12}, X_2) = \Delta P_M(M, X_1', X_2), \quad (1.18)$$

де ΔP_M – функція оптимального управління з урахуванням заданого значення цільової функції M ; X_1' – вектор X_1 без елементу x_1 .

У стаціонарному режимі система рівнянь (1.13) прийме вигляд:

$$f_{onm}(X_{1onm}^0, X_1, X_2) = 0. \quad (1.19)$$

З даного рівняння з урахуванням відсутності статистичної помилки в управлінні виразимо вектор $X_2 = f_2(X_{1onm}^0, X_1)$ та підставимо до формули цільової функції оптимального управління (1.9). У результаті отримаємо функцію оптимального управління вигляду:

$$\Delta P_M(M, X_1', f_2(X_2)) = \Delta P_A(M, X_1'). \quad (1.20)$$

Знайдемо мінімум функції оптимального управління у просторі, заданого вектором X_1' . Для цього виконаємо диференціювання цільової функції за елементами вектора X_1' . У результаті отримаємо вектор похідних:

$$D\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X_1')}{\partial X_1'}. \quad (1.21)$$

Приймемо, що існує вектор X_1' , який перетворює елементи вектора похідних $D\Delta P_A$ в нуль.

Тоді у просторі, заданим вектором X_1' , існує оптимальний стан, який мінімізує функцію оптимального управління (1.20).

У даному випадку вектор управляючих дій $X_{1onm}^0 = X_1'$ знаходиться шляхом розв'язання рівняння:

$$\frac{\partial \Delta P_A(M, X_{1onm}^{0/})}{\partial X_{1onm}^{0/}} = 0, \quad (1.22)$$

де $X_{1onm}^{0/}$ – вектор X_{1onm}^0 без елемента x_1^0 . Елемент x_1^0 може бути знайдено з формули (1.17).

Розв'язання рівняння дає вектор оптимальних значень управляючих дій $X_{1onm}^0 = f(M, X_1)$.

Таким чином, в системі з оптимальним управлінням формується оптимальний регулятор вигляду:

$$W_{onm} = \frac{X_{1onm}^0}{f(M, X_1)}. \quad (1.23)$$

У підсумку система оптимального управління прийме вигляд, наведений на рис. 1.10. На вектор простору станів зазвичай накладаються обмеження. Може бути задана верхня й нижня границі кожної змінної стану системи управління. Якщо таке обмеження задане на фізичному рівні або системою управління, то вихідна система рівнянь змінює вигляд. При цьому простір змін станів звужується, і знаходяться нові значення оптимальних управляючих впливів за описаною вище моделлю.



Рисунок 1.10 – Система оптимального управління динамічною системою

Джерело – [розроблено автором]

На рис. 1.10 позначено: W_0 – передаточна функція об'єкта управління; W_p – передаточна функція регулятора; W_{opt} – передаточна функція оптимального регулятора; K_{zz} – вектор пропорційного зворотного зв'язку; M_z – задане значення цільової функції M .

Таким чином, запропонований підхід до оптимального управління дозволить знайти та сформулювати керуючі впливи, що у статичному режимі мінімізують функцію оптимального управління ΔP та забезпечать задане значення цільової функції M . Перехід від одного оптимального стану системи до іншого оптимального стану відбувається за бажаними динамічними процесами. При цьому під бажаною динамічною поведінкою розуміються процеси, що протікають із заданим перерегулюванням, нульовою статичною помилкою й максимальною швидкістю. Формування таких процесів виконується відповідним розподілом коренів характеристичного рівняння (1.22).

Складемо схему проведення дисертаційного дослідження (рис. 1.11) та постановки наукового завдання (рис. 1.12).

На першому етапі дисертаційного дослідження виконується аналіз предметної області та формується наукове завдання. Дослідження особливостей, переваг та недоліків ГЕУ дає можливість визначити ГЕУ з уніполярними машинами як перспективний напрямок розвитку суднових двигунів. Проводиться обґрунтування вибору суднового рушія та будується математична модель оптимального управління. Побудова математичної моделі дозволяє формалізувати результат наукового дослідження.

На другому етапі дисертаційної роботи розробляються нові наукові результати. Для формування наукових результатів, спершу розробляється метод розрахунку систем автоматичного управління з регульованими параметрами, який ґрунтується на роботах [1, 5, 15, 34, 47, 69, 81]. Застосування даного методу дає можливість розробити метод оптимального управління ГЕУ з уніполярними машинами, метод компонування та топології енергообладнання та динамічну модель ГЕУ.

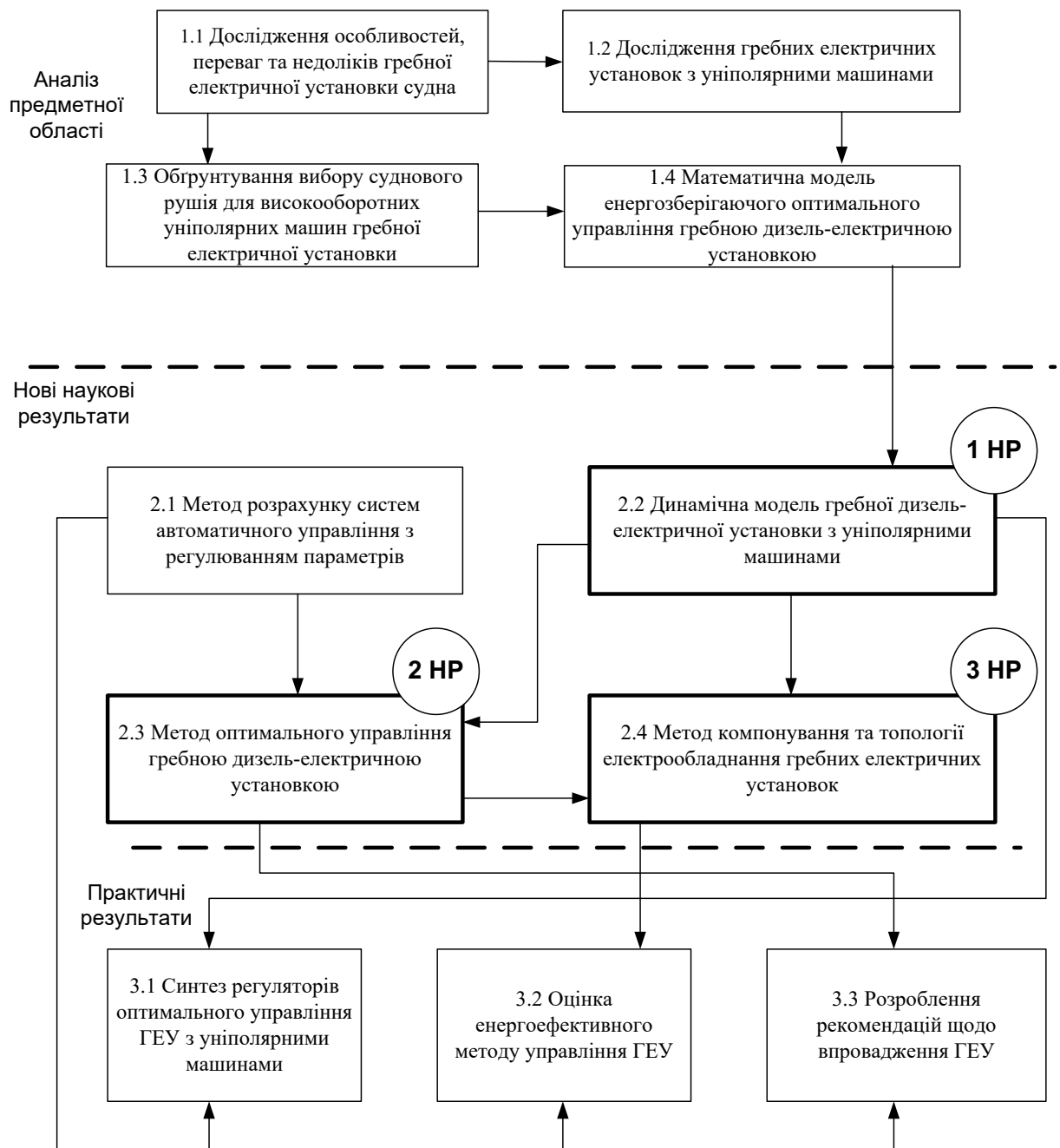


Рисунок 1.11 – Схема проведення дисертаційного дослідження

Джерело – [розроблено автором]

На третьому етапі розробляється система практичних результатів, що дозволяють впровадити отримані методи на практиці та оцінити їх ефективність. Сутність рекомендацій полягає в технічних рішеннях щодо зменшенні втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта за рахунок енергозберігаючого оптимального управління шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна.



Рисунок 1.12 – Постановка наукового завдання

Джерело – [розроблено автором]

Для досягнення мети роботи вирішується ряд наукових завдань.

При рішенні поставлених у дисертації завдань використано інструментарій теорій автоматичного управління, оптимального управління, динамічних систем, електричних ланцюгів, магнітних ланцюгів, електричних машин.

При дослідженні застосований математичний апарат векторного та матричного обчислення, методів прикладної математики, методів оптимізації. Аналіз математичних моделей, чисельна та графічна реалізація виконані з використанням ЕОМ із застосуванням пакетів математичного програмного забезпечення: Simulink (додаток ПЗ MatLab), MathCAD, Maple.

Висновки до розділу 1

1. При роботі з гребною електричною установкою простіше, ніж у звичайній установці, реалізувати систему дистанційного управління та автоматизації на програмуємих мікроконтролерах. При цьому забезпечується зручність та швидкість управління, підвищена надійність експлуатації судна.

2. Застосування високооборотних уніполярних машин у сукупності з редуктором дозволяє частково вирішити проблему низької напруги якоря уніполярної машини.

3. Активне використання нових матеріалів дають нормальні масогабаритні та об'ємні показники і високий коефіцієнт корисної дії через відсутність втрат на вихрові струми. Технологічні досягнення в області розробки струмознімальних пристроїв уніполярних машин постійного струму дозволяють вважати застосування таких машин у гребній електричній установці перспективним напрямком дослідження.

4. У гребній електричній установці доцільно застосовувати гвинт регульованого кроку у поєднанні з синхронними гребними електричними двигунами, що працюють з постійною частотою обертання.

5. Для підвищення енергетичної ефективності гребної електричної установку необхідно реалізувати оптимальне управління процесом передачі енергії від дизеля до гвинта.

6. Запропонований підхід до оптимального управління дозволить знайти та сформулювати керуючі впливи, що у статичному режимі мінімізують функцію оптимального управління ΔP та забезпечать задане значення цільової функції M . Перехід же від одного оптимального стану системи до іншого оптимального стану відбувається за бажаними динамічними процесами.

Основні результати проведеного дослідження опубліковані у роботах здобувача [12, 14, 48, 79, 115, 126].

РОЗДІЛ 2

ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ГРЕБНОЮ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ

У даному розділі дисертаційної роботи розкривається сутність нових наукових результатів: удосконалено динамічну модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, яка, на відміну від існуючих, враховує наявність трьох керуючих контурів, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля, та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта, що дозволяє виконати синтез регуляторів контурів управління з заданими динамічними характеристиками; удосконалено метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою, який, на відміну від існуючих, враховує вплив на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна для підвищення енергетичної ефективності.

Дослідження ґрунтуються на роботах [5, 16, 27, 34, 46, 78, 112, 118].

2.1 Динамічна модель гребної дизель-електричної установки

2.1.1 Математична модель навантаження гребної дизель-електричної установки

Вважаємо, що ГДЕУ складається з дизеля, електричного генератора зі збудженням з боку ротора постійним струмом, електродвигуна так само зі збудженням з боку ротора постійним струмом, електричних перетворювачів.

В якості рушія використовується ГРК. Розглядаються елементи ГДЕУ з позицій теорії динамічних систем, на базі яких складається математична модель такої установки. Принципову схему ГДЕУ наведено на рис. 2.1 [16].

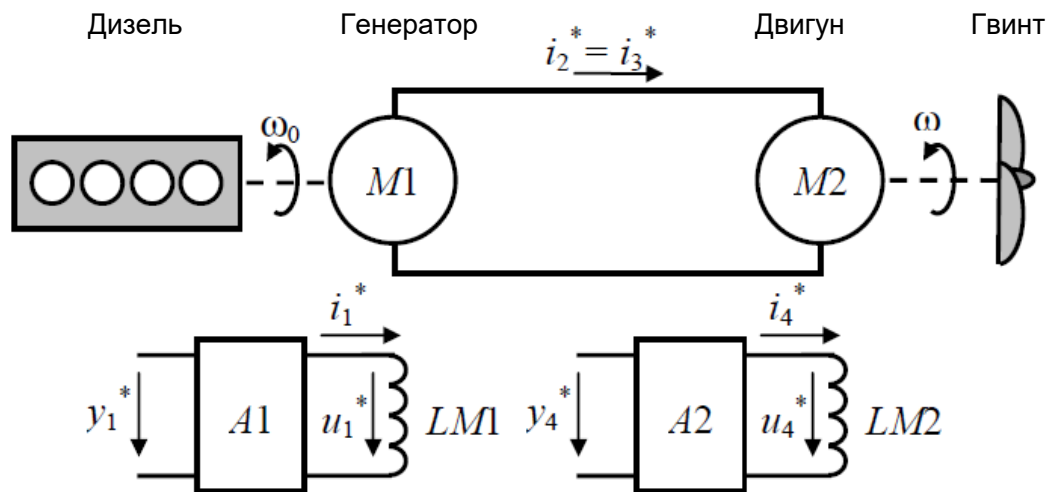


Рисунок 2.1 – Принципова схема гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами

Джерело – [16]

Розглянемо формальний опис навантаження на електродвигун ГДЕУ, що створює рушій судна – гвинт. Дана характеристика використовується для моделювання та оптимізації режимів роботи ГДЕУ. В якості математичної моделі навантаження будемо використовувати механічну характеристику гвинта – залежність швидкості обертання гвинта від моменту сили опору. Механічну характеристику гвинта визначимо, вважаючи, що при швидкості гвинта $\omega^* = 1$ момент опору гвинта дорівнює [10, 128]:

$$M_{CV}^* = k_v \cdot M_{HV}^*, \quad (2.1)$$

де k_v – коефіцієнт, що характеризує режим роботи гвинта;

$M_{HV}^* = 1 - R_z^*$ – це номінальний момент гвинта;

R_z^* – опір ланцюга якорів двигуна в умовних одиницях.

Величина $k_v = k_{v1}$ максимальна при роботі гвинта у швартовому режимі, а величина $k_v = k_{v0}$ мінімальна при роботі гвинта у вільній воді. Відношення k_{v0}/k_{v1} , як правило, складає 0,6...0,75. Вибір конкретного значення k_v залежить від призначення судна. Для суден, що працюють в основному у швартових режимах (буксирів, криголамів), він вище. Для суден,

основний режим роботи яких відбувається у вільній воді, він менше.

При моделюванні коефіцієнт k_v розглядається як зовнішній збуджуючий вплив, величина якого залежить від режиму роботи гвинта. Механічну характеристику гвинта далі апроксимуємо квадратичною залежністю вигляду:

$$M_{cV}^* = k_v \cdot M_{HV}^* \cdot \omega^{*2} \cdot \text{sign}(\omega^*). \quad (2.2)$$

Вигляд механічної характеристики гвинта $\omega(M_{cV}^*)$ наведено на рис. 2.2.

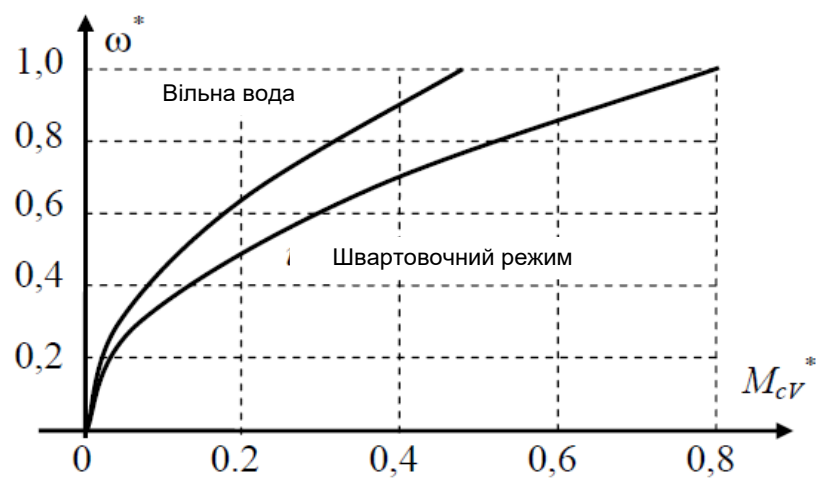


Рисунок 2.2 – Механічна характеристика гвинта

Джерело – [16]

Момент опору гвинта на структурній схемі зображений на рис. 2.3.

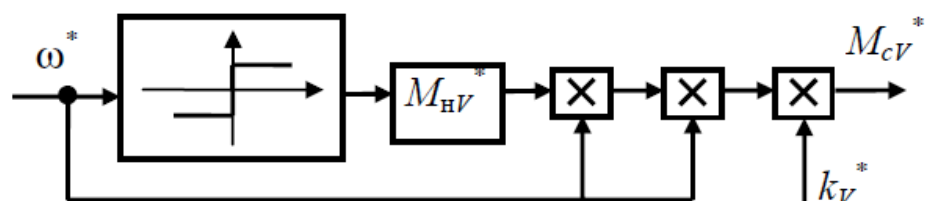


Рисунок 2.3 – Зображення моменту опору гвинта на структурній схемі

Джерело – [розроблено автором]

Структурна схема, зображена на рис. 2.3, використовується далі для моделювання динамічного поведіння ДЕГУ з уніполярними машинами.

2.1.2 Динамічна модель системи «генератор-двигун»

Електромеханічний перетворювач ДЕГУ складається з двох уніполярних машин, одна з яких працює в режимі генератора, а інша – у режимі двигуна. Виберемо в якості базових величин номінальні параметри генератора. Рівняння генератора запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot p i_1 ; \\ u_2 &= R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot p i_2 + L_{21} \cdot \omega \cdot i_1 , \end{aligned} \quad (2.3)$$

де R_1 – опір обмотки збудження; L_1 – індуктивність обмотки збудження; i_1 – струм обмотки збудження; R_2 – опір обмотки якоря; L_2 – індуктивність розсіювання обмотки якоря; i_2 – струм обмотки якоря; L_{21} – взаємна індуктивність обмоток якоря та збудження; ω – швидкість обертання якоря.

Рівняння двигуна має вигляд:

$$\begin{aligned} u_4 &= R_4 \cdot i_4 + L_4 \cdot p i_4 ; \\ u_3 &= R_3 \cdot i_3 + L_3 \cdot p i_3 + L_{34} \cdot \omega_0 \cdot i_4 , \end{aligned} \quad (2.4)$$

де R_4 – опір обмотки збудження; L_4 – індуктивність обмотки збудження; i_4 – струм обмотки збудження; L_3 – опір обмотки якоря; L_3 – індуктивність розсіювання обмотки якоря; L_{34} – взаємна індуктивність обмоток якоря та збудження; ω_0 – швидкість обертання якоря.

Позначимо потокозчеплення обмотки якоря з обмоткою збудження генератора $\psi_{12} = L_{21} \cdot i_1$, а потокозчеплення обмотки якоря з обмоткою двигуна $\psi_{34} = L_{34} \cdot i_4$. Тоді електрорушійна сила (ЕРС) двигуна $E_2 = \psi_{34} \cdot \omega$. Змінимо напрям струму двигуна на протилежний. Оскільки обмотки якоря з'єднані послідовно, то $u_3 = u_2$. З урахуванням цих зауважень рівняння системи генератор-двигун приймуть такого вигляду:

Уніполярний генератор розвиває електромагнітний момент, який є моментом опору для дизеля:

$$M_{cD}^* = \psi_{12}^* \cdot i_2^* = L_{12}^* \cdot i_1^* \cdot i_2^*, \quad (2.6)$$

де $\psi_{12}^* = L_{12}^* \cdot i_1^* \in [0,1]$ – потокозчеплення обмотки збудження з обмоткою якоря; i_1^* – струм обмотки збудження; i_2^* – струм обмотки якоря.

Уніполярний двигун розвиває електромагнітний момент, який є рушійним моментом для гвинта:

$$M^* = \psi_{34}^* \cdot i_4^* = L_{34}^* \cdot i_4^* \cdot i_2^*. \quad (2.7)$$

де $\psi_{34}^* = L_{34}^* \cdot i_4^* \in [0,1]$ – потокозчеплення обмотки збудження з обмоткою якоря; i_4^* – струм обмотки збудження.

Рівняння руху якоря і гвинта:

$$J \cdot p \cdot \omega = M - M_{cV}, \quad (2.8)$$

де J – інтегральний момент інерції якоря двигуна, валопроводу та гвинта; M_{cV} – момент опору гвинта.

У відносних одиницях рівняння руху прийме такого вигляду:

$$T_V \cdot p \cdot \omega^* = M^* - M_{cV}^*, \quad (2.9)$$

де M_{cV}^* – момент опору у відносних одиницях; $T_V = J \cdot \omega_6 / M_6$ – механічна постійна часу двигуна, валопроводу та гвинта.

2.1.3 Динамічна модель перетворювачів

Сучасні перетворювачі будуються на основі силової електроніки й мають імпульсний принцип дії. Динамічна модель перетворювача достатньо складна. У п.п. 2.1.3 розглянуто наближену передатну функцію перетворювача, використану у динамічній моделі ГДЕУ. Структурно перетворювач можна розділити на силову частину й систему управління.

Силова частина реалізується на електронних ключах, що періодично включаються й модулюють вихідну змінну. Нехай період проходження імпульсів, які моделюють вихідну змінну перетворювача, дорівнює T_i . Тоді передатну функцію силової частини перетворювача можна представити елементом затримки $e^{-T_i \cdot p}$. Оскільки період слідування імпульсів T_i малий, то елемент затримки можна представити наближено двома членами ряду:

$$e^{-T_i \cdot p} \approx 1 - T_i \cdot p \approx \frac{1}{1 + T_i \cdot p}. \quad (2.10)$$

Отже, динамічну поведінку силової частини перетворювача можна представити аперіодичною функцією першого порядку.

Система керування перетворювача звичайно реалізується на основі мікропроцесора і має істотно більшу швидкодію, ніж силова частина. Отже, її можна вважати безінерційним елементом. Але до алгоритму системи керування доцільно штучно включити аперіодичний елемент з постійною часу $T_{СК}$.

Тоді перетворювач буде аперіодичним елементом другого порядку:

$$W_{СК} = \frac{1}{T_i \cdot p + 1} \cdot \frac{k}{T_{СК} \cdot p + 1}, \quad (2.11)$$

де k – коефіцієнт передачі перетворювача.

Використання мікропроцесорної техніки дозволяє завжди зробити

перетворювач лінійним елементом, а штучне включення в систему аперіодичного елемента згладжує помилки, пов'язані з апроксимацією силової частини перетворювача. Нехай базовим значенням прийняти таке значення вихідної величини системи управління U_6 , якому відповідає базове значення вихідної величини електричного перетворювача. З іншого боку, електричний перетворювач формується так, щоб базове значення вихідної величини дорівнювало відповідному базовому значенню електродвигуна U_H .

Отже, статичний коефіцієнт передачі U_H/U_6 встановлює коефіцієнт приведення між базовими величинами силової частини електроприводу та керуючого пристрою.

Таким чином, при синтезі системи керування коефіцієнт передачі між електричним перетворювачем та управляючим пристроєм у відносних одиницях приймає одиничне значення. При надходженні на вхід електричного перетворювача одиничного (базового) сигналу на виході також буде одиничний (базовий) сигнал. Структурна схема перетворювача має вигляд, наведений на рис. 2.6.

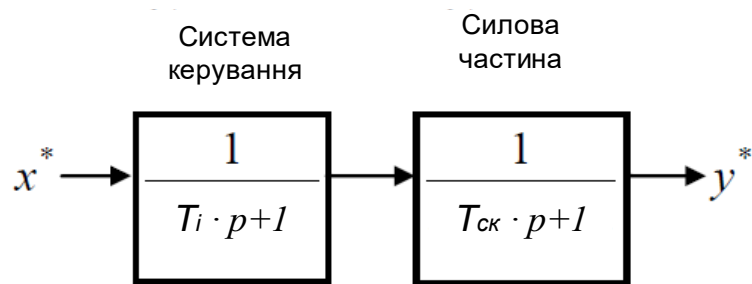


Рисунок 2.6 – Передаточна функція перетворювача

Джерело – [розроблено автором]

Перетворювачі А1 та А2 (див. рис. 2.1) підключаються до обмоток збудження уніполярних машин. Отже, на структурній схемі їх можна навести у вигляді послідовно включених аперіодичних елементів (рис. 2.7).

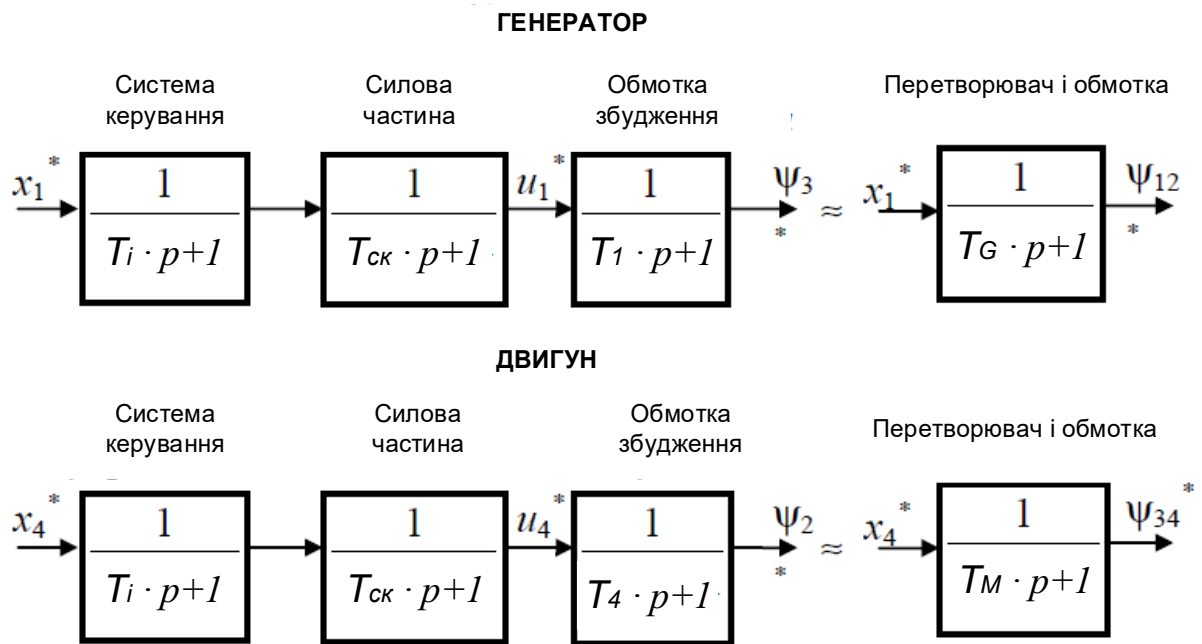


Рисунок 2.7 – Передатні функції перетворювачів і обмоток збудження генератора та двигуна

Джерело – [розроблено автором]

Передатна функція перетворювачів та обмоток збудження генератора та двигуна будуть аперіодичним елементом третього порядку. Аперіодичний елемент третього порядку досить добре апроксимується аперіодичними елементами першого порядку (рис. 2.7), постійна часу якого дорівнює сумі постійних часу ланок [18]:

$$\begin{aligned} T_G &= T_i + T_{CK} + T_1; \\ T_M &= T_i + T_{CK} + T_4. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Похибка апроксимації перехідної функції при рівних значеннях постійних часу не перевищує 2%, а при нерівних постійних часу похибка буде менше.

Таким чином, при моделюванні перехідних процесів у ГДЕУ в структурній схемі перетворювачі об'єднуються з обмотками збудження генератора й двигуна та наводяться аперіодичним елементом першого порядку. Коефіцієнти передачі елементів мають одиничне значення, а постійні часу визначаються за формулою (2.12).

2.1.4 Динамічна модель дизеля

Розглянемо дизель як масу, до якої прикладається сумарний момент сили. Величину моменту рушійної сили M_D визначимо, як функцію витрати палива за одиницю часу, споживаного дизелем G_0 :

$$M_D = k_M \cdot G_0, \quad (2.13)$$

де k_M – коефіцієнт пропорційності.

Момент внутрішнього опору дизеля M_{c0} розглянемо як силу сухого тертя:

$$M_{c0} = M_0 \cdot \text{sign}(\omega_0). \quad (2.14)$$

При дослідженнях використовуються відносні одиниці. У відносних одиницях моменту рушійної сили:

$$M_D^* = k_M^* \cdot G_0^*. \quad (2.15)$$

Крім моменту сили внутрішнього опору, на дизель діє зовнішня сила з боку генератора вигляду (2.6). Обертання його вала описується рівнянням:

$$T_D \cdot p \cdot \omega_0^* = M_D^* - M_{cD}^* - M_{c0}^*, \quad (2.16)$$

де $T_D = J_D \cdot \omega_6 / M_6$ – механічна постійна часу дизель-генератора; J_D – сумарний момент інерції дизель-генератора; ω_6 – базове значення швидкості; M_6 – базове значення моменту.

Нехай дизель має контур швидкості з пропорційним регулятором типу Уатта та коефіцієнтом зворотного зв'язку $k_{oc}^* = 1$. Структурна схема, яка характеризує динамічну поведінку дизеля, наведена на рис. 2.8.

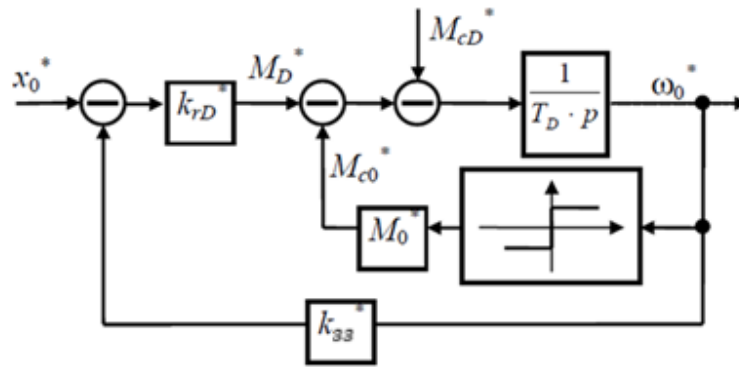


Рисунок 2.8 – Структурна схема дизеля з пропорційним регулятором швидкості
Джерело – [розроблено автором]

Внутрішній зворотний зв'язок за швидкістю визначає мінімальне значення витрати палива за одиницю часу, що споживається дизелем на холостому ходу, і гарантує стійку роботу двигуна: $G_0^* > M_0^*$.

Управляюча змінна x_0^* задає величину швидкості обертання дизеля. Статична механічна характеристика дизеля $\omega_0^*(M_{cD}^*)$ знаходиться з рівняння:

$$(x_0^* - k_{33}^* \cdot \omega_0^*) \cdot k_{rD} - M_0^* - M_{cD}^* = 0. \quad (2.17)$$

Зовнішній зворотній зв'язок за швидкістю формує жорстку механічну характеристику дизеля:

$$\omega_0^*(M_{cD}^*) = \frac{x_0^*}{k_{33}^*} - \frac{(M_0^* + M_{cD}^*)}{k_{oc}^* \cdot k_{rD}^*}. \quad (2.18)$$

При наборі моменту навантаження M_{cD}^* швидкість дизеля провалюється на величину:

$$\omega_0^* = \frac{M_{cD}^*}{k_{33}^* \cdot k_{rD}^*}. \quad (2.19)$$

З формули (2.19) очевидно, що провал частоти обертання дизеля визначається коефіцієнтом зворотного зв'язку k_{rD}^* . Оскільки величина k_{rD}^* , як

правило, достатньо значна, то величина ω_0^* достатньо мала.

Передатна функція дизеля за керуючим впливом при пропорційному регуляторі швидкості дорівнює:

$$W_D = \frac{1}{T_{rD0} \cdot p + 1}, \quad (2.20)$$

де $T_{rD0} = T_D/k_{rD}$.

Динамічна модель ГДЕУ з уніполярними машинами формується на базі динамічних моделей її елементів: дизеля, генератора-двигуна та гвинта. Структурні схеми цих елементів наведені відповідно на рис. 2.3, 2.5, 2.8. Структурна схема ГДЕУ наведена на рис. 2.9.

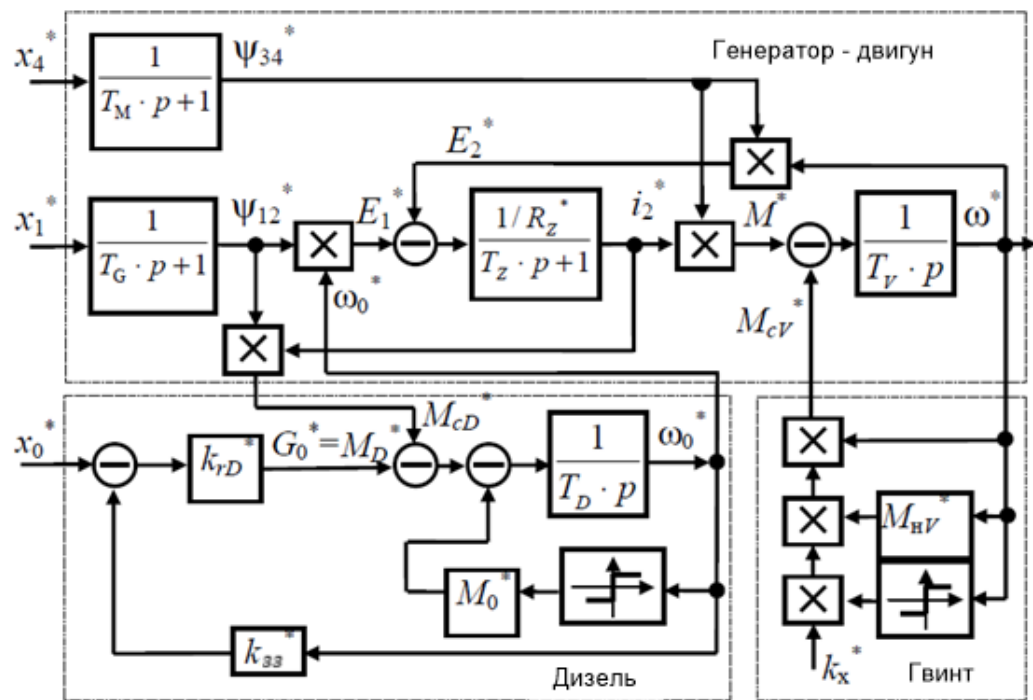


Рисунок 2.9 – Структурна схема системи «дизель-генератор-двигун-гвинт»

Джерело – [розроблено автором]

Дана структурна схема, відображає математичну модель системи, що має три керуючих контура, які формують магнітні потоки генератора,

гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта. Ця система дозволить провести синтез регуляторів контурів управління, що відповідають заданим критеріям оптимізації [12, 86].

2.2 Синтез динамічних характеристик гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами

2.2.1 Динамічні властивості гребної дизель-електричної установки без зворотних зв'язків

Оскільки динамічна система «дизель-генератор-двигун-гвинт» (див. рис. 2.9) є нелінійною, її аналітичне дослідження є складним. Для дослідження динамічної поведінки системи використаємо структурну схему рис. 2.9 у програмі Simulink [22]. Прийmemo, що система «дизель-генератор-двигун-гвинт» має такі параметри, наведені у відносних одиницях: $R_z^* = 0,06$; $k_{rD}^* = 4$; $k_{zz}^* = 1$; $M_0^* = 0,1$; $M_{HV}^* = 0,9$; $k_x^* = 1$, та постійні часу, наведені у секундах: $T_G^* = 0,3$; $T_Z^* = 0,02$; $T_M^* = 0,2$; $T_D^* = 2$; $T_V^* = 1,5$.

Розглянемо перехідні характеристики системи без зворотних зв'язків при використанні найбільш розповсюджене управління при постійному струмі збудження якоря $i_1^* = 1$ та постійній швидкості обертання дизеля $\omega_0^* = 1$.

Інтерес представляють перехідні характеристики змінних станів: швидкість обертання гвинта ω^* , струм у ланцюзі якорів генератора та двигуна i_2^* й швидкість обертання якоря генератора ω_0^* . Вважаємо, що вхідні змінні x_0^* , x_1^* дорівнюють одиниці. Результати моделювання наведені на рис. 2.10. Найбільший інтерес представляє струм у ланцюзі якорів генератора й двигуна i_2^* . Максимальне значення струму якоря має кратність 3,2. Для регулювання струму двигуна та його обмеження звичайно використовується контур струму з інтегрально-пропорційним регулятором, настроєний на технічний оптимум.

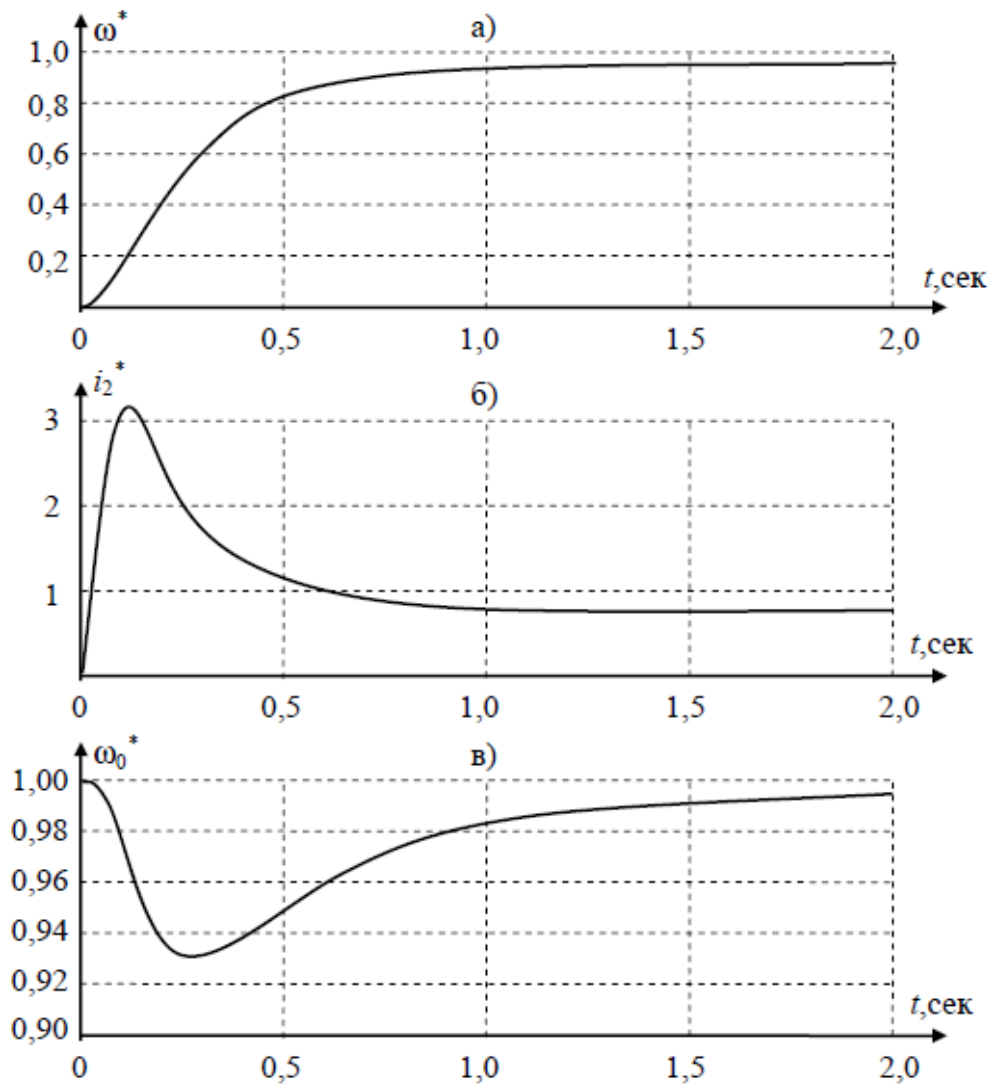


Рисунок 2.10 – Перехідні характеристики системи без зворотних зв'язків:

а) швидкості гвинта; б) струму ланцюга якорів; в) швидкості дизеля

Джерело – [розроблено автором]

2.2.2 Синтез контуру швидкості обертання махових мас дизеля

Розглянемо формування динаміки обертання якоря генератора, який приводиться в обертання дизелем. Регулювання обертання дизеля виконується шляхом впливу на рейку паливного насоса. Швидкість обертання маховика дизеля при впливі на рейку паливного насоса при наявності пропорційного регулятора швидкості поводить як аперіодичний елемент першого порядку. Він має помилку за управляючим впливом.

Для реалізації постановки оптимального управління необхідно синтезувати інтегральний регулятор швидкості. Передатна функція дизеля за керуючим впливом при пропорційному та інтегральному регуляторі швидкості:

$$W_{DT} = \frac{k_{rD}}{T_{rD} \cdot T_D \cdot p^2 + k_{rD} \cdot T_{rD} \cdot p + k_{rD}}, \quad (2.21)$$

де T_D – постійна часу дизель-генератора; T_{rD} – постійна часу інтегрального регулятора; k_{rD} – коефіцієнт пропорційності регулятора швидкості.

У даному випадку коефіцієнт зворотного зв'язку може бути прийнятий одиниці, а коефіцієнт k_{rD} обраний так, щоб забезпечувати рівність дійсної та уявної частин коренів характеристичного рівняння:

$$k_{rD} = \frac{2 \cdot T_D}{T_{rD}}, \quad (2.22)$$

де T_{rD} приймається достатньо малим, але не меншим, ніж $T_D/2$. Перехідна характеристика буде мати перерегулювання 4,3%. Вигляд перехідної характеристики при $T_{rD} = \frac{T_D}{2} = 1$ наведено на рис. 2.11.

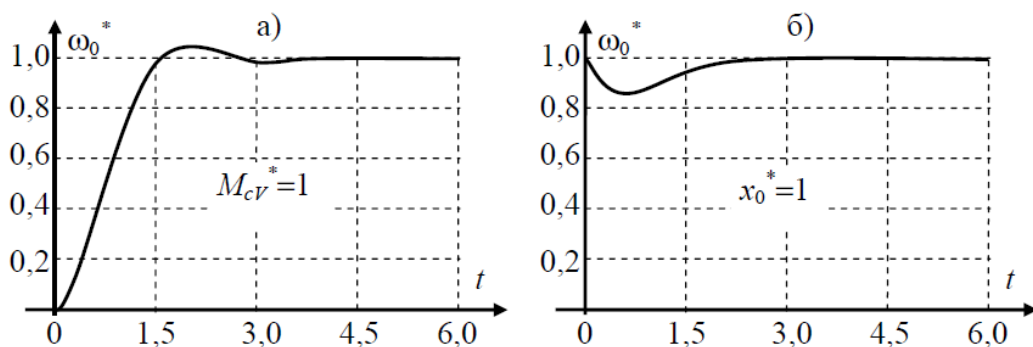


Рисунок 2.11 – Перехідні характеристики дизеля:

а) за управляючим впливом; б) за збуджуючим впливом

Джерело – [розроблено автором]

Дизель як об'єкт управління при наявності інтегрального регулятора забезпечує нульову статичну помилку за управляючою дією. Якщо управляюча дія задовольняє умові оптимальності, то швидкість обертання маховика дизеля і, відповідно, ротора генератора буде точно відповідати управляючій дії.

2.2.3 Синтез контуру управління потокозчіпленням ланцюга обмотки збудження гребного уніполярного двигуна

Обмотка збудження управляється перетворювачем напруги. Вихідна змінна, яка бере участь у формуванні оптимального управління, – це струм обмотки, а вхідний сигнал управління – перетворювача. Перетворювач та обмотка управління з погляду управління їх динамічною поведінкою є аперіодичними елементами першого порядку, з'єднані послідовно. Постійні часу цих елементів дуже відрізняються, тому їх доцільно апроксимувати одним аперіодичним елементом. Передатна функція об'єкта управління потокозчіпленням контуру обмотки збудження уніполярного двигуна:

$$W_{04} = \frac{1}{T_M \cdot p + 1}. \quad (2.23)$$

Для оптимального управління змінною стану – потокозчіпленням обмотки збудження двигуна – синтезуємо контур, за вхідним управляючим впливом якого буде йти потокозчіплення обмотки збудження двигуна. Структурну схему контуру потокозчіплення обмотки збудження наведено на рис. 2.12. Передатна функція регулятора потокозчіплення обмотки збудження уніполярного двигуна підбирається згідно з виразом:

$$W_{r4} = \frac{1/k_{oc}}{W_{04} \cdot 2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} = \frac{T_M \cdot p + 1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} = \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot p} + \frac{T_M - T_\mu}{2 \cdot T_\mu \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}. \quad (2.24)$$

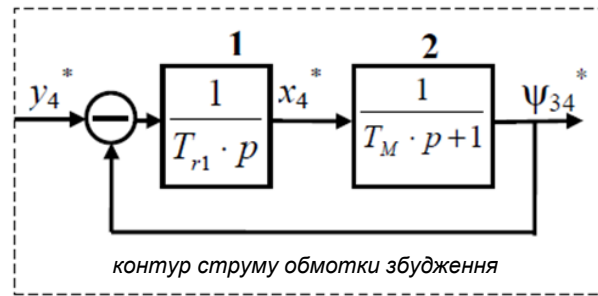


Рисунок 2.12 – Структурна схема контуру потокозчіплення обмотки збудження:

1 – регулятор струму;

2 – електричний перетворювач з обмоткою збудження

Джерело – [розроблено автором]

При $T_\mu = T_M$ маємо:

$$W_{r4} = \frac{1}{2 \cdot T_M \cdot p}. \quad (2.25)$$

Контур потокозчіплення (рис. 2.13) забезпечує нульову статичну помилку за управляючою дією обмотки збудження уніполярного двигуна і породжує шукану перехідну функцію з перерегулюванням у 4,3% та середньгеометричною постійною часу $\sqrt{2} \cdot T_M$.

Діючи на управляючу змінну, можна оптимізувати загальні втрати передачі енергії від дизеля до гвинта.

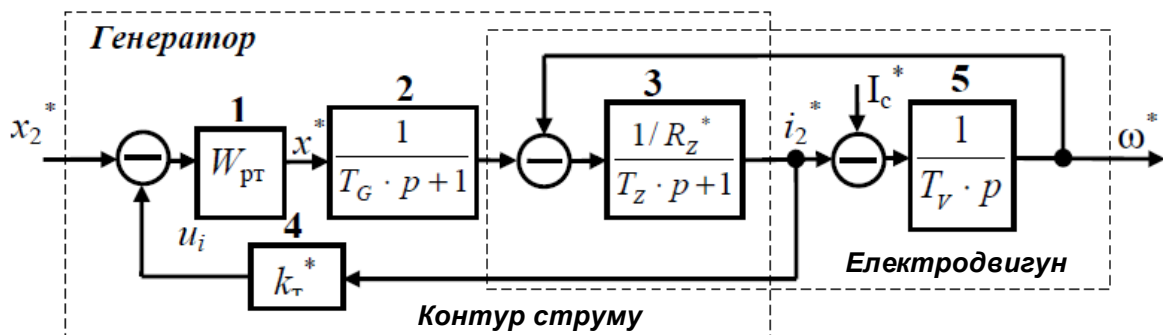


Рисунок 2.13 – Структурна схема контуру струму ланцюга якорів:

Джерело – [розроблено автором]

На рисунку 2.13 позначені: 1 – регулятор струму; 2 – електричний перетворювач; 3 – електрична частина електродвигуна; 4 – датчик струму; 5 – механічна частина приводу

Таким чином, у даному підрозділі дисертаційної роботи розглянуто синтез регуляторів змінних станів системи. Структурну схему системи управління ГДЕУ з регуляторами змінних станів наведено на рис. 2.14.

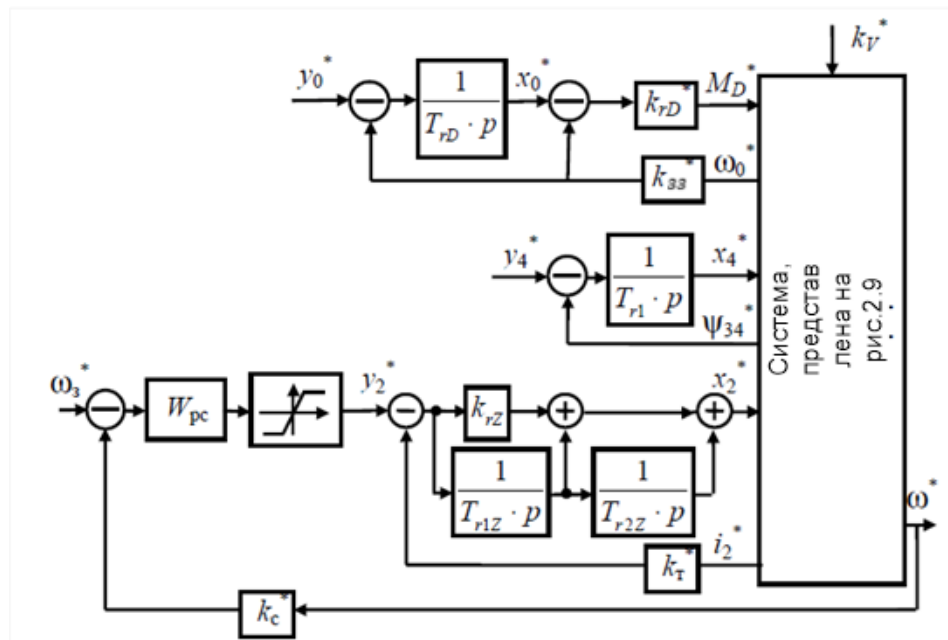


Рисунок 2.14 – Структурна схема системи управління гребною дизель-електричною установкою з регуляторами змінних станів

Джерело – [розроблено автором]

Синтез динаміки, виконаний методом корекції динамічних процесів регуляторами, дозволяє одержати бажані динамічні процеси, і формує керуючі системи за змінними станів.

2.3 Метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою

2.3.1 Синтез оптимальних регуляторів змінних станів при управлінні моментом двигуна

Створення електромагнітного моменту двигуном є цільовим призначенням ГДЕУ. Його величина визначається, виходячи з умов експлуатації, і задається оператором або системою управління більш високого рівня. Задане значення моменту зв'язує змінні стани співвідношенням (2.7).

Передача енергії від дизеля до гвинта з метою створення електромагнітного моменту вирішується неоднозначно. Одне і те саме значення електромагнітного моменту двигуна може бути отримане при різних сполученнях змінних стану ГДЕУ. Ці значення визначаються так, щоб мінімізувати критерій управління – втрати в елементах, що керують передачею енергії від дизеля до гвинта [12].

Екстремум критерію знаходиться в області змінних станів системи управління. Змінні стани пов'язані між собою заданим електромагнітним моментом (2.7). При пошуку екстремуму використовуються зв'язки між змінними стану, визначені рівняннями, що описують динаміку системи.

Залежності втрати потужності від струму ланцюга якорів i_2^* при різних значеннях швидкості обертання якоря генератора ω_0^* , та швидкості обертання якоря двигуна ω^* , наведені на рисунках 2.15 а) та б).

Екстремальні значення $i_{2\text{ опт}}^*$, $\omega_{0\text{ опт}}^*$ залежать від параметрів системи та від швидкості обертання вала двигуна й заданого значення моменту на валу двигуна. Якщо покласти, що в статичному режимі момент сили на валу двигуна пов'язаний зі швидкістю обертання залежністю

$$M^* = k_x \cdot M_H^* \cdot \omega^{*2} \cdot \text{sign}(\omega^*), \quad (2.26)$$

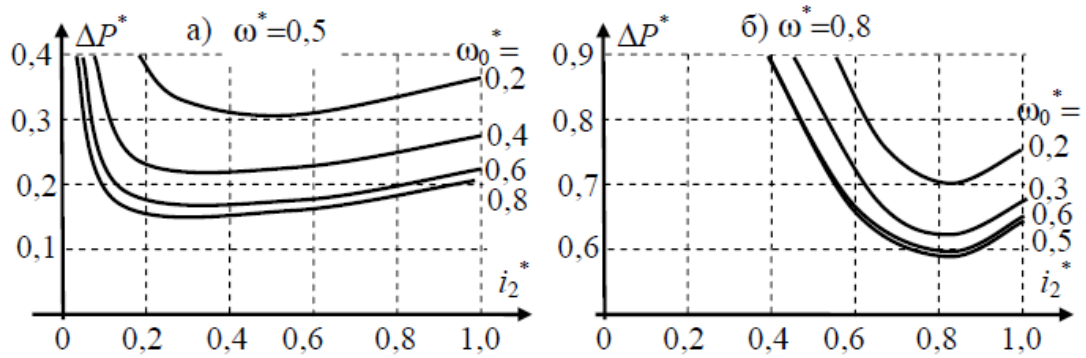


Рисунок 2.15 – Залежності втрат потужності від струму якорів при різних значеннях швидкості обертання якоря генератора і при швидкості обертання якоря двигуна: а) $\omega^* = 0,5$; б) $\omega^* = 0,8$

Джерело – [розроблено автором]

то екстремальні значення $i_{2\text{ опт}}^*$ та $\omega_{0\text{ опт}}^*$ будуть представлені функціями швидкості ω^* , які наведені на рис. 2.16.

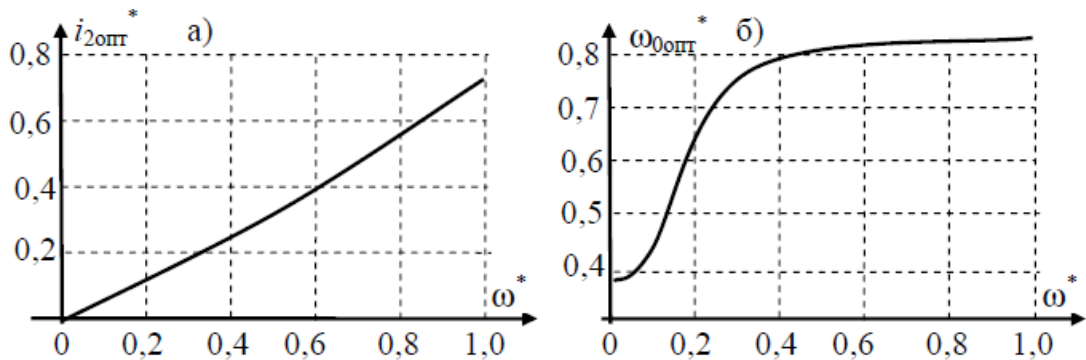


Рисунок 2.16 – Залежності оптимальних значень змінних стану від швидкості обертання якоря двигуна:

а) струму якорів; б) швидкості обертання генератора

Джерело – [розроблено автором]

Якщо продиференціювати функцію критерію за змінними стану $i_{2\text{ опт}}^*$ та $\omega_{0\text{ опт}}^*$ та прирівняти ці похідні до нуля, то одержимо рівняння, рішення якого визначить $i_{2\text{ опт}}^*$, та $\omega_{0\text{ опт}}^*$.

Знайти точне аналітичне рішення цих рівнянь відносно i_2^* та ω^* не представляється можливим. Тобто знайти екстремальні значення $i_{2\text{ опт}}^*$, $\omega_{0\text{ опт}}^*$

функції можна лише чисельними методами. Однак помітимо, що величина приведенного значення падіння напруги на вентилях перетворювача мала ΔU^* . Тому покладемо $\Delta U^* = 0$. У цьому випадку рішення рівняння $\frac{\partial \Delta P}{\partial i_2^*} = 0$ дає значення струму якорем машин:

$$i_{2opt}^* = \sqrt{M^*} \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{R_1^* \cdot L_{34}^{*2} \cdot \omega^{*2} + R_4^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2}}{R_2^* \cdot L_{34}^{*2} \cdot (R_1^* \cdot R_2^* + L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2})} \right)}. \quad (2.27)$$

Якщо врахувати, що

$$R_1^* \cdot R_2^* + L_{12}^{*2} \omega_0^{*2} \approx L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2}, \quad (2.28)$$

то формула (2.27) прийме такого вигляду:

$$i_{2opt}^* = \sqrt{M^*} \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{R_1^* \cdot \omega^{*2}}{R_2^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2}} + \frac{R_4^*}{R_4^* \cdot L_{34}^{*2}} \right)}. \quad (2.29)$$

Формула (2.29) визначає оптимальне значення струму якорів електричних машин при заданому значенні електромагнітного моменту [125].

Грунтуючись на формулі (2.29), синтезуємо оптимальний регулятор струму якорів електричних машин як складову методу оптимального управління:

$$\Delta u_2 = \sqrt{M^*} \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{R_1^* \cdot \omega^{*2}}{R_2^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2}} + \frac{R_4^*}{R_4^* \cdot L_{34}^{*2}} \right)} - i_2^*. \quad (2.30)$$

Значення i_2^* , ω_0^* та ω^* у формулі (2.30) підставляються з відповідних датчиків. Якщо динамічні процеси в контурі струму синтезовані так, що регулятор забезпечує нульову статичну помилку, то в статичному режимі

$\Delta y_2 = 0$ та $i_2^* = i_{2\text{опт}}^*$ Фрагмент структурної схеми з оптимальним регулятором струму наведено на рисунку 2.17. Даний фрагмент надбудовується до структурної схеми (див. рис 2.14).

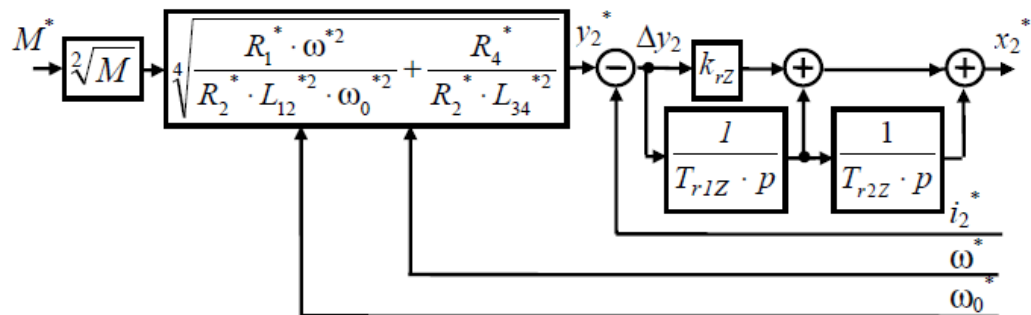


Рисунок 2.17 – Фрагмент структурної схеми з оптимальним регулятором струму ланцюга якорів уніполярних електричних машин

Джерело – [розроблено автором]

Фрагмент структурної схеми з оптимальним регулятором струму збудження двигуна наведено на рис. 2.18.

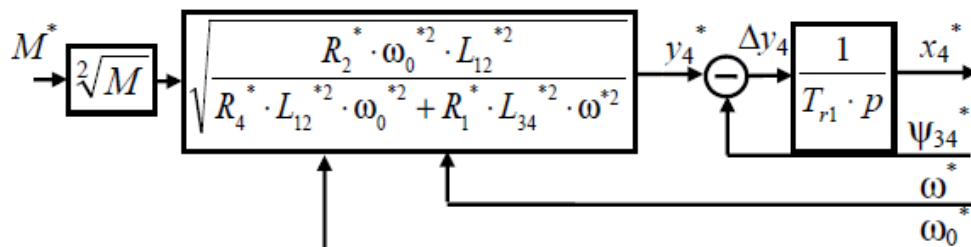


Рисунок 2.18 – Фрагмент структурної схеми з оптимальним регулятором струму збудження уніполярного двигуна

Джерело – [розроблено автором]

Графік залежності оптимальної швидкості обертання махових мас якоря генератора від швидкості обертання махових мас якоря двигуна наведено на рис. 2.19.

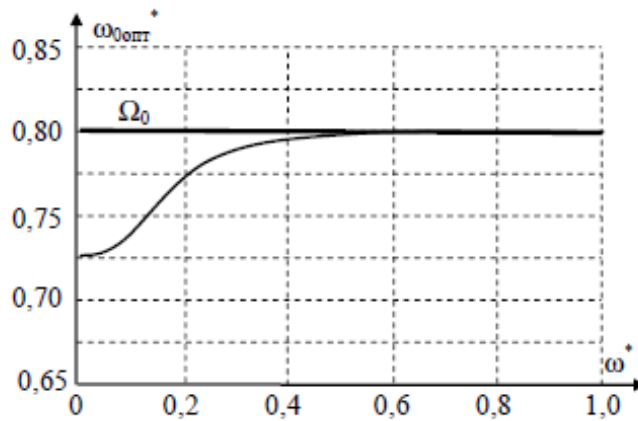


Рисунок 2.19 – Графік залежності оптимальної швидкості обертання махових мас якоря генератора від швидкості обертання махових мас якоря двигуна
Джерело – [розроблено автором]

Аналіз залежності, наведеної на рис. 2.19 свідчить, що з достатньою для практичних цілей точністю можна вважати, що $\omega_{\text{опт}}^* \approx \Omega_0$. Таким чином, оптимальний регулятор повинен підтримувати сталість швидкості обертання махових мас якоря генератора.

2.3.2 Синтез оптимальних регуляторів змінних станів при управлінні швидкістю обертання якоря двигуна

У даному підрозділі розробимо оптимальні за критерієм втрат енергії управляючі впливи на ГДЕУ при фіксованому значенні швидкості обертання якоря двигуна. В такій постановці цільова функція гребної установки найбільш поширена, оскільки між швидкістю обертання гвинта та швидкістю руху судна є близький до лінійного зв'язок. Його швидкість визначається, виходячи з умов експлуатації, і задається оператором або системою управління більш високого рівня [111].

У підрозділі 2.3.1 дисертаційної роботи виконано синтез динамічних процесів при керуванні швидкістю обертання гвинта шляхом впливу на контур струму ланцюга якорів електричних машин.

Цей контур швидкості визначив змінну стану i_2^* . При цьому залишаються не заданими входні впливи на контури струму обмотки збудження двигуна і контур швидкості обертання махових мас дизель-генератора (рис. 2.14). Сформуємо оптимальне управління струмом обмотки збудження двигуна та швидкістю обертання махових мас дизель-генератора при заданому значенні швидкості обертання гвинта. Оскільки струм ланцюга якорів машин заданий керуючим впливом, то варто сформувати оптимальні керуючі впливи на контур струму збудження двигуна й контур швидкості обертання махових мас дизеля.

Сформуємо оптимальний регулятор для струму збудження двигуна за керуючою змінною y_4^* (див. рис. 2.14). Критерій оптимальності визначений формулою (2.3). Мінімум критерію досягається при виконанні рівності (2.29). Відмітимо, що струми y_2^* , y_4^* та момент M^* пов'язані співвідношенням. Підставимо значення моменту M^* до формули (2.29) та знайдемо струм i_4^* :

$$i_{2opt}^* = i_{2opt}^* \sqrt{\left(\frac{R_2^* \cdot \omega_0^{*2} \cdot L_{12}^{*2}}{R_4^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2} + R_1^* \cdot L_{34}^{*2} \omega^{*2}} \right)}. \quad (2.31)$$

Значення i_2^* , ω_0^* та ω^* у даній формулі підставляються з відповідних датчиків, значення $i_{2opt}^* = y_2^*$ є задаючим впливом на контур струму якорів електричних машин. Оптимальне управління контуром швидкості обертання махових мас дизель-генератора вже розглядалося в роботі та здійснюється аналогічно при управлінні швидкістю обертання гвинта.

Структурну схему системи оптимального управління ГДЕУ при керуванні швидкістю гвинта наведено на рис. 2.20.

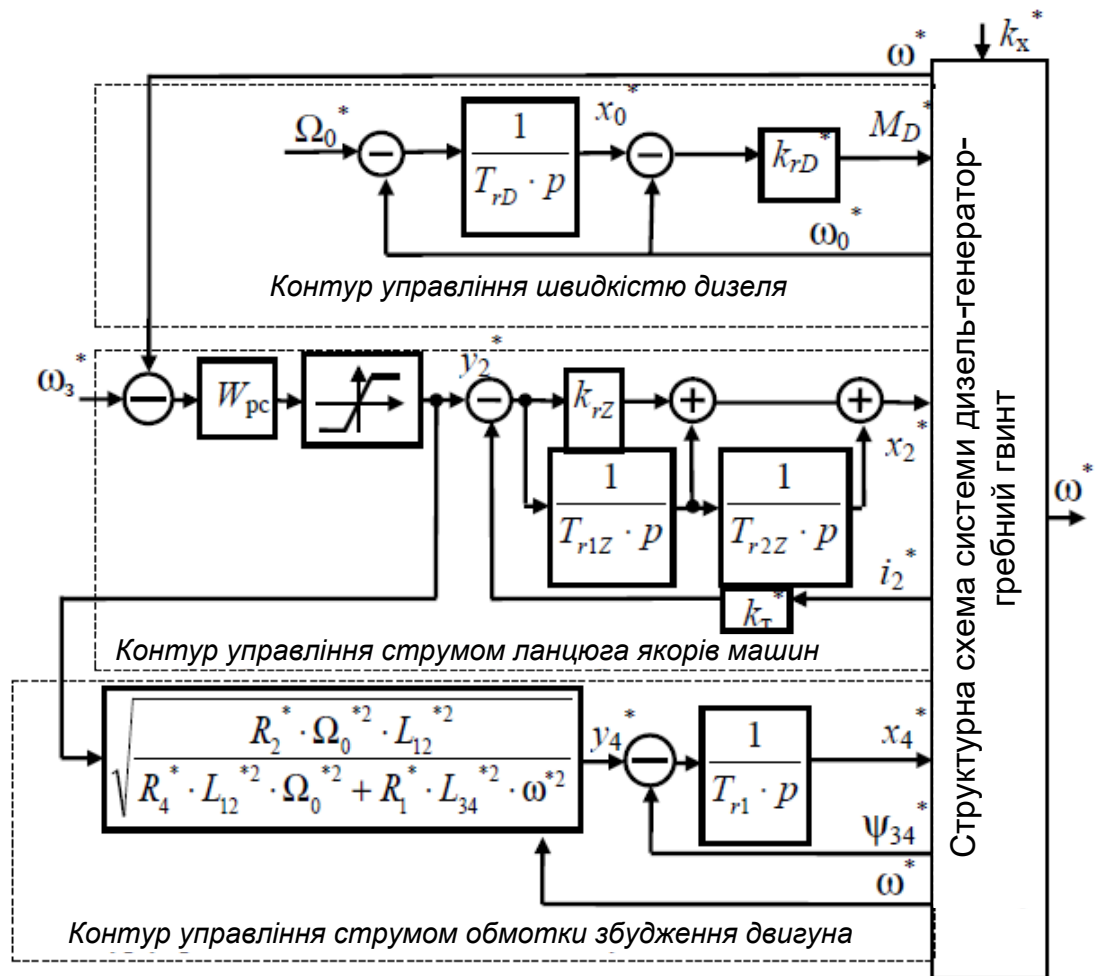


Рисунок 2.20 – Структурна схема системи оптимального управління гребною дизель-електричною установкою при задаванні швидкості гвинта

Джерело – [розроблено автором]

Висновки до розділу 2

1. Отримано систему оптимального управління ГЕУ шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна.

2. Проведено синтез оптимальних регуляторів і математичне імітаційне моделювання. Обчислення проводилося паралельно за двома системами.

Перша, система з класичним (роздільним) управлінням ГДЕУ з уніполярними машинами, коли управління виробляється за однією змінною, а інші змінні контурів підтримуються на номінальних значеннях.

Друга система, з оптимальним управлінням за критерієм мінімуму втрат енергії в каналі її перетворення від двигуна до рушія (гвинта), коли всі змінні управління підтримуються на оптимальному рівні, а перехід від одного оптимального стану до іншого відбувається за оптимальними динамічними характеристиками.

3. Удосконалено динамічну модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, яка, на відміну від існуючих, враховує наявність трьох керуючих контурів, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля, та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта, що дозволяє виконати синтез регуляторів контурів управління з заданим динамічним характеристикам.

4. Удосконалено метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою, який, на відміну від існуючих, враховує вплив на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна для підвищення енергетичної ефективності.

Основні результати, отримані у розділі, опубліковані в працях здобувачки [10, 12, 86, 128].

РОЗДІЛ 3

МЕТОД КОМПОНУВАННЯ ТА ТОПОЛОГІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ГРЕБНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

У даному розділі дисертаційної роботи отримав подальший розвиток метод компонування та топології електрообладнання гребних електричних установок, що дозволило обґрунтувати перспективний обрис судна. Проводиться побудова оптимальних за критерієм втрат енергії регуляторів управління гребних дизель-електричних установок, моделювання процесів та доведення ефективності розроблених методів [11].

3.1 Топологія та компоновка електрообладнання гребних електричних установок

Склад обладнання і схем ГЕУ.

На прикладі ГЕУ змінно-постійного струму розглянемо можливий склад обладнання установки:

- а) джерела енергії – генератори (Г) з первинними двигунами;
- б) силові напівпровідникові перетворювачі;
- в) гребні електродвигуни;
- г) збудники генераторів (ЗГ) і гребних електродвигунів;
- д) щит електроруху (ЩЕР);
- е) пульт управління електрорухом (ПЕР);
- ж) пости дистанційного управління (ПДУ);
- з) щитки сигналізації (ЩС).

Гребні електродвигуни жорстко з'єднуються з гребними валами. На гребному валу монтується валопривідний пристрій, за допомогою якого під час ремонтів і перед пуском повертається гребний вал й ротор ГЕД.

Головні генератори приводяться первинними двигунами, що

встановлюються зазвичай на загальних з ними рамах і можуть мати один або два опорних підшипника. Охолодження підшипників здійснюється від загальної системи змащення ПД.

Силові напівпровідникові перетворювачі виконуються у вигляді щита або шафи, в якому розміщені напівпровідникові вентиля (керовані або некеровані) й елементи схеми управління, захисту і контролю вентилів. Примусове охолодження (водяне або повітряне) дозволяє збільшити навантаження на вентиля і скоротити їх загальну кількість. Кращим є повітряне охолодження від окремих електроventиляторів через повітроохолоджувачі.

Збуджувачі служать для живлення обмоток збудження головних електричних машин. При індивідуальному збудженні кожен елемент живить обмотку тільки однієї машини, при груповому збудженні від одного збуджувача живляться обмотки декількох машин. Як правило, ГЕД мають індивідуальне збудження, а всі генератори одного ГЕД або контуру – групове збудження від загального пристрою. Застосовуються машинні, електромашинні і статичні збуджувачі.

Машинні збуджувачі ГЕД та генераторів контуру з'єднуються між собою і з приводним двигуном та представляють єдиний агрегат збудження.

Статичні збуджувачі вбудовуються до захисту електроруху або виконуються у вигляді окремих шаф. Резервування досягається зниженням коефіцієнту використання за струмом та напругою вентилів, що забезпечує нормальну роботу збуджувача при виході з ладу кількох вентилів або паралельних ланцюгів. Це дозволяє забезпечити високу надійність збуджувачів і спростити загальну схему управління рухом. При розробці тиристорних збуджувачів необхідно передбачати конструктивні та схемні заходи щодо зменшення їх впливу на якість напруги мережі живлення.

Щит електроруху призначений для підготовки ГЕУ до роботи, набору схем головного струму та збудження (включення до схеми електричних машин і збуджувачів), управління системою збудження і контролю за роботою ГЕУ. У щит вбудовують виборчі перемикачі ланцюга головного струму, перемикачі

агрегатів збудження, автомати живлення, захисту, блокування, сигналізації і контролю. На щиті зазвичай встановлюється мнемосхема. Якщо передбачається вахтовий метод обслуговування, в щит вбудовуються також місцевий пост управління ГЕД, перемикач постів управління та систему зв'язку.

Пульт управління електродвигуном призначений для дистанційного контролю за роботою ГЕУ й управління ГЕД. Він зазвичай вбудовується до центрального поста управління (ЦПУ). У пульт вбудовуються система зв'язку, пости управління ГЕД, перемикачі ПУ, вимірювальні прилади та апаратура сигналізації й контролю. При відсутності чергування на ЩЕР у пульті встановлюються елементи дистанційного управління комутаційними апаратами, що дозволяють виробляти дистанційний набір схеми, а також пуск і налаштування механізмів (насосів, вентиляторів), які обслуговують ГЕУ.

Пост дистанційного управління служить для управління ГЕД складом групи керманичів судна і в експлуатаційних режимах є основним постом. До складу посту входять пристрій для регулювання сигналу управління в ланцюгах збудників головних електричних машин і необхідні елементи зміни сигналізації. Пости управління виконуються в двох варіантах: суміщеними з системою зв'язку та окремим зразком.

Щитки сигналізації служать для представлення інформації про роботу ГЕУ, в них вбудовано сигнальні елементи, а за необхідності – вимірювальні прилади і мнемосхема.

Схема силового струму визначає склад і з'єднання між собою всіх елементів ланцюгу головного струму (електричні машини, контакти перемикачів, апарати захисту і регулювання, вимірювальні прилади тощо). На схемі показуються місця включення елементів схеми регулювання і наводяться режими роботи ГЕУ.

Схема збудження визначає склад і з'єднання основних і резервних збуджувачів й виборчих перемикачів. На схемі наводиться включення ручних регуляторів збудження, розрядних резисторів налаштування, елементів захисту і вимірювальних приладів ланцюгів збудження.

Схема управління і регулювання визначає склад та з'єднання постів управління, а також ланцюгів управління і зворотних зв'язків між збудниками. На схемі показуються елементи стабілізації, установчі та налагоджувальні опорні елементи, елементи захисту, блокування і сигналізації.

Схеми збудження, управління і регулювання часто об'єднуються.

Схема сигналізації визначає склад і з'єднання всіх приладів сигналізації (лампи, табло, звукові сигнали тощо) з необхідною апаратурою захисту і контролю.

Схема управління двигунами визначає склад електропневматичних вентилів та їх з'єднання з перемикачем режимів роботи або постом управління ГЕД, а також склад і з'єднання елементів захисту і сигналізації. На схемі вказуються зв'язки зі схемою управління і регулювання ГЕД.

Схема живлення допоміжних механізмів ГЕУ від загальної для судна електростанції з автоматичними вимикачами, елементами захисту та сигналізації.

Крім принципових схем, розробляється схема з'єднань (монтажна схема), що показує з'єднання складових частин проводами і кабелями, а також місця їх введення і приєднання.

Розглянемо компоновання обладнання гребної електричної установки.

Розташування елементів ГЕУ багато в чому визначається призначенням і типом судна, однак сформуємо рекомендації, загальні для всіх типів суден.

Гребні електродвигуни зазвичай розміщуються в окремому приміщенні в кормовій частині судна, але можуть розміщуватися і разом з генераторними агрегатами. У першому випадку зменшується довжина і маса валопроводу, що дозволяє скоротити сумарний обсяг машинних приміщень, а також раціонально використовувати гострі частини судна. Однак при розміщенні та виборі ГЕД необхідно передбачати можливість їх нормального обслуговування, розбирання і ремонту.

Пари масла, палива і вологи, які виникають в приміщенні, де розміщені ГЕД, у поєднанні зі щітковим пилом призводять до погіршення ізоляції, що особливо позначається на роботі машин постійного струму. Необхідно

прагнути до того, щоб ГЕД і механічне обладнання, не пов'язане безпосередньо з забезпеченням його роботи, розміщувалися у різних приміщеннях. Не потрібно розташовувати ГЕД та генераторні агрегати (особливо з дизельним приводом) в одному машинному відділенні. Якщо цього не вдається уникнути, що особливо часто трапляється на малих судах, то слід виконувати ГЕД із замкнутою системою вентиляції.

Генераторні агрегати не мають жорсткого зв'язку з гребними валами, тому можуть розташовуватися в будь-якій частині судна.

Застосування швидкохідних ГДЕУ, що мають порівняно малу масу і габарити, дозволяє розташовувати обладнання в два яруси з розміщенням генераторних агрегатів на платформах. Двох'ярусна компоновка ГЕД та дизель-генераторів у кормовій частині судна дозволяє значно скоротити загальну довжину машинних відділень (рис. 3.1).

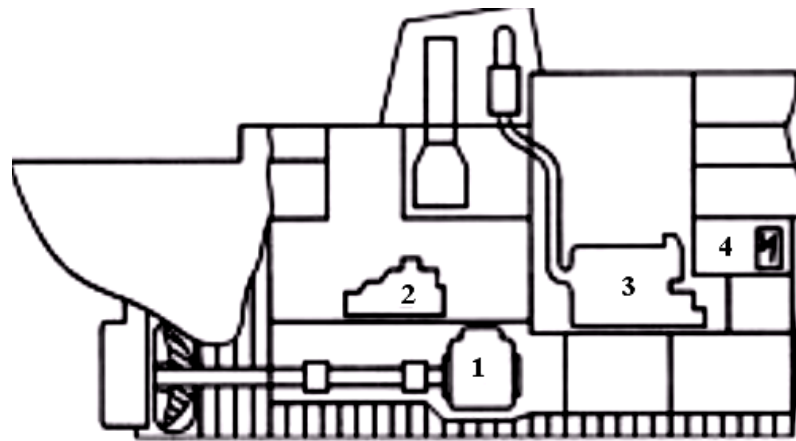


Рисунок 3.1 – Двох'ярусна компоновка гребного електричного двигуна і дизель-генераторів

1 – двигун; 2 – збуджувачі; 3 – дизель-генератор; 4 – ПУ

Джерело – [розроблено автором]

Скорочення загальної довжини машинних відділень при застосуванні ТЕГУ також може бути досягнуто шляхом двох'ярусного розміщення обладнання.

Таким чином, при розміщенні основного електрообладнання ГЕУ можливо рекомендувати [11]:

1) розміщувати ГЕД в окремих приміщеннях з урахуванням забезпечення мінімальної довжини гребного валу, при цьому поблизу ГЕД не повинні прокладатися трубопроводи, що мають фланцеві з'єднання;

2) розміщувати генераторні агрегати в окремих приміщеннях і не встановлювати на них іншого електрообладнання ГЕУ (щитів перетворювачів), для яких необхідно передбачати окремі приміщення;

3) застосовувати двох'ярусне розташування електрообладнання при достатній висоті борту і при кормовому розташуванні машинних відділень;

4) передбачати звукоізоляцію приміщень, в яких розміщуються дизель-генератори. В цих приміщеннях не повинні встановлюватися допоміжні механізми, що вимагають постійного обслуговування на ходу судна;

5) виділяти окремі приміщення для допоміжних механізмів машинної установки.

Напівпровідникові перетворювачі ланцюга головного струму не рекомендується розташовувати в дизель-генераторних приміщеннях; розміщувати їх слід разом зі щитами електроруку або в спеціальних приміщеннях безпосередньо над ГЕД. Однак в деяких випадках, особливо в ГЕУ змінно-постійного струму великої потужності, з метою скорочення довжини дротів змінного струму доцільно розміщувати силові випрямлячі безпосередньо поблизу генераторів.

Агрегати збудження та статичні збуджувачі не слід розміщувати в дизель-генераторних приміщеннях; агрегати доцільно встановлювати в приміщеннях, де розташовуються ГЕД, або в спеціальних приміщеннях. Статичні збудники розміщувати разом зі щитами електроруку або в спеціальних приміщеннях.

Щити електроруку встановлюються з урахуванням розташування трас головного струму в антишумових стінах машинних відділень, на платформах у приміщеннях, де розміщуються ГЕД, або у спеціальних приміщеннях.

Пульти управління електроруком розташовується, як правило, в ЦПУ – спеціальному приміщенні для дистанційного управління механічною установкою

судна. Іноді, при відсутності дистанційного управління апаратами головного ланцюга, для зручності управління ГЕД пульт управління встановлюють в приміщенні ЩЕР або поєднують пульт та щит в одній конструкції.

Місцевий пост управління вбудовується в щити або пульт електроруху. Команди для зміни напрямку і частоти обертання ГЕУ подаються за допомогою системи управління та зв'язку.

Пост дистанційного управління встановлюється в ходовій рубці. При цьому управління здійснюється за допомогою рукояток тумб машинного телеграфу (за відключеною схемою телеграфу). На суднах підвищеної маневреності і при великих розмірах ходової рубки в ній встановлюється кілька тумб машинного телеграфу (в тому числі обов'язково по бортах), які пов'язані між собою і з ПДУ механічною та електричною передачею. На суднах, що вимагають точного маневрування, можуть встановлюватися додаткові ПДУ в кормовій і носовій частинах. Перемикач ПДУ зазвичай розташовується в ходовій рубці; перемикач з місцевого управління на дистанційне розміщується на пульті або щитах електроруху [127].

3.2 Оптимізація системи регулювання гребної електричної установки постійного струму

Якщо дані і властивості об'єкта регулювання відомі, то завдання полягає в такому виборі і налаштуванні регулюючого пристрою, при яких керуючий на них вплив був у змозі якомога швидше і точніше, без виникнення коливань змусити регульовану величину X слідувати за керуючим впливом X_3 і нейтралізувати зміну величини X_Z . Ідеальний режим контуру регулювання був би досягнутий у тому випадку, якщо б регульована величина реагувала на зміну без запізнювання і без появи коливань. Така поведінка контуру описується рівнянням:

$$X(t) / X_3(t) = 1 \text{ або } X(p) / X_3(p) = 1.$$

Але у цьому випадку регульована величина ніяк не реагувала б на зміни збудження:

$$X(t) / X_Z(t) = 0 \text{ або } X(p) / X_Z(p) = 0.$$

Перешкодою для такої ідеальної поведінки контуру регулювання є інерційність об'єкту. Тому виникає завдання щодо розробки і застосування для даного об'єкта регулювання регулятора, з тим, щоб ліквідувати вплив інерції об'єкту настільки повно, наскільки це виявляється можливим.

$$\text{Реально: } W_3(p) = X(p) / X_3(p) \neq 1.$$

Це співвідношення відноситься до всього спектру частот від 0 до нескінченності. Вочевидь, що доцільно для частини спектру частот домогтися наближення до 1. У цьому випадку в момент стрибку вхідного сигналу (при $t \rightarrow 0$), коли найбільш різко виражені найвищі частоти спектру сигналу, неможливо домогтися того, щоб регульована величина в точності слідувала за значенням управління. Однак з подальшим розвитком перехідного процесу на перший план виступають більш низькі частоти. І якщо в цій смузі частот модуль передавальної функції приблизно дорівнює 1, то похибка регульованої величини щодо управляючої буде близькою до 0.

Оскільки модуль W_3 протягом всього перехідного процесу за можливістю швидше повинен підходити до 1, то такий прийом оптимізації називається оптимізацією настройки регулятора шляхом пригону модуля до одиниці.

Пригін модуля $W_3(t)$ характеризується тим, що передавальна функція повинна залишитися близькою до 1 навіть при $\omega \rightarrow 0$.

При аналізі контурів регулювання формуються передавальні функції такого вигляду:

$$W_3(p) = \frac{X(p)}{X_3(p)} = \frac{b_0}{a_0 + pa_1 + p^2a_2}; \quad (3.1)$$

$$W_3(p) = \frac{X(p)}{X_3(p)} = \frac{b_0 + pb_1}{a_0 + pa_1 + p^2a_2 + p^3a_3}. \quad (3.2)$$

Можна показати, що

$$b_0 = a_0; \quad b_1 = a_1. \quad (3.3)$$

Якщо у формулі (3.1) виділити дійсну частину, то для модуля передавальної функції будемо мати:

$$|W_3| = \sqrt{\frac{b_0^2}{a_0^2 - \omega^2(2a_0a_2 - a_1^2) + \omega^4a_2^2}}. \quad (3.4)$$

За вимогою, що при низьких частотах при низьких частотах $|W_3| = 1$, то з урахуванням (3.3) отримаємо: $a_1^2 = 2a_0a_2$. Це перша умова оптимізації.

Застосовуючи аналогічні прийоми до (3.2), отримаємо:

$$W_3(\omega) = \sqrt{\frac{b_0^2 + \omega^2b_1^2}{a_0^2 - \omega^2(2a_0a_2 - a_1^2) - \omega^4(2a_1a_2 - a_2^2) + \omega^6a_3^2}}. \quad (3.5)$$

Для пригонки (3.5) до 1 необхідно виконати умову [118]:

$$a_1^2 = 2a_0a_2, \quad a_2^2 = 2a_0a_3.$$

Якщо ці умови оптимізації виконуються, то формули (3.4) та (3.5) матимуть вигляд:

$$|W_3| = \sqrt{\frac{1}{1 + \omega^4 \left(\frac{a_2}{a_0}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1 + \omega^2 \left(\frac{a_1}{a_0}\right)^2}{1 + \omega^6 \left(\frac{a_3}{a_0}\right)^2}}. \quad (3.6)$$

Пропорційний та інтегральний регулятор.

Виберемо за об'єкт регулювання інерційну ланку першого порядку:

$$W_{об}(p) = K_{об} \frac{1}{1 + pT}. \quad (3.7)$$

Застосуємо пропорційний регулятор. Тоді:

$$W_0(p) = K_p K_{об} \frac{1}{1 + pT};$$

$$W_3(p) = \frac{K_p K_{об} \frac{1}{1 + pT}}{1 + K_p K_{об} \frac{1}{1 + pT}} = \frac{K_p K_{об}}{K_p K_{об} + 1 + pT}.$$

Отже,

$$\frac{X_3(p) - X(p)}{X_3(p)} = 1 + W(p) = \frac{1 + pT}{K_p K_{об} + 1 + pT} \quad (3.8)$$

при $t \rightarrow \infty$

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{X_3 - X}{X_3} = \frac{1}{K_p K_{об} + 1}.$$

Таким чином, статистична помилка регулювання буде тим менше, чим більше посилення в контурі $K_p K_{об}$.

За необхідності уникнення похибок, які властиві П-регулятору, звернемося до інтегральних ланок:

$$W_0 = \frac{1}{pT} K_{об} \frac{1}{1 + pT}. \quad (3.9)$$

Тоді

$$W_3 = \frac{K_{06}}{K_{06} + pT + p^2 T_1 T}, \quad (3.10)$$

а помилка дорівнює

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{X_3 - X}{X_3} = 0. \quad (3.11)$$

Нехай регулювання необхідно здійснювати без статичної помилки. Необхідно I -регулювання. Для компенсації великої інерційності необхідно надати регулятору пропорційно-інтегральні властивості:

$$W_0(p) = K_p \frac{1 + pK_{i3}}{pK_{i3}} K_{06} \frac{1}{1 + pT}, \quad (3.12)$$

де $T \gg a$. Умова компенсації $T_u = T$. Тоді

$$W_0(p) = K_p \frac{K_{06}}{pK_{i3}} \cdot \frac{1}{1 + p\sigma}; \quad (3.13)$$

$$W_0(p) = \frac{K_p K_{06}}{K_p K_{06} + pT_{i3} + p^2 T_{i3} \sigma}, \quad (3.14)$$

де $a_0 = K_p K_{06}$; $a_1 = T_{i3}$; $a_2 = T_{i3} a$.

Умови оптимізації: $a_1^2 = 2 \cdot a_0 \cdot a_2$; $T_{i3}^2 = 2 \cdot K_p \cdot K_{06} \cdot T_{i3} \cdot \sigma$; звідки

$$K_p = \frac{T_{i3}}{2 \cdot K_{06} \cdot \sigma}.$$

$$W_3 = \frac{\frac{T_{i3}}{2 \cdot K_{06}} K_{06}}{\frac{T_1}{2 \cdot K_{06}} K_{06} + pT_{i3} + p^2 T_{i3} \sigma} = \frac{1}{1 + p2\sigma + p^2 2\sigma^2}. \quad (3.15)$$

Отже, передавальна функція оптимізованого контуру визначається

тільки амплітудою малих постійних часу. Рівняння перехідного процесу відповідає цій характеристиці W_3 :

$$X_1(t) = X(t) + 2\sigma \frac{dX(t)}{dt} + 2\sigma^2 \frac{d^2X(t)}{dt^2}. \quad (3.16)$$

При стрибку:

$$f(t) = \frac{X(t)}{X_3} = 1 - e^{\frac{1}{2\sigma}} \left(\cos \frac{1}{2\sigma} + \sin \frac{1}{2\sigma} \right). \quad (3.17)$$

Відповідна до цього процесу крива $X(t)$ наведена на рисунку 3.2.

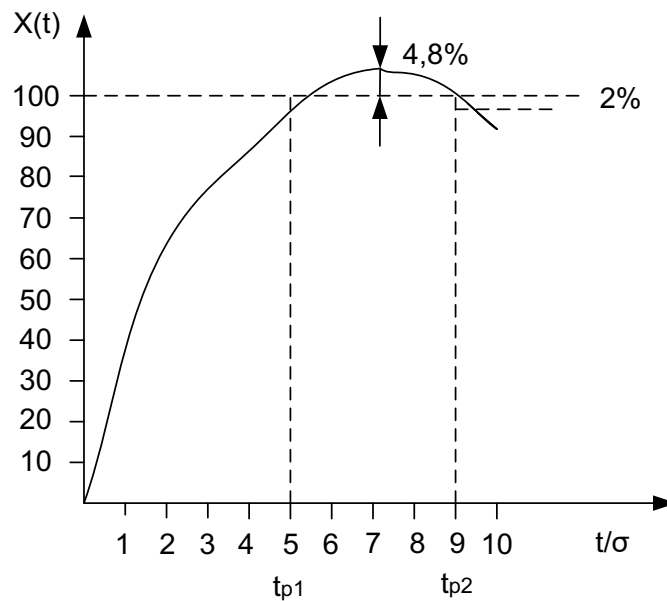


Рисунок 3.2 – Перехідний процес при стрибкоподібній зміні вхідного сигналу
Джерело – [розроблено автором]

Отримана крива перехідного процесу не є оптимальною за швидкодією і перерегулюванням. Дійсно, якщо

$$W_3 = \frac{K_p K_{06}}{K_p K_{06} p T_{i3} + p^2 T_{i3} \sigma} = \frac{1}{1 + p \frac{T_{i3}}{K_p K_{06}} + p^2 \frac{T_{i3} \sigma^2}{K_p K_{06}}} = \frac{1}{1 + \beta p + \alpha p^2};$$

$$\frac{X_3}{X} = \frac{1}{1 + \beta p + \alpha p^2};$$

$$X_3 = X + \beta \frac{dX}{dt} + \alpha \frac{d^2 X}{dt^2},$$
(3.18)

то рішення такого рівняння:

$$X(t) = e^{-\frac{t}{2}at} \left(C_1 \cos \frac{1}{2}at + C_2 \sin \frac{1}{2}at \right) = Ae^{-\frac{t}{2}at} \sin \frac{1}{2}\lambda(t - B) \quad (3.19)$$

при $\lambda^2 = 4b - a^2 > 0$ $\lambda^2 = 4b - a^2 > 0$.

$\xi = \beta/2\sqrt{\alpha}$ – коефіцієнт демпфірування.

При $\xi = 1$, $4b = a^2$ залежність (3.19) вироджується в експоненту:

$$a = \frac{\beta}{\alpha}; b = \frac{1}{\alpha},$$

тобто

$$X(t) = e^{-\frac{t}{2}at} (C_1 t + C_2). \quad (3.20)$$

Якщо в ланцюжку інерційної ланки першого порядку є дві великі інерційності, то для їх компенсації регулятор повинен володіти двома значеннями часу попередження, тобто повинен бути ПІД-регулятор.

Рівняння електромеханічної рівноваги двигуна постійного струму (ДПС) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} U - E &= iR + L \frac{di}{dt}; \\ E &= c' \omega \Phi; \\ M &= c' i \Phi; \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

де U – напруга, що прикладається до якоря двигуна; E – електрорушійна сила ГЕД; ω – кутова швидкість; Φ – потік двигуна; M – електромагнітний момент, що розвивається двигуном; J – момент інерції, M_c – момент опору, c' – конструктивна постійна; R , L – відповідно активний опір та індуктивність якорного ланцюга.

В операторній формі система (3.21) може бути наведена [118] як:

$$\left. \begin{aligned} I(p) &= \frac{U - c' \omega \Phi}{R(1 - pT)}; \\ E &= c' \omega \Phi; \\ M &= c' i \Phi; \\ \frac{\omega}{M - M_c} &= \frac{1}{Jp}, \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

де $T = \frac{L}{R}$.

Система (3.22) дозволяє структурну схему ДПС подати так (рис. 3.3).

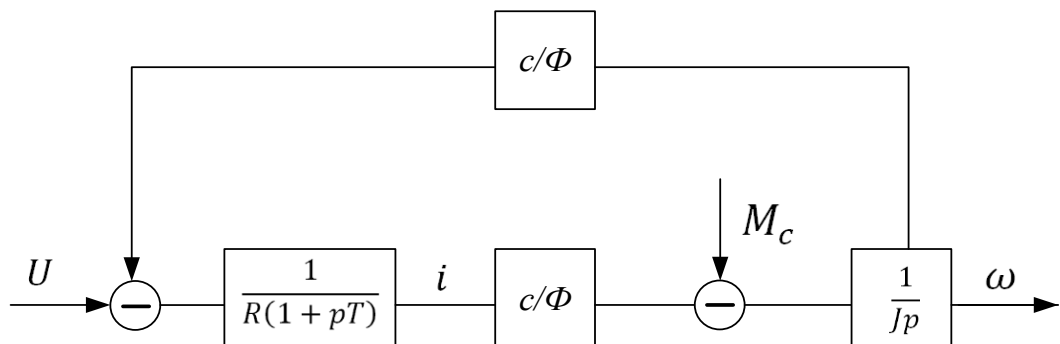


Рисунок 3.3 – Структурна схема двигуна постійного струму

Джерело – [розроблено автором]

Введемо змінну $T_M = \frac{R_E}{c/2\Phi}$ як електромеханічну постійну часу. Тоді структурна схему ДПС буде мати вигляд (рис. 3.4).

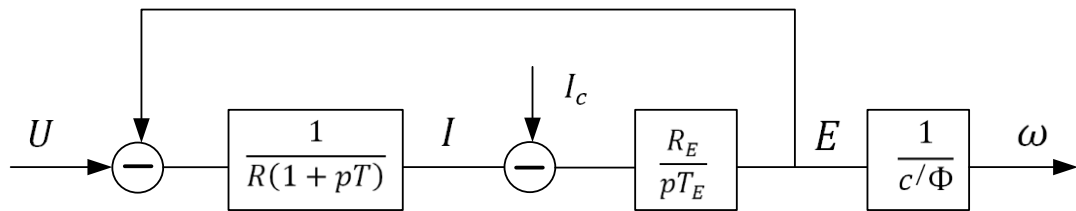


Рисунок 3.4 – Структурна схема двигуна постійного струму

Джерело – [розроблено автором]

У цій структурі точка докладання збудження (M_c) перенесена в точку формування струму (I_c), що визначається необхідністю контролювати струм у процесі роботи електроприводу.

Відповідна структура справедлива для однозонного регулювання, коли швидкість ДПС регулюється зміною напруги на якорі при номінальному потоці збудження.

При регулюванні збудження схему замикання ланцюга збудження можна представити так (рис. 3.5):

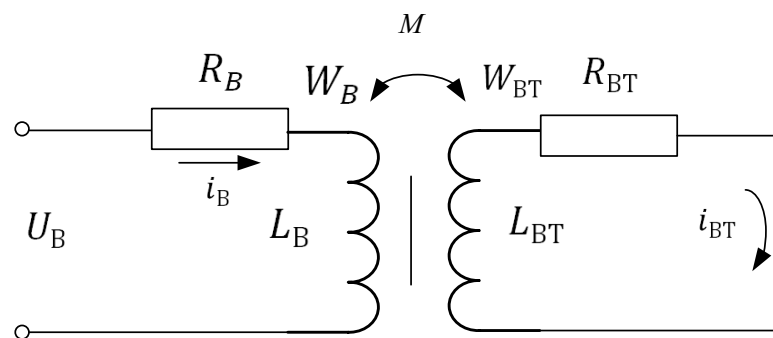


Рисунок 3.5 – Замикання ланцюга збудження

Джерело – [розроблено автором]

У цій схемі замкнутий магнітно-пов'язаний контур являє собою контур вихрових струмів.

Рівняння, що визначають струм збудження, можуть бути записані так:

$$\left. \begin{aligned} U_B &= i_B R_B (1 + pT_B) - pM_{i_{BT}}; \\ 0 &= i_{BT} R_{BT} (1 + pT_{BT}) - pM_{i_0}. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

У формулі (3.23) $M = k\sqrt{L_1 L_{BT}}$; $\frac{L_B}{L_{BT}} = \left(\frac{W_B}{W_{BT}}\right)^2$, де L_B , L_{BT} – відповідно індуктивності контурів струму збудження і вихрових струмів; W_B , W_{BT} – витки обмотки збудження та еквівалентного контуру вихрових струмів; k – коефіцієнт взаємодукції.

Відповідно до (3.23) маємо:

$$U_B = i_B \left[R_B (1 + pT_B) - \frac{M^2 p^2}{R_{BT} (1 + pT_{BT})} \right]. \quad (3.24)$$

Якщо покласти $k = 1$, тоді:

$$\frac{M^2 p^2}{R_{BT} (1 + pT_{BT})} = \frac{R_B p^2 T_{BT} T_B}{1 + pT_{BT}}. \quad (3.25)$$

При цьому формула (3.24) перетвориться до вигляду

$$U_B = i_B \left[R_B (1 + pT_B) - \frac{R_B p^2 T_{BT} T_B}{1 + pT_{BT}} \right] \quad (3.26)$$

або

$$i_B = \frac{U_B}{R_B} \cdot \frac{1 + pT_{BT}}{(1 + pT_{B\Sigma})}, \quad (3.27)$$

де $T_{B\Sigma} = T_B + T_{BT}$.

Приймаючи, що $E = c' \omega \Phi$, а $F = i_B W_B - i_{BT} W_{BT}$, можна записати:

$$\begin{aligned}
 F &= i_B \left[W_B - \frac{MW_{BT}}{R_{BT}(1 + pT_{BT})} \right] = i_B W_B \left[1 - \frac{pT_{BT}}{R_{BT}(1 + pT_{BT})} \right] = \\
 &= i_B W_B \frac{1}{1 + pT_{BT}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

Потік збудження ДПС позначимо так:

$$\Phi = \frac{K_\Phi i_B}{1 + pT_{BT}}, \tag{3.29}$$

де $K_\Phi = \frac{\Delta\Phi}{\Delta F} W_B$ визначається кривою намагнічування машини. Тод:

$$E = K_\Phi \cdot c' \cdot \omega \cdot i_B \cdot \frac{1}{1 + pT_{BT}}. \tag{3.30}$$

Загальна структурна схема ДПС за каналом збудження буде виглядати так (рис. 3.6).

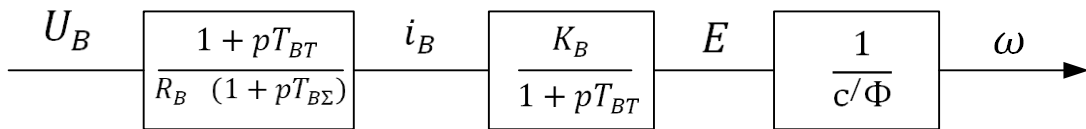


Рисунок 3.6 – Структурна схема ДПС за каналом збудження

Джерело – [розроблено автором]

Однозонне регулювання швидкості електроприводу постійного струму. При однозонному регулюванні зміна швидкості ДПС здійснюється застосуванням напруги на якорі при номінальному потоці збудження.

Відповідно до принципів підпорядкованого регулювання система ДПС розбивається на дві підсистеми з регульованими параметрами – струмом (внутрішній контур) та швидкістю (основний контур регулювання). Кожному контуру надається у відповідність свій регулятор. Оптимізація починається з

внутрішнього контуру – контуру струму. Якщо в якості перетворювача, який живить якір двигуна, використовується напівпровідниковий випрямляч (НПВ), то структурну схему ДПС з НПВ наведено на рис. 3.7.

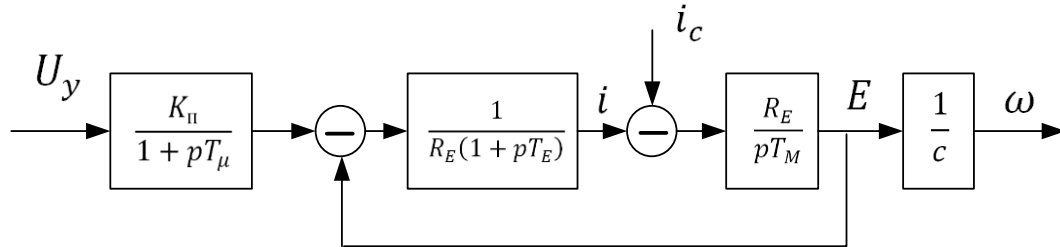


Рисунок 3.7 – Структурна схема вентильного електроприводу постійного струму з однозонним регулюванням
Джерело – [розроблено автором]

На рис. 3.7 позначено: R_E – еквівалентний опір якірного ланцюга; K_{Π} – коефіцієнт передачі НПВ; $T_{\mu} = (0,06 \div 0,01)$ – постійна часу НПВ.

Проведемо оптимізацію контуру струму.

На даній схемі розірваний зворотний зв'язок по ЕРС, зміни якої більш інерційні, ніж процеси в контурі струму, які визначаються T_E .

Величини R_E та T_E визначаються загальним опором та індуктивностями ланцюга якоря двигуна.

Як правило $T_{\mu} \ll T_E$, тобто контур струму має дві апериодичні ланки з постійними часу, що істотно відрізняються.

Вочевидь, що для компенсації більшої постійної часу та додавання астатичних властивостей контуру струму необхідно застосувати ПІ – регулятор струму, тобто:

$$W_{pT} = K_{pT} \cdot \frac{1 + pT_{it}}{pT_{it}}. \quad (3.31)$$

Тоді передавальна функція розімкнутого контуру струму прийме вигляд:

$$W_{\text{рк}} = K_{\text{пт}} \cdot \frac{1 + pT_{it}}{pT_{it}} \cdot \frac{K_{\text{п}}}{1 + pT} \cdot \frac{1}{R_E(1 + pT_E)}. \quad (3.32)$$

Передавальна функція замкнутого контуру струму за умови компенсації T_E (тобто $T_E = T_{it}$) буде дорівнювати:

$$W_{\text{зк}} = \frac{W_{\text{БК}}}{1 + W_{\text{БК}}K_T} = \frac{K_{\text{пт}} \cdot K_{\text{п}} \cdot \frac{1}{R_E}}{p^2 \cdot T_i \cdot T + p \cdot T_i + K_T \cdot K_{\text{рс}} \cdot K_{\text{п}} \cdot \frac{1}{R_E}}. \quad (3.33)$$

Позначивши $a_0 = K_T \cdot K_{\text{пт}} \cdot K_{\text{п}} \cdot \frac{1}{R_E}$; $a_1 = T_i$; $a_2 = T_i \cdot T$ й беручи до уваги умови оптимізації контуру ($2 \cdot a_1^2 = a_0 a_2$), отримаємо:

$$K_{\text{пт}} = \frac{T_E R_E}{2K_{\text{п}} \cdot K_T \cdot T}. \quad (3.34)$$

Підставивши (3.34) до (3.33), отримаємо передавальну функцію оптимізованого контуру струму:

$$W_{\text{opt}} = \frac{1/K_T}{1 + 2pT + 2p^2T^2}. \quad (3.35)$$

Отже, передавальну функцію регулятора струму можливо представити як:

$$W_{\text{пт}} = \frac{T_E R_E}{2K_{\text{п}} \cdot K_T \cdot T} \cdot \frac{1 + pT_E}{pT_E}. \quad (3.36)$$

Проведемо оптимізацію контуру швидкості.

До контуру швидкості оптимізований контур струму увійде дещо спрощеним. Нехтуємо членами вищого порядку і отримуємо:

$$W_{opt} = \frac{1/K_T}{2pT_\mu} = \frac{1/K_T}{1 + pT_T}, \quad (3.36)$$

де $T_T = 2T_\mu$.

Оптимізовану структурну схему контуру швидкості наведено на рис. 3.18.

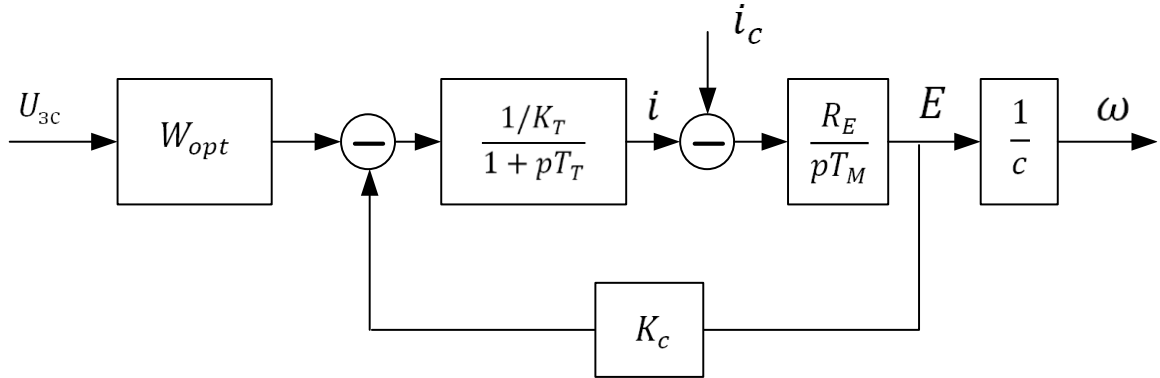


Рисунок 3.8 – Структурна схема контуру швидкості

Джерело – [розроблено автором]

Пропорційний регулятор має вигляд: $W_{pc} = K_{pc}$. У цьому випадку передавальна функція розімкнутого контуру дорівнює:

$$W_{pкс} = K_{pc} \cdot \frac{\frac{1}{K_T}}{1 + pT_T} \cdot \frac{R_E}{pT_M c}. \quad (3.37)$$

Передавальна функція замкнутого контуру швидкості:

$$W_{зкс} = \frac{W_{opt}}{1 + W_{opt}K_c} = \frac{K_{pc} \cdot R_E \cdot \frac{1}{K_T} \cdot \frac{1}{c}}{p^2 \cdot T_M \cdot T_T + pT_M + K_{pc}R_E \cdot K_c \cdot \frac{1}{K_T} \cdot \frac{1}{c}}. \quad (3.38)$$

Позначивши $a_0 = K_{pc} \cdot R_E \cdot \frac{1}{K_T} \cdot \frac{1}{c}$; $a_1 = T_M$; $a_2 = T_M \cdot T_T$ й беручи до уваги умови оптимізації контуру, що визначається виразом $2 \cdot a_1^2 = a_0 a_2$, формула

(3.38) дозволяє визначити K_{pc} :

$$K_{pc} = \frac{T_M K_T c}{2T_M \cdot R_E \cdot K_c} \cdot \quad (3.39)$$

Підставивши (3.38) до (3.39), отримаємо формулу оптимізованої передавальної функції замкненої за швидкістю системи

$$W_{зт(opt)} = \frac{1/K_c}{1 + 2pT_T + 2p^2T_T^2} \quad (3.40)$$

яка відповідає налаштуванню контуру на модульний оптимум та кривої перехідного процесу при стрибку напруги.

Загальна структурна схема електроприводу з однозонним регулюванням швидкості наведено на рис. 3.9.

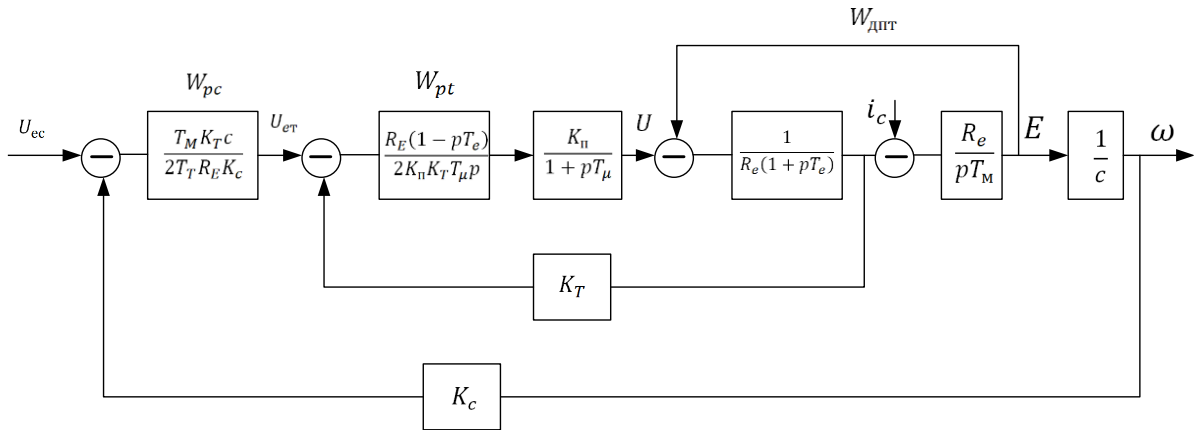


Рисунок 3.9 – Структурна схема оптимізованої системи електроприводу постійного струму

Джерело – [розроблено автором]

При цьому статизм системи дорівнює:

$$\lim_{p \rightarrow 0} (1 - W_{зт(opt)} \cdot K_c) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(1 - \frac{1}{1 + 2pT_M + 2p^2T_M^2} \right) = 0.$$

При визначенні статизму за збудженням необхідно вхідним впливом прийняти i_c та $U_{zc} = 0$. Тоді структурна схема матиме вигляд (рис 3.10).

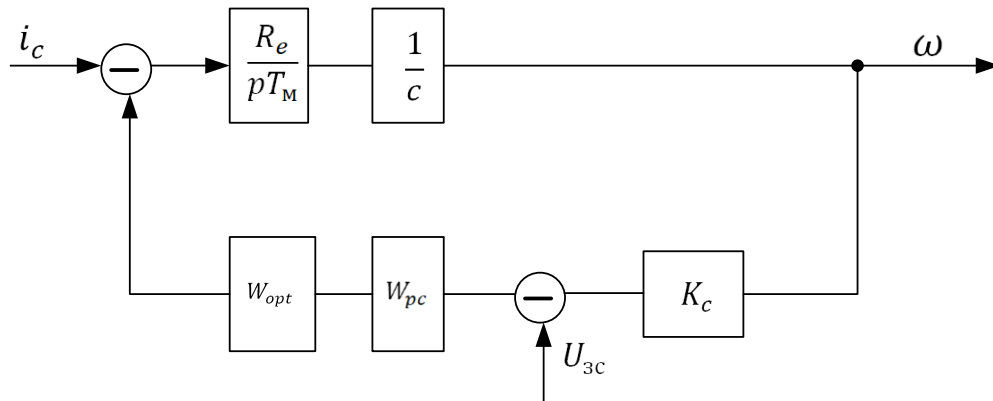


Рисунок 3.10 – Структурна схема електроприводу при визначенні статизму за збудженням

Джерело – [розроблено автором]

Швидкісна помилка (Δ) при застосуванні статичного навантаження (Δ/c) визначається формулою:

$$\Delta = |W_{зт} K_c \Delta i_c|, \quad (3.41)$$

де $W_{зт}$ – передавальна функція за збудженням.

Статична помилка має вигляд:

$$\Delta_{ст} = \lim_{p \rightarrow 0} W_{зт} K_c \Delta i_c. \quad (3.42)$$

Підставляючи (3.40) до (3.42), отримаємо:

$$\Delta_{ст} = \frac{R_e}{c} \frac{2T_T}{T_m} \Delta i_c. \quad (3.43)$$

Таким чином, статична помилка при застосуванні до валу двигуна

моменту опору Δi_c у $T_m/2T_T$ разів менше, ніж у розімкненій системі.

Побудуємо пропорційно-інтегральний регулятор. У цьому випадку передавальна функція регулятора дорівнює:

$$W_{pc} = K_{pc} \frac{1 + pT_{ic}}{pT_{ic}}. \quad (3.44)$$

Передавальна функція розімкненої за швидкістю системи:

$$W_{bc} = \frac{W_{pc}}{K_T(1 + pT_T)} \cdot \frac{R_e}{p \cdot c \cdot T_u}. \quad (3.45)$$

Відповідно, передавальна функція замкнутої системи дорівнює:

$$W_{3c} = \frac{K_{pc} R_e (1 + pT_{ic}) \frac{1}{K_T}}{p^3 \cdot T_{ic} \cdot T_T \cdot T_M + p^2 \cdot c \cdot T_{ic} T_M + K_{pc} \cdot K_c \cdot R_e \cdot \frac{1}{K_T} (1 + p \cdot T_{ic})}. \quad (3.46)$$

Позначивши $a_3 = T_{ic} \cdot T_T \cdot T_M$; $a_2 = c \cdot T_{ic} T_M$; $a_1 = T_{ic} \cdot K_{pc} \cdot K_c \cdot R_e \cdot \frac{1}{K_T}$ і $a_0 = K_{pc} \cdot K_c \cdot R_e \cdot \frac{1}{K_T}$, умови оптимізації такого контуру можна записати так:

$$\begin{cases} a_1^2 = 2a_0a_2; \\ a_2^2 = 2a_1a_3. \end{cases} \quad (3.47)$$

Рішення системи (3.47) дозволяє отримати:

$$\begin{aligned} K_{pc} &= \frac{c \cdot T_M \cdot K_T}{2 \cdot T_T \cdot R_e \cdot K_c}; \\ T_{ic} &= 4 \cdot T_M. \end{aligned} \quad (3.48)$$

Підставляючи знайдені за умовами оптимізації (3.48) до (3.46), отримаємо рівняння передавальної функції оптимізованого контуру швидкості:

$$W_{zc(opt)} = \frac{\frac{1}{K_c} (1 + 4T_T)}{8p^3 \cdot T_T^3 + 8p^2 \cdot T_T^2 + 4pT_T}. \quad (3.49)$$

Таким чином, поведінка оптимізованого контуру швидкості визначається тільки малою постійною часу T_T .

При цьому крива перехідного процесу при стрибку буде відповідати симетричного оптимуму з перерегулюванням, який дорівнює 43,4%.

Систему з ПІ-регуляторами струму та швидкістю двохразово інтегруємо й отримаємо статизм другого порядку.

Наявність у системі великого (43,4%) перерегулювання є неприйнятним для регульованого електроприводу. Одним з варіантів зниження перерегулювання в такій системі є включення в тракт фільтру з передавальної функцією $W_\phi = 1/(1 + 4T_T)$, що компенсує дію форсуючої ланки у $W_{zc(opt)}$.

У такому випадку відбувається згладжування вхідного сигналу, перерегулювання знижується до 8,1%, але збільшується час відпрацювання завдання управління електроприводом.

3.3 Моделювання та аналіз режимів оптимального управління гребною дизель-електричною установкою за критерієм мінімізації втрат енергії

Порівнюємо режим оптимального управління з найбільш розповсюдженим режимом, коли магнітний потік у машинах та швидкість дизеля підтримують постійним $\psi_{12}^* = \psi_{34}^* = 1$, $\omega_0^* = 1$ – класичним режимом роздільного управління. Для цього побудована модель ГДЕУ з уніполярними машинами і системи управління з використанням технології комп'ютерного моделювання динамічних

систем на базі програми Simulink, що є додатком пакета MATLAB [22].

Моделювання режимів роботи ГДЕУ здійснюється в часовій області в абсолютних значеннях (секунди), всі інші параметри задані у відносних одиницях. При русі судна у вільній воді звичайно використовуються два технологічних режими роботи гребної установки: режими економічного ходу та повного ходу. Режим повного ходу судна з повною (крейсерською) швидкістю використовується не часто. Основним технологічним режимом роботи ГДЕУ є режим економічного ходу, коли швидкості обертання вала ГЕД лежать у діапазоні від 50 до 80% від номінальної швидкості [66].

При моделюванні в середовищі MATLAB [22] був створений файл параметризації, що задає значення і залежності параметрів гребної дизель-електричної установки й системи управління.

Моделювання процесів проводилося паралельно по двох моделях з однаковим задаючим впливом (рис. 3.11).

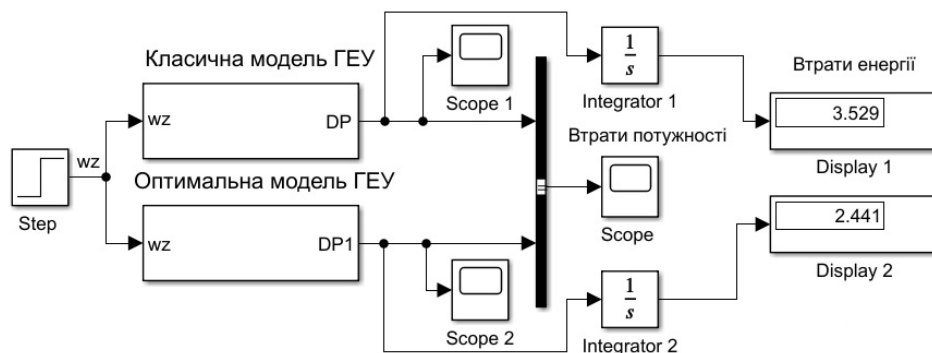


Рисунок 3.11 – Загальна схема систем для моделювання пуску гребної дизель-електричної установки в класичному (роздільному) й оптимальному режимі роботи

Джерело – [розроблено автором]

При аналізі поведінки змінних станів системи управління ГЕУ було проведено порівняння значень втрат енергії у різних режимах управління. Режим оптимального управління було зіставлено режим роздільного

керування, коли швидкість обертання дизеля w_0 та струм намагнічування ГЕД i_4^* підтримуються на номінальному рівні. За результатами моделювання отримані перехідні характеристики втрат гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами (рис. 3.12).

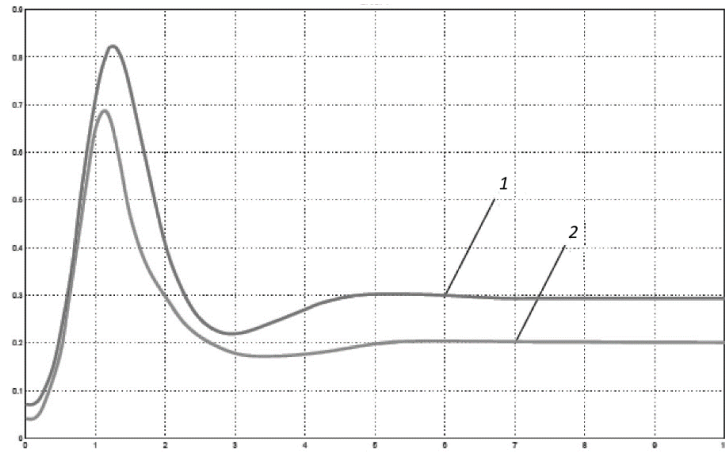


Рисунок 3.12 – Перехідна характеристика втрат ГЕУ з уніполярними машинами: 1 - втрати при класичному роздільному управлінні; 2 - втрати при оптимальному керуванні

Були побудовані структурна схема класичного роздільного управління ГДЕУ з уніполярними машинами (рис. 3.13) при підтримці швидкості обертання дизеля ω_0^* та струмом обмеження ГЕД i_4^* на номінальному рівні, а також схема оптимального управління при підтримці швидкості обертання дизеля та струму намагнічування ГЕД на оптимальних значеннях (рис. 3.14).

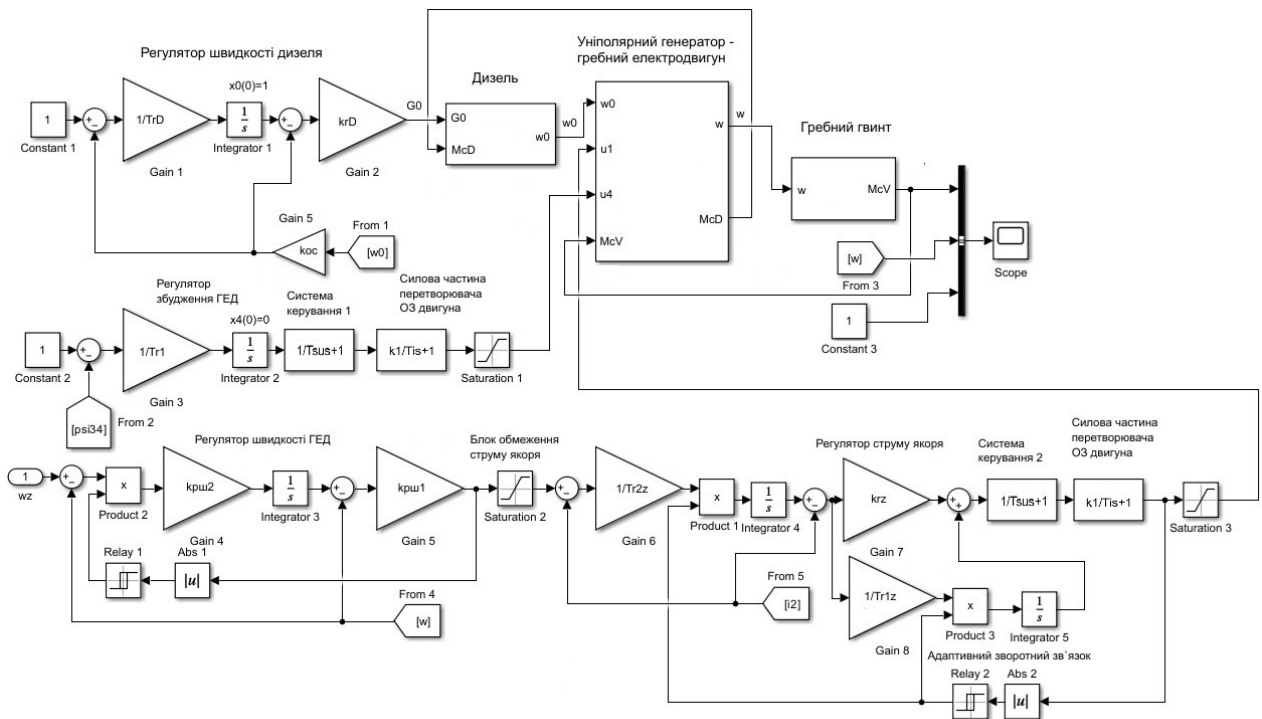


Рисунок 3.13 – Структурна схема класичного (роздільного) управління гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами
Джерело – [розроблено автором]

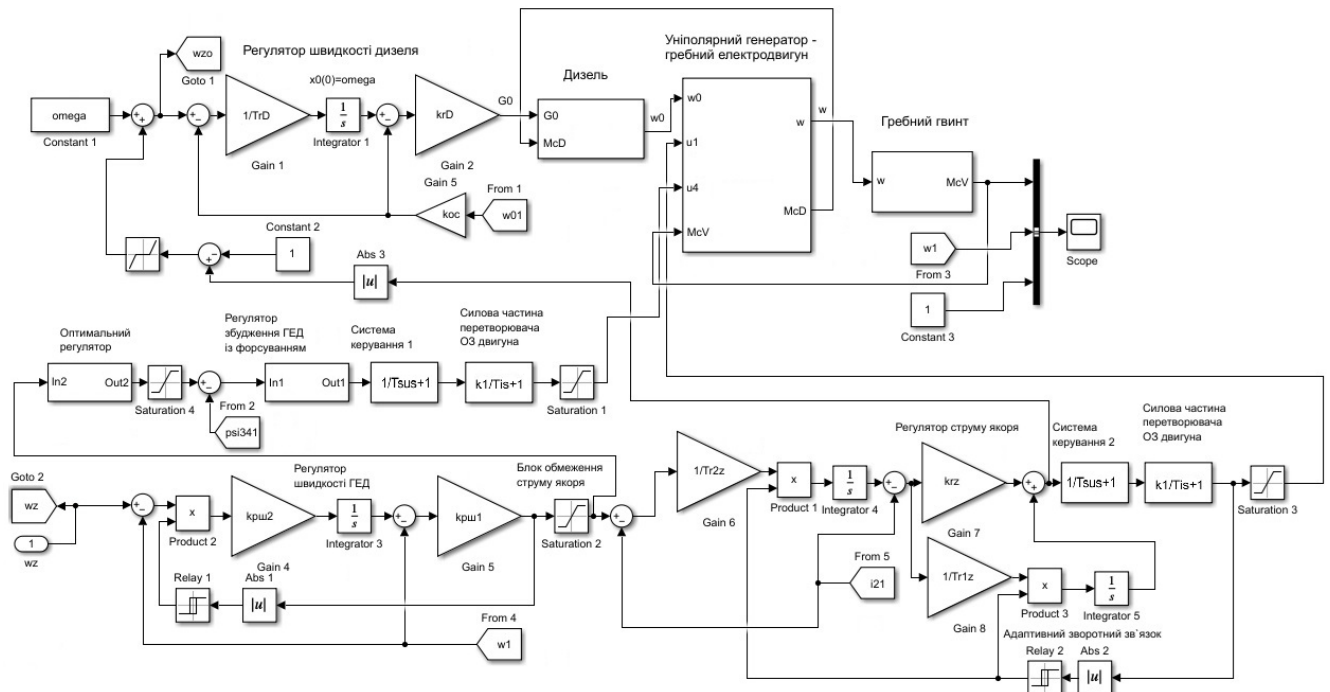


Рисунок 3.14 – Структурна схема оптимального управління гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами
Джерело – [розроблено автором]

Основні елементи системи представлені у вигляді блоків, моделі яких були розглянуті вище. Так, блок структурної схеми моделі системи уніполярний генератор – гребний електродвигун наведений на рис. 3.15.

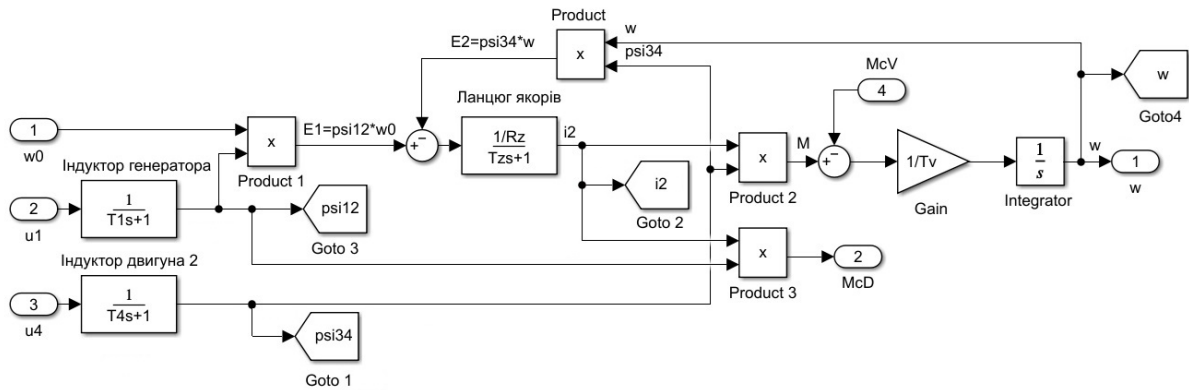


Рисунок 3.15 – Блок структурної схеми моделі системи уніполярний генератор – гребний електродвигун
Джерело – [розроблено автором]

Отримано перехідні характеристики змінних стану системи при різному значенні задаючого впливу (рис. 3.16).

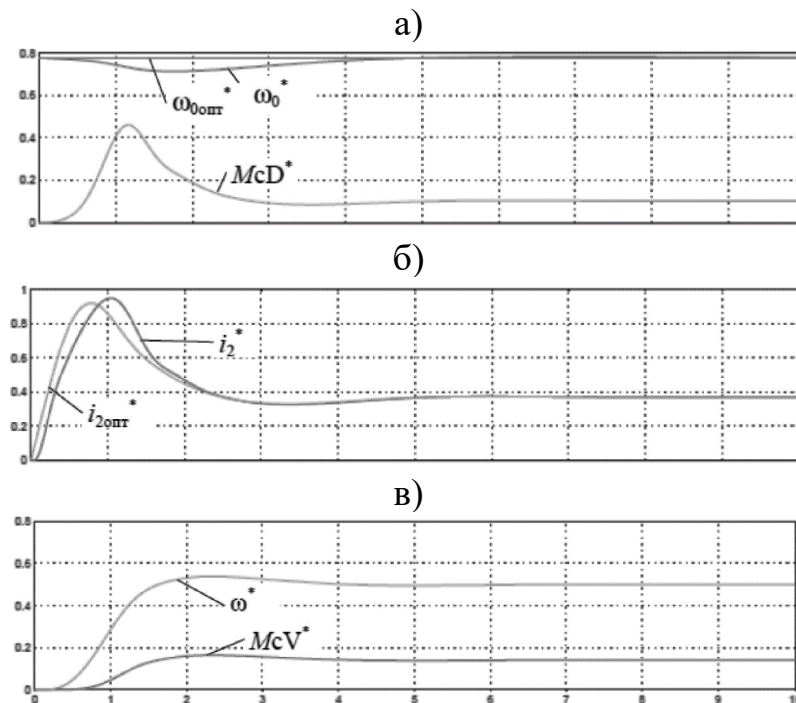


Рисунок 3.16 – Перехідні характеристики змінних станів ГЕУ з уніполярними машинами: а – реакція дизель-генератора; б - струм якорів уніполярних машин; в – вихідні характеристики ГЕД

При аналізі порівнювалися основні критерії управління (сумарні втрати енергії і потужності) і поведінка цільової функції управління (момент на валу та швидкість гвинта). Отримано перехідні характеристики змінних станів при різному значенні задаючого впливу. Усі змінні стани наведені у відносному вигляді.

Відповідно до представлених результатів, можна зробити висновок про ефективність оптимального управління ГДЕУ з уніполярними машинами.

При цьому в режимі оптимального управління без обмеження змінні стани системи на малих швидкостях обертання гвинта спостерігаються менші втрати енергії як у динамічному, так і в статичному (сталому) режимах.

При пуску до швидкості $\omega=0,8$ у динаміці спостерігається короткочасний режим, коли втрати при оптимальному управлінні порівнюється з втратами при класичному управлінні. Це пояснюється перебуванням змінних станів у зоні обмеження та динамічних помилок управління. Розглянемо залежності втрат від швидкості обертання гвинта в сталому режимі для класичного та оптимального управління при роботі гвинта у вільній воді та у швартовому режимі (рис. 3.17).

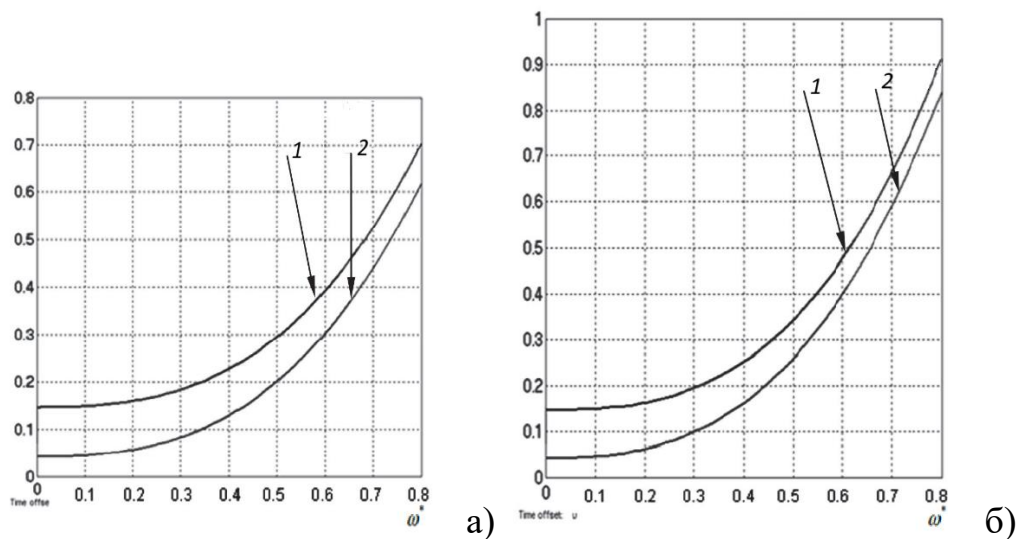


Рисунок 3.17 – Залежність втрат від швидкості обертання гвинта в сталому режимі:

а) робота гвинта у вільній воді; б) робота гвинта у швартовому режимі

Джерело – [розроблено автором]

На рис. 3.17 позначено 1 – втрати при роздільному управлінні, 2 – втрати при оптимальному управлінні. У цілому, у сталих і динамічних режимах при заданій швидкості обертання гвинта ω менш номінальної, система оптимального управління підтримує втрати енергії в ГДЕУ з уніполярними машинами на мінімальному рівні. При збільшенні швидкості обертання гвинта втрати квадратично збільшуються та у номінальному режимі швидкості обертання наближаються до 1. При цьому ефективність оптимального управління зберігається у всьому діапазоні регулювання і складає від 5 до 13%, що і відображає економію енергії.

Таким чином, можна зробити узагальнюючий висновок, що система управління ГДЕУ, розроблена у дисертаційній роботі, дозволяє отримати ефект, що полягає у мінімізації витрат енергії, що відповідає меті роботи.

Висновки до розділу 3

1. Отримано систему оптимального управління ГЕУ шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин й подачу палива до теплового двигуна.

2. Побудовані регулятори, що згладжують вхідний сигнал, а перерегулювання знижується до 8,1%.

3. Отримав подальший розвиток метод компоновання та топології електрообладнання гребних електричних установок, що дозволило обґрунтувати перспективний обрис судна.

4. Проведено синтез оптимальних регуляторів та математичне імітаційне моделювання. Обчислення проводилося паралельно за двома системами. Перша, система з класичним (роздільним) управлінням гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами, коли управління виробляється по одній змінній, а інші змінні контурів підтримуються на номінальних значеннях. Друга система, з оптимальним управлінням за критерієм мінімуму втрат енергії в каналі її перетворення від двигуна до рушія (гвинта), коли всі змінні управління підтримуються на оптимальному рівні, а перехід від одного оптимального стану до іншого відбувається по оптимальним динамічним характеристикам.

5. Відповідно до представлених результатів доведено ефективність оптимального управління гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами. Застосування оптимального управління дозволяє зменшити втрати від 5 до 13% для різних режимів руху судна.

6. Перспективою розвитку результатів дисертаційного дослідження є масштабування методів оптимального управління на інші типи ГЕУ.

Основні результати, отримані у розділі опубліковані у працях здобувачки [11, 66, 86, 127, 129].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено *актуальне наукове завдання* розроблення перспективного методу управління гребною електричною установкою з метою підвищення енергоефективності гребної дизель-електричної установки за рахунок оптимального управління за критерієм втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачі палива до теплового двигуна. При цьому отримано такі наукові та практичні результати.

1. *Проведено аналіз* існуючих підходів щодо побудови єдиних суднових електроенергетичних систем. За результатами цього аналізу встановлено, що гребні електричні установки, маючи суттєві переваги перед механічною передачею енергії від теплового двигуна через валопровід до гвинта, знаходять усе більше поширення і використання в якості рушійного комплексу судна. При роботі з гребною дизель-електричною установкою простіше, ніж у звичайній гребній установці, реалізувати систему дистанційного управління та автоматизації на програмованих мікроконтролерах. При цьому забезпечується зручність та швидкість управління, підвищена надійність експлуатації судна. Пріоритетним напрямками технічної політики при проектуванні гребних електричних установок є забезпечення підвищення енергоефективності та збільшення енергозбереження.

2. Застосування високооборотних уніполярних машин у сукупності з редуктором дозволяє частково вирішити проблему низької напруги якоря уніполярної машини, а нормальні масогабаритні та об'ємні показники, за рахунок активного використання матеріалів, високий коефіцієнт корисної дії через відсутність втрат на вихрові струми і технологічні досягнення в області розробки струмознімальних пристроїв уніполярних машин постійного струму дозволяють вважати застосування таких машин у гребній дизель-електричній установці перспективним напрямком дослідження, що визначило актуальність виконання дисертаційної роботи.

3. Технологія передачі енергії від теплового двигуна до рушія містить у собі вироблення електроенергії, її перетворення та узгодження руху електродвигуна і рушія. На теперішній час найбільше поширення отримала така структура передачі енергії: “тепловий двигун” – “електричний генератор” – “електричний перетворювач” – “гребний електродвигун” – “(редуктор)” – “гвинт”. Завдяки значному технічному прогресу в області силової електроніки саме така структура дозволяє синтезувати енергоефективні системи управління гребною дизель-електричною установкою. Однак при збільшенні потужності енергоустановки структура стає громіздкою та важко реалізованою, що вимагає пошуку альтернативних варіантів побудови структур суднових енергосистем за критерієм енергоефективності.

3. Сформульовано *мету дослідження*, яка полягає у підвищенні енергоефективності гребної дизель-електричної установки за рахунок оптимального управління за критерієм втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачі палива до теплового двигуна.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі *часткові наукові завдання дослідження*:

1) проведено аналіз основних розробок та приведені основні схеми побудови силових ланцюгів для систем постійного, постійно-змінного та змінно-змінного струмів;

2) розроблено метод розрахунку систем автоматичного управління з регулюванням параметрів.

3) розроблено математичну модель гребної електричної установки з уніполярними машинами;

4) розроблено метод оптимального управління гребною електричною установкою шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачі палива до теплового двигуна;

5) виконано синтез регуляторів оптимального управління гребною електричною установкою з уніполярними машинами;

б) доведено ефективність застосування оптимального управління гребною електричною установкою з уніполярними машинами.

4. У ході виконання дисертаційної роботи одержані такі *нові наукові результати*:

удосконалено динамічну модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, яка, на відміну від існуючих, враховує наявність трьох керуючих контурів, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну, швидкість обертання гвинта, що дозволяє виконати синтез регуляторів контурів управління із заданими динамічними характеристиками;

удосконалено метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою, який, на відміну від існуючих, враховує вплив на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна для підвищення енергетичної ефективності;

отримав подальший розвиток метод компонування та топології електрообладнання гребних електричних установок, що дозволило обґрунтувати перспективний обрис судна.

5. Значення вирішеного у дисертації завдання для науки полягає в подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ синтезу енергоефективних систем управління гребною дизель-електричною установкою.

6. Практичне значення отриманих результатів полягає у зменшенні втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта за рахунок енергозберігаючого оптимального управління шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна.

Проведено синтез оптимальних регуляторів та імітаційне моделювання паралельно за двома системами. У першій системі з класичним роздільним управлінням гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами управління вироблялося по одній змінній, а інші змінні контурів підтримувалися на номінальних значеннях. У другій системі з оптимальним

управлінням за критерієм мінімуму втрат енергії в каналі її перетворення від двигуна до рушія (гвинта) всі змінні управління підтримувалися на оптимальному рівні, а перехід від одного оптимального стану до іншого відбувався за оптимальними динамічними характеристиками. За результатами імітаційного моделювання доведено, що в залежності від режимів роботи судна зменшення енерговитрат склало від 5% до 13%.

7. Реалізація запропонованого в дисертаційній роботі підходу щодо розроблення методів і моделей підвищення енергоефективності гребної дизель-електричної установки дозволяє отримати систему оптимального управління гребною дизель-електричною установкою шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачу палива до теплового двигуна; побудовані регулятори, що згладжують вхідний сигнал, а перерегулювання знижується до 8,1%.

Основні результати досліджень доцільно використовувати при розробці технологій синтезу енергоефективних систем управління гребною дизель-електричною установкою; у науково-дослідних організаціях – для зменшення втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта за рахунок впливу на магнітні потоки уніполярних машин і подачу палива до теплового двигуна; у вищих навчальних закладах – для вдосконалення системи підготовки фахівців зі спеціальності морський та внутрішній водний транспорт.

8. Методи дослідження ґрунтуються на положеннях автоматичного й оптимального управління, динамічних систем, електричних ланцюгів, магнітних ланцюгів, електричних машин, зокрема, методів векторного та матричного обчислення, прикладної математики й оптимізації, математичного моделювання.

9. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується чіткою і виваженою постановкою наукового завдання, коректним використанням у процесі досліджень відомих теоретичних положень автоматичного й оптимального управління, динамічних систем, електричних ланцюгів, магнітних ланцюгів, електричних

машин, зокрема, методів векторного та матричного обчислення, прикладної математики й оптимізації, математичного моделювання на всіх етапах виконання дисертації й аналізу результатів досліджень, використанням тільки перевірених методик і програмних продуктів, використанням для синтезу й оцінювання якості роботи моделей актуальних вихідних даних з одночасним оцінюванням якості роботи моделей, задовільним збігом результатів, одержаних в дисертації, з відомими положеннями сучасної науки у досліджуваній галузі знань, а також апробацією результатів на наукових конференціях і їх публікацією у визнаних наукових виданнях.

10. Теоретичні результати дисертаційних досліджень *впроваджені*:

– метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою з урахуванням впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна у Державному підприємстві водних шляхів України «Одеський морський торговельний порт» (акт впровадження від 30.01.2025р. № 15/28-35);

– метод компоновання та топології електрообладнання гребних електричних установок для обґрунтування обрисів судна у Державному підприємстві водних шляхів України «Одеський морський торговельний порт» (акт впровадження від 30.01.2025р. № 15/28-35);

– модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами для вивчення особливостей синтезу регуляторів контурів управління із заданими динамічними характеристиками у навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій факультету експлуатації технічних систем на водному транспорті на кафедрі електрообладнання та автоматики водного транспорту при викладанні дисциплін «Теорія електроприводу та електричні машини», «Гребні електричні установки» та «Суднові автоматизовані електроенергетичні установки та системи управління» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт впровадження від 07.01.2025р. № 08/01-11).

11. Подальшими напрямками досліджень є масштабування методів оптимального управління на інші типи гребних електричних установок.

Таким чином, послідовне вирішення поставлених часткових наукових завдань дослідження, отримання нових наукових результатів, підтвердження їх коректності та практичної значимості, дозволяє зробити узагальнюючий висновок, що *наукове завдання* дисертаційної роботи, яке полягало у розробленні перспективного методу управління гребною дизель-електричною установкою з метою підвищення енергоефективності та енергозбереженості є *виконаним*, а *мета* роботи, яка полягала у підвищенні енергоефективності гребної дизель-електричної установки за рахунок оптимального управління за критерієм втрат енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачі палива до теплового двигуна є *досягнутою*.

Список використаних джерел

1. Артемов Г.А., Горбов В.М., Артемов Г.А. Суднові енергетичні установки. Миколаїв: УДМТУ, 2002. 356 с.
2. Будашко В.В. Розробка трирівневої багатокритеріальної стратегії управління гібридною судновою енергетичною установкою комбінованого пропульсивного комплексу // Електротехніка і електромеханіка. № 2. 2017. С. 62-72. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
3. Бурбело М.Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2008. №1. С. 65-68.
4. Вишне夫斯基 Л.В., Муха Н.И., Веретенник А.М. Расчет напряжений в электроустановках с импульсными регуляторами // Автоматизация судовых технических средств. Одесса: ОГМА. 2003. №8. С. 8-15.
5. Вишне夫斯基 Л.В., Муха Н.И., Минь Куан Дао. Управление напряжением автономных асинхронных генераторных установок: монография. Одесса: НУ «ОМА», 2016. 196 с. ISBN: 978-966-7591-71-7.
6. Вишне夫斯基 Л.В., Муха Н.И., Павленко С.С. Пуск асинхронных электродвигателей с компенсацией реактивной мощности: монография. Одесса: НУ «ОМА», 2016. 161 с.
7. Вишне夫斯基 Л.В., Веретенник А.М., Войтецкий И.Е., Козырев И.П. Включение синхронных генераторов в многоагрегатную судовую электростанцию // Электромашинобудування та електрообладнання. Киев: Техніка. 2007. №68. С. 26-29.
8. Волков А.В., В.И. Бондаренко, В.А. Волков. Исследование эффективности компенсации мощности искажений и реактивной мощности искажений и реактивной мощности электропотребителей посредством активного фильтра с релейным управлением // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «ПСЕ – 2008». 2008. Ч. 6. С. 49-54.
9. Голубев В.В. Импульсное преобразование переменного напряжения.

К.: Наук. Думка, 2014. 247 с.

10. Голубєва С.М., Гороховська О.К. Динамічна модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. 2024. №2(49). С. 148-158.

11. Голубєва С.М., Юрченко Є.М. Дослідження технологічних варіантів побудови електричних силових установок на водному транспорті // Водний транспорт. 2025. №1 (42). С. 156-165. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.19

12. Голубєва С.М., Бойко С.О., Метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою // Водний транспорт. 2024. №3(41). С. 167-178.

13. Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Замаруєв В.В. Полупроводниковый преобразователь с вольтодобавкой в качестве активного фильтра // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. 2007. Ч. 2. С. 112-117.

14. Губаревич О.В, Голубєва С.М Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». Т.1. №21. С. 55-63.

15. Доманський І.В. Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями: монографія. НТУ «ХП». Харків: вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. 224 с.

16. Дранкова А.О., Муха Н.И. Использование нейронных сетей прямого распространения для прогнозирования технического состояния судовых дизель-генераторов // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу: Теорія і практика. Харків: НТУ «ХП». 2013. №36. С. 505-506.

17. Дранкова А.О. Использование нейронных сетей прямого распространения для прогнозирования технического состояния судовых дизель-генераторов // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу: Теорія і практика. Харків: НТУ «ХП». 2013. №36. С. 505-506.

18. ДСТУ:EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. ДП «УкрНДНЦ», 2023.
19. Ершова Н.М. Современные методы теории проектирования и управления сложными динамическими системами: монография. Д.: ПГАСА, 2016. 282 с.
20. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. К.: Техніка, 2002. 688с.
21. Кардаш В.П., Худенко Г.О. Підвищення ефективності експлуатації судових пристроїв морських суден // Суднові енергетичні установки. Одеса: НУ «ОМА», 2018. № 38. С. 98-100.
22. Лозинський А., Мороз В., Паранчук Я. Розв'язування задач електромеханіки в середовищі пакетів MathCAD і MATLAB: навч. посіб. Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2000. 166 с.
23. Гвоздева И.М., Демиров В.В. Моделирование динамических процессов в автономной электроэнергетической системе при асинхронном режиме работы одного из синхронных генераторов // Систем. технології. 2015. № 3. С. 10-20.
24. Муха Н.И. Перспективная компоновка судовых автономных электроэнергетических систем // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ». 2017. С. 285-288.
25. Носенко В.М. Судовые энергетические установки. Николаев: ФЛН, 2013. 443 с.
26. Gorbov V.M., Serbin S.I., Mitienkova V.S. Marine engineering encyclopedia. Mykolaiv: publisher Torubara V.V., 2017. 200 p.
27. Савенко О.Є. Оптимізація роботи багатогенераторної судової електроенергетичної системи // Вісн. Вінниц. політехн. ін-ту. 2012. № 1. С. 131-134.
28. Савенко О.Є. Оптимізація роботи судової електростанції з метою

підвищення якості електроенергії // Вісн. Вінниц. політехн. ін-ту. 2013. № 6. С. 74-78.

29. Рак О.М., Бушер В.В., Глазєва О.В. Особливості визначення потужності допоміжно-аварійного електроприводу руху судна з комбінованою дизель-електричною силовою установкою // Електромех. і енергозберігаючі системи. 2020. № 4. С. 8-16.

30. Осовський Д.І. Системи автоматичного управління судновими енергетичними установками: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2014. 274 с.

31. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. Київ: Ліра-К, 2020. 242 с.

32. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою та пристрій для його здійснення: патент на винахід UA 116656 Україна, МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P 9/46. /Вишневський Л.В., Муха М.Й., Тумольський О.П., заявка № а 2015 11808 від 30.11.2015, опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8, книга 1.

33. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою: атент на винахід UA112396 Україна, МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P9/46 / Вишневський Л.В., Муха М.Й., Тумольський О.П., Дудко С.А., заявка № а2015 09542 від 05.10.2015, опубл. 25.08.2016, Бюл. №16. 4с.

34. Переверзєв А.В., Василенко О.В. Моделирование елементів силовій електроніки: монографія. Запоріжжя: ЗДІА, 1998. 117 с.

35. Петухов М.В., Ю.В. Грицюк, А.В. Гадай. Інтегральні показники енергетичного процесу тиристорних компенсаторів реактивної потужності при їх живленні від мережі обмеженої потужності // Вісник Приазовського державного технічного університету. Маріуполь: ПДТУ. 2005. С. 100-104.

36. Пивняк Г.Г., А.В. Волков. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: монографія. Днепропетровск: НГУ, 2006. 470 с.

37. Попович М.Г., Теряєв В.І., Кіселичник С.О., Бур'ян С.О. Особливості

синтезу та дослідження електромеханічних систем з послідовною корекцією та частотнорегульованими асинхронними двигунами // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчук. 2007. Вип. 3 (44). ч.2. С. 12-16.

38. Вишнеvский Л.В., Веретенник А.М.. Расчет параметров автоколебаний в системе стабилизации скорости вращения судового генератора // Электромашинобуд. та електрообладн. 2005. № 64. С. 28-32.

39. Регульований електропривод: підручник. К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. 509 с.

40. Толочко О.І. Розробка складних електромеханічних систем в середовищі пакета MATLAB з використанням блоків додатку віртуального фізичного моделювання SimScape // Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми автоматизованого електроприводу. Харків: НТУ «ХПІ». 2015. №12. С. 118-123.

41. Россомаха, О., Пізінцалі, Л., Россомаха, О., Александровська, Н., Шахов, В., Гуменний, І., Рабоча, Т., Зубко, О. Энергоефективність судових енергетичних установок в Україні: стан та перспективи розвитку // Scientific Collection «InterConf». 2023. № 152. С. 517-520.

42. Савенко О.Є. Теоретичне та експериментальне дослідження роботи багатогенераторної судової електроенергетичної системи // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2011. № 3. С. 58-62.

43. Коноплев К.Г., Конева С.А. Системы автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов: монография. Севастоп. нац. техн. ун-т. Севастополь, 2007. 87 с.

44. Денисов Ю.А. Стабилизаторы постоянного напряжения с широтноимпульсными и частотно-импульсными квазирезонансными преобразователями. К.: Изд. Института электродинамики НАН Украины, 2001. 146 с.

45. Вагущенко Л.Л. Современные информационные технологии в судовождении. Одесса: ОНМА, 2013. 135 с.

46. Васильев В.Н., Пащенко Ю.В. Судовые электрические машины постоянного тока. О.: Банто, 2000. 100 с.
47. Олейников А.М., Мартынов В.Н. Судовые электрические машины: науч.-метод. пособие. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. 316 с.
48. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Пріступа С.В., Пастух О.В., Голубева С.М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин судових ГРЩ // Водний транспорт. 2021. № 3(34). С. 13-21. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.02
49. Толочко О.І. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
50. Шидловский А.К., Козлов А.В., Комаров Н.С., Москаленко Г.А. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью. К.: Наук. думка, 2003. 271 с.
51. Черников П.С., Яровенко В.А., Зарицкая Е.И. Вплив загальносудових споживачів електроенергії на оптимальне управління гребними електричними установками // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Х.: НТУ «ХПІ», 2019. № 4(1329). С. 75-82.
52. Черников П.С. Управление гребными электрическими установками электроходов при различных критериях оптимальности // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: XII межд. науч.-техн. конф., Севастополь. 2013.
53. Чехет Э.М., Соболев В.Н., Михальский В.М. Тенденции развития матричных преобразова-телей для асинхронного электропривода // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електропривода». Харків: НТУ «ХПІ». 2005. № 45. С. 32-37.
54. Пипченко А.Н., Пономаренко В.В., Теплов Ю.И., Шевченко В.А. Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления. О.: ТЭС, 2012. 487 с.

55. Яровенко В.А., Черников П.С. Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов // *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 6. С. 32-41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.

56. Яровенко В.А., Черников П.С. Системный подход к поиску законов управления ГЭД судов с электродвижением // *Новейшие технологии в электроэнергетике: IV межд. науч.-техн. конф.*, Харків. 2012. С. 89-90.

57. Aboulhian A., Green D.H., Switzer J.F., Kane T.J., Bredariol G.V., Lindahl P., Donnal J.S., Leeb S.B. A power system monitor for electromechanical equipment diagnostics // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. № 15(3). P.1405-1414.

58. Acomi N., Acomi O.C. The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index // *European Geosciences Union General Assembly. Energy Procedia*. 2014. № 59. P. 243-248.

59. Ali M.Z., Shabbir M.N.S.K., Liang X., Zhang Y., Hu T. Machine Learning-Based Fault Diagnosis for Single-and Multi-Faults in Induction Motors Using Measured Stator Currents and Vibration Signals // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. № 55(3). P. 2378-2391.

60. Ayyappan G.S., Ramesh Babu B., Srinivas K., Raja Raghavan M., Poonthalir R. Mathematical Modelling and IoT Enabled Instrumentation for Simulation & Emulation of Induction Motor Faults. *IETE Journal of Research*. 2021. P. 1-13. doi: 10.1080/03772063.2021.1875272

61. Bimal K. *Bose Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends*. K. Bimal. USA, 2006. 917 p.

62. Braslavsky I.Y., Metelkov V.P., Esaulkova D.V., Kostylev A.V. Simplified method of taking into account temperature fluctuations influence on durability of induction motors stator winding insulation // In: *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*, IEEE. 2017. P. 1-4.

63. *Brushless Constant-Voltage Synchronous Alternators 1FC. Low-Voltage for shipboard and industrial use*. Pula, Croatia: Uljanik TESU d.d., 2007. 244 p.

64. Cherif S.Y., Benoudjit D., Nait-Said M.S., Nait-Said N., Incipient short

circuit fault impact on service continuity of an electric vehicle propelled by dual induction motors structure. *Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. Et Énerg.* 2022. №67(3). P. 265-270.

65. Ciprian H., Szabó L. Wavelet Analysis and Park's Vector Based Condition Monitoring of Induction Machines // *Juornal of Computer Science and Control Systems*. 2011. № 4(2). P. 35-38.

66. Gubarevych, O., Golubieva, S., Melkonova, I. Comparison of the results of simulation modeling of an asynchronous electric motor with the calculated electrodynamic and energy characteristics // *Przegląd Elektrotechniczny*, №98(10). 2022. P. 61-66. DOI:10.15199/48.2022.10.11 (Scopus).

67. Corzine K.A. Operation and Design of Multilevel Inverters. University of Missouri - Rolla. Copyright. 2005. 79 p.

68. Culbert I., Letal J. Signature analysis for online motor diagnostics: Early detection of rotating machine problems prior to failure // *IEEE Industry applications magazine*. 2017. № 23(4). P. 76-81.

69. Culbert I., Rhodes W. Using current signature analysis technology to reliably detect cage winding defects in squirrel cage induction motors // *In Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*. 2005. P. 95-101. IEEE.

70. Eldeeb H.H., Berzoy A., Saad A.A., Mohammed O.A. On-line Monitoring of Stator Inter-Turn Failures in DTC driven Asynchronous Motors using Mathematical Morphological Gradient // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2019. P. 1018-1023.

71. Enache M-A., Vlad I., Campeanu A., Erina E. Optimization of operation characteristics for asynchronous motors used in coal mills. *Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. Et Énerg.* 2019. №64(1). P. 27-32.

72. Espinoza Jose R., Ed. H. Rashid Muhammad. Inverters Power electronics: Handbook. USA: Academic Press, 2001.

73. Meier F. Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low speed direct-drive applications: Ph.D. dissertation,

Royal Inst. Technol. School Elect. Eng. Elect. Mach. Power Electron. Stockholm. Sweden. 2008. 165 p.

74. Goolak S. Methodical recommendations for application of the model of physical processes in a three-phase asynchronous motor // Proceedings of the State University of Infrastructure and Technology. Series: Transportation Systems and Technologies. 2018. № 1(32), P. 4-13.

75. Goolak S., Gerlici J., Gubarevych O., Lack T., Pustovetov M. Imitation Modeling of an Inter-Turn Short Circuit of an Asynchronous Motor Stator Winding for Diagnostics of Auxiliary Electric Drives of Transport Infrastructure // Communications - Scientific Letters of the University of Zilina. № 23(2). P. 65-74. doi: 10.26552/com.C.2021.2.

76. Goolak S., Gerlici J., Sapronova S., Tkachenko V., Lack T., Kravchenko K. Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives // Communications-Scientific letters of the University of Zilina. 2019. № 21(2). P. 24-31.

77. Goolak S., Gubarevych O., Yermolenko E, Slobodyanyuk M, Gorobchenko O. Development of mathematical model of induction motor for vehicles // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 2/2 (104), P. 24-35.

78. Gubarevych O., Goolak S., Daki O., Tryshyn V. Investigation of turn-to-turn closures of stator windings to improve the diagnostics system for induction motors // Problems of the regional energetics. E-Journal. 2021. №2(50). P. 10-24.

79. Gubarevych O.V, Goolak S.O., Golubieva S.M. An integrated approach to diagnosing asynchronous electric motors of water transport // New technologies. 2019. № 2(9), P. 48-61.

80. Guiqui L. Electrical power generating arrangement and method utilizing in induction generator: patent USA, Nr 3832625, (336140), 2024.

81. Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., Mitescu C.D. Physical Hydrodynamics. Oxford University Press, 2001. 505 p.

82. Habbi E.G. New dynamic genetic selection algorithm: application to

induction machine identification. Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. Et Énerg. 2021. №66(3). P. 145-151.

83. Hansen J.F. Modeling and Control of Marine power System: PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, Trondheim, 2008.

84. Hengchum Mao, Fred C.Y. Lee, Dushan Borogevich, Silva Hiti. Review of High-Performance Three – Phase Power-Factor Correction Circuits // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. № 44(4). P. 437-446.

85. Howell M. Correcting induction motor power factor. Electrical Apparatus Service Association Inc. 2014. URL: <https://surl.li/hhmsru> (дата звернення: 18.10.2024).

86. Golubieva S., Morneva M., Deuschle I. Increase in the efficiency of controlling marine electric engines by optimizing their control systems // 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2022. P. 204-211. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969335 (Scopus).

87. Jameson N.J., Azarian M.H., Pecht M., Impedance-based condition monitoring for insulation systems used in low-voltage electromagnetic coils // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. №64(5). P. 3748-3757.

88. Jiang S.B., Wong P.K., Guan R., Liang Y., J. Li. An efficient fault diagnostic method for three-phase induction motors based on incremental broad learning and non-negative matrix factorization // IEEE Access. 2019. №7. P. 17780-17790.

89. John, A. Beverley, Chapter VIII Electric Propulsion Drives // Marine Engineering; Roy, L.H., Ed.; Society of Naval Architects and Marine Engineers: Jersey City, NJ, USA, 1992.

90. Jorge Mari, Michal-Wolfgang Waszak, Simon Schramm: Electric power generation with magnetically geared machine: patent USA, № 8044527 (019885/0588), 2011.

91. Mc Quin N.P., Williams P.N. Transient electrical and mechanical behavior or large induction generator installations // 4. Intern. Conf. on Electr. Mach. and Drives, IEEE Conf. Publ. № 310. 198. P. 251-255.

92. Khechekhouche A., Cherif H., Menacer A., Chehaidia S.E., Panchal H. Experimental diagnosis of inter-turns stator fault and unbalanced voltage supply in induction motor using MCSA and DWER // Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN), 2020, №8(3), P. 1202-1216.

93. Yu M., Zhu J., Qiang D., Zhu Y. Numerical calculation of global temperature field during phase failure of small induction motor // 2019 Chinese Control Conference (CCC). 2019. P. 7143-7148.

94. Krause W., Sudhoff P. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2013.

95. Liubarskyi B., Petrenko O., Shaida V., Maslii A. Analysis of optimal operating modes of the induction traction drives for establishing a control algorithm over a semiconductor transducer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 4(8). P. 65-72.

96. Lovska A., Fomin O.A. New Fastener To Ensure The Reliability Of A Passenger Car Body On A Train Ferry // Acta Polytechnica. 2020. № 60(6). P. 478-485.

97. Mairte J., Gaboury S., Bbouchard B., Bouzouane A. A new computational method for stator faults recognition in induction machines based on hyper-volumes // 2015 IEEE International Conference on Electro. Information Technology (EIT). 2015. P. 216-220.

98. Malozyomov B.V., Vilberger M.E., Rozhkova M.V., Shtang A.A. Diagnostics time intervals of electric transport systems using time between failures // International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering». Atlantis Press. 2017. P. 458-466.

99. Meshalkin V.P., Kurilin S.P., Dli M.I., Bobkov V.I., Fedulov A.S. Ways to increase the energy efficiency and reliability of induction electric motors in chemical plants // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021. №55(2). P. 215-224.

100. Minasyan M.A., Kiaw Thet Naing. Methodology for calculating the depreciation of a marine diesel generator unit taking into account the influence of thrust side, bow and stern vibration isolators, 2021. 76 p.

101. MJB. Data Sheets Three-phase Synchronous Generators. Power generation, 160 – 630 frame sizes Industrial application. Arzignano (VI), Italy: Marelli Motori S.p.A., 2013. 73 p.
102. Nawaz M., Zulfiqar F., Bilal M. Performance evaluation of digital governor for improving operational efficiency and reliability of power plant // Sarhad University International Journal of Basic and Applied Sciences. 2017. № 4(1). P. 1-9.
103. Ned, M. Electric Machines and Drives, A First Course; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2012.
104. Nosenko A., Domnitskiy A., Shemshura E. Predictive reliability assessment of loading and transport modules of tunneling equipment during construction of road tunnels // Procedia Engineering, 2017. №206. P. 1661-1666.
105. Palácios R. H.C., I.N. da Silva, Goedtel A., Godoy W.F., Lopes T. Diagnosis of stator faults severity in induction motors using two intelligent approaches // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. №13(4). P. 1681-1691.
106. Peresada S., Kovbasa S., Prystupa D., Lyashevskyi S. Adaptive control of stator currents for self-comissioning of induction motor drives // Технічна електродинаміка. 2013. №5. С. 24-31.
107. Mukha M., Drankova A., Bousher V., Shestaka A. PLC-based ship's electromechanical systems laboratory // Proceedings of the 13–th International Conference on the Engine Room Simulators, September, 20-21. Odessa, Ukraine: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017. P. 183-190.
108. Pustovetov M, Soltus K., Sinyavskiy I. Computer simulation of induction motors and transformers. Examples of interaction with power electronic converters. LAP LAMBERT. Academic Publishing, 2013.
109. Pustovetov M.Yu. Approach to Computer Implementation of Mathematical Model of 3-Phase Induction Motor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 327(2). DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022085
110. Serra P., Fancello G. Towards the IMO's GHG Goals: A Critical Overview of the Perspectives and Challenges of the Main Options for Decarbonizing

International Shipping // Sustainability. 2020. № 12 (8).

111. Shavelkin A.A., Gerlici J., Shvedchykova I.O., Kravchenko K., Kruhliak H.V. Management of power consumption in a photovoltaic system with a storage battery connected to the network with multi-zone electricity pricing to supply the local facility own needs // Electrical Engineering and Electromechanics, 2021, № 2, P. 36-42.

112. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Przegląd. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery to meet the needs of ocal object with generation of electricity into grid // Elektrotechniczny. 2021. № 97(11). P. 144-149.

113. Singh A., Grant B., DeFour R., Sharma C., Bahadoorsingh S. A review of induction motor fault modeling // Electric Power Systems Research. 2016. № 133. P. 191-197.

114. Singh M., Shaik A.G. Incipient fault detection in stator windings of an induction motor using Stockwell transform and SVM // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. №69(12). P. 9496-9504.

115. Gubarevych O., Goolak S., Golubieva S. Systematization and selection of diagnosing methods for the stator windings insulation of induction motors // Revue Roumane Des Sciences Techniques. Électrotechn. et Énerg. 2022. № 67(4). P. 445-450. (Scopus).

116. Three-phase Asynchronous Generators. G11R - G22R. Langenhagen, Germany: VEM motors GmbH, 2015. 17 p.

117. Tomar A., Garg A. Starting Time Calculation for Induction Motor // Electr Electron System. 2015. URL: <https://surl.li/ifarjz> (дата звернення: 17.09.2024).

118. Varbanets R., Fomin O., Píštěk V., Klymenko V., Minchev D., Khrulev A., Zalozh V., Kučera P. Acoustic method for estimation of marine low-speed engine turbocharger parameters // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. № 9(3). 321 p.

119. Vijay K.G. Power Factor Improvement of Induction Motor by Using

Capacitors // International Journal of Engineering Trends 330 and Technology. 2013. URL: <https://surl.li/jaxpmr> (дата звернення: 17.09.2024).

120. Volyanskaya Y., Volyanskiy S., Volkov A., Onishchenko O. Determining energy-efficient operation modes the propulsion electrical motor of an autonomous swimming apparatus // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 6/8 (90). P. 11-16.

121. Yang J., Guo Y., Zhao W. Long short-term memory neural network based fault detection and isolation for electro-mechanical actuators // Neurocomputing. 2019. №360. P. 85-96.

122. Yupeng Yuan, Zhixiong Li, Reza Malekian & Xinping Yan Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts // Journal of Marine Engineering & Technology. 2017. №16. № 3. P. 150-159.

123. Zhukovskiy Y.L., Korolev N.A., Babanova I.S., Boikov A.V. The probability estimates of the defects of the induction motors based on the complex method of diagnostics // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. №87(032055). doi:10.1088/1755-1315/87/3/032055

124. Zoeller C., Vogelsberger M., Bazant M., Ertl H., Wolbank T.M. Diagnostic technique for traction motor insulation condition monitoring by transient signal assessment // PCIM Europe 2018: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, VDE. 2017. P. 1-8.

Додаток А

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Голубєва С.М., Юрченко Є.М. Дослідження технологічних варіантів побудови електричних силових установок на водному транспорті // Водний транспорт. 2025. №1 (42). С. 156-165. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.19>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/409>
2. Голубєва С.М., Бойко С.О., Метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою // Водний транспорт. 2024. №3(41). С. 167-178. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.19>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/382>
3. Голубєва С.М., Гороховська О.К. Динамічна модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. 2024. №2(49). С. 148-158. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.2.2024.321378>
https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/321378
4. Голубєва С.М., Тараненко С.В., Кириченко О.О та ін. Термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики // Водний транспорт. 2023. № 1(37). С. 201-213. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/270>
5. Голубєва С.М., Морнева М.О., Пастух О.В. Застосування енергозберігаючих та природоохоронних технологій на водному транспорті // Наукові вісті Дніпівського університету. 2023. № 24. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24-4>
<https://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/2023-24-6.pdf>

6. Голубєва С.М., Тараненко С.В. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні // Водний транспорт. 2021. № 2(33). С. 5-12. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01

<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/165>

7. Голубєва С.М., Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В. та ін. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ // Водний транспорт. 2021. № 3(34). С. 13-21. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.02

<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/184>

8. Губаревич О.В., Голубєва С.М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Т.1. №21 С. 55-63.

Наукові публікації у виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus:

9. Golubieva S., Gubarevych O., Melkonova I. Comparison of the results of simulation modeling of an asynchronous electric motor with the calculated electrodynamic and energy characteristics // Przegląd Elektrotechniczny. 2022. № 98(10). P. 61-66. doi 10.15199/48.2022.10.11

<https://sigma-not.pl/publikacja-139655-2022-10.html>

10. Gubarevych O., Goolak S., Golubieva S. Systematization and selection of diagnosing methods for the stator windings insulation of induction motors // Revue Roumane Des Sciences Techniques. Électrotechn. et Énerg. 2022. № 67(4). P. 445-450.

<https://journal.iem.pub.ro/rrst-ee/article/view/175>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Голубєва С.М. Динамічна модель гребної дизель-електричної установки // Проблеми сталого розвитку морської галузі: зб. матеріалів IV міжн. наук. - практ. конф., 28-29 листопада 2024 р., м. Одеса, 2024. С. 181-184.

12. Golubieva, S., Morneva, M., Deuschle, I. Increase in the efficiency of controlling marine electric engines by optimizing their control systems // 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2022. P. 204-211. doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969335

13. Голубєва С.М., Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Пріступа С.В., Пастух О.В., Суднова пропульсивна установка з частотним керуванням гребними електродвигунами // Дніпровські читання-2024: зб. тез V міжн. наук. - практ. конф. 5 грудня 2024 р., м. Київ, 2024. С. 108-110.

Додаток Б



МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ
Державне підприємство
«Одеський морський торговельний порт»
 (ДП «Одеський порт»)
 пл. Митна, 1, м. Одеса, 65082, Код ЄДРПОУ 01125666 тел. (048) 729-47-00
 e-mail: odsea@omtp.com.ua, web: https://omtp.com.ua

Вих. 15/28 - 35
 Від 30.01.2025 р

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
 ГОЛУБЕВОЇ Світлани на тему **«Оптимізація управління гребною дизель-
 електричною установкою морських суден за критерієм втрат енергії»**
 на здобуття наукового ступеня доктора філософії
 зі спеціальності 271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Викладена у дисертаційній роботі Голубевої С.М. модель гребної дизель-
 електричної установки з уніполярними машинами, враховує наявність трьох
 керуючих контурів, які формують магнітні потоки генератора, гребного
 електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну,
 швидкість обертання гвинта

Впровадження наукових рекомендацій, запропонованих в дисертаційній
 роботі Голубевої С.М. дозволяє виконати синтез регуляторів контурів управління із
 заданими динамічними характеристиками.

Практичне значення отриманих результатів полягає у зменшенні втрат
 енергії при передачі її від теплового двигуна до гвинта за рахунок
 енергозберігаючого оптимального управління шляхом впливу на магнітні потоки
 уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна.

Апробація результатів дисертаційної роботи Голубевої С.М. підтверджує їх
 практичну значущість і визначає доцільність їх подальшого впровадження у ДП
 «Одеський порт»

Директор



Олексій МЯСКОВСЬКИЙ

« 30 » 01 2025 р.



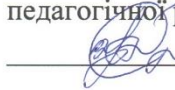
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
(ДУІТ)

Вул. Кирилівська, 9 м. Київ, 04071 тел./факс: (044) 463-74-70, 482-51-26
 E-mail: duit@duit.edu.ua Код ЄДРПОУ 41330257

«07» 01 2025 № 08/01-11

УЗГОДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи

 **Юрій ДУДНИК**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова комісії з реорганізації
 ДУІТ

 **Олександр ГРИЩУК**

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
 Голубевої Світлани на тему «**Оптимізація управління гребною дизель-електричною установкою морських суден за критерієм втрат енергії**»

Цей акт складено про те, що наукові дослідження за темою дисертаційної роботи Голубевої Світлани на тему «**Оптимізація управління гребною дизель-електричною установкою морських суден за критерієм втрат енергії**» використовуються в навчальному процесу факультету експлуатації технічних систем на водному транспорті на кафедрі електрообладнання та автоматики водного транспорту при викладанні дисциплін «Теорія електроприводу та електричні машини», «Гребні електричні установки» та «Суднові автоматизовані електроенергетичні установки та системи управління» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт.

В.о. директора Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, доктор технічних наук, професор



Олена ТИМОЩУК

Декан факультету експлуатації технічних систем на водному транспорті, кандидат технічних наук



Олексій СЬОМІН