

ОГЛЯД ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ ПОКРАЩЕННЯ
ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОХОДІВ

С.О. Зеленюк¹, Н.І. Александровська², С.А. Потравко³

¹аспірант кафедри “СЕУ і ТЕ”,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0007-6771-9844

²завідувач кафедри «Суднобудування і судноремонт»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

³старший викладач кафедри «Суднобудування і судноремонт»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0002-5886-9692

Анотація

Вступ. У роботі представлена коротка історія виникнення та розвитку суден-електроходів у світовій морській галузі та підкреслена їхня зростаюча роль у наш час, що є результатом використання тих переваг, які характерні для суден з електрорухом – екологічність, економічність, кращі експлуатаційні та динамічні характеристики, тощо. Виходячи з наведеної узагальненої схеми об'єднаної електроенергетичної системи електроходу та виділених її основних компонентів, визначено основні фактори, що впливають на зміну характеристик суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) під час динамічних навантажень. З іншого боку, локальні регулятори складових частин СЕЕС – автоматичний регулятор частоти обертання первинних двигунів, автоматичний регулятор напруги генераторів, контролер частотного перетворювача налаштовуються таким чином, щоб забезпечити оптимальне функціонування своїх об'єктів регулювання переважно у статичних режимах роботи. Наступним кроком у розвитку систем автоматичного управління (САУ) СЕЕС є впровадження багаторівневих систем зі своїми стратегіями управління, що дозволяє привести у відповідність експлуатаційні характеристики суднових пропульсивних комплексів з вимогами класифікаційних товариств до параметрів електричних мереж під час перехідних процесів, які також наведені у статті. Численні дослідження та пропозиції для вирішення таких завдань, кількість наведених джерел та широка тематика проблем, що висвітлюються в них, дозволяє стверджувати, що розвиток та вдосконалення СЕЕС для суден з електрорухом, а також їх регуляторів та систем управління ще довго залишаться актуальними.

Мета. Огляд наявних напрямків розвитку ЕЕС суден з гребною електричною установкою (ГЕУ) в цілому, частин цих систем, систем контролю та аналіз таких напрямів щодо поліпшення динамічних характеристик як самих систем, так і їх регуляторів.

Результати. За підсумками огляду серед основних тенденцій, що визначають розвиток СЕЕС електроходів можна назвати застосування нових джерел енергії,

збільшення загальної потужності установок та енергетичної щільності їх окремих складових частин, поява потужних короткочасних імпульсних навантажень, відмова від електромеханічних вузлів автоматики на користь електронних пристроїв. З іншого боку, проблеми обмінних коливань у багатоагрегатних суднових електростанціях, випадкові відключення СЕЕС під час динамічних процесів, погіршення якості електроенергії в суднових електромережах за рахунок присутності вищих гармонійних складових, зумовлених застосуванням потужних статичних напівпровідникових перетворювачів, ще чекають на своє остаточне рішення. При моделюванні динамічних режимів у деяких джерелах використовуються математичні моделі з лінеаризованими рівняннями, без урахування нелінійностей, властивості яких елементи СЕЕС набувають під час динамічних навантажень. Також використовуються моделі з одиничними генеруючими агрегатами, при цьому впливом обмінних коливань нехтують. Не вдалося знайти досліджень, присвячених реакції автоматичних регуляторів на зміну стану первинних двигунів внаслідок відмов і несправностей. Більшість запропонованих шляхів поліпшень динамічних характеристик матеріало- та трудомісткі, вимагають значних проміжків часу для впровадження та підходять для перспективних типів електроходів.

Висновки. За визнанням авторів опрацьованих статей, існує низка проблем для СЕЕС електроходів, що виникають під час динамічних процесів. Для їх вирішення необхідно розробити математичну модель СЕЕС з урахуванням нелінійних властивостей частин системи, що виявляються в перехідних режимах. Після перевірки та проведення експерименту з моделлю потрібно розробити адаптивний регулятор із включенням до числа вхідних сигналів його такого, який відображав би технічний стан первинного двигуна. Створення такого регулятора дозволить судам з електрорухом оптимально проходити динамічні обурення за критеріями безпеки, економічності та енергоефективності.

Ключові слова: судно-електрохід, пропульсивна електрична установка, гребна електрична установка, автономна електрична установка, динамічні процеси, система управління енергією, дизель-генератор, система автоматичного управління, стратегія управління, ємнісна передача енергії, обмінні коливання потужності, іоністор, надпровідник.

OVERVIEW OF PROSPECTIVE DIRECTIONS FOR IMPROVING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF VESSEL ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS

S.O. Zeleniuk¹, N.I. Aleksandrovska², S.A. Potravko³

¹graduate student of the «SEU and TE» department,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0007-6771-9844

²PhD in Technical Sciences, Associate professor,
Head of the Department of Shipbuilding and Ship repair,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

³Senior lecturer of the Department of Shipbuilding and Ship repair,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0002-5886-9692

Summary

Introduction. The work presents a brief history of the emergence and development of electric ships in the global maritime industry and emphasizes their growing role in our time, which is the result of using those advantages that are characteristic of ships with electric propulsion – environmental friendliness, economy, better operational and dynamic characteristics, etc. Based on the given generalized scheme of the combined electric power system of the electrically driven and its main components, the main factors affecting the change in the characteristics of ship electric power systems (SEPS) during dynamic loads are determined. On the other hand, the local regulators of the constituent parts of the SEPS – the automatic regulator of the rotation frequency of the primary engines, the automatic regulator of the voltage of the generators, the controller of the frequency converter are adjusted in such a way as to ensure the optimal functioning of their regulatory objects mainly in static modes of operation. The next step in the development of automatic control systems (ACS) of the SEPS is the implementation of multi-level systems with their own control strategies, which allows to bring the operational characteristics of ship propulsion systems into compliance with the requirements of classification societies for the parameters of electrical networks during transient processes, which are also given in the article. Numerous studies and proposals for solving such tasks, the number of cited sources and the wide range of issues highlighted in them, allow us to assert that the development and improvement of SEPS for vessels with electric propulsion, as well as their regulators and control systems, will remain relevant for a long time. **Purpose.** An overview of the available directions for the development of the EPS of vessels with a electric propulsion plants as a whole, parts of these systems, control systems and analysis of such directions for improving the dynamic characteristics of both the systems themselves and their regulators. **Results.** According to the results of the review, among the main trends that determine the development of electric rowing vessels SEPS, we can mention the use of new energy sources, an increase in the total power of installations and the energy density of their individual components as well, the appearance of powerful short-term impulse loads, the abandonment of electromechanical automation units in favor of electronic devices. On the other hand, the problems of exchange oscillations in multi-unit ship power plants, accidental shutdowns of SEPS during dynamic processes, deterioration of the quality of electricity in ship power networks due to the presence of higher harmonic components caused by the use of powerful static semiconductor converters, are still waiting for their final solution. When modeling dynamic modes, some sources use mathematical models with linearized equations, without taking into account nonlinearities, the properties of which SEPS elements acquire during dynamic loads. Models with single generating units are also used, while the influence of exchange fluctuations is neglected. It was not possible to find studies devoted to the response of automatic regulators to changes in the condition of primary engines due to failures and malfunctions. Most of the proposed ways of improving dynamic characteristics are material- and labor-intensive, require significant periods of time for implementation, and are suitable for promising types of electric vessels. **Conclusions.** According to the authors of the studied articles, there are a number of

problems for electric ships SEPS that arise during dynamic processes. In order to solve them, it is necessary to develop a mathematical model of the SEPS, taking into account the nonlinear properties of the parts of the system that appear in transient modes. After checking and conducting an experiment with the model, it is necessary to develop an adaptive regulator with the inclusion of one of the input signals that would reflect the technical condition of the primary engine. The creation of such a regulator will allow ships with electric propulsion to optimally undergo dynamic disturbances according to the criteria of safety, economy and energy efficiency.

Key words: *electric rowing ship, propulsion electric plant, rowing electric plant, islanded electric grid, transient process, power management system, diesel generator, automatic control system, control strategy, capacitive energy transfer, power exchange fluctuations, supercapacitor, superconductor.*

Вступ. Деякі джерела називають XXI століття «золотим» століттям розвитку електрики у суднобудуванні [1]. Це не дивно оскільки, розпочавшись з малопотужних динамо як джерел електроенергії для мереж освітлення парових суден [2] та гальванічних батарей для живлення приводів гребних коліс прогулянкових човнів у 80-х роках XIX століття, електрика перетворилася на одне з головних джерел енергії на судах у наш час. Вирішуючи безліч завдань за рахунок застосування електрики, суднобудівники також застосували його для забезпечення руху суден. Першим прикладом електрохода став танкер «Вандал», початок експлуатації – 1903 р., з електростанцією на постійному струмі сумарною потужністю 220 кВт [2]. На сьогоднішній день системи електроруку застосовуються на багатьох типах суден: буксири, круїзні лайнери, пороми, судна-кабелеукладачі, спеціальні судна газо- та нафтопромисловості, військові кораблі тощо. Потужність електроустановок сучасних суден перебуває у діапазоні 2-150 МВт залежно від типу судна, у тому числі 50-82% споживання посідає безпосередньо на пропульсивні комплекси [3].

При всьому різноманітті варіантів архітектурних рішень пропульсивних комплексів суден-електроходів, як «класична» електроенергетична система (ЕЕС) [2] може бути представлена система круїзного лайнера «Queen Elizabeth 2» (рис.1).

Як видно з ескізу, основними складниками такої ЕЕС є:

– Первинні двигуни. На ескізі представлені дизелі, проте на деяких типах суден можуть застосовуватися парові та газові турбіни.

– Генератори. Залежно від обраного роду струму можуть бути постійного та змінного струму. Переважна більшість генераторів, що застосовуються в даний час, це трифазні синхронні електричні машини змінного струму з частотою 50/60 Гц з самозбудженням. Вал генератора з'єднаний з валом первинного двигуна, двигун і генератор утворюють єдиний динамічний комплекс і є частиною системи, що генерує електроенергію. Число таких генеруючих агрегатів може коливатися. Найбільш поширена їх кількість – 4 одиниці, для підвищення надійності їх кількість може бути збільшено, зокрема для «Queen Elizabeth II» було використано 9 генеруючих агрегатів [2].

– Головний розподільчий щит (ГРЩ). Основна функція – комутація та синхронізація задіяних у певному режимі генераторів у єдину мережу,

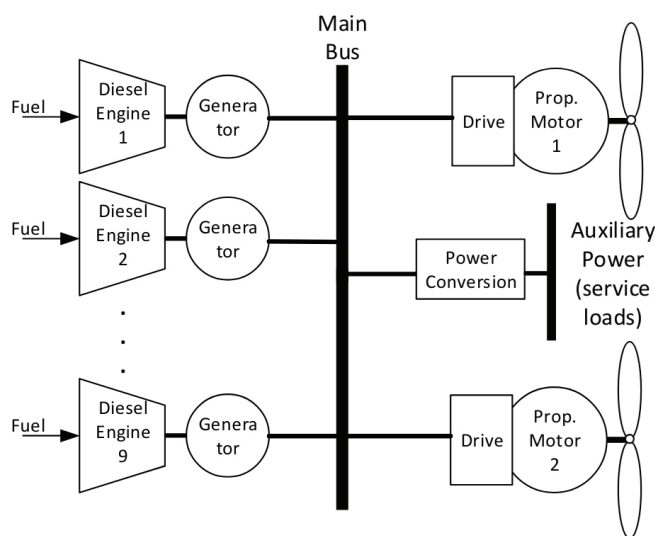


Рис. 1. Спрощений ескіз об'єднаної електроенергетичної системи електроходу «Queen Elizabeth II» [2]

забезпечення рівномірного навантаження для кожного з працюючих генераторів, забезпечення енергією споживачів. ГРЩ також виконують функції захисту електрообладнання, на ньому встановлені вимірювальні прилади.

– Джерела живлення гребних електродвигунів. Як джерела живлення в сучасних системах електроруху використовуються силові напівпровідникові частотні перетворювачі [4], що дозволяють регулювати швидкість обертання та здійснювати реверсування гребних електродвигунів.

– Гребні електродвигуни (ГЕД). Завдяки використанню напівпровідникових частотних перетворювачів для живлення ГЕД вдалося розширити використання індукційних асинхронних двигунів поряд з електродвигунами постійного струму і синхронними двигунами.

– Мережа допоміжних навантажень. Оскільки представлена класична ЕЕС є об'єднаною, для живлення решти суднових навантажень, крім пропульсивного комплексу, використовуються понижуючі трансформатори, так як робоча напруга пропульсивної установки зазвичай вище, ніж напруга живлення насосів, навігаційного обладнання, мереж освітлення і т.д., і окрема система розподільчих щитів.

Окремим пунктом, не зазначеним на рис.1, потрібно виділити регулятори та систему керування пропульсивним комплексом електрохода. Як правило, система управління багаторівнева [5], один із прикладів наведено на рис.2. Регулятори первинного рівня тут це регулятор частоти обертання первинного двигуна, який також використовується для розподілу активного навантаження між генераторами, що працюють в паралелі, і автоматичний регулятор напруги синхронного генератора, що також використовується для рівномірного розподілу реактивного навантаження при паралельній роботі генераторів. Кожен дизель-генератор має ці два типи регуляторів. Статичні частотні перетворювачі, що застосовуються для живлення гребних електродвигунів, також мають свої системи електронного

регулювання силовими напівпровідниковими елементами, останні покоління реалізовані з використанням програмованих логічних контролерів (ПЛК). Вторинний рівень контролю ЕЕС, званий «системою управління енергією» або «системою управління живленням» від англійської Power Management System (PMS) відповідає за конфігурацію електростанції в різних режимах роботи, введення-виведення резервного генератора в роботу, контроль основних параметрів та забезпечення безпечного режиму експлуатації електричної мережі [5]:

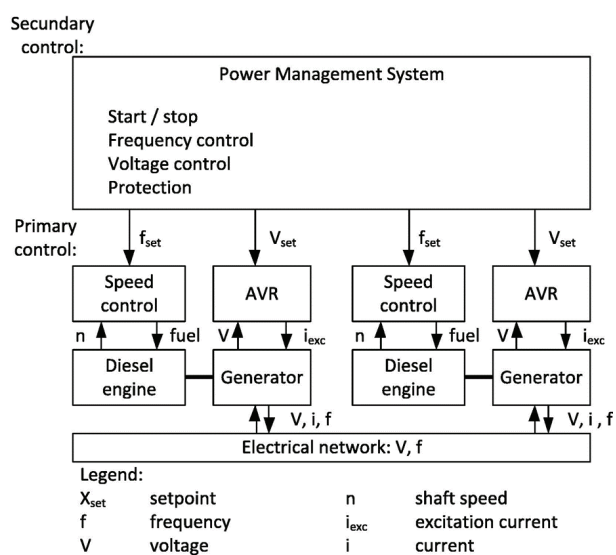


Рис. 2. Двохрівнева система управління електроенергетичною установкою судна з електрорухом [5]

Враховуючи історію експлуатації ЕЕС на флоті, що триває понад сторіччя, а також кількість існуючих міжнародних та державних наглядових установ, не можна оминути питання стандартизації вимог, що висуваються до самої ЕЕС, її частин, характеристик виробленої системою електроенергії. До таких організацій належать національні Морські класифікаційні товариства, наприклад – Lloyd's Register, Det Norske Veritas, Регістр судноплавства України тощо, Міжнародна організація зі стандартизації ISO, Інститут інженерів електротехніки та електроніки IEEE та інші. Основним критерієм існуючих вимог є забезпечення високої якості електроенергії, надійності силового електронного обладнання та безпеки екіпажу на борту судна. Зокрема, введено обмеження щодо відхилень частоти та напруги від номінальних значень. Для сталих режимів відхилення по напрузі не можуть перевищувати +6%, -10%, для частоти +- 5% [6]. При динамічних режимах роботи дозволяються короточасні, до 1,5 с, відхилення напруги +- 20% та в межах 5с відхилення +-10% за частотою [6]. Регламентується також значення сумарного коефіцієнта гармонійних складових кривої напруги, яке не повинно перевищувати 5% [6]. Для сумарного коефіцієнта спотворення розрахунки виробляються до 40й гармоніки. Для розрахунку коефіцієнта спотворення по кожній гармоніці коефіцієнт спотворення не повинен перевищувати 1,5% [6]. Оскільки

суднові електростанції складаються з кількох генеруючих агрегатів, регламентуються вимоги до їхньої паралельної роботи:

- нерівномірність частоти обертання дизель-генераторів змінного струму, призначених для паралельної роботи, повинна бути такою, щоб амплітуда кутових коливань валу генератора була не більшою за $3,5 \text{ градуса}/P$, де P – число пар полюсів генератора [6];

- різницю активних навантажень і реактивних падінь напруги генераторів різної потужності, що працюють у паралелі, не повинні перевищувати 10% номінальної потужності найбільшого генератора або не більше ніж на 25% номінальної потужності найменшого генератора [6];

Окремо виділено вимоги до регуляторів первинних двигунів ЕЕС під час перехідних процесів:

- при миттєвому накиданні активного навантаження ДГ повинен навантажуватись ступенями. Залежно від ступеня форсування дизеля за середнім ефективним тиском всього передбачено 3 ступені [7];

- при скиданні або накиданні максимального ступеня навантаження генератора, зміна частоти в мережі не повинна перевищувати 10% розрахункової [7];

- при миттєвому накиданні навантаження від нульового до 50% розрахункового навантаження генератора, а також при наступному (після досягнення частоти обертання, що встановилася) накиданні 50% навантаження генератора, що залишилися, короткочасна зміна частоти обертання двигуна не повинна перевищувати 10% розрахункової частоти обертання. Накидання електричного навантаження більш ніж двома ступенями може бути допущено, якщо суднова електрична установка дозволяє використання привідних двигунів, які можуть навантажуватися лише більш ніж двома ступенями та за умови, що це вже допущено на стадії проектування судна. Це має бути підтверджено у схваленій документації та перевірено під час випробувань на судні. У цьому випадку величина навантаження, яка повинна автоматично вмикатися після знеструмлення, а також послідовність включення навантаження повинні відповідати ступеням навантаження двигуна [7].

Актуальність. Наведений останній пункт, що допускає знеструмлення при динамічних накидах навантаження в ЕЕС, у тому числі й суден-електроходів, змушує докладніше зупинитися на проблемах експлуатації пропульсивних комплексів суден з електрорухом, деякі з яких залишаються невирішеними і в даний час.

Мета досліджень – огляд наявних напрямків розвитку ЕЕС суден з гребною електричною установкою (ГЕУ) згідно узагальненої схеми наданої вище та аналіз таких напрямів щодо поліпшення динамічних характеристик як самих систем, так і їх регуляторів.

Оскільки первинними джерелами енергії є дизельні двигуни, то динамічні постійні часу їх суттєво довші по відношенню до тимчасових характеристик електричної частини суднових ЕЕС за ступенем сприйняття навантаження, що призводить до глибоких провалів за частотою і напругою мережі, тобто веде до можливості неконтрольованих «блекаутів». Дизельні двигуни, розраховані в достатніх межах, щоб забезпечувати необхідну потужність споживачів в сталих режимах, часом не встигають впоратися з запитами на збільшення потужності при маневруванні, поганій погоді, реверсах та інших динамічних збуреннях [7].

Серед способів поліпшення динамічних характеристик дизельних двигунів застосовують збільшення інерційних мас ДГ, що має знизити провали частоти обертання первинних двигунів, отже, і провали частоти і напруги у електричних ланцюгах. Однак, цей спосіб має негативний ефект, тому що зі збільшенням маси маховиків збільшується і тривалість перехідних процесів [7]. Іншими шляхами покращення динаміки дизельних двигунів є:

- соплове регулювання турбіни;
- регулювання частоти обертання ТК впливом на систему постачання повітря з боку компресора;
- додаткова подача повітря в повітряний ресивер та циліндри дизеля;
- збільшення частоти обертання ТК у період розгону за рахунок подачі повітря на лопатки газової турбіни;
- застосування спеціальних пристроїв для отримання додаткового моменту на валу ТК [7].

Всі наведені вище способи означають глибоку модернізацію існуючих дизельних двигунів, а значить економічно є капіталомісткими і в кінцевому підсумку ведуть до заміни всієї суднової електростанції.

Наступним етапом покращення динамічних характеристик ЕЕС електроходів можна назвати модернізацію самих синхронних генераторів. Найбільш примітивним рішенням є просте збільшення потужності агрегату електростанції, за рахунок чого пропонується покривати дефіцит потужності при перехідних процесах.

Як джерело електроенергії на судах зазвичай використовуються безщіткові синхронні машини з самозбудженням, які фактично є 2 електричними машинами на одному валу – збудник, основний генератор і з'єднаний з ними в одну систему управління автоматичний регулятор напруги (АРН). Спрощена схема такого генератора представлена рис.3.

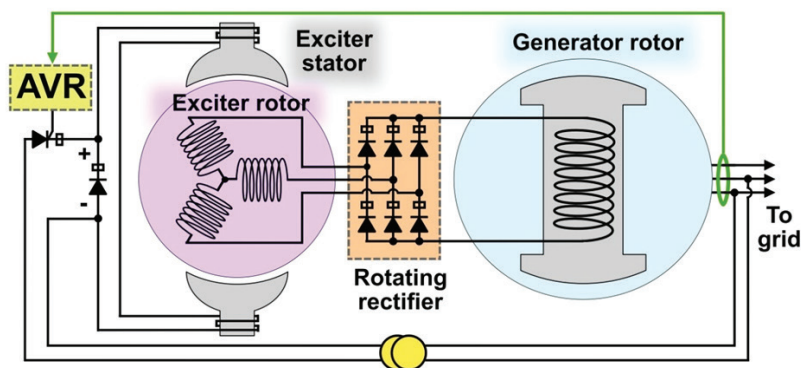


Рис. 3. Узагальнена схема суднового безщіткового генератора [8]

Стрибки напруги основної мережі, що виникають при різких набросах/скидах навантаження, уловлюються датчиками АРН, що у відповідність до свого закону регулювання збільшує/зменшує струм збудження збудника й у кінцевому підсумку – ступінь збудження основного генератора, відпрацьовує відхилення напруги від номінального

значення. Швидкодія вищезазначеного контуру регулювання, тобто системи збудження, визначає динамічні властивості синхронного генератора і є об'єктом постійного вдосконалення. Одним із шляхів такого поліпшення є застосування постійних магнітів замість статорної (нерухомої) обмотки збудника (рис.4), що дозволяє збільшити величину магнітного потоку в збуднику, уникнути обмежень, викликаних явищем насичення заліза статора збудника [8]. Оскільки керувати магнітним потоком постійного магніту неможливо, регулювання струму збудження роторної обмотки основного генератора здійснюється за рахунок обертового керованого перетворювача, кут відкриття тиристорів якого здійснюється АРН з бездротовою передачею керуючого впливу. Недоліками такої схеми є присутність пульсацій валу електричної машини, обумовлених застосуванням тиристорного перетворювача, що обертається, а також істотне падіння напруги на ньому [8].

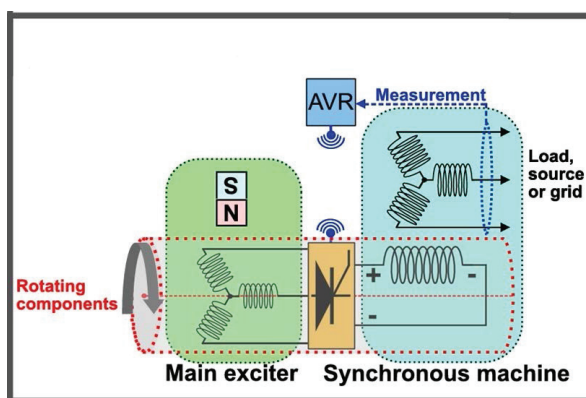


Рис. 4. Схема збудження синхронного генератора із застосуванням постійного магніту та керованого тиристорного перетворювача [8]

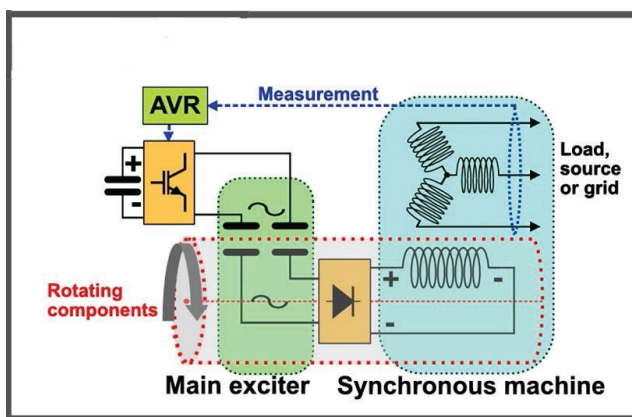


Рис.5 Система збудження СГ з використанням технології ємнісної передачі енергії [8]

Іншим напрямком удосконалення систем збудження є застосування технології ємнісної передачі енергії (Capacitive Power Transfer). Сутність її полягає

в розташуванні вкладених одна в одну пар циліндричних провідних пластин, зовнішня з яких займає місце нерухомої обмотки збудника, а внутрішня закріплена на роторі синхронної машини (рис. 6). Зазор між циліндрами невеликий і енергія, необхідна для обмотки збудження основного генератора, передається через конденсатори, що утворилися. Ця технологія є перспективною і нині застосовна для малопотужних машин [9].

Для прискорення досягнення максимальної напруги в ланцюзі збудження, а значить і поліпшення динамічних характеристик генератора, застосовуються також батареї конденсаторів [9].

Наступним типом проблем, з яким доводиться стикатися при експлуатації суднових ЕЕС, є обмінні коливання потужності при паралельній роботі декількох генеруючих агрегатів. Обмінні коливання потужності – це явище своєрідного переходу потужності від одного ДГ до іншого з частотою, що вимірюється кількома герцями [10]. Осцилограма зміни активної потужності кожного з двох паралельно працюючих ДГ є приблизно синусоїдальною кривою цієї зміни з дзеркальним характером, тобто. максимуму потужності одного ДГ на даний час відповідає мінімум потужності іншого ДГ (і навпаки) [10]. Обмінні коливання виникають у тому числі і при динамічних коливаннях навантаження і можуть призвести до нестабільної роботи генераторів, випадіння їх із синхронізму, аварійної зупинки та поломки [10]. Проблема існування обмінних коливань потужності між синхронними генераторами була виявлена давно, залишається не до кінця вирішеною до сьогоднішнього дня, а нижче наведено деякі запропоновані шляхи їх усунення. Одним з таких шляхів є введення в систему управління судновою електростанцією додаткового адаптивного регулятора (рис.6), позначеного як блок ПОКП (пристрій обмінних коливань потужності) [11]. Блок ПОКП отримує інформацію від усіх дизелів і генераторів працюючих у паралельному режимі, після чого він обробляє інформацію та у разі необхідності здійснює підстроювання коефіцієнтів передачі та уставок за частотою обертання автоматичних регуляторів частоти обертання первинних двигунів. Проте, на думку самого автора, такий регулятор не буде ефективним для динамічних режимів суднової ЕЕС. Іншим прикладом удосконалення систем збудження СГ є застосування алгоритму активного керування придушенням перешкод (Active Disturbance Rejection Control ADRC) та включення контролера на основі такого алгоритму у систему збудження генератора [12]. Блок-схема такого контролера (рис.7) містить такі основні компоненти – диференціатор відстеження (Tracking Differentiator TD), розширений спостерігач стану (extended state observer ESO), ланка нелінійного зворотного зв'язку помилки стану (nonlinear state error feedback NLSEF). Результати моделювання динамічних процесів – накидання навантаження, 1- та 3-фазних коротких замикань для 2х працюючих у паралелі СГ з використанням ADRC-фільтра в ланцюзі збудження показали значне зменшення відхилень напруги в основній мережі та часу перехідних процесів порівняно з класичною системою збудження [12]. На жаль, немає відомостей про розробку хоча б пробного зразку такого регулятора.

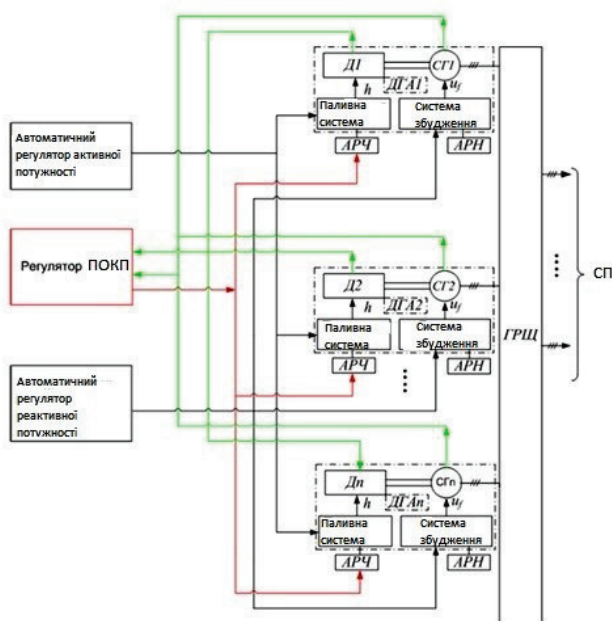


Рис. 6. Блок-схема АСУ СЕЕС із блоком ПОКП [11]

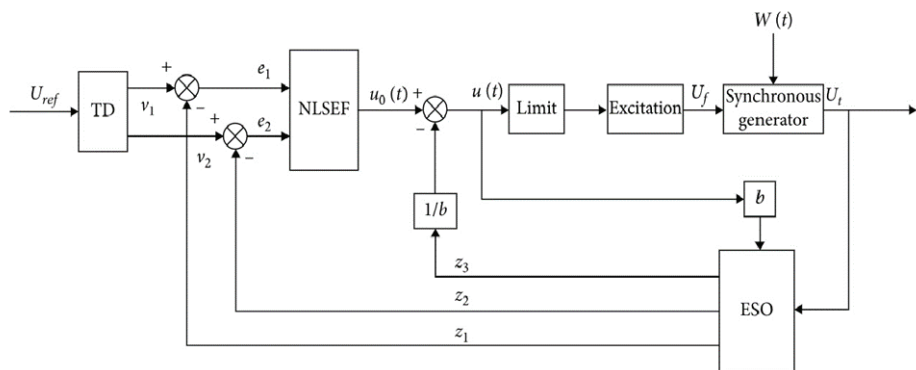


Рис. 7. Блок-схема включення контролера активного керування придушенням перешок у систему збудження СГ [12]

Наступною частиною СЕЕС суден з ГЕУ, за рахунок якої можливо поліпшити динамічні характеристики, є ГРЩ чи їхня сукупність. Або, якщо точніше, повернення до використання постійного струму [13]. Він може застосовуватися для живлення частини судових споживачів і тоді говорять про «мікромережі постійного струму» [6], які живлять від силових випрямлячів через локальні розподільні щити (РЩ) або ГРЩ повністю переводиться на постійний струм [13, 14], причому генератори, пропульсивний комплекс та основна частина судових споживачів залишаються на змінному струмі (рис.8).

Це досягається включенням силових випрямлячів до фідерних ліній генераторів перед ГРЩ і, відповідно, інверторів в кабелі живлення навантажень після ГРЩ. З переваг такої архітектури побудови ЕЕС зазначають такі:

- Підвищення ефективності первинного двигуна та зниження витрат на паливо,
- Економія ваги та простору,
- Генератори, що працюють з коефіцієнтом потужності, рівним одиниці,
- Зниження втрат під час передачі енергії,
- Більш швидке та просте паралельне з'єднання генераторів,
- Простіша реалізація накопичення енергії. Поліпшення динамічних характеристик СЕЕС з ГРЩ постійного струму відбувається через відсутність необхідності підтримки однакової частоти обертання первинних двигунів і, отже, провалів частоти мережі, що виникають. Крім цього, вирішується проблема дефіциту потужності, що виникає при різких начерках навантаження. На сучасному етапі все частіше використовуються так звані судна з гібридними ЕЕС, у яких поряд із класичними первинними двигунами (дизелями та турбінами) використовуються паливні елементи, вітрогенератори, накопичувачі енергії на основі літій-іонних акумуляторів [14]. За наявності шин постійного струму інтеграція додаткових джерел енергії в ЕЕС не складе великих зусиль. Згадані вище пристрої застосовуються в основному для вирішення завдань зменшення викидів в атмосферу, економії палива і т.п. Для покращення динамічних характеристик цікаві іоністори або суперконденсатори (Supercondensators) [15,16]. Вони мають відповідні характеристики для покращення стабільності СЕЕС при перехідних процесах, приклад гібридної енергетичної системи електроходу з іоністором представлений на рис. 9.

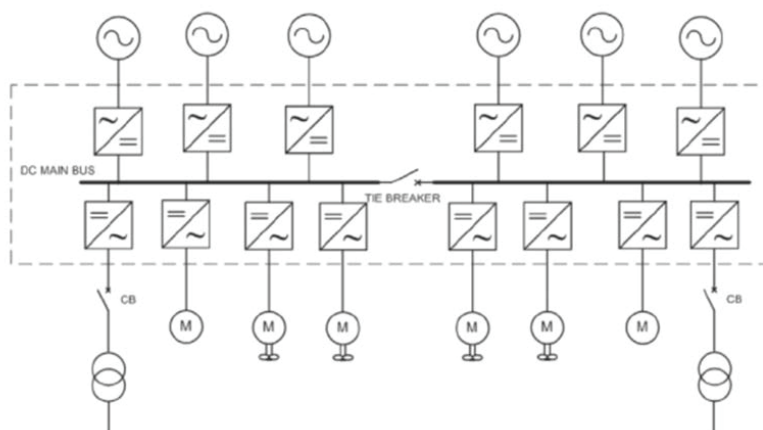


Рис. 8. Приклад побудови СЕЕС із ГРЩ постійного струму [13]

Однак промислове застосування іоністорів як накопичувачів джерел енергії для пропульсивних комплексів залишається перспективою, дослідження в цій галузі знаходяться на стадії теоретичних розробок та моделювання.

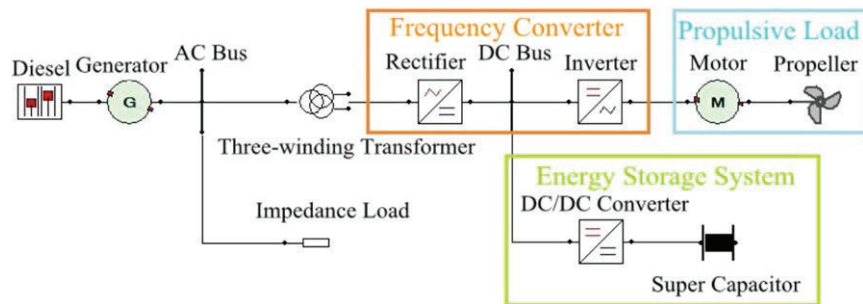


Рис. 9. Схема СЕЕС електрохода з використанням іоністора [15]

Розвиток силових напівпровідникових елементів дав можливість розробки частотних перетворювачів (ЧП) та впровадження їх як джерела живлення гребних електродвигунів на судах. Після початку застосування тиристорів наприкінці 1950-х років елементна база ЧП суттєво розширилася і продовжує розвиватися, але основними елементами залишаються діоди, тиристори та IGBT-транзистори [17]. Серед найбільш відомих топологій НП можна виділити такі: випрямлячі, циклоконвертери, синхроконвертери та ШІМ-інвертери (рис.10). Керовані випрямлячі застосовуються як джерела живлення двигунів постійного струму малої потужності (до 5 МВт) і, як наслідок, вони не застосовуються для судових ГЕУ на змінному струмі. В якості джерел живлення синхронних двигунів застосовуються цикло- та синхроконвертери. Циклоконвертери зазвичай застосовуються в ГЕУ криголамів або суден із системами динамічного позиціонування (ДП) через їхню здатність зберігати високі значення крутного моменту при низьких швидкостях ГЕД.

Циклоконвертери допускають вхідні сигнали з фіксованою амплітудою та частотою і перетворюють їх у вихідні сигнали змінної амплітуди та частоти з низькою частотою перемикання та без внутрішньої шини постійного струму. Недоліком такої схеми є той факт, що частота мережі на виході ЧП не може бути вищою за вхідну [17]. На інших типах суден із синхронними двигунами, які не вимагають подібних характеристик, можуть застосовуватися синхроконвертери, що мають менші розміри, простіші контролери управління, кращі характеристики щодо спотворення параметрів мережі через спектр вищих гармонік. Синхроконвертери містять керований тиристорний випрямляч, індуктивний ланцюг постійного струму і тиристорний інвертор, який працює як інвертор джерела струму. Швидкістю двигуна можна керувати, регулюючи частоту вихідного струму, а крутний момент і потужність регулюються зміною напруги на шині постійного струму. Завдяки тому, що робота випрямляючого та інвертуючого щаблів може виконуватися незалежно і з достатньою швидкістю, зміна швидкості обертання гребних гвинтів та їх реверс відпрацьовуються також досить швидко. Однак через застосування тиристорів та їхню невисоку швидкість перемикання крутний момент двигуна може мати биття на низьких обертах [17]. Більш універсальним типом ЧП є перетворювачі, що використовують принцип широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Вони можуть застосовуватися для керування як синхронними, так і асинхронними двигунами та асинхронними двигунами з постійними магнітами.

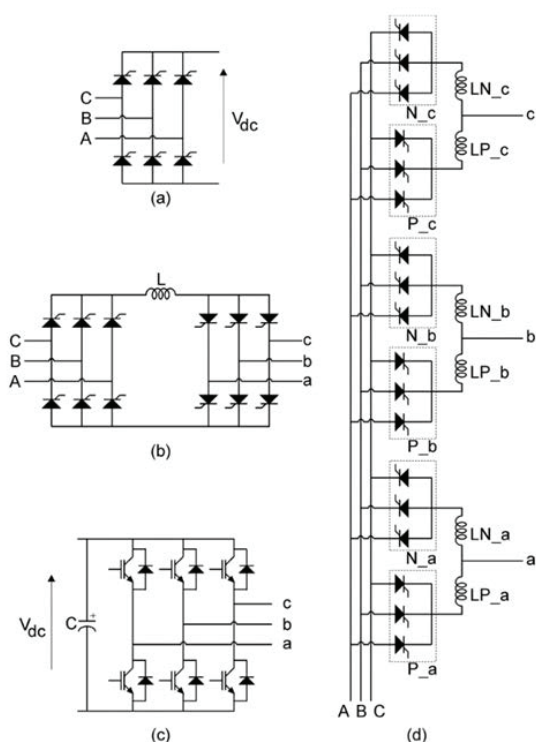


Рис. 10. Керований випрямляч (a), синхроконвертор (b), ШІМ-інвертор (c), циклоконвертор (d) [17]

ЧП з ШІМ засновані на силових пристроях з керованим вимкненням, таких як IGBT транзистори, які здатні працювати на більш високих частотах, ніж перетворювачі на основі тиристорів. Типовий перетворювач із ШІМ складається з мостового діодного випрямляча який є входним каскадом, ємнісної ланки постійного струму та вихідного інвертора. Діодний випрямляч можна замінити випрямлячем з ШІМ-контролером, щоб покращити електричні характеристики входного каскаду приводу, що дозволяє уникнути використання великих пасивних фільтрів гармонік. Амплітудою і частотою вихідної напруги можна керувати, а за рахунок високочастотного перемикавання можна точно і плавно регулювати крутний момент двигуна. Робочі характеристики приводу зберігаються у всьому діапазоні доступних амплітуд та частот напруги [17].

Щодо питання подальшого розвитку НП з погляду поліпшення динамічних показників цікаві ті, які зменшують недоліки існуючих ЧП. Основною проблемою частотних перетворювачів є спотворення ними параметрів мережі живлення за рахунок виникнення вищих гармонік напруги і струму. Елементна база силових пристроїв з карбїду кремнію (SiC) швидко розвивається [18], і різні дослідження показують перші результати її застосування в силових пристроях. Частоти перемикавання пристроїв на елементах із SiC можуть бути у 100 разів вищими, ніж у звичайних Si – що збільшить швидкодїю ЧП, а опір провідності у 100 разів нижчий,

що як відомо, є одним із шляхів зниження емісії вищих гармонійних складових струму. Ще однією перевагою перетворювачів на основі карбїду кремнію є можливість роботи з вищими напругами, і, як наслідок, більш швидкі та ефективні силові пристрої можуть стати комерційно доступними в найближчому майбутньому [18]. Наступним шляхом модернізації ПП є дослідження у сфері нових топологій перетворювачів потужності, у тому числі, ймовірно, найцікавішими з погляду застосування у майбутніх ГЭУ є багаторівневі, матричні і багатофазні перетворювачі [17]. Принцип роботи багаторівневих перетворювачів полягає у генерації різних напруг на шині постійного струму для покращення якості форми сигналу змінної напруги. У свою чергу багаторівневі перетворювачі пропонуються трьох видів: перетворювачі з діодними снабберами, з «літаючими» конденсаторами і послідовні каскадні перетворювачі [17]. Усі запропоновані рішення мають на меті зменшення гармонійних спотворень вихідного сигналу змінного струму. У свою чергу для управління вищезазначеними топологіями розробляються такі алгоритми управління: низькочастотний ШПМ, високочастотний ШПМ, гібридний [17]. У першому випадку кожен перемикач, що складається з IGBT-транзистора та FWD-діода, перемикається один раз на основній частоті змінного струму. Як наслідок, потрібна більша кількість рівнів для мінімізації вихідних гармонійних спотворень. У разі роботи високочастотної ШПМ доступні різні методи, найбільш цікавим підходом є метод зсуву несучої частоти, який мінімізує гармонічні спотворення на виході у разі рівної напруги постійного струму. Гібридний алгоритм багаторівневого перетворювача передбачає, що один перетворювач, що складається з IGCT, перемикається на низькій частоті, а другий високочастотний ШПМ-перетворювач очищує гармонійний спектр першого [17].

Матричні перетворювачі складаються з масиву двонаправлених перемикачів $m \times n$, де m і n – кількість вхідних та вихідних фаз відповідно, що дозволяє змінювати стан з'єднання вхідних та вихідних фаз. Алгоритм управління для даної топології досить складний, крім того, при проектуванні перетворювача необхідно враховувати різні практичні питання, такі як вхідний пасивний фільтр для компенсації реактивної потужності або снаббери для запобігання перенапруг під час роботи перетворювача. Амплітуда та частота для низькочастотних складових вихідних напруг матричного перетворювача вимагає підбору відповідного методу модуляції, що є недоліком даного типу ЧП [17].

Багатофазні перетворювачі використовуються для живлення багатофазних асинхронних двигунів. Такі двигуни мають більшу надійність, ніж звичайні трифазні, і, як наслідок, можуть успішно застосовуватися в ГЭУ. Багатофазні перетворювачі використовують загальну шину постійного струму та включають стільки гілок, що складаються з двох або більше (багаторівневих) перемикачів, скільки фаз у керованого двигуна. Слід враховувати, що 3-фазні інвертори можуть розглядатися як окремий випадок багатофазної топології, і методи модуляції, що застосовуються до трифазних інверторів, такі як синусоїдальна або просторово-векторна ШПМ, можуть бути поширені на багатофазні перетворювачі.

Що стосується електродвигунів, незважаючи на те, що їхня частка в загальному навантаженні, включаючи ГЭД, підрулюючі пристрої, насоси та інше, становить 80-90%, кількість видів дуже обмежена і представлена в основному асинхронними

(індукційними) двигунами. Додавши сюди двигуни постійного струму та синхронні машини отримаємо повну лінійку ГЕД на сучасних судах-електроходах. Умовно їх застосування можна розмежувати за потужністю. Двигун постійного струму повинен отримувати живлення від джерела постійного струму, а оскільки виробництво та розподілення електроенергії трифазне, двигун постійного струму повинен житися від випрямляча з тиристорним керуванням, який також забезпечує регулювання швидкості. Витрати, технічне обслуговування і технологічні обмеження лімітують застосування двигунів постійного струму 5ма МВт [17]. Асинхронні або індукційні двигуни можуть бути безпосередньо підключені до електричної мережі і, отже, працювати з постійною швидкістю або можуть житися від циклоконвертера або ШПМ-інвертора, щоб отримати регулювання швидкості. Найбільш економічно ефективні у діапазоні потужностей до 5-10 МВт [17]. Синхронні машини використовуються у великих гребних приводах, зазвичай >5 МВт у конфігураціях з прямим підключенням до гребного гвинта і >8-10 МВт у разі підключення через редуктор [17].

У питанні вдосконалення ГЕД саме синхронні машини мають найвищий потенціал. Насамперед можна виділити синхронні двигуни з постійними магнітами (ПМ), перші приклади їх використання на судах вже відомі [19].

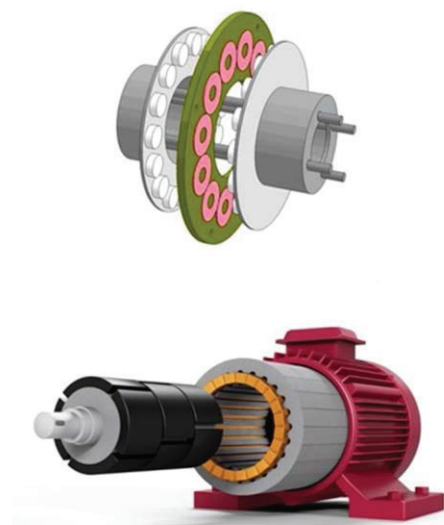


Рис. 11. Приклади синхронних двигунів із постійними магнітами [19]

Компанії ABB, Siemens, DRS Technologies та інші вже випускають такі лінійки промислових зразків електродвигунів цього типу. Конструкційною особливістю ЕД з ПМ є застосування постійних магнітів замість обмотки збудження, розташованої на роторі електричної машини. Приклади такого компонування представлені на рис. 11. З переваг СЕД з ПМ слід зазначити такі:

- велика енергетична густина;
- високий ККД (до 99,3%);

- спрощена система охолодження;
- поліпшені експлуатаційні характеристики;
- стійкість до коливань напруги у мережі.

Іншим шляхом удосконалення СЕД є впровадження технологій, пов'язаних із надпровідниками. Дослідження в галузі матеріалів з меншими електричними втратами, відомих як надпровідні дроти [14, 19] дозволили підвищити ефективність і щільність потужності машин, що обертаються, при одночасному зниженні їх розмірів і ваги.

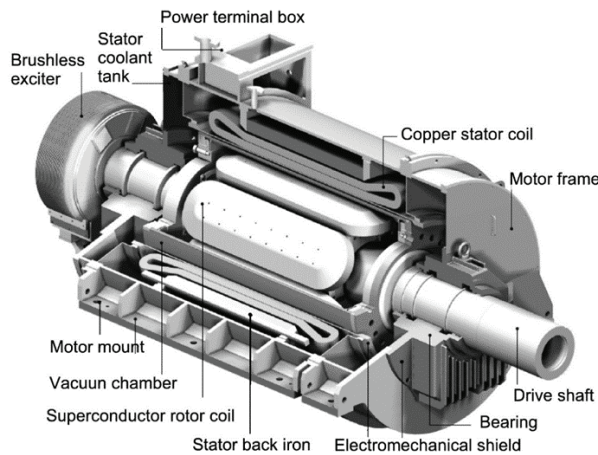


Рис. 12. Прототип 5 МВт синхронного електродвигуна з використанням технології ВТС компанії American Superconductor [17]

Існує два основних типи надпровідників: низькотемпературний надпровідник (НТС) з робочою температурою близько 10 К та високотемпературний надпровідник (ВТС), де робоча температура вище 100 К [19]. Через низьку температуру обидві технології вимагають системи охолодження, а у випадку з проводами НТС вона менша і простіша. Слід враховувати, що енергоспоживання цих холодильників залежить від потужності генератора або двигуна. Залежно від обраного надпровідникового матеріалу та конфігурації двигуна було запропоновано різні дослідницькі прототипи цих електричних машин, але перші комерційно доступні приклади засновані на синхронних двигунах на базі ВТС фірми American Superconductors, Inc [19]. Ці двигуни більш енергоємні, тихіші, легші і менші, ніж еквівалентні машини традиційної конструкції. Компанія American Superconductors, Inc. розробила два синхронні двигуни ВТС потужністю 5 МВт (рис. 12) та 36,5 МВт для ВМС США. Компанія Siemens також розробила прототипи електричних машин на основі ВТС для суднових установок.

Удосконалення систем управління та контролю ЕЕС суден-електроходів з метою покращення їх динамічних характеристик, безпеки та показників технічної експлуатації також є предметом досліджень і часто згадується у світових літературних джерелах. Як уже згадувалося, система управління є багаторівневою,

нижчий рівень якої займають локальні регулятори обертів первинних двигунів, системи збудження та автоматичного регулювання напруги генераторів і модулі керування частотних перетворювачів живлення ГЕД, а верхній поєднує різні функції в межах «системи управління живленням» (PMS) [5]. Оновленням підлягають всі частини системи управління, наприклад, загальними тенденціями розвитку автоматичних регуляторів частоти обертання є перехід від електромеханічних моделей до повністю електронних пристроїв [20]. Іншою характерною особливістю удосконалень є застосування замість або на додаток до класичних ПД або П+І регуляторів різних контролерів або алгоритмів керування [21,22]. Зокрема, для поліпшення характеристик АРЧ пропонується запровадити управління з прогнозуючою моделлю дизеля з лінійними спостерігачем у ланцюзі зворотнього зв'язку [21]. Ще одним із досліджень пропонується побудова регулятора частоти обертання дизеля на принципах нечіткої логіки з використанням алгоритму оптимізації рою частинок [22].

Удосконалення регуляторів напруги синхронних генераторів у плані поліпшення динаміки ЕЕС пов'язано, як згадувалося на початку статті, з форсуванням збудження СГ при накидах навантаження, як описано в [6,8,9].

Повертаючись до питання локальних регуляторів ЧП ГЭД, слід зазначити, що сучасні регулятори реалізуються з урахуванням мікропроцесорної техніки. В основі їх лежать класичні схеми замкнених ПІ та ПД регуляторів із зворотним зв'язком, які постійно вдосконалюються та мають деякі особливості залежно від типу ГЕД, що живиться від конкретного ЧП. Оскільки судна з ГЭД постійного струму нині мало будуються, основні типи їх, застосовувані на судах – синхронні і асинхронні двигуни змінного струму [23]. Всі СУ ЧП ГЭД побудовані на векторному принципі, що дозволяє домагатися необхідних значень обертаючого моменту на валу ГЭД і його швидкості обертання у всьому діапазоні регулювання. Умовно СУ ПП можна розділити на кілька взаємозалежних частин, наявність яких визначається топологією самого ЧП [23]. Як правило, статичний перетворювач частоти включає некерований або керований випрямляч зі своїм контролером, внутрішню шину постійного струму, на якій організовані ланцюги з опорами навантаження для режимів рекуперації ГЕД, також зі своїми контролерами і автономні інвертори, які відповідно мають свої керуючі підсистеми для забезпечення відкриття комутаційних ключів. До складу СУ ЧП можуть входити допоміжні регулюючі пристрої контролю активних фільтрів або, наприклад, підсистем обмеження динамічного навантаження [23]. Як зазначалося раніше, кількість можливих топологій для інверторів постійно зростає [17] і кількість запропонованих удосконалень їх СУ відповідно пропонується дедалі більше. Наприклад, МРС-регулятор із застосуванням прогнозуючої моделі (Model predictive control) запропонований для живлення ЧП гребного асинхронного двигуна. За твердженням авторів, даний тип регулятора дозволяє домогтися зменшення пульсацій крутного моменту на валу ГЭД і зменшення кількості перемикачів ключів інвертора [24]. Наступним варіантом удосконалення СУ ЧП є введення в її регулятор генератора хаотичних сигналів (Chaos-Based Generator), вихідний сигнал якого поєднується з основним сигналом управління і потім сумарний сигнал надходить у ланцюг управління ключами інвертора. Автори стверджують про зменшення рівня перешкод на 20Дб

у вихідному ШІМ-сигналі, що надходить на АД [25]. Ще одним прикладом удосконалення систем управління частотних перетворювачів живлення АД є наступна запропонована конфігурація для матричних перетворювачів інверторів. Її особливість – введення в структуру звичайного ПІ регулятора контуру управління, побудованого на засадах нечіткої логіки. Метою такого апгрейду є зменшення коефіцієнта гармонійних спотворень THD (Total Harmonics Distortion) напруги та струму у вхідних та вихідних ланцюгах ЧП [26]. Підсумовуючи, можна констатувати, що сучасні розробки, що стосуються СУ ЧП ГЕД електроходів, здебільшого присвячені покращенню якості показників суднової мережі та зменшенню присутності в ній складових вищих гармонік, як з боку живлення ЧП, так і з боку навантаження.

Усі вищезгадані регулятори у відповідність до різних джерел, наприклад, [6] утворюють первинний рівень управління (рис.2). Однак, у зв'язку з подальшим розвитком ЕЕС, збільшенням їх сумарної потужності, збільшенням частки пропульсивних навантажень, які можуть досягати 90% їх обсягу, а також появою так званих імпульсних навантажень PPL (pulse power loads), тобто. навантажень дуже великої потужності, що тривають дуже короткий час – секунди або мілісекунди (такі навантаження характерні для військових кораблів насамперед), виникає проблема вдосконалення систем керування ЕЕС електроходів [5]. Для створення СУ, які задовольняли б нові запити, використовується досвід проектування наземних автономних електричних мереж або мікромереж та електричних транспортних засобів [27]. Потенційним рішенням синтезу нових СУ можливо використання ієрархічної схеми управління [6]. У такій схемі регулювання можна оперувати за допомогою кількох рівнів керування, як показано на рис. 2. У такому разі говорять про стратегію управління, яка є кращою, оскільки вводить незалежну поведінку між різними рівнями управління. Таким чином, функції оптимізації та стабілізація енергосистеми можуть бути досягнуті одночасно, особливо для ізольованих систем із кінцевою генерацією та інерцією [6]. Верхній рівень ієрархічної суднової системи управління електроенергетичною установкою електроходів зазвичай реалізується в рамках системи управління потужністю або Power Management System (PMS), показаної на рис.2, яка виконує вторинне управління уставками швидкості та напруги, щоб підтримувати їх значення в робочих межах системи під час динамічних режимів роботи ЕЕС [5]. Наприклад, через спад напруги частота електричної мережі також буде зменшуватися зі збільшенням навантаження. PMS може (повільно) збільшувати уставку, щоб компенсувати спад та підтримувати частоту мережі на заданому рівні [6].

Більш того, під час зміни навантаження PMS забезпечує автоматичний запуск і зупинку резервних генераторних установок і контролює навантаження так, щоб двигуни не були перевантажені, обмежуючи за рахунок алгоритмів обмеження динамічного навантаження тягові моменти ГЕД і відключаючи другорядні споживачі при необхідності. Нарешті, PMS може виконувати функції захисту, такі як запобігання блекаутам, відключення несправних частин системи та переналаштування електричної мережі після вимкнення електроенергії. Стратегія управління, реалізована в PMS, отримала назву стратегії, що ґрунтується на (логічних) правилах. Управління з урахуванням (логічних) правил – це тип управління

енергоспоживанням судна, який спирається на людський досвід (інженерні знання), евристику, інтуїцію і навіть математичні моделі [28]. Він також використовує інформацію, зібрану під час раніше виконаних рейсів та стратегії вирівнювання навантаження. Рішення про розподіл потужності в кожний момент часу ґрунтуються на наборі визначених правил. Ці стратегії можуть бути реалізовані за участю оператора у режимі реального часу. Вони статичні, тому вибір робочих точок компонентів вимагає наявності відповідних таблиць або діаграм, щоб найкращим чином задовольнити потребу в потужності судна в конкретному режимі. Рішення приймаються миттєво на основі даних, що знімаються датчиками у конкретний момент часу. Надалі засновані на логічних правилах стратегії отримали свій розвиток і сьогодні розрізняють дві їх категорії – стратегії засновані на детерміністичних методах, і засновані на нечітких правилах [28].

З появою суден з гібридною силовою установкою, що використовують поряд із звичайними первинними джерелами енергії – дизель-генераторами, нові: паливні елементи, вітрогенератори, акумулятори та ін., стратегії оптимізації спільного використання джерел енергії вимагали створення третього рівня управління, відомого як система управління енергією (Energy Management System – EMS) [5,6]. Оскільки в частині управління динамічними процесами, всі підзадачі реалізуються на первинному та вторинному рівнях управління – у системах стабілізації частоти та напруги та PMS, розглянемо тенденції розвитку саме для цих систем.

Зокрема, у роботі [29], що ґрунтується на великій базі попередніх експериментів та теоретичних досліджень широкого кола авторів, запропоновано концепцію інтегрованої з PMS системи управління відмовами та знеструмленням з підвищеною надійністю. Її суть у застосуванні додаткових розподілених контролерів, включених до стандартної PMS ЕЕС електроходу, як показано на рис. 13.

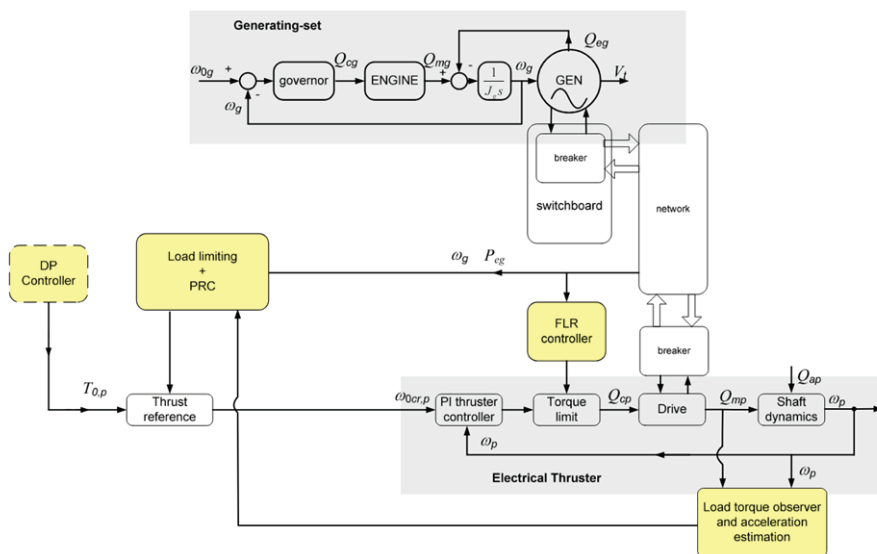


Рис. 13. Інтегрована з PMS система управління відмовами та знеструмленням підвищеної надійності [29]

Розподілені контролери виділені жовтим і є наступними:

Контролер перерозподілу потужності та управління обмеженням навантаження Load limiting + PRC (Power redistribution controller) перерозподіляє потужність між споживачами (трастерами), які генерують коливання навантаження. Обмеження навантаження на трастери здійснюється відстеженням сигналів про стан автоматичних вимикачів генераторів, переминок розподільних щитів, потужних споживачів. Контролер також використовує відхилення частоти мережі, розрахункові значення втрати тяги на гвинті, а також опосередковані показники коливань мережного навантаження як вхідні сигнали.

Контролер управління розподілом тяги (Load torque observer and acceleration estimation) реалізує існуючі алгоритми розподілу тяги з чутливістю до коливань швидкості гвинта. Таким чином, задана тяга на трастері, що погано працює, буде зменшена і перерозподілена на інші трастери.

Контролер швидкого зниження навантаження FLR (Fast Load Reduction) реалізований на основі алгоритму спостерігача, здатного розпізнавати відключення генератора за вимірюванням частоти мережі та потужності (струму, напруги). Цей контролер незалежний від PMS та дублює попередній, з більш високою швидкістю. Головною особливістю концепції інтегрованого управління є те, що уникають проблеми із затримками зв'язку та збоями, а кількість датчиків та зв'язку між контролерами зводиться до мінімуму. Більше того, оскільки управління розподілене в енергосистемі, досягається високий рівень надмірності та надійності, тобто стійкість до збоїв та відключень живлення.

Слабкими сторонами даної пропозиції є те, що процес змін параметрів мережі прийнято квазістатичним, а динамічні обурення розглядаються як шум. Регулювання виконується за випадку активної системи динамічного позиціонування, що обмежує застосування даних контролерів певними режимами роботи судна.

Результати досліджень. За підсумками огляду серед основних тенденцій, що визначають розвиток СЕЕС електроходів можна назвати застосування нових джерел енергії, збільшення загальної потужності установок та енергетичної щільності їх окремих складових частин, поява потужних короткочасних імпульсних навантажень, відмова від електромеханічних вузлів автоматики на користь електронних пристроїв. З іншого боку, проблеми обмінних коливань у багатоагрегатних судових електростанціях, випадкові відключення СЕЕС під час динамічних процесів, погіршення якості електроенергії в судових електромережах за рахунок присутності вищих гармонійних складових, зумовлених застосуванням потужних статичних напівпровідникових перетворювачів, ще чекають на своє остаточне рішення. При моделюванні динамічних режимів у деяких джерелах використовуються математичні моделі з лінеаризованими рівняннями, без урахування нелінійностей, властивості яких елементи СЕЕС набувають під час динамічних навантажень. Також використовуються моделі з одиничними генеруючими агрегатами, при цьому впливом обмінних коливань нехтують. Не вдалося знайти досліджень, присвячених реакції автоматичних регуляторів на зміну стану первинних двигунів внаслідок відмов і несправностей. Більшість пропонованих шляхів поліпшень динамічних характеристик матеріало- та трудомісткі, вимагають значних проміжків часу для впровадження та підходять для перспективних типів електроходів.

Висновки. За визнанням авторів опрацьованих статей, існує низка проблем для СЕЕС електроходів, що виникають під час динамічних процесів. Для їх вирішення необхідно розробити математичну модель СЕЕС з урахуванням нелінійних властивостей частин системи, що виявляються в перехідних режимах. Після перевірки та проведення експерименту з моделлю потрібно розробити адаптивний регулятор із включенням до числа вхідних сигналів його такого, який відображав би технічний стан первинного двигуна. Створення такого регулятора дозволить судам з електрорухом оптимально проходити динамічні обурення за критеріями безпеки, економічності та енергоефективності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hai-chun Niu, Mei-lian Zhao, Fu-zhen Qin. Study on the Ship Electric Propulsion System and Its Development. In: 7th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2017). Atlantis Press, 2017. Volume 112. DOI: <https://www.atlantis-press.com/article/25876778.pdf>
2. Espen Skjong, Egil Rødskar, Marta Molinas, Tor Arne Johansen, Joseph Cunningham. The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day. In: IEEE PROCEEDINGS 2015. DOI: https://folk.ntnu.no/torarnj/IEEE_Proceedings_Skjong_2015.pdf
3. П. С. Черников, В. А. Яровенко, Е.И. Зарицкая. Вплив загальносуднових споживачів електроенергії на оптимальне управління гребними електричними установками // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 75-82. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.
4. Hiroyasu Kifune, Mehdi Zadeh. Overview of Electric Ship Propulsion and Fuel Consumption. In: July 2019 Marine Engineering 54(4):576-581, DOI:10.5988/jime.54.576
5. R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments, Department of Maritime & Transport Technology, Delft University of Technology, The Netherlands, Applied Energy Volume 194, 15 May 2017, Pages 30-54. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.02.060
6. Guerrero, Josep M.; Jin, Zheming; Liu, Wenzhao; Bin Othman @ Marzuki, Muzaidi; Savaghebi, Mehdi; Anvari-Moghaddam, Amjad; Meng, Lexuan; Quintero, Juan Carlos Vasquez. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies. In Proceedings of PCIMASIA 2016. (pp. 135-142). VDE Verlag GMBH. https://www.researchgate.net/publication/308050733_Shipboard_Microgrids_Maritime_Islanded_Power_Systems_Technologies
7. Веретенник А.М., Аболешкин С.Е. Современный дизель-генератор – источник энергии судовой электростанции. Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 28. – Одесса: ОНМА, 2011. Стр.133-145. УДК 621.436.12

8. Jonas Kristiansen Nøland, Stefano Nuzzo, Alberto Tassarolo, Erick F. Alves. Excitation System Technologies for Wound-Field Synchronous Machines: Survey of Solutions and Evolving Trends. August 2019 IEEE Access 7(1):109699-109718. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2933493
9. J. Dai, S. Hagen, D. C. Ludois, and I. P. Brown, Synchronous generator brushless field excitation and voltage regulation via capacitive coupling through journal bearings, IEEE Trans. Ind. Appl., vol.53, no.4, pp. 33173326, Jul. 2017. DOI:10.1109/TIA.2017.2681621
10. Савенко А. Е. Исследование обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторов / А. Е. Савенко // Материалы 19 международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика 2012”. – Киев, 2012. – С. 251–252.
11. Савенко А. Е. Метод уменьшения обменных колебаний мощности при управлении параллельной работой судовых дизель генераторных агрегатов / А. Е. Савенко // Материалы 20 международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика 2013”. – Николаев, 2013. – С. 271–272.
12. Rongjie Wang, Xiangyu Liu, Yuyuan Huang. Synchronous Generator Excitation System for a Ship Based on Active Disturbance Rejection Control. <https://doi.org/10.1155/2021/6638370>
13. Kyunghwa Kim, Kido Park, Gilltae Roh & Kangwoo Chun (2018) DC-grid system for ships: a study of benefits and technical considerations, Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping, 2:1, 1-12, DOI: 10.1080/25725084.2018.1490239
14. Zhuk, D.; Zhuk, O.; Kozlov, M.; Stepenko, S. Evaluation of Electric Power Quality in the Ship-Integrated Electrical Power System with a Main DC Bus and Power Semiconductor Electric Drives as Part of the Electric Propulsion Complex. Energies 2023, 16, 2961. <https://doi.org/10.3390/en16072961>
15. Peng Bao, Wanting Wang. Stability Improvement of Electric Ship Propulsion System Using Supercapacitor. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2030, 2021 International Conference on Electrical Engineering and Computer Technology (ICEECT 2021) 20-22 August 2021, Qingdao, China. DOI 10.1088/1742-6596/2030/1/012006
16. Wenjie Chen, Alf Kare Adnanses, Jan Fredrik Hansen, John Olav Lindtjorn, Tianhao Tang. Super-capacitors based hybrid converter in marine electric propulsion system. The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010, 06-08 September 2010. DOI: 0.1109/ICELMACH.2010.5607967
17. Victor M. Moreno, Alberto Pigazo. Future trends in electric propulsion systems for commercial vessels. Journal of Maritime Research, Vol. IV. No. 2, pp. 81-100, 2007. Printed in Santander (Spain). ISSN: 1697-4840.
18. Elasser A., Kheraluwala M. H., Ghezzi M. H., Steigerwald R. L., Evers N. A., Kretchmer J., Chow T. P. A comparative evaluation of new silicon

- carbide diodes and state-of-the-art silicon diodes for power electronic applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* 39 (4) (2003), 915-921. DOI:10.1109/TIA.2003.813730
19. Bassham, Bobby A. An evaluation of electric motors for ship propulsion. Theses and Dissertations. Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2003-06. In: <http://hdl.handle.net/10945/1029>
 20. Ying Hu, Jianguo Yang, Nao Hu, Lei Hu, Zhengyan Qian, Yonghua Yu. Research and development of electronic speed control strategies for medium-speed marine diesel engines. August 2017, *International Journal of Engine Research*. Volume 19, Issue 5. DOI:10.1177/1468087417725005
 21. Tran, T.A. The Optimization of Marine Diesel Engine Rotational Speed Control Process by Fuzzy Logic Control Based on Particle Swarm Optimization Algorithm. *Future Internet* 2018, 10, 99. <https://doi.org/10.3390/fi10100099>
 22. H. Shu, X. Li, Y. Liu and R. Wang, «Model Predictive Control With Disturbance Observer for Marine Diesel Engine Speed Control,» in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 49300-49318, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3270286
 23. The guide of Marine Frequency Converters marine EQUIPMENT. In: https://www.academia.edu/33141451/The_guide_of_Marine_Frequency_Converters_marine_EQUIPMENT
 24. Liu T, Yao X, Kou J. Enhanced Model Predictive Control for Induction Motor Drives in Marine Electric Power Propulsion System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024; 12(3):378. <https://doi.org/10.3390/jmse12030378>
 25. Balestra Michele, Bellini Alberto, Callegari Sergio, Rovatti Riccardo, Setti Gianluca. (2004). Chaos-Based Generation of PWM-Like Signals for Low-EMI Induction Motor Drives: Analysis and Experimental Results. *IEICE Transactions on Electronics*. E87C.
 26. Jati Mentari, Era Purwanto, Sumantri Bambang, Rusli Muhammad, Nasuha Aris, Tjahjono Anang, Taufik Taufik. (2021). A Fuzzy Supervisory Scalar Control for Matrix Converter Induction Motor Drives. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 13. 203-217. DOI:10.15676/ijeei.2021.13.1.12
 27. Chua, L. W. Y. (2019). A strategy for power management of electric hybrid marine power systems. Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore. <https://doi.org/10.32657/10220/48078>
 28. Panday, Aishwarya & Bansal, Hari. (2014). A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle. In: https://www.researchgate.net/publication/316990426_A_Review_of_Optimal_Energy_Management_Strategies_for_Hybrid_Electric_Vehicle
 29. D. Radan. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems. Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor. Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology 2008. In: https://folk.ntnu.no/assor/PhD%20Thesis/Phd_Radan_NTNU.pdf

REFERENCES

1. Hai-chun Niu, Mei-lian Zhao, Fu-zhen Qin. Study on the Ship Electric Propulsion System and Its Development. In: 7th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2017). Atlantis Press, 2017. Volume 112. DOI: <https://www.atlantis-press.com/article/25876778.pdf>
2. Espen Skjong, Egil Rødskar, Marta Molinas, Tor Arne Johansen, Joseph Cunningham. The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day. In: IEEE PROCEEDINGS 2015. DOI: https://folk.ntnu.no/torarnj/IEEE_Proceedings_Skjong_2015.pdf
3. P. S. Chernikov, V. A. Yarovenko, E. I. Zaritskaya. Influence of ship consumers of electric energy on optimal control of electrical propulsion plants // Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion.» – Kharkiv : NTU «KhPI», 2019. – No. 4 (1329). – P. 75-82. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2409-9295.
4. Hiroyasu Kifune, Mehdi Zadeh. Overview of Electric Ship Propulsion and Fuel Consumption. In: July 2019 Marine Engineering 54(4):576-581, DOI:10.5988/jime.54.576
5. R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments, Department of Maritime & Transport Technology, Delft University of Technology, The Netherlands, Applied Energy Volume 194, 15 May 2017, Pages 30-54. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.02.060
6. Guerrero, Josep M.; Jin, Zheming; Liu, Wenzhao; Bin Othman @ Marzuki, Muzaidi; Savaghebi, Mehdi; Anvari-Moghaddam, Amjad; Meng, Lexuan; Quintero, Juan Carlos Vasquez. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies. In Proceedings of PCIMASIA 2016. (pp. 135-142). VDE Verlag GMBH. https://www.researchgate.net/publication/308050733_Shipboard_Microgrids_Maritime_Islanded_Power_Systems_Technologies
7. Veretennik A.M., Aboleshkin S.E. Modern diesel generator – energy source of ship power plant. Ship power plants: scientific and technical collection. Issue 28. – Odessa: ONMA, 2011. Pp.133-145. UDC 621.436.12
8. Jonas Kristiansen Nøland, Stefano Nuzzo, Alberto Tassarolo, Erick F. Alves. Excitation System Technologies for Wound-Field Synchronous Machines: Survey of Solutions and Evolving Trends. August 2019 IEEE Access 7(1):109699-109718. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2933493
9. J. Dai, S. Hagen, D. C. Ludois, and I. P. Brown, Synchronous generator brushless field excitation and voltage regulation via capacitive coupling through journal bearings, IEEE Trans. Ind. Appl., vol.53, no.4, pp. 33173326, Jul. 2017. DOI:10.1109/TIA.2017.2681621
10. Savenko A. E. Study of exchange power oscillations during parallel operation of marine synchronous generators / A. E. Savenko // Proceedings of the 19th international conference on automatic control “Automation 2012”. – Kyiv, 2012. – P. 251–252.

11. Savenko A. E. Method for reducing exchange power fluctuations when controlling parallel operation of marine diesel generator units / A. E. Savenko // Proceedings of the 20th international conference on automatic control “Automation 2013”. – Nikolaev, 2013. – P. 271-272.
12. Rongjie Wang, Xiangyu Liu, Yuyuan Huang. Synchronous Generator Excitation System for a Ship Based on Active Disturbance Rejection Control. <https://doi.org/10.1155/2021/6638370>
13. Kyunghwa Kim, Kido Park, Gilltae Roh & Kangwoo Chun (2018) DC-grid system for ships: a study of benefits and technical considerations, Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping, 2:1, 1-12, DOI: 10.1080/25725084.2018.1490239
14. Zhuk, D.; Zhuk, O.; Kozlov, M.; Stepenko, S. Evaluation of Electric Power Quality in the Ship-Integrated Electrical Power System with a Main DC Bus and Power Semiconductor Electric Drives as Part of the Electric Propulsion Complex. *Energies* 2023, 16, 2961. <https://doi.org/10.3390/en16072961>
15. Peng Bao, Wanting Wang. Stability Improvement of Electric Ship Propulsion System Using Supercapacitor. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2030, 2021 International Conference on Electrical Engineering and Computer Technology (ICEECT 2021) 20-22 August 2021, Qingdao, China. DOI 10.1088/1742-6596/2030/1/012006
16. Wenjie Chen, Alf Kare Adnances, Jan Fredrik Hansen, John Olav Lindtjorn, Tianhao Tang. Super-capacitors based hybrid converter in marine electric propulsion system. The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010, 06-08 September 2010. DOI: 0.1109/ICELMACH.2010.5607967
17. Víctor M. Moreno, Alberto Pigazo. Future trends in electric propulsion systems for commercial vessels. Journal of Maritime Research, Vol. IV. No. 2, pp. 81-100, 2007. Printed in Santander (Spain). ISSN: 1697-4840.
18. Elasser A., Kheraluwala M. H., Ghezzi M. H., Steigerwald R. L., Evers N. A., Kretschmer J., Chow T. P. A comparative evaluation of new silicon carbide diodes and state-of-the-art silicon diodes for power electronic applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* 39 (4) (2003), 915-921. DOI:10.1109/TIA.2003.813730
19. Bassham, Bobby A. An evaluation of electric motors for ship propulsion. Theses and Dissertations. Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2003-06. In: <http://hdl.handle.net/10945/1029>
20. Ying Hu, Jianguo Yang, Nao Hu, Lei Hu, Zhengyan Qian, Yonghua Yu. Research and development of electronic speed control strategies for medium-speed marine diesel engines. August 2017, International Journal of Engine Research. Volume 19, Issue 5. DOI:10.1177/1468087417725005
21. Tran, T.A. The Optimization of Marine Diesel Engine Rotational Speed Control Process by Fuzzy Logic Control Based on Particle Swarm Optimization Algorithm. *Future Internet* 2018, 10, 99. <https://doi.org/10.3390/fi10100099>

22. H. Shu, X. Li, Y. Liu and R. Wang, «Model Predictive Control With Disturbance Observer for Marine Diesel Engine Speed Control,» in IEEE Access, vol. 11, pp. 49300-49318, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3270286
23. The guide of Marine Frequency Converters marine EQUIPMENT. In: https://www.academia.edu/33141451/The_guide_of_Marine_Frequency_Converters_marine_EQUIPMENT
24. Liu T, Yao X, Kou J. Enhanced Model Predictive Control for Induction Motor Drives in Marine Electric Power Propulsion System. Journal of Marine Science and Engineering. 2024; 12(3):378. <https://doi.org/10.3390/jmse12030378>
25. Balestra Michele, Bellini Alberto, Callegari Sergio, Rovatti Riccardo, Setti Gianluca. (2004). Chaos-Based Generation of PWM-Like Signals for Low-EMI Induction Motor Drives: Analysis and Experimental Results. IEICE Transactions on Electronics. E87C.
26. Jati Mentari, Era Purwanto, Sumantri Bambang, Rusli Muhammad, Nasuha Aris, Tjahjono Anang, Taufik Taufik. (2021). A Fuzzy Supervisory Scalar Control for Matrix Converter Induction Motor Drives. International Journal on Electrical Engineering and Informatics. 13. 203-217. DOI:10.15676/ijeei.2021.13.1.12
27. Chua, L. W. Y. (2019). A strategy for power management of electric hybrid marine power systems. Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore. <https://doi.org/10.32657/10220/48078>
28. Panday, Aishwarya & Bansal, Hari. (2014). A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle. In: https://www.researchgate.net/publication/316990426_A_Review_of_Optimal_Energy_Management_Strategies_for_Hybrid_Electric_Vehicle
29. D. Radan. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems. Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor. Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology 2008. In: https://folk.ntnu.no/assor/PhD%20Thesis/Phd_Radan_NTNU.pdf