

11. Osoblyvosti vyznachennia potuzhnosti dopomizhno-avariinoho elektropyvodu rukhu sudna z kombinovanoi dyzel-elektrychnoi sylovoi ustanovkoi / O.M. Rak, V.V. Busher, O.V. Hlazieva // Elektromekh. i enerhozberihaiuchi systemy. - 2020. - № 4. - S. 8-16.
12. Vijay K.G. Power Factor Improvement of Induction Motor by Using Capacitors [Електронний ресурс] / K.G. Vijay // International Journal of Engineering Trends 330 and Technology. – 2013..

УДК 629.12

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.20

Мельник О.В.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СУДНОВИХ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ УСТАНОВОК

Метою статті є проведення аналізу технічних рішень схем суднових комбінованих пропульсивних установок, в яких поєднуються робота теплових головних двигунів та гребних електричних установок. Розглянуто комбіновані пропульсивні установки, які знаходять все більш широке застосування на сучасних судах морського флоту. Особливістю комбінованих установок є те, що енергія для руху судна в них виробляється в двох різномісних суднових двигунах - теплових і електричних, працюючих на загальний рушій.

Дані установки є складними електромеханічними системами, призначеними для забезпечення руху в різних режимах експлуатації судна та виробництва електроенергії в режимі економічного ходу або при стоянці. Комбіновані пропульсивні установки поєднують в собі переваги традиційних пропульсивних установок з тепловими головними двигунами та гребних електричних установок.

Перспективним напрямом підвищення ефективності роботи комбінованих пропульсивних установок є також використання валогенераторів в режимі двигуна. Конфігурація цих установок складається з підключеного до редуктора малообертового дизельного двигуна (МОД), працюючого на гвинт та електричної машини (ЕМ), яка може працювати в режимі генератора або в режимі двигуна.

Ключові слова: комбінована пропульсивна установка, головний тепловий двигун, гребний електродвигун, гребна електрична установка, редуктор, валопровід, гребний гвинт, рушій, режим експлуатації. ефективна потужність, передача потужності, судновий дизель, енергетична установка, судно, суднові двигуни,

Актуальність дослідження. Комбіновані пропульсивні комплекси (КПК) поєднують в собі переваги класичної дизельної енергетичної установки з особливостями гребної електричної установки (ГЕУ). Гребні електричні установки знаходять все більше застосування, враховуючи відомі переваги перед прямою механічною передачею енергії від теплового двигуна до гвинта. Електрична технологія передачі енергії від теплового двигуна до рушія зазвичай відбувається за схемою: тепловий двигун – електричний генератор – електричний перетворювач – гребний електродвигун – (редуктор) – гвинт.

Потужність споживання ГЕУ досить велика і становить 80..90% від потужності електростанції. Тому важливою задачею при проектуванні ГЕУ є забезпечення її високої енергоефективності. Підвищення енергетичної ефективності є пріоритетним напрямком технічної політики в суднобудівництві. Найбільша економія енергоресурсів в ГЕУ може бути досягнута шляхом оптимального процесу управління процесом передачі потужності в кожному елементі від теплового двигуна до гвинта. Тому структура суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) повинна бути побудована таким чином, щоб забезпечити можливість управління всіма

елементами, що беруть участь в передачі енергії від теплового двигуна до гвинта. Оскільки в ланцюзі передачі потужності витрати в теплому двигуні найбільші, то структуру СЕЕС доцільно формувати таким чином, щоб була можливість змінювати всі її стани. Метою даної роботи було показати дослідження розвитку суднових комбінованих пропульсивних систем в напрямку покращення електроенергетичних показників.

Аналіз останніх досліджень. Засновником теорії дослідження динаміки спільної роботи елементів пропульсивного комплексу був професор В.І. Небеснов. Він в своїх працях розробив основи теорії й методів розрахунку перехідних та сталих режимів руху комплексу «корпус судна – гвинти – двигуни» в самих різних експлуатаційних режимах. В останні роки ряд робіт у цьому напрямку присвячені дослідженням:

- оптимального управління гребними електроенергетичними установками в складі пропульсивних комплексів електроходів на маневрах – В.О. Яровенко [1];
- проектування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів – В.В. Бодашко [2-4];
- динаміки роботи головного двигуна в складі пропульсивного комплексу – П.С. Суворова [5, 6].

Серед зарубіжних вчених, які займаються питаннями математичного моделювання, експлуатації гребних електричних установок і дизель-електричних пропульсивних систем слід виділити – J.F. Hansen [7– 9], A.K. Adnane [10], D.Radane [11]. Новітні розробки енергозберігаючих гібридних електричних пропульсивних комплексів належать таким всесвітньо відомим фірмам – гігантам, як – ABB-Marine [12], Rolls-Royce-Marine [13], MAN EPROX [14], Wartsila [15], Siemens [16], та іншим. Інтерес до цього напрямку досліджень незмінно зростає, так як світові тенденції розвитку суднобудівництва спрямовані на зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище, збільшення енергоефективності, надійності, як наслідок, маневреності та універсальності більшості типів суден, збільшенню терміну їх експлуатації.

Мета дослідження. Проведення аналізу роботи комбінованих пропульсивних комплексів (КПК), з виділенням ролі гребних електричних установок та валопроводу в складі головної установки.

Виклад основного матеріалу. Пропульсивною установкою (ПУ) називають комплекс механізмів та пристроїв, призначений для забезпечення руху судна. Суднова ПУ складається з рушія, валопроводу, головних суднових передач, головних теплових чи гребних електричних двигунів. На судах застосовуються ПУ різних типів. Найбільшого поширення нині знаходять пропульсивні установки з головними тепловими двигунами. Широкого поширення набули судові системи електроруху (ССЕ). Цим пропульсивним установкам притаманні переваги та недоліки, які визначають їх сферу застосування.

Прагнення поєднувати переваги пропульсивних установок різних типів стимулювало створення комбінованих (гібридних) пропульсивних установок.

Гребні електричні установки (ГЕУ) можуть бути класифіковані:

1. за родом струму – змінного, постійного та змінно-постійного (подвійного роду струму);
2. за типом первинного двигуна - з тепловими рушіями (дизелі, парові та газові турбіни), установки зі статичними джерелами електроенергії (аккумуляторні батареї та електрохімічні генератори);
3. за системою управління – з ручним та автоматичним управлінням;
4. за способом з'єднання гребного електродвигуна з гвинтом – з прямим з'єднанням та з редукторним з'єднанням.

У гребних електричних установках *постійного струму* як головні генератори застосовуються генератори з незалежним збудженням, а як гребні електродвигуни - двигуни з незалежним збудженням. ГЕУ постійного струму використовуються в установках малої та середньої потужності з високою маневреністю. Обмеження потужності цього типу ГЕУ визначається складністю створення електричних машин великої потужності. Такі установки відрізняються простотою, зручністю та плавністю регулювання частоти обертання гребних гвинтів у широкому діапазоні їх моментів та навантажень.

У гребних електричних установках *змінного струму* як головні генератори застосовуються синхронні машини, а як гребні електродвигуни – синхронні або асинхронні електродвигуни.

ГЕУ змінного струму встановлюються на судах із відносно рідкісною зміною режиму руху.

У ГЕУ змінного струму при малих та середніх потужностях (до 15 МВт) як первинний двигун зазвичай використовуються дизелі, а при великих потужностях – турбіни.

Регулювання частоти обертання гребних електродвигунів ГЕУ змінного струму з гвинтами фіксованого кроку забезпечується зміною частоти напруги генераторів при зміні частоти обертання первинних двигунів, або шляхом використання в якості гребних електродвигунів асинхронних машин з фазним ротором. Частотне керування кутовою швидкістю гребних електродвигунів змінного струму виявляється енергетично вигідним, тому що при цьому досягається мінімізація їх електричних втрат. Зміна напрямку обертання гребних електродвигунів досягається перемиканням фаз у головному ланцюзі.

Спосіб регулювання режиму роботи ГЕУ змінного струму дозволяє уникнути труднощів регулювання частоти обертання двигунів змінного струму, завдяки використанню гвинтів регульованого кроку (ГРК).

Використання потужних керованих напівпровідникових випрямлячів дозволило створити ГЕУ подвійного струму.

Перевагами ГЕУ цього типу є:

- висока надійність та економічність синхронних генераторів;
- плавне та економічне регулювання частоти обертання гребного електродвигуна, керованого випрямлячем;
- можливість живлення всіх судових споживачів від основних генераторів, тобто. від єдиної судової електростанції змінного струму

ГЕУ подвійного роду струму називаються установки, в яких як джерела електроенергії використовуються синхронні генератори змінного струму, а як гребні електродвигуни - електродвигуни постійного струму.

Розробка потужних випрямлячів дозволила об'єднати високі маневрені якості ГЕУ постійного струму, з перевагами ГЕУ змінного струму..

Застосовуються напівпровідникові випрямлячі двох типів:

- некеровані, вихідна напруга яких не регулюється;
- керовані – з регульованою вихідною напругою;

ГЕУ подвійного роду струму з випрямлячами забезпечують:

- високу маневреність за рахунок широкого діапазону регулювання частоти гребного електродвигуна;
- можливість створення турбогенераторних агрегатів без редукторів та зручність їх компонування у машинному відділенні;
- зниження шумності та вібрації елементів ГЕУ;
- підвищення загального к.к.д. установки;
- найбільшу простоту виконання та надійність гребних електродвигунів.

Застосування ВРШ для ГЕУ подвійного роду струму вносить додаткові переваги:

- постійність частоти обертання двигунів генераторів;
- сталість частоти обертання гребного електродвигуна та гребного гвинта.

Постійність частоти обертання первинних двигунів ГЕУ дозволяє проводити відбір потужності від шин системи електроруку для загальних потреб споживачів суден і раціональніше використовувати встановлену потужність судової електростанції.

ГЕУ подвійного роду струму перевершують за своїми характеристиками ГЕУ як постійного, і змінного струму.

Основне завдання при експлуатації ГЕУ – забезпечити її безвідмовну та безаварійну роботу, постійну готовність до дії.

Вирішення такої задачі досягається при виконанні наступних умов:

- забезпечення кваліфікованого обслуговування;
- своєчасне поповнення змінно-запасними частинами та матеріалами;

- правильне визначення термінів та обсягів профілактичних та ремонтних робіт, що виконуються судновим екіпажем;
- проведення розширених випробувань та організація налагодження ГЕУ відповідно до цільового призначення судна;
- постійний контроль ступеня забруднення ізоляційних поверхонь в електричних машинах ГЕУ;
- перевірка стану кабелів.

Таким чином, комплекс заходів технічної експлуатації охоплює обслуговування, догляд та ремонт ГЕУ та її елементів.

Перспективним напрямом підвищення ефективності роботи комбінованих пропульсивних установок є також використання валогенератора в режимі двигуна.

Конфігурація установки складається з підключеного до редуктора малообертового дизельного двигуна (МОД), працюючого на гвинт та електричної машини (ЕМ), яка може працювати в режимі генератора або в режимі двигуна.

Це дає можливість роботи КПК в режимах:

- відключення живлення (PTO – Power take off)
- режиму накопичення енергії (PTI – Power take in) в межах основного діапазону обертів головного двигуна [17].

Конфігурація комбінованого пропульсивного комплексу та валогенератора з режимами PTO/PTI показано на рис. 1.

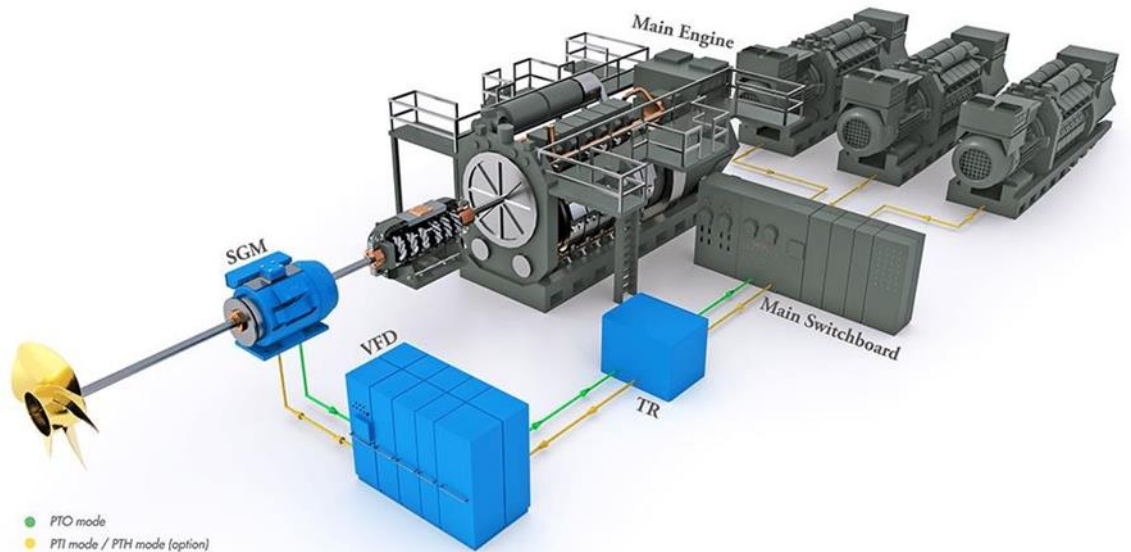


Рисунок 1 – Конфігурація комбінованого пропульсивного комплексу та валогенератора з режимами PTO/PTI [17]

Main Engine – головний двигун пропульсивної установки судна, Main Switchboard – головний розподільчий щит, TR – трансформатор напруги, VFD (Variable-frequency drive) – перетворювач частоти, SGM (Shaft Generator Motor) – валогенератор-двигун, PTO/PTI mode – лінії зв'язку при роботі пропульсивного комплексу в режимі PTO/PTI)

При режимі роботи пропульсивного комплексу та суднової електростанції Power Take-Off (PTO) валогенератор відбирає потужність та оберти від головного двигуна судна і працює як генератор, тобто подає живлення до електростанції з номінальною напругою та частотою [18-21]. Режим PTO може бути здійснений за допомогою механічних з'єднань, гідравлічних насосів або інших методів передачі потужності. На рис. 2 показана схема роботи КПК в режимі PTO.

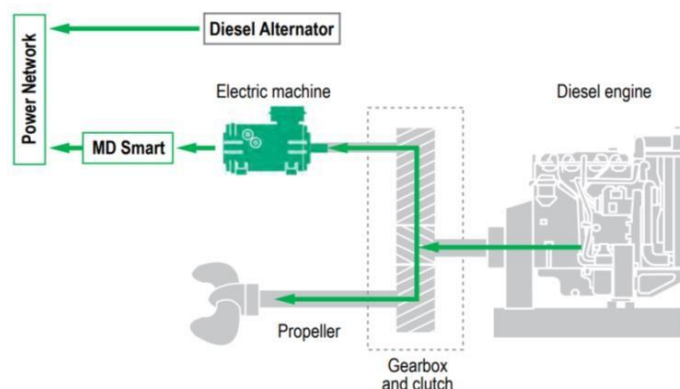


Рисунок 2 – Схема роботи КПК в режимі РТО, де

Diesel Engine – головний двигун, *Diesel Alternator* – генераторний агрегат, *Power Network* – суднова електроенергетична станція, *MDSmart* – перетворювач частоти фірми LeroySomer, *Electric machine* – валогенератор/двигун, *Gearbox and clutch* – муфта зчеплення, *Propeller* – гвинт судна

Power Take-In (PTI) – це режим, в якому валогенератор віддає потужність на вал пропульсивної установки та працює як електродвигун. Може бути встановлений датчик зворотного зв'язку швидкості (speed reference) для обмеження моменту відповідно до параметрів системи. Схема роботи КПК в режимі PTI показана на рис.3.

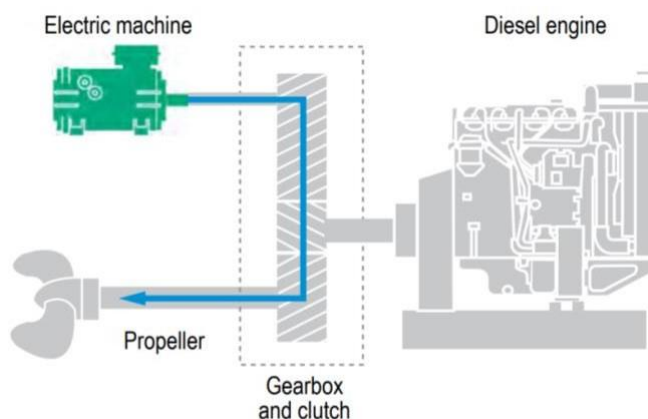


Рисунок 3 – Схема роботи КПК в режимі РТІ, де

Diesel Engine – головний двигун, *Electric machine* – валогенератор/двигун, *Gearbox and clutch* – муфта зчеплення, *Propeller* – гвинт судна

Керування режимами роботи генератора-двигуна та регулювання обертів, потужності, напруги і частоти реалізується за допомогою спеціалізованої системи управління, яка може включати в себе різні компоненти, такі як:

- PLC (програмований логічний контролер) – дозволяє програмувати різні режими роботи SGM та використовувати логічні алгоритми чи спеціалізовані програми для виконання різних завдань керування.

- Інвертори з ШІМ (Широтно-імпульсна модуляція) – інвертори використовуються для зміни постійного струму в змінний струм. Інвертори з ШІМ дозволяють регулювати напругу та частоту живлення SGM, що впливає на його оберти і потужність.

- Датчики зворотнього зв'язку – вимірюють оберти, потужність та інші параметри і дозволяють системі управління коригувати вихідну величину в реальному часі для досягнення

бажаних результатів, таким чином реалізується керування зі зворотнім зв'язком (Closed-Loop Control)

○ Спеціалізоване програмне забезпечення: управління SGM також може включати в себе спеціалізоване програмне забезпечення для налаштування режимів роботи, моніторингу та збереження даних про роботу системи.

Для керування валогенератором-двигуном SGM пропонується використовувати конвертори - перетворювачі частоти (ПЧ) SINAMICS з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) на базі IGBT транзисторів [22-23]. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) - це метод керування електричними сигналами, де час увімкнення (ширина імпульсу) і час вимкнення змінюються з необхідною частотою (частота комутації) для створення бажаної величини напруги або струму на виході.

Чим ширший імпульс, тим більша потужність або напруга. Частота зміни імпульсів також впливає на характеристики сигналу. Для отримання правильної синусоїдальної форми напруги змінного струму напруга вирівнюється за допомогою фільтрів, і частота модуляції вища, ніж для стандартних рішень активного фільтра електромережі (AFE). Це спрямовано на забезпечення надійної та ефективної роботи системи. Таким чином системи управління SIEMENS SINAMICS надають можливість використовувати всі переваги валогенератора та двигуна як гребної електричної установки.

Отже, SGM РТО/РТИ має наступні переваги:

○ зниження витрат на паливо-мастильні матеріали;
 ○ покращення безпеки судна та екіпажу завдяки використанню системи РТО;
 ○ системи РТО можуть працювати з низьким рівнем шуму;
 ○ за допомогою систем РТО можна зменшити розмір або кількість дизельних генераторів, що веде до зменшення ваги та об'єму на судні.

○ застосування систем РТО дозволяє зменшити кількість дизельних генераторів та зменшити їх розмір.

Висновки. У статті досліджується розвиток суднових комбінованих пропульсивних комплексів для покращення електроенергетичних показників. Судновласники віддають перевагу комбінованим пропульсивним комплексам з валогенераторами, які можуть працювати в режимах РТО/РТИ, а також гібридним комплексам з системами акумуляції енергії в батареї (Battery storage) [24].

Ці переваги роблять комбіновані пропульсивні комплекси привабливими для застосування в морській галузі та допомагають покращити ефективність та надійність роботи суден, але потребують подальшого дослідження в сфері якості електроенергії.

REFERENCES

1. Yarovenko, V.A. (1998), "Influence of the parameters of propulsive complexes on indicators of the quality of work of rowing power plants", *Prydniprovskiy naukoviy visnyk*, vol. 66, pp. 79-83.
2. Budashko, V.V. (2017), "Development of a three-level multi-criteria control strategy for a hybrid ship power plant of a combined propulsion complex", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, vol. 2, pp. 62-72. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
3. Budashko, V. Ungarov, D. and Onishenko, O. (2016), "Modernization of hybrid electric-power system for combined propulsion complexes", *Electrotechnic and computer systems*, vol. 23(99), pp. 17-22.
4. Budashko, V.V. and Onischenko, O.O. (2014), "Improvement of the control system of the thruster of the combined propulsion complex", *Visnyk NTU «KhPI»*, vol. 38(1081), pp. 45-51.
5. Suvorov, P.S. (1995), *Ekspluatatsyonnye rezhymy nahruzheniya glavnykh sudovykh sredneoborotnykh dyzelej* [Operating modes of loading of main marine medium-speed diesel engines], Moriak, Odessa, Ukraine.
6. Suvorov, P.S. Karpov, L.N. and Mel'nykov, B.P. (1999), "Identification of operating modes of the main engines in shallow water", *Avtomatyzatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv*, vol. 3, pp. 143-154.

7. Hansen, J.F. (2008), "Modeling and Control of Marine power System", Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
8. Hansen, J.F. Ådnanes, A.K. and Fossen, T.I. (1998), "Modelling, simulation and multivariable model-based predictive control of marine power generation system", *IFAC Proceedings*, vol. 31(30), pp. 41-46. doi: 10.1016/S1474-6670(17)38415-X.
9. Hansen, J.F. Ådnanes, A.K. and Fossen, T.I. (2001), "Mathematical Modelling of Diesel-Electric Propulsion Systems for Marine Vessels", *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 1-33. doi: 10.1076/mcmd.7.3.323.3641.
10. Ådnanes, A.K. (2003), *Maritime electrical installations and diesel electric propulsion*, Oslo, Norway: ABB Marine AS.
11. Radan, D. (2004), *Power electronic converters for ship propulsion electric motors*. Department of Marine Technology NTNU, Trondheim, Norway.
12. Radan, D. (2008), "Integrated Control of Marine Electrical Power Systems", Doctoral, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
13. Rolls-Royce Marine (2017), "Rolls-Royce Marine Portal", available at: <https://www.rollsroyce.com/products-and-services/marine.aspx> (Accessed 7 December 2024).
14. MAN, EPROX (2017), "Energy-saving electric propulsion system", available at: <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/marine-broschures/energy-saving-diesel-electric-propulsion-system---eproxy-flyer.pdf?sfvrsn=0> (Accessed 9 December 2024).
15. Wartsila (2016), "Wartsila Portal", available at: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/power-systems/electricpropulsion/electric-propulsion-systems> (Accessed 10 December 2024).
16. Siemens (2015), "Integrated propulsion technologies", available at: <https://www.industry.siemens.com/verticals/global/en/marine/commercial-ships/ship-propulsion/Pages/propulsion.aspx> (Accessed 11 December 2024).
17. Budashko, V. and Shevchenko, V. (2019), "Improving the control strategy of a multi-mass electromechanical system", *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, [Online], vol. 9 (49), pp. 38-43, available at: https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_september_part_3.pdf (Accessed 14 December 2024).
18. LEROY SOMER (2022), "Marine Solutions/Proven solutions for Marine applications Propulsion & Power Grid", available at: https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/6097_en.pdf (Accessed 18 December 2024).
19. Budashko, V.V. (2019), "Increasing the efficiency of hybrid propulsion complexes for multipurpose vessels by different criteria of the energy management strategies", *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, [Online], vol. 10 (50), pp. 53-62, available at: https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_1050_oct_2019_part_4.pdf (Accessed 14 December 2024).
20. Hvozdeva, I. Myrhorod, V. Budashko, V. and Shevchenko, V. (2020), "Problems of Improving the Diagnostic Systems of Marine Diesel Generator Sets", *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, Ukraine. pp. 350-354. Doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235453.
21. Myrhorod, V. Hvozdeva, I. and Budashko, V. (2020), "Multi-parameter Diagnostic Model of the Technical Conditions Changes of Ship Diesel Generator Sets", *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine. pp. 1-5. Doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240905.
22. Siemens (2020), "Low Voltage Engineering manual Version 6.7, Supplement to Catalogs D 11 and D 21.3", available at: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/185/83180185/att_1026522/v1/G130_G150_S120_S150_ext_config_man_0620_en-US.pdf (Accessed 16 December 2024).
23. Budashko, V. Obniavko, T. Onishchenko, O. Dovidenko, Y. and Ungarov D. (2020), "Main problems of creating energy-efficient positioning systems for multipurpose sea vessels", *2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Kyiv, Ukraine. pp. 106-109. Doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255514.

24. Elizabeth Lindstada, Torstein Ingebrigtsen (2020), "Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements", available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920918302578> (Accessed 16 December 2024).

Melnik O.V.

ADVANCED EFFICIENCY OF WORK OF SHIP PROPULSION PLANTS

The purpose of this article is to analyze the technical solutions of ship combination propulsion plants, which involve the operation of thermal propulsion engines and propulsion electric plants. Combined propulsion plants are examined, which are becoming more and more widely used on current ships of the maritime fleet. The peculiarity of the combined plants is that the energy for the ship's propulsion in them is generated in two different types of ship engines - thermal and electrical, operating on the propulsion system.

These plants are folding electromechanical systems designed to ensure the safety of the ship in various modes of operation of the ship and the generation of electricity in the economical mode or when stationary. Combined propulsion plants combine the advantages of traditional propulsion installations with thermal propulsion engines and propulsion electric installations.

A promising way to directly improve the efficiency of combined propulsion units is also the use of shaft generators in engine mode. The configuration of these plantss consists of a low-speed diesel engine (MSD) connected to the gearbox, driven by the propeller of an electric machine (EM), which can operate in generator mode or in motor mode.

Key words: combined propulsion plant, main thermal engine, electric propulsion motor, electric propulsion plant, reducer, shaft drive, propeller, engine, operating mode. effective power, power transmission, marine diesel, power plant, ship, marine engines.