

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕНЕРУЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ В ТЕРМОЕФЕКТИВНІЙ СИСТЕМІ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ЇЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

О. М. Рак¹, О. В. Глазева², С. А. Дудко²

¹Донецький національний технічний університет

²Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація. Метою впровадження головних двигунів з електронним управлінням є подальша оптимізація робочого процесу, зменшення викидів NOx з відпрацьованими газами до норм, встановлених MARPOL 73/78, зниження питомих витрат палива. Встановлення генератора в лінію вала дозволяє отримати додаткове джерело електричної енергії і джерело руху, що підвищує надійність роботи електростанції і енергоефективність судна.

Ключові слова: головний двигун, валогенератор, електродвигун, електронне управління, газова турбіна, парова турбіна, головний розподільчий щит, утилізаційний котел, дизельний генератор, питомі витрати палива, навантаження

Вступ.

В останні роки індустрія судноплавства стала предметом пильної уваги світової спільноти через глобальне збільшення викидів вуглецю у повітря. Дослідження показують, що в найближчі 15 років обсяг викидів в атмосферу зросте на 75% у міру збільшення обсягів торгівлі. Крім того, витрати на енергоресурси значно зросли, досить імовірно, що ця тенденція буде продовжуватися. Дефіцит і зростаюча вартість енергоресурсів, а також прагнення до поліпшення екологічності експлуатації флоту, лежать в основі вимог, встановлених Міжнародною морською організацією (*International Maritime Organization (IMO)*) в Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ щодо конструктивного індексу (коефіцієнту) енергетичної ефективності (*EEDI*), а також розробки і виконання судового плану управління енергоефективністю судна (*SEEMP*) в процесі експлуатації. Згідно з цими вимогами більшість нових суден повинні бути на 10% ефективніше з 2015 року, на 20% ефективніше до 2020 року і на 30% ефективніше з 2025 року. [1].

Сучасні морські судна є складним енерго- та електромеханічним комплексом з високим рівнем автоматизації та комп'ютеризації. Їх працездатність напряму залежить від компетентності, професіоналізму та узгоджених дій всього екіпажу, що в свою чергу, впливає на безпеку мореплавства, фінансово-економічні показники, рейтинг та імідж всієї компанії.

Зараз, враховуючи сучасний та динамічний рівень розвитку техніки та технологій, навіть в межах однієї серії судна можуть мати суттєві відмінності, не кажучи вже про інші типи суден, які відрізняються за призначенням, але всі судна незалежно від призначення мають спільні риси.

1. Мета і задачі дослідження

Метою роботи є аналіз енергоефективності суден при обладнанні судової електроенергетичної системи (СЕЕС) додатковими джерелами електричної енергії, та визначення сучасних тенденцій комплектування, режимів роботи судових електростанцій для їх енергоефективної і безаварійної експлуатації.

2. Матеріали дослідження.

Розглянемо основні принципи побудови та функціонування СЕЕС на прикладі контейнеровоза «Matilda Maersk» з місткістю 16000 контейнерів. Його основні технічні характеристики подані в табл.1.

По-перше ніж перейти до особливостей СЕЕС зупинимось на технічних характеристиках її головного двигуна (ГД). В якості ГД на судні встановлений мало обертовий дизель DOOSAN-WÄRTSILÄ-SULZER RT-flex96C з електронним управлінням (ЕУ) номінальною потужністю 93360 к.с. (68640кВт) і частотою обертання 102 об/хв [3]. Лінійка ГД подана дизелями двох модифікацій RT та RT-flex [5,6,7]. Їх тепловий баланс поданий на рис.1.

Таблиця 1

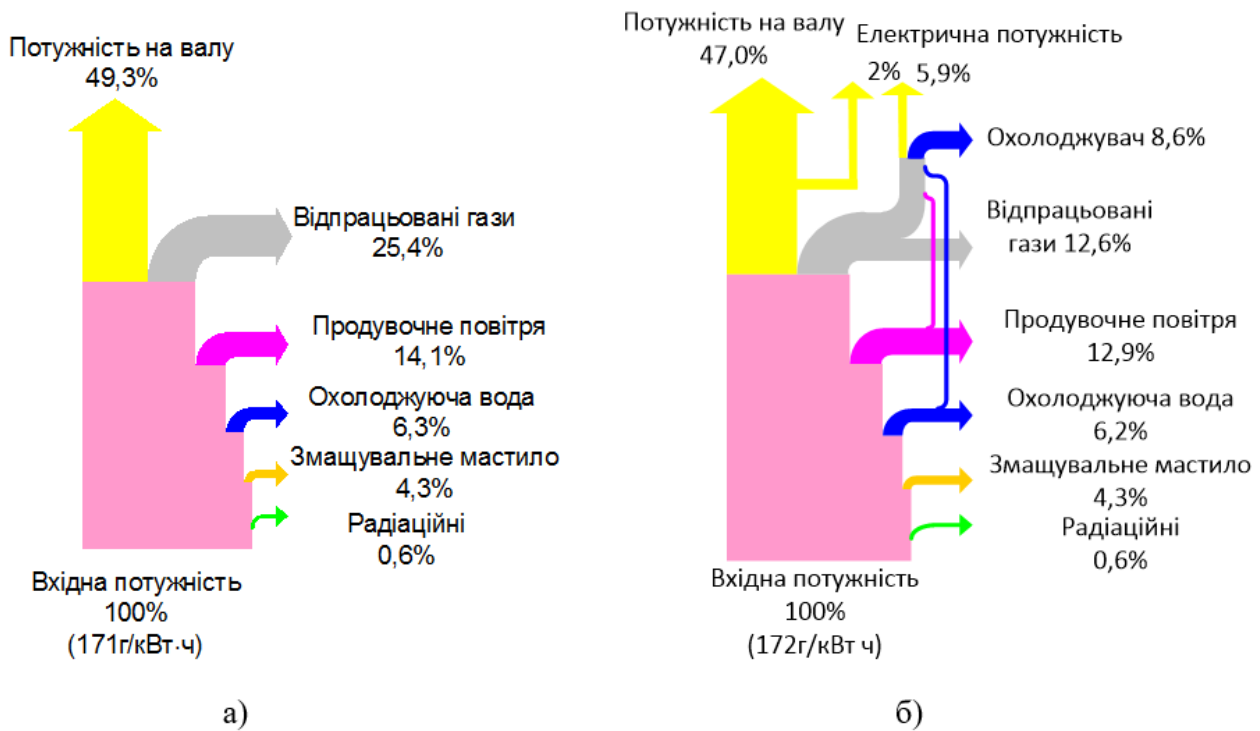
Технічні характеристики судна

Назва судна		Mathilde Maersk	
Побудова		ODENSE SHIPYARD LTD. ODENSE-LINDØ	
№ будівельника		LINDØ № 216	
Дата закладки киля		22.09.2008	
ІМО №		9359052	
Офіційний №		D. 4253	
Позивний		CUJS2	
Тонаж, т	Бруто	Нето	
	98268	50732	
Довжина, м		366	
Ширина, м		42,8	
Висота борту, м		24	

З теплового балансу (рис.1,а) видно, що 49% енергії, отриманої від спалювання палива перетворюється на корисну роботу, яка забезпечує рух судна. Майже 50% відпрацьованого тепла є додатковим ресурсом енергії, який теоретично можна використати на судні для виробництва пари та електроенергії, необхідних для обігрівання та роботи додаткового обладнання [7].

З рис.1,а витікає, що найбільше ємною для двигунів RT-flex96С залишається тепла енергія, яка міститься у відпрацьованих газах (25,4%) з якої ще можна додатково отримати 5,9% електричної потужності.

Як показує аналіз, для ГД MAN B&W, які є також дуже поширеними в наш час, ці показники є ідентичними [4].



Якщо в старих моделях ГД енергії відпрацьованих газів не вистачало для приводу газотурбокомпресорів (ГТК), то в нових – введення низки удосконалень в організацію робочого процесу двигунів та систему газообміну дозволили не лише форсувати двигуни шляхом вдмухування, але й зумовили суттєве збільшення енергії вихлопних газів. Це дало можливість вико-

ристовувати її не лише в ГТК, але і в додатково встановлених турбінах [4].

В термoeфективній системі (Thermo efficiency System (TES)) силова газова турбіна (ГТ) поєднується з паровою турбіною (ПТ), яка призводить до дії турбогенератор змінного струму [2,4]. Вироблення пари для парової турбіни здійснюється утилізаційним котлом (УК), увімкне-

ним в загальну систему у відповідності до рис.2. Також ГД призводить до дії валогенератор (ВГ) / двигун (Д). Використання такої схеми дозволяє в деяких випадках або підсилити рушій, або забезпечити аварійне джерело руху.

Такий підхід до побудови СЕЕС повністю відповідає вимогам, викладеним у [6,7] і дозво-

ляє, на наш погляд, ввести таке поняття як «узагальнена» СЕЕС. Його введення дозволить у подальшому спростувати аналіз будь-якої СЕЕС тому, що на всіх суднах, без винятку, присутні окремі її елементи, або їхні комбінації, наприклад ГД-ТГ-ДГ, ГД-ВГ-ДГ, ГД-ДГ або лише ДГ.

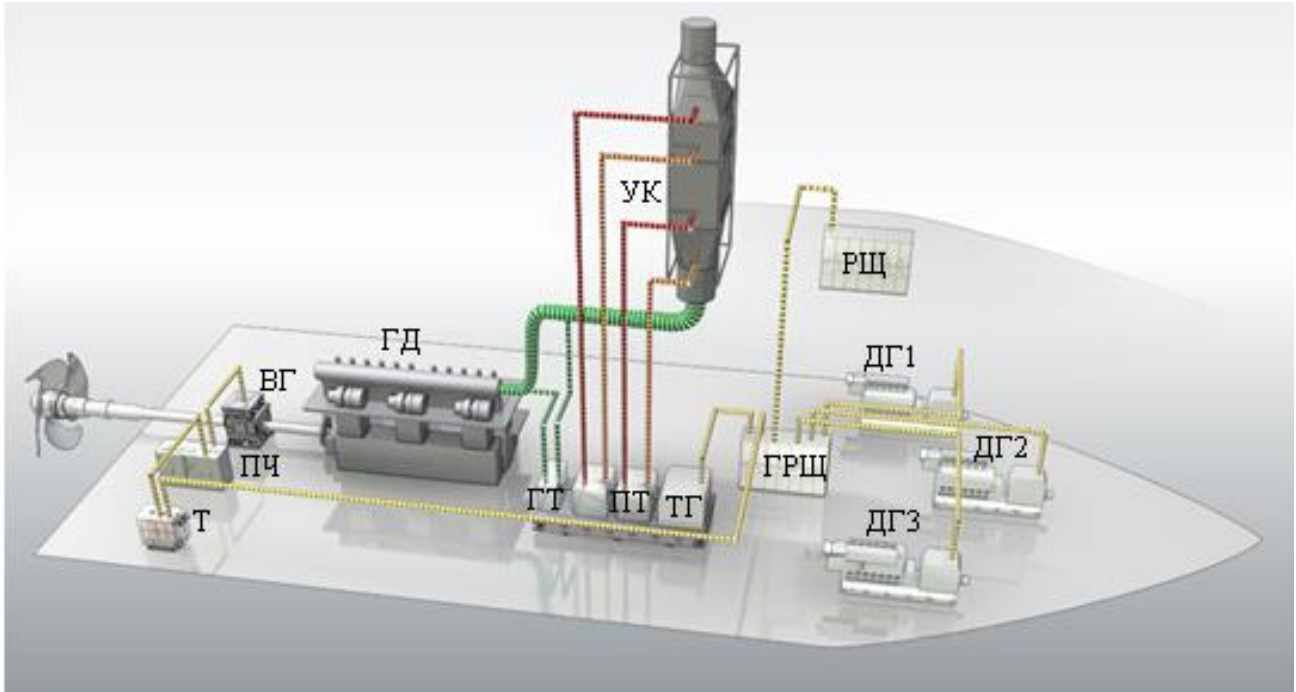


Рис. 2. Структурно-функціональна схема узагальноної СЕЕС: ГД – головний двигун; ВГ - валогенератор; Т - трансформатор; ПЧ – перетворювач частоти; УК - утилізаційний котел; ГТ - газова турбіна; ПТ - парова турбіна; ТГ - турбогенератор в [6] він зветься утилізаційним (УГ); ДГ1-ДГ3 - дизельні генератори; ГРЩ – головний розподільчий щит; РЩ - розподільчий щит

Тепер перейдемо до питання визначення потужності та складу СЕЕС. Питання визначення потужності СЕЕС, яка складається лише з ДГ, до яких відносять ймовірнісні, статистичного моделювання, аналітичний та табличний (назва методу пояснюється тим, що розрахунок навантажень СЕЕС у всіх режимах роботи судна оформлюють у вигляді таблиці), достатньо добре розроблені і викладені в [8]. В цій роботі для визначення потужності ДГ використовувався табличний метод визначення навантажень. Питання визначення потужності та вибору ТГ і ВГ в сучасній вітчизняній та зарубіжній літературі з морської справи розглянуто в недостатньому обсязі. Подальший аналіз літературних джерел показує, що потужність ТГ можна знайти користуючись діаграмою електричної потужності, яка виробляється ГТ і ПТ, поданої на рис. 3 та в [9]. По діаграмі (рис.3) для потужності ГД $P_{ГД}=68640\text{кВт}$ визначаємо електричну потужність ГТ $P_{ГТ}=2000\text{кВт}$ і потужність ПТ $P_{ПТ}=4200\text{кВт}$, що дозволяє отримати сумарну потужність ТГ $P_{ТГ}=6200\text{кВт}$ і співпадає

з даними [2]. Слід відмітити, що доцільно використовувати додаткові джерела електроенергії, потужність яких покриває хоча б ходовий і/або маневровий режими судна.

Потужність ВГ також можна оцінити орієнтовно, виходячи з наступних міркувань. Потужність на валу, подана на рис.2 це потужність на валу самого ГД, а потужність гвинтова буде меншою на величину втрат у підшипниках ($\approx 6\%$) і втрати на ВГ ($\approx 4\%$). В системі з передаванням енергії на генератор через редуктор втрати в редукторі становлять ($\approx 2\%$) і в самому генераторі ($\approx 4\%$) [10].

Тобто, потужність ВГ $P_{ВГ}=0,04 \cdot 68640=2745\text{кВт}$, що також відповідає [2]. А далі, за каталогами-довідниками фірм-виробників здійснюється вибір конкретних типів турбін і генераторів.

В табл.2 подані паспортні дані генераторів. З табл. 2 видно, що сумарна потужність ТГ і ВГ дорівнює сумі потужностей всіх ДГ, тому у відповідності до [2] пріоритетною вважається наступна послідовність введення генеруючих потужностей ТГ \rightarrow ВГ \rightarrow ДГ. При такій постановці

завдання можлива річна економія за статтею «Паливо» згідно з рис.3 може становити 1,2млн.\$.

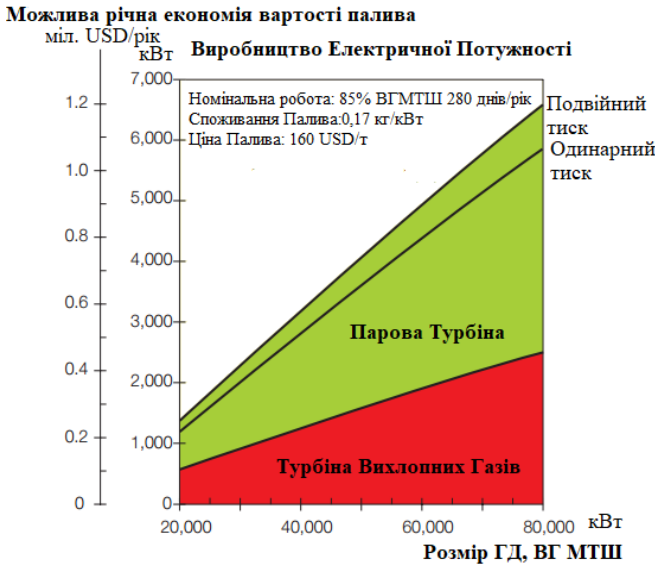


Рис. 3. Діаграма електричної потужності, яка виробляється газовою (Exhaust gas) та паровою (Steam) турбінами в залежності від потужності (Size of main engine) ГД

Також, важливо відзначити, що в 50-60 рр. вартість палива була низькою і знаходилась на рівні 20-30\$/тону, і тому завдання досягнення максимальної економічності ГД не було головним. У 80-і рр. вартість палива зросла в 10 і більше разів, і завдання підвищення економічності роботи ГД стало одним з головних. Для визначення витрат палива для виробництва електричної енергії скористаємось залежністю питомих витрат палива від навантаження.

У відповідності до [11] питомі витрати палива (SFOC) для ГД і ДГ можна апроксимувати поліномом другого ступеню виразами:

$$SFOC_{ME} = 0.01 \cdot L^2 - 1.513 \cdot L + 226.33, \quad (1)$$

$$SFOC_{DG} = 0.006 \cdot L^2 - 0.9586 \cdot L + 230.16, \quad (2)$$

де L – навантаження двигуна, %.

Для забезпечення роботи ГД та вироблення електричної енергії ДГ, ТГ або ВГ використовується важке паливо (HFO) – мазут ціною 160\$/т. Але, окремі зони (SECAs і ECAs, Caribbean US Virgin islands and Puerto Riko) вимагають використання низькосіркового мазуту, ціна якого є значно вищою. А з першого січня 2014 в усіх водах США і портах ЄС застосовується лише низькосіркове дизельне паливо (GDO), вартість якого значно вище 405\$/т – ціна за MDO.

Аналіз будемо виконувати на підставі питомих витрат палива. При цьому необхідно прийняти до уваги, що ГД і ДГ у відповідності до [12] повинні працювати в режимі наближеному до номінального, тобто з навантаженням 85% (для збільшення моторесурсу), і для виробництва електроенергії ТГ у відповідності з рис.1,6 ГД витрачається 5,9% палива.

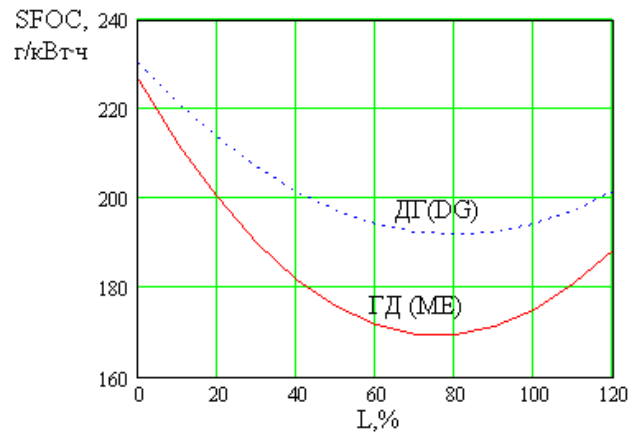


Рис.4. Питомі витрати палива для ГД (ME) і ДГ (DG)

Таблиця 2

Паспортні данні генераторів

Генератор	Тип	S, кВА	n, мин ⁻¹	U, В	I, А	f, Гц	cos φ
ДГ (3)	«Siemens» 1DK4531-8BF05-Z	3600	1800	6600	315,3	60	0,7
ТГ (1)	«Siemens» 1FJ4805-4SB62	7000	1800	6600	613,1	60	0,857
ВГ (1)	«Siemens» 65L3710-8LG42-4AW0	3571	45-82	6600	328,5	60	0,7
Аварійний	«CATERPILLAR» SR4	1700	1800	440	2456,6	60	0,8

Як показує практика, потужність дизелів для приводу генераторів є більшою за електрич

ну потужність генераторів на 10%. Тобто, якщо взяти з табл.2 значення потужності генератора «Siemens» 1DK4531-8BF05-Z $S = 3600$ кВА, то потужність приводного дизеля буде становити приблизно 4000кВт. Простим перерахунком отримуємо, що вартість вироблення 1кВт енергії за статтею «Паливо» для ТГ становить 0,02\$/кВт, а ДГ – 0,14\$/кВт (0,04 у випадку використання мазуту).

Висновки

Підсумовуючи викладене вище можна зробити наступні висновки:

1. Використання в якості ГД двигунів з електронним управлінням дозволяє шляхом гнучкого налаштування паливної апаратури забезпечити не лише дотримання вимог конвенції MARPOL 73/78 в частині скорочення кількості викидів NO_x, а також встановлювати потужні ВГ, які знижують собівартість генерованої енергії від 30 до 40 відсотків;

2. При укомплектуванні СЕЕС ТГ, що працюють від енергії використаних газів зменшують вартість 1кВт енергії за статтею «Паливо» у 7 разів.

3. Укомплектування СЕЕС додатковими джерелами електроенергії ВГ спільно з ТГ дозволяє розширити межсервісний інтервал для ДГ до 180 діб, що відповідає 4320 годинам роботи.

4. Введення поняття «узагальнена» СЕЕС дозволить в подальшому спрощувати аналіз роботи будь-якої електростанції.

5. Використання додаткових джерел електричної енергії на судні дозволить отримати річну економію за статтею «Паливо» приблизно 1,2млн.\$.

Список використаної літератури

1. MEPC 60/4/35. Prevention of Air Pollution from Ships, Mandatory EEDI requirements [Electronic resours]: Draft text for adding a new part to MARPOL Annex VI for regulation of the energy efficiency of ships. – Режим доступа 15.07.14: http://www.rina.org.uk/hres/mepc%2060_4_35.pdf.

2. 'M' class container ship. Operating manual lindø newbuilding L. 216. m/s "MATHILDE MAERSK" [Electronic resours].

3. SULZER RTA96C Marine Installation Manual [Electronic resours] / Issue May 2004. <https://ru.scribd.com/doc/11498707/RTFLEX96C>.

4. Возницкий, И. В. Двигатели MAN B&W модельного ряда MC 50–98. Конструкция,

эксплуатация, техническое обслуживание [Текст]. – М.: МОРКНИГА, 2008 – 264с., ил.

5. Pounder's Marine Diesel Engines and gas Turbines [Text]. Eighth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheller Road, Burlington, VF 01803.

6. Правила технической эксплуатации морских и речных судов. Электрооборудование [Текст].КНД 31.2.002.07–96.

7. Правила классификации и постройки морских судов [Текст]. Том 2. НД - № 2-020101-047. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная , 8. 2007. – 680с.

8. Справочник судового электротехника. Т.1. Судовые электроэнергетические системы и устройства [Текст] / Под ред. Г. И. Китаенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1980. –528с., ил.

9. Код доступа: <http://www.123energy.net/resources/cogeneration.pdf> [Electronic resours].

10.Код доступа: <http://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovid6/technical-papers/shaft-generators-for-mc-and-me-engines.pdf?sfvrsn=22> [Electronic resours].

11. E. Chatzinikolaou, C. Patsios, A. Sarigiannidis and A. Kladas. Exploitation of shaft generators for green efficient ship operation – Electric machine selection and operation on ship's electrical power system [Text] // 5th and 6th Marinlive Workshops "Ship Electric Grids" & "Power Management Systems".

12.Технико-экономические характеристики судов морского флота [Текст] РД 31.03.01 – 90. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1992. – 232с.

References

1. MEPC 60/4/35. Prevention of Air Pollution from Ships, Mandatory EEDI requirements: Draft text for adding a new part to MARPOL Annex VI for regulation of the energy efficiency of ships, available at: http://www.rina.org.uk/hres/mepc%2060_4_35.pdf.

2. 'M' class container ship. Operating manual lindø newbuilding L. 216. m/s "MATHILDE MAERSK".

3. SULZER RTA96C Marine Installation Manual / Issue May 2004, available at: <https://ru.scribd.com/doc/11498707/RTFLEX96C>.

4. Voznitsky, I. V. (2008), "Engines MAIN B & W of the model range MC 50–98. Construction, operation, maintenance" [Dvigateli MAN B&W modelnogo ryada MS 50–98. Konstruksiya, eksplu-

atatsiya, tehniceskoe obsluzhivanie], MORKNIGA, Moscow, 264 p.

5. Pounder's Marine Diesel Engines and gas Turbines. Eighth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheller Road, Burlington, VF 01803.

6. Rules of technical operation of sea and river vessels. Electrical equipment [Pravila tehniceskoy ekspluatatsii morskikh i rechnyih sudov. Elektrooborudovanie]. KND 31.2.002.07-96.

7. Rules classification and construction of sea-going vessels [Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov]. Volume 2. ND - No. 2-020101-047. Russian Maritime Register of Shipping. Russian, Sankt-Petersburg, Palace Embankment, 8, 2007, 680p.

8. Reference book of ship electrical engineering. T.1. Ship electrical power systems and devices [Spravochnik sudovogo elektrotehnika. T.1. Sudovyie elektroenergeticheskie sistemy i

ustroystva] / Ed. G.I. Kitaenko. - 2 nd ed., Pererab. and additional. - L.: Shipbuilding, 1980, 528 p., Ill.

9. Access code: <http://www.123energy.net/resources/cogeneration.pdf>.

10. Access code: <http://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/shaft-generators-for-mc-and-me-engines.pdf?sfvrsn=22>.

11. E. Chatzinikolaou, C. Patsios, A. Sarigiannidis and A. Kladas. Exploitation of shaft generators for green efficient ship operation – Electric machine selection and operation on ship's electrical power system // 5th and 6th MarineLive Workshops "Ship Electric Grids" & "Power Management Systems".

12. Technical and economic characteristics of the vessels of the marine fleet of the [Tehniko-ekonomicheskie harakteristiki sudov morskogo flota] RD 31.03.01-90, Mortekhinformreklama, Moscow, 1992, 232 p.

DETERMINATION OF GENERATING CAPACITIES IN THE THERMOEFFECTIVE SYSTEM OF THE SHIPBOARD POWER PLANT AND ITS TECHNO-ECONOMIC INDICATORS

A. Rak¹, O. Glazeva², S. Dudko²

¹Donetsk National Technical University

²National University «Odessa Maritime Academy»

Abstract. Currently, the main engines with electronic control are becoming increasingly common on sea-going vessels. The task of implementing e-management is to further improve the energy efficiency of the vessel by optimizing the working process, reducing NOx emissions with exhaust gases to the standards established by MARPOL 73/78, and reducing the specific fuel consumption.

The purpose of this work is to analyze the energy efficiency of ships when equipping the ship electric power system (SEPS) with additional sources of electrical energy and familiarize electrotechnical officers with modern acquisition trends, operating modes of ship power plants for their energy-efficient and trouble-free operation.

In modern models of diesel-electric propulsion systems, the introduction of electronic control of the engine working processes, in particular the gas exchange system, has resulted in a significant increase in the energy of the exhaust gases. This, in turn, made it possible to use the energy of gases not only in gas turbochargers, but also in additional systems for generating electrical energy, such as turbogenerators.

The article considers the issues of determining the power and composition of the SEPS. The introduced concept of the generalized SEPS allows to simplify the analysis of any SEPS containing its individual components or their combinations.

The installation of the shaft generator makes it possible to obtain both an additional source of electrical energy and a stabilization device for the moment of the gas turbine, and in the event of a failure, the main engines is an alternative / emergency source of traffic. The power of additionally installed generators is commensurate with the total power of all diesel generators. This determines the philosophy of the ship's power plant: turbo-generator - shaft generator - diesel generators. This increases the reliability of the entire power plant, saves a significant part of the fuel, which contributes to improving the energy efficiency of the vessel as a whole.

Keywords: main engine, shaft generator, electric motor, electronic control, gas turbine, steam turbine, main switchboard, boiler, diesel generator, specific fuel consumption, loading.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ В ТЕРМОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЕ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И ЕЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

А. Н. Рак¹, О. В. Глазева², С. А. Дудко²

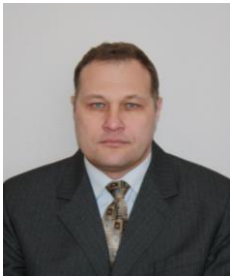
¹Донецкий национальный технический университет

²Национальный университет «Одесская морская академия»

Аннотация. Целью внедрения главных двигателей с электронным управлением является дальнейшая оптимизация рабочего процесса, уменьшение выбросов NOx с отработанными газами до норм, установленных MARPOL 73/78, снижение удельных расходов топлива. Установка генератора в линию вала позволяет получить дополнительный источник электрической энергии и источник движения, повышает надежность работы электростанции и энергоэффективность судна.

Ключевые слова: главный двигатель, валогенератор, электродвигатель, электронное управление, газовая турбина, паровая турбина, главный распределительный щит, утилизационный котел, дизельный генератор, удельный расход топлива, нагрузка.

Отримано 28.03.2018



Рак Александр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки і ТОЭ Донецького національного технічного університету. Вул. Артема, 58 Донецьк, Україна, E-mail: lion15ua@rambler.ru, тел. +38- 050-273-85-42

Alexandr Rak, Ph.D., Associate Professor of the Department of electromechanics and theoretical foundations of electrical engineering, Donetsk National Technical University, Artema street, 58, Donetsk, Ukraine, E-mail: lion15ua@rambler.ru, тел. +38- 050-273-85-42

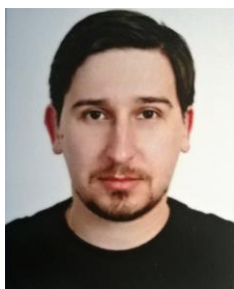
ORCID ID: 0000-0003-2809-6529



Глазева Оксана Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри суднової електромеханіки і електротехніки Національного університету «Одеська морська академія». Вул. Дідріхсона, 8, Одеса, Україна, E-mail: o.glazeva@gmail.com, тел. +38-067-994-03-42

Oksana Glazeva, Ph.D., Associate Professor of the Department Ship's electromechanics and electrical engineering, Odessa National University «Odessa Maritime Academy», Didrikhson str.,8, Odessa, Ukraine, E-mail: o.glazeva@gmail.com, тел. +38-067-994-03-42

ORCID ID: 0000-0002-4992-7697



Дудко Сергій Анатолійович, старший викладач кафедри суднової електромеханіки і електротехніки Національного університету «Одеська морська академія». Вул. Дідріхсона, 8, Одеса, Україна, E-mail: Sergiydudko.od@gmail.com, тел. +38-067-559-55-45

Sergiy Dudko, Senior Lecturer of the Department Ship's electromechanics and electrical engineering, Odessa National University «Odessa Maritime Academy», Didrikhson str.,8, Odessa, Ukraine, E-mail: Sergiydudko.od@gmail.com, тел. +38-067-559-55-45

ORCID ID: 0000-0002-0605-7177