

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ДОПОМІЖНО-АВАРІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РУХУ СУДНА З КОМБІНОВАНОЮ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ**О. М. Рак**

Донецький національний технічний університет

вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83001, Україна. E-mail: lion15ua@rambler.ru

В. В. Бушер, О. В. Глазева

Національний університет «Одеська морська академія»

вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна. E-mail: victor.v.bousher@gmail.com, o.glazeva@gmail.com

В роботі співставлено традиційну методику розрахунку параметрів електричного руху морських суден в допоміжно-аварійних режимах при малих швидкостях судна з іншою, спрощеною через те, що вона не потребує використання великої кількості діаграм для визначення опору руху судна. Але за спрощеною методикою для розглянутого прикладу – контейнеровозу місткістю 16 тис. контейнерів з потужністю головного двигуна 61776 кВт, синхронною машиною потужністю до 6 МВт в режимі двигуна та трьома дизель-генераторами з електричною потужністю по 3187 кВт – отримано потужність на 39 % більше, що збігається з власним досвідом експлуатації судна в режимах з електричним рухом, навантаження дизель-генераторів в цьому режимі на судні близько до 70 %, що й отримано за розрахунками. Таким чином, при модернізації рушійної установки або при проектуванні нових суден доцільно порівняти результати двох розрахунків потужності дизель-генераторів на межі мінімально-стійких обертів головного двигуна та обрати більший з результатів. Порівняння питомих та абсолютних витрат палива, здійснених на базі відомих апроксимаційних поліномів для низько- і високошвидкісних дизелів при допоміжно-аварійному русі показує, що при русі від високошвидкісних дизель-генераторів MAK8M32C витрати палива зменшуються на 24 %, ніж при забезпеченні мінімально стійких обертів головного двигуна 12 RTflex-96C компанії WÄRTSILÄ-SULZER. Тому використання електричного руху дозволяє зберегти моторесурс головного двигуна, зменшити витрати палива. Таке співвідношення спостерігається на більшості морських транспортних суден. А враховуючи, що дизель-генератори працюють майже з оптимальним навантаженням, а головний двигун – на холостому ході, електричний рух забезпечує суттєве зменшення шкідливих викидів в атмосферу. Останнє дійсно і для судна, де синхронний двигун розташований позаду головного двигуна, хоча витрати палива в цьому випадку збільшуються на 32 %.

Ключові слова: головний двигун, дизельний генератор, суднова рушійна установка, допоміжно-аварійний рух судна, число Фруда, діаграма Папмеля, витрати палива.

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНО-АВАРИЙНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВИЖЕНИЯ СУДНА С КОМБИНИРОВАННОЙ ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ**А. Н. Рак**

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина. E-mail: lion15ua@rambler.ru

В. В. Бушер, О. В. Глазева

Национальный университет «Одесская морская академия»

ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, 65029, Украина. E-mail: victor.v.bousher@gmail.com, o.glazeva@gmail.com

В работе сопоставлена традиционная методика расчета параметров электрического движения морских судов во вспомогательно-аварийных режимах при малых скоростях судна с другой, упрощенной за счет того, что она не требует использования большого количества диаграмм для определения сопротивления движению судна. Но по упрощенной методике для рассматриваемого примера – контейнеровоза вместимостью 16 тыс. контейнеров с мощностью главного двигателя 61776 кВт, синхронной машиной мощностью до 6 МВт в режиме двигателя и тремя дизель-генераторами с электрической мощностью по 3187 кВт, получена мощность на 39 % больше, что совпадает с собственным опытом эксплуатации судна в режимах с электрическим движением, нагрузка дизель-генераторов в этом режиме на судне близка к 70 %, что и получено по расчетам. Таким образом, при модернизации двигательной установки или при проектировании новых судов целесообразно сравнить результаты двух методов расчетов мощности дизель-генераторов на грани минимально устойчивых оборотов главного двигателя и выбрать большее значение. Сравнение удельных и абсолютных расходов топлива, осуществленных на базе известных аппроксимационных полиномов для низко- и высокоскоростных дизелей при вспомогательно-аварийном движении показывает, что при движении от высокоскоростных дизель-генераторов MAK8M32C расход топлива уменьшается на 24 %, чем при обеспечении минимально устойчивых оборотов главного двигателя 12 RTflex-96C компании WÄRTSILÄ-SULZER. Поэтому использование электрического движения позволяет сохранить моторесурс главного двигателя, уменьшить расход топлива. Такое соотношение наблюдается на большинстве морских транспортных судов. А учитывая, что дизель-генераторы работают почти с оптимальной нагрузкой, а главный двигатель – на холостом ходу, электрическое движение обеспечивает существенное уменьшение вредных выбросов в атмосферу. Последнее действительно и

для судна, где синхронный двигатель расположен позади главного двигателя, хотя расход топлива в этом случае увеличивается на 32 %.

Ключевые слова: главный двигатель, судовая двигательная установка, дизельный генератор, вспомогательно-аварийное движение судна, расход топлива, число Фруда, диаграмма Папмеля.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Питання надійності суднової рушійної установки було, є і буде залишатись актуальним завжди. В наш час на багатьох судах використовуються синхронні машини, які встановлюються в лінію валу, або перед головним двигуном і поєднуються з ним або безпосередньо, або за допомогою з'єднувальної муфти (рис. 1).

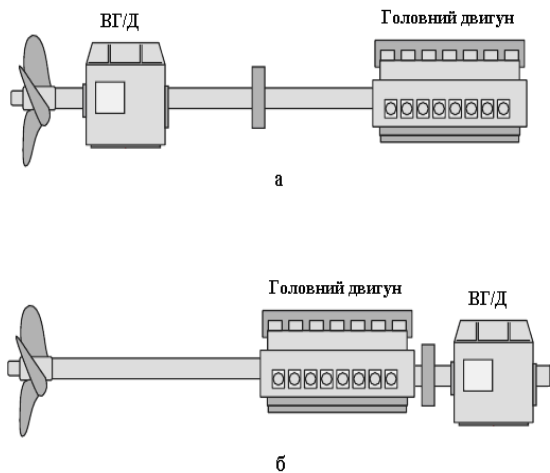


Рисунок 1 – Схеми вмикання допоміжних електродвигунів: а) в лінії гребного валу; б) перед головним двигуном

Такий підхід дозволяє:

- по-перше, отримати додаткове допоміжно-аварійне джерело руху і електричної енергії;
- по-друге, забезпечити виконання вимог міжнародної конвенції MARPOL73/78 в частині дотримання норм викидів з морських суден [1].

Одразу зазначимо, що в забезпеченні допоміжного або аварійного руху принципової різниці немає, але треба пам'ятати, що аварійний рух використовується лише у випадку виходу з ладу головного двигуна (ГД), а допоміжний – для забезпечення більшої потужності для руху судна або для руху судна при неможливості забезпечення мінімально стійких частот обертання ГД.

В останньому випадку ГД від'єднується від гребного валу за допомогою муфти і здійснюється рух від електричного двигуна, який живиться від дизельного генератора (ДГ) [2].

Межа мінімально стійких частот обертання $n_{\min}$ визначається типом дизеля, питомим навантаженням циліндрів, стабільністю регулювання паливної апаратури, тиском розпилювання та іншими факторами.

При $n_{\text{екс}} = 0,25n_{\text{ном}}$ навантаження на дизель складає всього 1,56 % від номінального, тобто

дизель фактично працює на холостому ходу. При цьому виникають труднощі в здійсненні нормального процесу утворення суміші та згоряння протягом тривалого часу.

Зазвичай вимагають, щоб у судових дизелів були забезпечені стійкі режими «малих ходів» (при $n_{\text{екс}} \approx 33...25\%$ від $n_{\text{ном}}$). У низки двигунів (наприклад, фірми MANB&W) вдається знижувати при маневруванні $n_{\text{екс.min}}$ до 20 % (та нижче) від $n_{\text{ном}}$; однак при такому режимі різко знижуються параметри (p_c до 1,6, p_z до 20 і p_f до 200 кгс/м²), погіршується процес утворення суміші та згоряння, а також підсилюється утворення нагару в циліндрі та випускному тракті. У зв'язку з цим тривалість роботи дизеля на мінімальних швидкостях звичайно обмежується часом від 30 до 60 хв. [3].

В такому разі важливо мати можливість швидко переходити на рух від електричного двигуна. Порівняємо методи вибору електричного рушія та меж його використання, що має суттєве значення для забезпечення надійності суднової рушійної установки.

Мета роботи – обґрунтування параметрів допоміжно-аварійного руху судна з електричним рушієм до межі, при якій забезпечуються мінімальні стійкі оберти головного двигуна.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методика проведення дослідження

В цій роботі розрахунок параметрів допоміжно-аварійного електричного руху виконано за стандартною методикою визначення потужності електричних рушіїв для морських суден та за методикою, представленою в [4–6], але з урахуванням рекомендацій провідних фірм-виробників суднового механічного і електромеханічного обладнання, їх останніх досліджень, а також власних досліджень і спостережень.

Результати досліджень і обговорення

Для прикладу розглянемо контейнеровоз місткістю 16 тис. контейнерів, який має наступні головні розміри, потужності основного механічного і електромеханічного обладнання, представлені в [7]: довжину між перпендикулярами – 351,08 м; ширину по мідель-шпангоуту – 42,8 м; осадку – 15 м; дедвейт – 116100 т; ГД WÄRTSILÄ-SULZER 12 RTflex-96C потужністю 61776 кВт і частотою обертання 98,5 об/хв., момент, що утворюється головним двигуном – 5992046 Нм; момент інерції ГД – $5 \cdot 10^5$ кгм²; момент інерції системи – $1 \cdot 10^6$ кгм²; швидкість судна – 28 вузлів. В лінію гребного валу встановлений синхронний валогенератор/двигун фірми SIEMENS, який забезпечує виробництво електричної енергії в режимі генератора від 1,1...2,5 МВт в діапазоні

частот обертання від 45 до 90 об/хв; а також споживає електричну енергію 3,3...6 МВт в діапазоні частот обертання 45...90 об/хв; потужність приводного дизеля МАК8М32С для генератора дорівнює 3840 кВт; потужність одного з трьох судових генераторів SIEMENS 1DK4531-8BF05-Z становить $S=3600$ кВА при $U=6,6$ кВ, $\cos\varphi=0,7$, $n=1800$ об/хв; судно – одногвинтове; відношення $H/D=0,923$; діаметр гвинта – 9,2 м; кількість лопатей гвинта 5.

Для того, щоб перейти до безпосередніх розрахунків, звернемо увагу на те, що на судні встановлений синхронний двигун фірми SIEMENS. На рис. 2 представлено навантажувальні діаграми синхронної машини при її роботі в режимі генератора або двигуна [7].

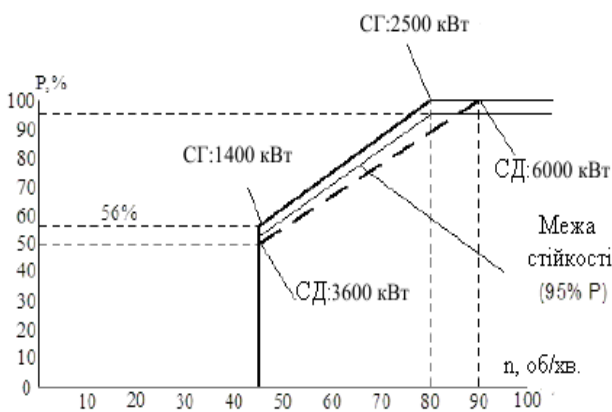


Рисунок 2 – Навантажувальні діаграми роботи синхронної машини в режимі генератора і двигуна

У більш пізніших дослідженнях, які надано в рекомендаціях фірми SIEMENS [8], приведений рис. 3, де межі використання електричного руху є зовсім іншими.



Рисунок 3 – Допустимі межі використання електричного, дизельного і дизель-електричного типів рушіїв

З рис. 2 витікає, що електричний рух судна можна здійснювати до частоти обертання ГД в 45 % від номінальної, а з рис. 3 – до швидкості руху судна в 55 % – $0,55 \cdot 28 = 15,66$ вузлів. Така різниця не зовсім зрозуміла і виникають питання, як саме забезпечувати рух судна при малих швидкостях.

Для визначення можливих режимів роботи скористаємося стандартною методикою.

Визначаємо водотоннажність:

$$W = k_d Dwt = 1,35 \cdot 116100 = 156700 \text{ т,}$$

де Dwt – дедвейт судна, т; k_d – коефіцієнт, який враховує співвідношення між водотоннажністю і дедвейтом. Його значення представлені в [9] і табл. 1.

Таблиця 1 – Співвідношення між дедвейтом і чистою вагою, водотоннажністю і дедвейтом

Тип судна	Дедвейт / чиста вага, k_B	Водотоннажність / дедвейт, k_d
Танкери і балкери	6	1,17
Контейнеровози	2,5...3	1,33...1,4

Об'ємна водотоннажність буде становити

$$V = \frac{W}{\rho} = \frac{156735}{1,025} = 152900 \text{ м}^3.$$

Довжина судна по ватерлінії:

$$L_{BL} = \frac{L_{III}}{0,97} = \frac{351,08}{0,97} = 361,9 \text{ м.}$$

Визначаємо характеристику гостроти корпусу судна:

$$\psi = 10C_b \frac{B}{L_{BL}} = 10 \cdot 0,6 \cdot \frac{42,8}{361,9} = 0,71,$$

де $C_b=0,6$ – коефіцієнт загальної повноти судна, який визначається за даними табл. 2, представленими в [9].

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів повноти різних типів морських суден

Тип судна	C_b	Швидкість судна, вузли
Ліхтеровози	0,9	5...10
Балкери	0,8...0,85	12...16
Танкери	0,8...0,85	12...17
Суховантажні	0,55...0,75	13...22
Контейнеровози	0,5...0,7	14...26
Вантажно-пасажирські	0,5...0,7	15...26

Швидкість судна:

$$v_s = v \sqrt{\frac{\psi}{L_{BL}}} = 15,66 \cdot \sqrt{\frac{0,71}{361,94}} = 0,694.$$

У відповідності до рис. 4 з урахуванням значень ψ і v_s визначаємо значення коефіцієнта $C_1=65$.

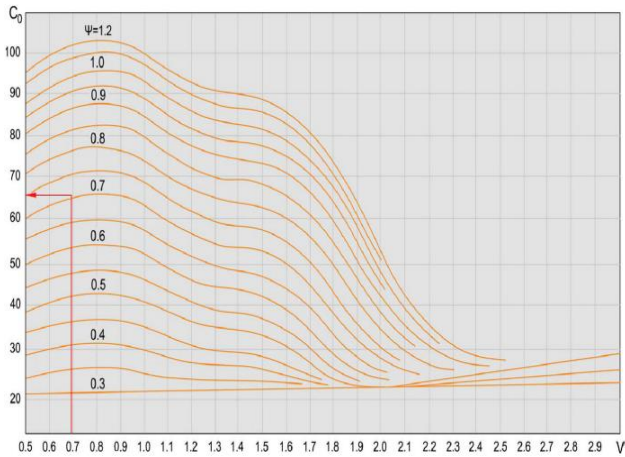


Рисунок 4 – Діаграма Папмеля для розрахунку буксирної потужності

Отримані значення підставляємо в формулу для визначення орієнтовної буксирної потужності (потужності двигуна):

$$N_{Rp} = 0,736 \frac{V}{L_{BL}} \frac{v^3}{C_1} \frac{X}{\lambda} \sqrt{\psi} =$$

$$= 0,736 \cdot \frac{152912}{361,9} \cdot \frac{8,06^3}{65} \cdot \frac{1}{1} \cdot \sqrt{0,71} = 2,101 \text{ МВт},$$

де $v = 0,515v_C$ (0,515 – коефіцієнт перерахунку швидкості судна з вузлів у м/с); отже в цьому випадку швидкість руху судна буде становити: $v = 0,515 \cdot 15,66 = 8,06$ м/с; X – коефіцієнт, який враховує кількість гребних валів: $X=1$ при 1 валу, 1,05 при 2 і 1,075 при 3; λ – поправочний множник, який визначається наступним чином:

$$\lambda = 0,7 + 0,3 \sqrt{\frac{L_{BL}}{100}}.$$

При $L > 100$ м, $\lambda = 1$.

Значення корисної тяги або буксирного опору:

$$P_E = \frac{N_{Rp}}{v} = \frac{2101000}{8,06} = 260,7 \text{ кН}.$$

З урахуванням конструктивних особливостей суден значення коефіцієнта попутного потоку для різної кількості гвинтів представлені в табл. 3 [9].

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів супутнього потоку для різної кількості гвинтів

Кількість гвинтів	Коефіцієнт попутного потоку
Одногвинтові	0,2...0,45
Двогвинтові з одним кронштейном	0,1...0,25
Двогвинтові з двома кронштейнами	0,15...0,35

Коефіцієнт засмоктування:

$$t = wK,$$

де w – коефіцієнт попутного потоку, $K=0,5...0,7$ для стерн, які обтікаються, $K=0,9...1,05$ для пластинчатих стерн; для двогвинтових суден з валовими рукавами $t=0,25w+0,14$; для суден з кронштейнами гребних валів $t=0,7w+0,06$.

В нашому випадку маємо одногвинтове судно зі стерном, що обтікається:

$$t = wK = 0,6 \cdot 0,32 = 0,192.$$

Повна сила упору гвинта:

$$P = \frac{P_E}{1-t} = \frac{260,7}{1-0,192} = 322,6 \text{ кН}.$$

З урахуванням повної сили упору гвинта визначаємо потужність приводних двигунів:

$$N_R = Pv = 322,6 \cdot 8,06 = 2600 \text{ кВт}.$$

Двигун Siemens 1DK4531-8BF-05-Z з $U=6600$ кВ, $I=450$ А, $\cos\varphi = 0,7$ відповідає таким умовам.

Згідно до [8] визначаємо частоту обертання гвинта

$$n_{DB} = C \sqrt[3]{\frac{N_R}{D_{GB}^5}} = 104 \cdot \sqrt[3]{\frac{2600}{9,2^5}} = 35,40 \text{ об/хв},$$

де D_{GB} – діаметр гвинта, м; C – постійна, яка залежить від кількості лопатей (табл. 4) [9].

Таблиця 4 – Залежність постійної C від кількості лопатей

Кількість лопатей	3	4	5	6
C	125	115	104	93

Таким чином, за стандартною методикою отримано $N_R = 2,600$ МВт, $n_{DB} = 35,40$ об/хв. Така частота обертання практично відповідає межі мінімально стійких обертів ГД.

Добру збіжність з результатами, отриманими за стандартною методикою, дають співвідношення, які представлені в [13], де зазначено, що для забезпечення руху судна в режимі «Самий малий» необхідно забезпечити:

– частоту обертання:

$$(25 \div 35\%)n_H = (0,25 \div 0,35)n_H = 24,6 \div 34,5 \text{ об/хв};$$

– потужність головного двигуна

$$(1,5 \div 4,5\%)P_H = (0,015 \div 0,045) 61774 =$$

$$= 926 \div 2780 \text{ кВт}.$$

Але можна запропонувати іншу методику розрахунку, якою користуються іноземні фахівці.

Так, за табл. 5 для відомої швидкості судна $v=15,66$ вузлів і характеристики гостроти корпусу судна $\psi=0,71$ визначаємо значення числа Фруда. Воно становитиме $Fr=0,115$.

Таблиця 5 – Залежність числа Фруда від швидкості і довжини судна

Довжина, м	Швидкість, вузли						
	14	16	18	20	22	24	26
100	0,23	0,26	0,3	0,33	0,36	0,39	0,43
150	0,19	0,21	0,24	0,27	0,3	0,32	0,35
200	0,16	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28	0,3
250	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27
300	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25
350	0,12	0,14	0,16	0,18	0,19	0,21	0,23
400	0,11	0,13	0,15	0,16	0,18	0,2	0,21

Тоді у загальному випадку значення буксирного опору визначається відразу значно простіше за діаграмою, представленою в [10]. На рис. 5 надано зразок такої діаграми.

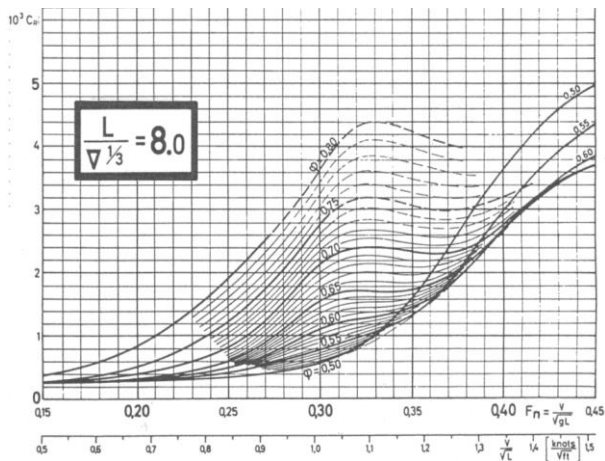


Рисунок 5 – Значення буксирного опору судна в залежності від числа Фруда та його конструктивних особливостей

Але через те, що такі діаграми відсутні для малих значень числа Фруда, то користуються графіками, представленими на рис. 6 [12], хоча в цьому випадку не враховуються конструктивні особливості судна.

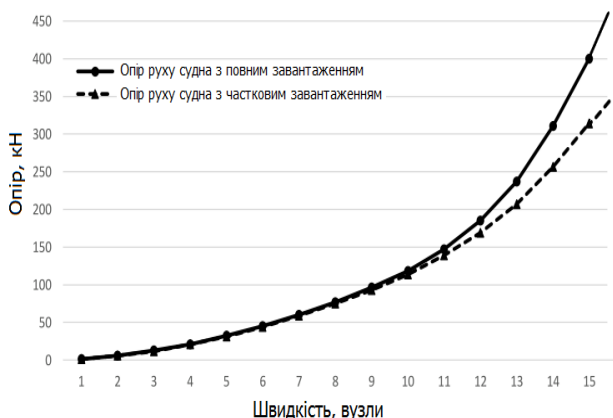


Рисунок 6 – Значення опору руху судна

Таким чином, потужність двигуна буде становити:

$$N_R = P_v = 450 \cdot 8,06 = 3,627 \text{ МВт},$$

що значно ближче до дійсності.

Різниця зі значенням потужності, визначеним за традиційною методикою, складає

$$3,627 - 2,600 = 1,027 \text{ МВт},$$

або $\delta = 39\%$, що є дуже суттєвою різницею.

Частота обертання гвинта становить:

$$n_{ДВ} = C_3 \sqrt{\frac{N_R}{D_{ГВ}^5}} = 104 \cdot \sqrt{\frac{3627}{9,2^5}} = 39,56 \text{ об/хв.}$$

Таку потужність можна забезпечити за допомогою дизель-електричного або дизель-механічного рушія. Правила використання схеми (рис. 1, а) досконало викладено в [14].

Перевіряємо відповідність потужності двигуна Siemens 1DK4531-8BF-05-Z технічній потужності приводного дизеля MAK8M32C, яка дорівнює 3840 кВт.

Як витікає зі схеми на рис. 7, представленої в [12], потужність приводного синхронного двигуна буде становити:

$$P_{Д} = 0,75 S_{Г} \text{ або } P_{Д} \approx 0,83 P_{ДГ},$$

де $S_{Г}$ – повна потужність генератора, кВА; $P_{ДГ}$ – активна потужність приводного дизель-генератора, кВт;

$$P_{Д} \approx 0,83 P_{ДГ} = 0,83 \cdot 3840 = 3187 \text{ кВт}.$$

Визначимо значення активної потужності генератора:

$$P_{Г} = S_{Г} \cos \varphi = 3600 \cdot 0,7 = 2520 \text{ кВт}$$

і навантаження на генератор:

$$K_{Г} = \frac{3,627}{2,520} = 1,44$$

та порівняємо його з рекомендаціями, представленими в [15] (табл. 6).

Якщо потужність двигуна перевищує потужність дизельного генератора, то необхідно вводити резервну потужність, тобто ще один генератор. Розподіл потужності при цьому повинний бути рівномірним і складе $\approx 72\%$.

Таким чином, необхідно два дизель-генератори для забезпечення режиму «Самий малий».

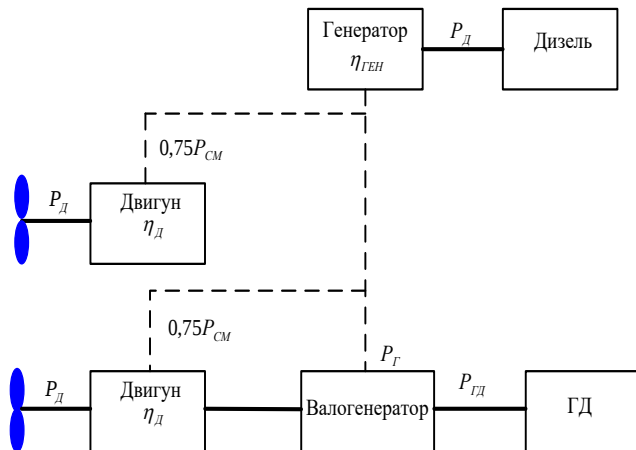


Рисунок 7 – Типове компонування дизель-електричної пропульсивної системи

Таблиця 6 – Послідовність запуску генератора (-ів)

Кількість приєднаних генераторів	Навантаження генератора, %	Резерв потужності. необхідний для вмикання генератора, %	Типовий час введення навантаження, с
2	85	2х15=30	0–10
3	87	3х13=39	0–10
4	90	4х10=40	0–10

Доцільно також розглянути і питання споживання палива ГД і ДГ.

Порівняємо питомі витрати палива (ПВП) при забезпеченні руху судна з мінімально стійкими обертами і при використанні електричного рушія.

Оскільки на судні встановлений ГД фірми WÄRTSILÄ-SULZER, то ПВП апроксимується наступною залежністю:

$$ПВП_{ГД} = 0,011L^2 - 1,704L + 234,5,$$

а питомі витрати палива більшості високо обертових ДГ, яким є дизель MAK8M32C, визначаються залежністю:

$$ПВП_{ДГ} = 6,758 \cdot 10^{-3} L^2 - 1,031L + 227,6,$$

де L – відносне навантаження ГД або ДГ у відсотках (%).

Для більшої зручності питомі витрати палива представлені у графічному вигляді (рис. 8).

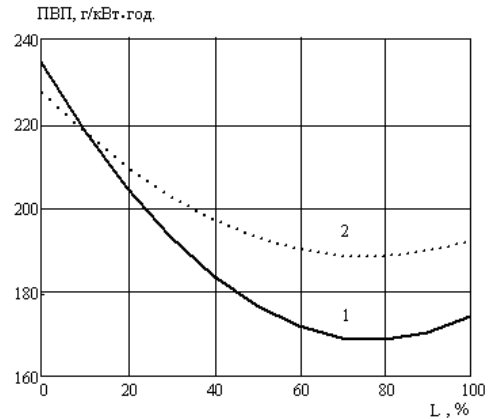


Рисунок 8 – Питомі витрати палива: 1 – головним двигуном; 2 – дизельним генератором

Для частоти обертання 39,56 об/хв потужність ГД можна визначити перерахунком:

$$P_2 = P_{ГД.Н} \left(\frac{n_2}{n_H} \right)^3 = 61776 \cdot \left(\frac{39,56}{98,5} \right)^3 = 4002 \text{ кВт.}$$

Навантаження на ГД буде складати:

$$K_{ГД} = \frac{P_2}{P_H} = \frac{4002}{61776} = 6,48 \%,$$

а витрати палива в цьому режимі будуть становити:

$$ВП_{ГД} = ПВП_{ГД} \cdot P_2 = 223,9 \cdot 4002 = 896 \text{ кг/год.}$$

Паливні витрати при використанні електричного рушія із його живленням від двох генераторів потужністю 3600 кВт кожен будуть становити, згідно з кривою (2):

$$ВП_{ДГ} = ПВП_{ДГ} \cdot P_{ДГ} = 188,4 \cdot 3627 = 683,3 \text{ кг/год.}$$

Порівняння витрат палива при використанні дизель-електричного і дизель-механічного руху показує, що при дизель-електричному русі вони є меншими.

Виконаємо аналогічний аналіз для схеми на рис. 1, б.

В цьому режимі колінчастий вал ГД стає продовженням гребного валу. Так, при обертанні колінчастого валу ГД починає працювати мастильний насос, який буде забезпечувати прокачування мастила і, тим самим, буде запобігати пошкодженню «дзеркала» внутрішньої поверхні циліндрової втулки. Втрати потужності при роботі змащувальної системи в цьому випадку у відповідності до рис. 9 будуть становити:

$$4,3\% N_H = 0,043 \cdot 61776 = 2656 \text{ кВт.}$$

Таким чином для приведення до дії судна необхідно забезпечити потужність:

$$N = N_R + 4,3\% \cdot N_H = 3,627 + 2,656 = 6,283 \text{ МВт.}$$

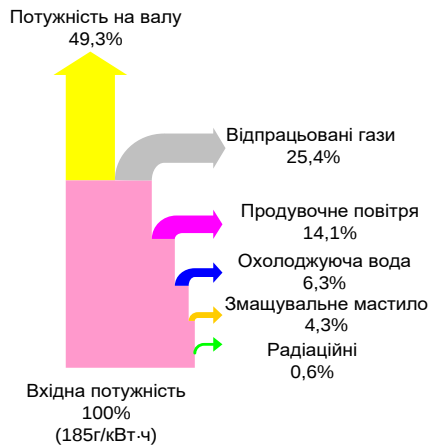


Рисунок 9 – Діаграма для визначення коефіцієнту корисної дії головного двигуна

Отримане значення є меншим за значення максимальної потужності двигуна 6,6 МВт і свідчить про можливість забезпечення електричного руху і для схеми на рис. 1, б. Навантаження на генератор при цьому буде становити:

$$K_r = \frac{6,283}{2,520} = 2,493,$$

тобто необхідно вводити до дії третій ДГ з відносним навантаженням на кожен з них $2,493:3=0,831=83,1\%$. Витрати палива при цьому складуть:

$$ВП_{ДГ} = ПВП_{ДГ} \cdot P_{ДГ} = 188,6 \cdot 6283 = 1184 \text{ кг/год.}$$

Це на 500 кг/год більше варіанту підключення з прямим електричним рухом, але також дизель-генератори працюватимуть з оптимальним навантаженням, що зменшує шкідливі викиди в атмосферу. І найважливіше, це режим може бути використаним при аварії головного двигуна.

ВИСНОВКИ. 1. В роботі проаналізовано традиційну методику розрахунку параметрів електричного руху морських суден в допоміжно-аварійних режимах при малих швидкостях судна (малих обертах гвинта) з урахуванням сучасних досліджень і рекомендацій, в якій більш чітко визначено межі використання коефіцієнтів. Показано, що для розглянутого прикладу (контейнеровозу на 16 тис. контейнерів) отриманий результат (2,600 МВт) збігається з верхньою межею рекомендацій до морських установок 2019 року.

2. Але за іншою спрощеною методикою, яку використовують зарубіжні фахівці, і яка є більш універсальною, а також простішою через те, що не потребує використання великої кількості діаграм для визначення опору руху судна, отримано потужність в цьому ж режимі 3,627 МВт. Цей результат збігається з власним досвідом експлуатації судна в режимах з електричним рухом:

навантаження двох дизель-генераторів в цьому режимі на судні близько до 70 %, що й отримано за розрахунками. Це можна пояснити різницею у підходах до проектування і будівництва суден різних компаній, а також рахуватись з тим, що в теперішній час експлуатуються лише судна, побудовані в інших країнах.

3. Порівняння витрат палива при допоміжно-аварійному русі показує, що при забезпеченні мінімально стійких обертів головного двигуна витрати палива становитимуть 896 кг/год., а при електричному русі за схемою з рис. 1, а – 683 кг/год., тобто такий режим роботи не тільки дозволяє зберегти моторесурс головного двигуна, а й зменшити витрати палива. Враховуючи, що дизель-генератори працюють майже з оптимальним навантаженням, а головний двигун – на холостому ході, електричний рух забезпечує суттєве зменшення шкідливих викидів в атмосферу.

4. При використанні схеми з рис. 1, б потужність суднової електростанції практично повністю забезпечує тільки рух судна. Витрати палива будуть складати 1184 кг/год і більшими на 500 кг/год у порівнянні зі схемою з рис. 1, а і на 300 кг/год більше, ніж при русі від головного двигуна, але з точки зору екології та збереження моторесурсу ГД, цей режим також є доцільним. Також необхідно рахуватись з тим, що судно з такими конструктивними особливостями використовує цей режим в аварійних ситуаціях, коли цей захід є тимчасовим і вимушеним, але вкрай необхідним, тому що завжди головне – забезпечення руху судна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Руководство по применению положений Международной конвенции МАРПОЛ 73/78.НД №2-030101-026/ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Санкт-Петербург, 2017. 163 с.
2. Propeller Shaft Clutch. RENK AED® Advanced Electric Drive. URL: <https://www.renk-ag.com/en/products-and-service/products/marine-propulsion-units/electric-propulsion-systems/> (дата звернення: 20.07.2020).
3. Дизели. Справочник. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под общей редакцией В. А. Ваншейдта, Н. Н. Иванченко, Л. К. Коллерова. Ленинград : «Машиностроение», 1977. 480 с.
4. Хайкин А. Б., Васильев В. П., Полонский В. И. Автоматизированные гребные электрические установки. Москва : Транспорт, 1986. 424 с.
5. Айзенштадт Е. Б. и др. Гребные электрические установки. Справочник. Ленинград : Судостроение, 1985.

6. Панов В. А., Романовский В. В., Корди С. А. Эксплуатация гребных электроустановок. Москва : Транспорт, 1988. 176 с.

7. 'M' class container ship. Operating manual lind newbuilding L. 216. m/s "Mathilde Maersk". Odence Steel Shipyard Ltd, 2008. 561 с.

8. Vessel System Design & Application of Technology For a Responsible and Sustainable Maritime Industrial Sector. URL: <mailto:doug.bridgen@siemens.com> (дата звернення 20.07.2020).

9. Basic Principles of Ship Propulsion. URL: <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/man-diesel-se/basic-principles-ship-propulsion/21500-86662.html> (дата звернення 20.07.2020).

10. Ship Resistance H.E. Guldhammer and Sv. Aa. Harvald, 1974. URL: <https://www.boatdesign.net/attachments/ship-resistance-guldhammer-harvald-1965-1974-pdf.86659/> (дата звернення 20.07.2020).

11. Cristian Andrés Morales Vásques. A methodology to select the electric propulsion system for platform Supply vessels (PSV)/ São Paulo, 2014. С. 80. URL: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-26122014-164655/publico/>

Dissertacao_Cristian_Morales.pdf (дата звернення 20.07.2020).

12. Guidelines on survey and certification of the energy efficiency design index (eedi), as amended (resolution мепс. 254 (67), as amended by resolution мепс. 261 (68)), 2014. URL: https://www.wold.prs.pl/files/parent225/p103p_en.pdf (дата звернення 20.07.2020).

13. Marine Installation Manual X62DF. Issue 2019. 05. URL: www.wingd.com. (дата звернення 20.07.2020).

14. Самонов С. Ф., Рак О. М., Глазева О.В. Підвищення ефективності та надійності комбінованих суднових пропульсивних установок. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*. Серія : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 3 (1357). С. 29–35. DOI: <http://doi:10/20998/2409-9295.2020.3.05>.

15. Diesel-electric Propulsion Plants. A brief guideline how to engineer a diesel-electric propulsion System. URL: <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/marine-broschures/diesel-electric-drives-guideline.pdf> (дата звернення 20.07.2020).

FEATURES OF POWER DETERMINATION OF AUXILIARY-EMERGENCY DRIVE MOTION OF A SHIP WITH A COMBINED DIESEL-ELECTRIC POWER PLANT

A. Rak

Donetsk National Technical University

vul. Artema, 58, Donetsk, 83001, Ukraine. E-mai: lion15ua@rambler.ru

V. Bousher, O. Glazeva

National University "Odessa Maritime Academy"

vul. Didrikhsona, 8, Odessa, 65029, Ukraine. E-mail: victor.v.bousher@gmail.com, o.glazeva@gmail.com

Purpose. The paper compares the traditional method of calculating the parameters of electric motion of ships in auxiliary emergency modes at low speeds of the vessel with another, simplified because it does not require the use of a large number of diagrams to determine the resistance of the vessel. But according to a simplified method for this example – a container ship with a capacity of 16,000 containers with the main engine capacity of 61776 kW, a synchronous machine with a capacity of up to 6 MW in engine mode, and three diesel generators with an electric capacity of 3187 kW – 39 % more power is obtained. Own experience of operation of the vessel in modes with electric movement – loading of diesel generators in this mode on the vessel about 70 % that is received by calculations. Thus, when upgrading the propulsion system or designing new vessels, it is advisable to compare the results of two calculations of the power of diesel generators at the limit of the minimum stable speed of the main engine and choose the larger of the results. **Methodology.** Comparison of specific and absolute fuel consumption, made on the basis of known approximation polynomials for low- and high-speed types of diesel of the company at auxiliary emergency movement shows that at the movement from high-speed diesel generators MAK8M32S fuel consumption decreases by 24 %, then at the maintenance of the main engine 12 RTflex-96C from WÄRTSILÄ-SULZER. **Results.** Therefore, the use of electric motion allows you to save engine power of the main engine, reduce fuel consumption. This ratio is observed on most maritime transport vessels. And given that diesel generators operate at almost optimal load, and the main engine – at idle, electric motion provides a significant reduction in harmful emissions into the atmosphere. The latter is also true for a ship where the synchronous engine is located behind the main engine, although fuel consumption, in this case, increases by 32 %. Figures 9, tables 6, references 15.

Key words: main engine, ship propulsion, diesel generator, auxiliary-emergency ship movement, fuel consumption, Froude number, Pappel diagram.

REFERENCES

1. (2017). *Rukovodstvo po primeneniyu polozheniy Mezhdunarodnoy konventsii MARPOL [Guidelines for the application of the provisions of the international convention MARPOL]*. 73/78.ND №2-030101-026/FAU «Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva». [in Russian]
2. Propeller Shaft Clutch. RENK AED® Advanced Electric Drive. Retrieved from <https://www.renk-ag.com/en/products-and-service/products/marine-propulsion-units/electric-propulsion-systems/>
3. Vansheidta, V.A., Ivanchenko, N.N., & Kollerova, L.K. (1977). *Dizeli. Spravochnik [Diesels. Directory]*. Leningrad : «Mashinostroenie» [in Russian]
4. Khaykin, A.B., Vasil'ev, V. P., & Polonskiy, V.I. (1986). *Avtomatizirovannye grebnye elektricheskie ustanovki [Automated rowing electric installations]*. Moscow : Transport. [in Russian]
5. Ayzenshtadt, E.B. et al. (1985). *Grebnye elektricheskie ustanovki. Spravochnik. [Rowing electrical installations. Directory]*. Leningrad : Sudostroenie. [in Russian]
6. Panov, V.A., Romanovskiy, V.V., & Kordi, S.A. (1988). *Ekspluatatsiya grebnykh elektroustanovok. [Operation of rowing electrical installations]*. Moscow: Transport [in Russian]
7. (2008). 'M' class container ship. Operating manual lindØ newbuilding L. 216. m/s "Mathilde Maersk". Odence Steel Shipyard Ltd.
8. Vessel System Design & Application of Technology For a Responsible and Sustainable Maritime Industrial Sector. Retrieved from <mailto:doug.bridgen@siemens.com>
9. Basic Principles of Ship Propulsion. Retrieved from <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/man-diesel-se/basic-principles-ship-propulsion/21500-86662.html>
10. (1974). Ship Resistance H.E. Guldhammer and Sv. Aa. Harvald. Retrieved from <https://www.boatdesign.net/attachments/ship-resistance-guldhammer-harvald-1965-1974-pdf.86659/>
11. Cristian Andrés Morales Vásques (2014). A methodology to select the electric propulsion system for platform Supply vessels (PSV). São Paulo. Retrieved from https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-26122014-164655/publico/Dissertacao_Cristian_Morales.pdf
12. (2014). Guidelines on survey and certification of the energy efficiency design index (eedi), as amended (resolution mepc. 254 (67), as amended by resolution mepc. 261 (68)). Retrieved from https://www.wold.prs.pl/files/parent225/p103p_en.pdf
13. (2019). Marine Installation Manual X62DF. Issue 05. Retrieved from www.wingd.com
14. Samonov, S.F., Rak, O.M. & Glazeva, O.V. (2020). Pidvishchennya efektyvnosti ta nadiynosti kombinovanih sudnovikh propul'sivnikh ustanovok [Improving the efficiency and reliability of combined ship propulsion systems]. *Visnik NTU «Kharkivs'kiy politekhnichniy institut»*. 3 (1357). 29-35. DOI: doi:10/20998/2409-9295.2020.3.05. [in Ukrainian]
15. Diesel-electric Propulsion Plants. A brief guideline how to engineer a diesel-electric propulsion System. Retrieved from <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovide/r6/marine-broschures/diesel-electric-drives-guideline.pdf>

Стаття надійшла 08.12.2020.