

## CHAPTER 6.

### MODERN TECHNOLOGIES IN INCREASING THE EFFICIENCY OF PROPULSION SYSTEMS OF SEA VESSELS

**Victor BUSER,**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and  
Electronics, National University “Odessa Maritime academy”  
Didrikhson str, 8, Odessa, Ukraine, 65052  
victor.v.bousher@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-3268-7519>

**Oksana GLAZEVA,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ship's  
Electromechanics and Electrotechnics, National University  
“Odessa Maritime academy”  
Didrikhson str, 8, Odessa, Ukraine, 65052  
o.glazeva@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-4992-7697>

**Abstract.** Main development trends of modern ship power systems are analyzed. The purpose of the paper is the analysis of energy modes and the development of criteria for transitions between different modes of an integrated marine vessel's power system, providing maximum efficiency in the use of fuel and motor resources of main engines of the vessel. It is proposed to identify, in addition to the shore-to-ship mode, four main operating modes in the presence of a synchronous machine on a propeller shaft and a converter that ensures an operation of this machine in both motor and generator modes. By dividing a load of the main engine into four levels – small, medium, nominal and large – an automatic system can accordingly control (or recommend in semi-automatic mode) the switching sequence of power equipment and actuating machines and mechanisms. Using the container ship Matilda Maersk as an example, it is shown when the ship moves at a low speed, the load of the main engine becomes so low that it can be provided by diesel generators of the ship's energy system (“Power-Take-Home” mode). This, on one hand, allows to save fuel, and on other hand increases the completeness of fuel oil consumption, since diesel generators operate at optimal load unlike the main engine, the load of which reaches only 10%. Similarly, in case of medium loading of the main engine, it is recommended to switch to the power supply of ship's grid from the main engine with the shaft generator (“Power-Take-On” mode), and if it is necessary to obtain increased power of the propulsion system, the synchronous machine is switched to engine mode powered by diesel generators (“Power-Take-In” mode). In addition, the ability to quickly transitions between these and main modes in emergency cases increases a survivability and safety of the vessel. Based on the analysis, an algorithm for switching between modes is proposed, which can be implemented in Supervisory Control and Data Acquisition for ship's energy systems, in particular, on a physical simulator at the National University “Odessa Maritime Academy”.

**Keywords:** propulsion system, power-take-on, power-take-in, power-take-home modes, optimal specific fuel oil consumption.

## СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПІДВИЩЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОПУЛЬСИВНИХ УСТАНОВОК МОРСЬКИХ СУДЕН

**Анотація:** Проведено аналіз основних тенденцій розвитку сучасних суднових електроенергетичних систем. Метою роботи є аналіз енергетичних режимів і розробка критеріїв переходів між різними режимами комбінованої силової установки, що забезпечують максимальну ефективність використання палива і моторесурсу основних машин судна. Запропоновано виділити, крім режиму берегового живлення, чотири основні режими роботи при наявності в системі синхронної машини на гребному валу і перетворювача, що забезпечує роботу цієї машини в режимах двигуна та генератора. На прикладі суднових енергетичних установок деяких контейнеровозів показано, що при пересуванні судна з малою швидкістю навантаження головного двигуна стає настільки низького рівня, який може бути забезпечений дизель-генераторами електро-енергетичної системи (PTH mode). Це, з одного боку, дозволяє економити паливо, а з іншого боку підвищує повноту згоряння палива, так як дизель-генератори працюють при оптимальному навантаженні на відміну від головного двигуна, навантаження якого досягає лише десяти відсотків. Аналогічно при неповному завантаженні головного двигуна рекомендується перехід на живлення всіх споживачів від головного двигуна з валогенератором (PTO mode), а при необхідності отримання підвищеної потужності пропульсивної системи - синхронна машина переводиться в режим двигуна з живленням від дизель-генераторів (PTI mode). Крім того, можливість швидкого перемикання між режимами PTH-PTO-PTI-MAIN в аварійних ситуаціях підвищує рівень живучості та безпеки судна. На підставі проведеного аналізу запропоновано алгоритм перемикання між режимами, який може бути реалізований в системі керування, диспетчеризації та збору даних суднових енергетичних систем, зокрема на фізичному тренажері в Національному університеті «Одеська Морська Академія».

### Вступ.

Міжнародною морською організацією ІМО проведені всебічні дослідження, які дозволяють виділити фактори зниження витрати палива на судах і, пов'язаних з ними, шкідливих викидів, так званих Green Home Gases (GHG), які містять вуглекислий газ CO<sub>2</sub>, оксиди азоту NO<sub>x</sub> і сірки SO<sub>x</sub>. Перелік і вплив вказаних факторів на зменшення викидів CO<sub>2</sub> для суден, що зараз будуються, наведено в таблиці 1[1].

Таблиця 1 – Фактори зниження викидів CO<sub>2</sub> суднами

| Найменування факторів                                                                                      | Зниження викидів CO <sub>2</sub> , % на тонно/милію |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Конструктивні: концепція проекту, швидкість ходу, особливості судна                                        | 2 – 50                                              |
| Характеристики корпусу і надбудов                                                                          | 2 – 50                                              |
| Потужність і особливості рушійної системи                                                                  | 5 – 15                                              |
| Використання палив з низькою кількістю газоподібних сполучень (вуглецю, сірки, азоту) в продуктах згоряння | 5 – 15                                              |
| Використання джерел відновлювальної енергії (вітрової, сонячної ...)                                       | 1 – 10                                              |
| Енергетичний менеджмент                                                                                    | 1 – 10                                              |

Лідери у виробництві обладнання для суден – Siemens, ABB, Mitsubishi Heavy Industries і інші приділяють велику увагу підвищенню ефективності суднових енергетичних систем, забезпеченню оптимального режиму роботи двигунів внутрішнього згоряння, що сприяє як зниженню споживання мазуту, так і істотному зменшенню викидів GHG.

Пропонується кілька методів підвищення ефективності використання палива за рахунок впровадження електричного руху [2]:

- оптимальне управління виробництвом, розподілом і використанням енергії;
- вдосконалення методів експлуатації на існуючих судах.

Всі сучасні морські енергетичні системи, що відповідають класу автоматизації A1,

використовують систему рекуперації відпрацьованого тепла (WHRS). Наприклад, Mitsubishi Heavy Industries пропонує на ринку Mitsubishi Energy Recovery Systems (MERS), яка відновлює і повторно використовує енергію з вихлопних газів основного двигуна. MERS оптимізує теплову ефективність, автоматично регулюючи потужність відповідно до необхідної електроенергії. Рішення в цій категорії складаються з паливозберігаючого двигуна світового класу, WHRS, гібридних турбокомпресорів, оптимізованих гвинтів. Ці технології можуть бути використані для підвищення теплового ККД установок на 20%. Крім того, технології селективного каталітичного відновлення (SCR) і рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) значно скорочують викиди  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$  – двох поширених джерел забруднення повітря. SCR і EGR самі знижують викиди  $\text{NO}_x$  більш ніж на 80%, а EGR за допомогою скрубера знижують викиди  $\text{SO}_x$  більш ніж на 98%. Сукупність цих рішень забезпечує істотне підвищення ККД суднової енергетичної системи і, як наслідок, зниження витрати палива і викидів GHG, що відповідає правилам IMO Tier III [3].

Сучасні компанії – виробники обладнання для суден приділяють велику увагу підвищенню ефективності суднових енергетичних систем та забезпеченню оптимальному режиму роботи двигунів внутрішнього згорання, що сприяє зниженню споживання мазуту та скороченню викидів GHG. Тому, удосконалення методів підвищення ефективності використання палива за рахунок впровадження електричного руху на існуючих суднах з пропульсивними установками (ПУ) є актуальним завданням.

Мета роботи - розробка алгоритмів управління суднової енергетичної установки, що реалізуються засобами системи Supervisory Control And Data Acquisition на підставі аналізу навантажень і обґрунтування критерію переходів між основними енергетичними режимами головного двигуна і дизель-генераторів комбінованої пропульсивної установки.

Для реалізації зазначеної мети в роботі були розв'язані наступні завдання:

1. Розглянути питання енергетичного менеджменту щодо зниження суднами витрат палива і шкідливих викидів в навколишнє середовище та проаналізовано різні експлуатаційні режими пропульсивної установки, які використовують на сучасних суднах.

2. Виконано аналіз залежності питомих витрат палива суднових двигунів внутрішнього згорання та обрано критерій перемикання між основними режимами.

3. Розраховано витрати палива та проаналізовано умови роботи ДВЗ комбінованої силової установки.

4. Створено математичну модель високовольтної п'ятифазної синхронної машини з векторним керуванням з автономним інвертором в пакеті програм MATLAB Simulink SimPowerSystems та виконано математичне моделювання перехідних процесів та усталених режимів в системі «Суднова мережа – СД з векторним управлінням – Навантаження».

5. Запропоновано алгоритм перемикання між режимами комбінованої суднової енергетичної установки.

6. Показано можливість інтегрування запропонованого алгоритму в SCADA суднових енергетичних систем.

Об'єктом дослідження було обрано суднову силову установку контейнеровоза «Gerda Maersk», а предметом дослідження стали режими роботи суднової енергетичної системи у різних діапазонах навантаження.

### **Енергетичні режими сучасних комбінованих пропульсивних установок.**

В секторі морського транспорту стоять задачі створення більш ефективної з точки зору екології та економії споживання енергії суднової енергетичної системи.

Підвищення ефективності використання палива розглядається як стійкий захід щодо зменшення викидів парникових газів та загального використання морської енергії. Енергоефективність в умовах морського транспорту співвідноситься з кількістю паливної енергії, необхідної щодо місткості судна та транспортних робіт. Виходячи з цього визначення, ефективність загальної бортової енергетичної системи слід оцінювати за допомогою показників енергоефективності, запроваджених ІМО. Такими показниками є Індекс проектування енергоефективності (EEDI) та План управління енергетичною

ефективністю суден (SEEMP). Операційний показник енергоефективності (EEOI) також пропонується як інструмент моніторингу для SEEMP. Ці показники є обов'язковими заходами як стандарт енергоефективності для вдосконаленого проектування та експлуатації суден. ІМО встановив вимоги щодо енергоефективності суден для існуючих та нових суден, що мають водотоннажність 400 валових тонн, і більше (рис.1) [4].

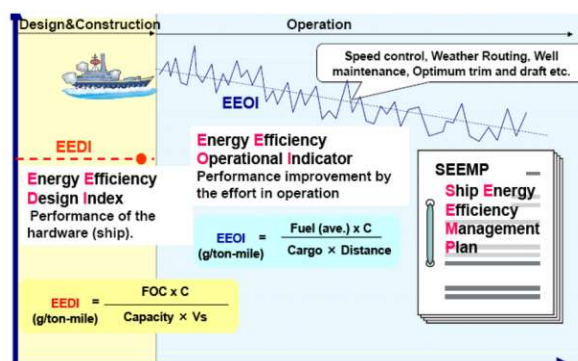


Рис. 1 – Презентація ІМО про технічні заходи

На цей час існують методи підвищення ефективності використання палива на судах: [5]

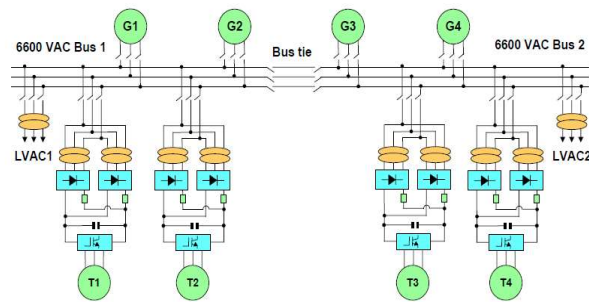
- інтеграція систем накопичення енергії;
- використання розподілу постійного струму;
- оптимальне управління розподілом та використанням енергії;
- вдосконалення методів експлуатації на існуючих звичайних судах.

В сучасних публікаціях, пов'язаних з морською індустрією, звертається увага на переваги впровадження на судах постійного струму. До таких переваг слід віднести можливість відмовитися від громіздких дорогих трансформаторів напруги, як обов'язкових елементів мережі, за рахунок застосування потужних високочастотних напівпровідникових перетворювачів постійного струму, що відкриває нові шляхи підвищення енергетичної ефективності суден. Підвищенню живучості суднової енергосистеми і якості електроенергії також перешкоджають особливості мережі змінного струму.

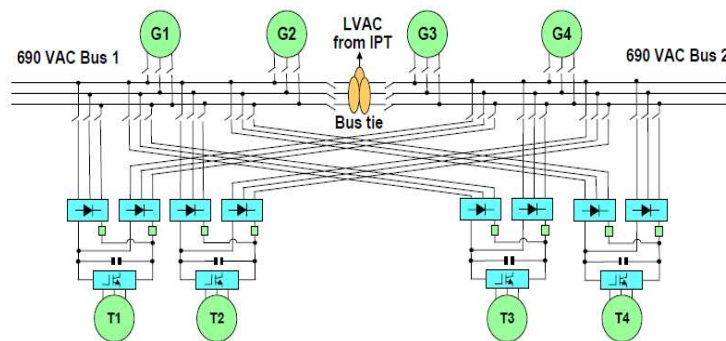
На сьогоднішній день існують такі структури суднових електроенергетичних систем (СЕЕС), в яких реалізовані перелічені переваги (таблиця 2).

Таблиця 2

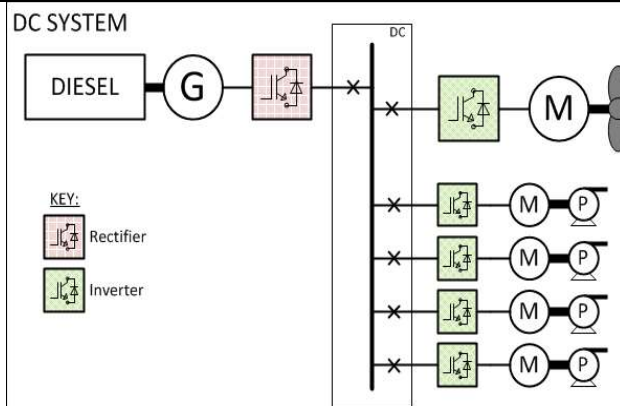
## Сучасні суднові системи розподілу електричної енергії



а) Високовольтна система електроруку з використанням постійного струму та багато-пульсного перетворення

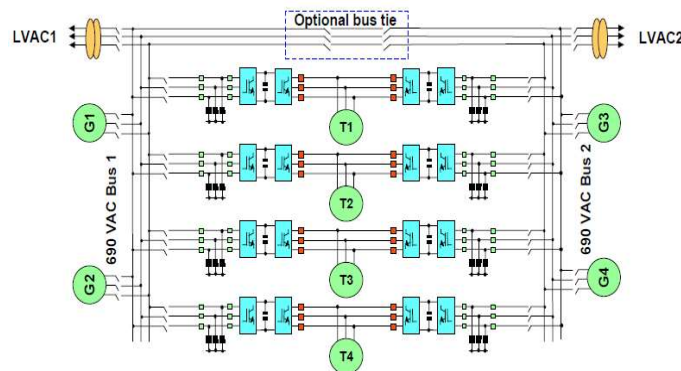


б) Система з технологією Low Loss Concept

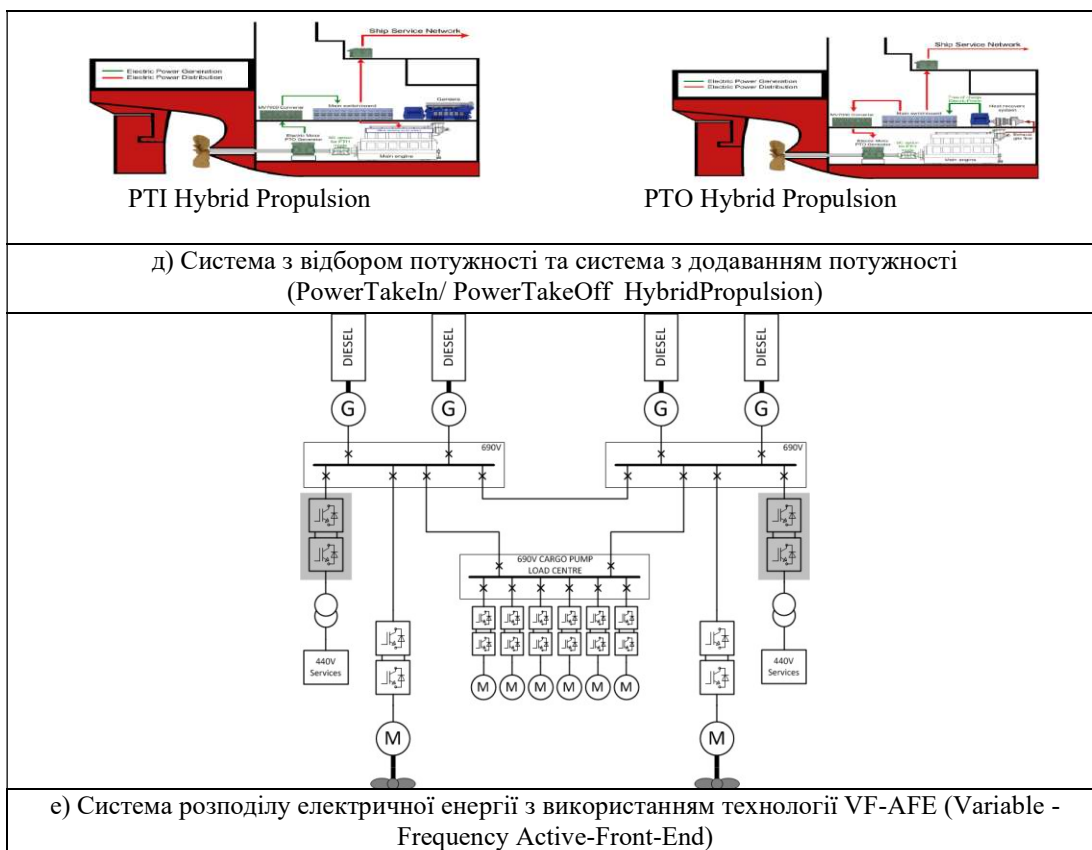


в) Система DC-Grid розподілу електричної енергії на постійному струмі

Продовження таблиці 2



г) Система AFE з використанням подвійної шини розподілу



На судах, які перебувають в експлуатації, підвищення ефективності використання енергії може бути досягнуто за рахунок впровадження широкого спектру дій технічного і оперативного характеру, таких як: вибір оптимальних шляхів і економічних (знижених) швидкостей руху, посадки і баластування судна; своєчасне очищення від обростання/фарбування корпусу і гребного гвинта; якісне технічне обслуговування і налаштування головних і допоміжних машин, механізмів та систем; розширені вимірювання показників ефективності рейсу і роботи обладнання; фіксування, обробка і передача даних для аналізу і корекції режимів; ефективне функціонування основних користувачів електроенергії; впровадження вдосконалених технологій вироблення і перетворення енергії в головних і допоміжних енергоустановках.

Отже більшість з переліченого, в тій чи іншій мірі, стосується суднової рушійної (пропульсивної) установки, до складу якої входять як головні двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), так і дизель- (турбо-) генератори .

З розвитком високовольтної техніки і напівпровідникових перетворювачів новим напрямком в суднових енергетичних системах стає використання високовольтних мереж постійного [6] і змінного струму з інверторами, в яких можливо забезпечення режимів рекуперації енергії, що в поєднанні з оптимізацією режимів роботи основних дизельних двигунів і дизель- (турбо- ) генераторів може забезпечити підвищення ефективності використання палива[7]

Найбільш придатними для цієї мети є суднові дизельні двигуни з електронним управлінням, гібридні і комбіновані або інтегровані пропульсивні системи (IPS) [8]. Важливим компонентом такої IPS є синхронна електрична машина (SM), що встановлюється в лінію гребного валу – валогенератор, яка може працювати як в режимі генератора (SG), так і в режимі двигуна (SG / M)[9].

Такі системи, не вимагаючи внесення будь-яких надмірних змін до конструкції судна, забезпечують наступні переваги:

- підвищена живучість завдяки появі додаткових джерел енергії і тяги;
- зниження питомої витрати палива (BSFC) як допоміжних двигунів, так і головного двигуна;

- зниження споживання олій і зниження витрат на технічне обслуговування;
- зниження встановленої потужності або обсягу допоміжного двигуна;
- зниження викидів;
- використання WHRS для підвищення ефективності головного двигуна;
- більш гнучке рішення для підключення до берегових джерел живлення;
- резервування в разі несправності основного або допоміжного двигуна;
- незалежна оптимізація ефективності рушіїв і виробництва електроенергії;
- можливість комбінованих режимів роботи генераторів.

Оптимізація режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння призводить до зниження specific fuel consumption (SFC) і значного збільшення терміну служби деталей двигунів через зниження вібрації.

Процес реінжинірингу здійснюється шляхом модернізації існуючого головного двигуна (ME) на гібридну силову установку, яка представляє собою динамічне поєднання ME і дизель-електричної рухової установки (DEP) (рис.2).

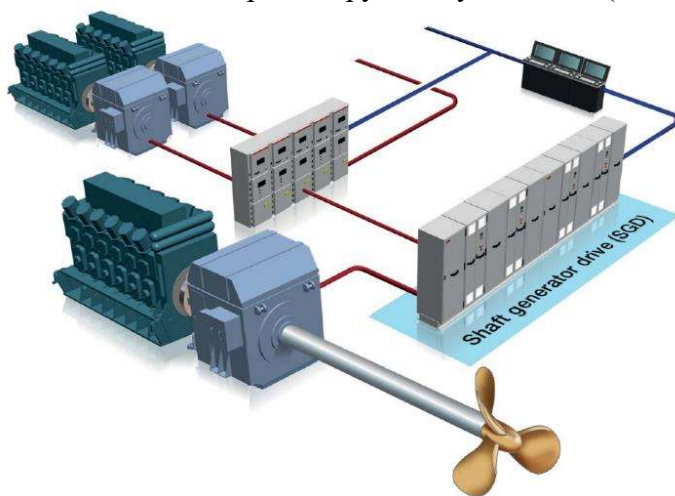
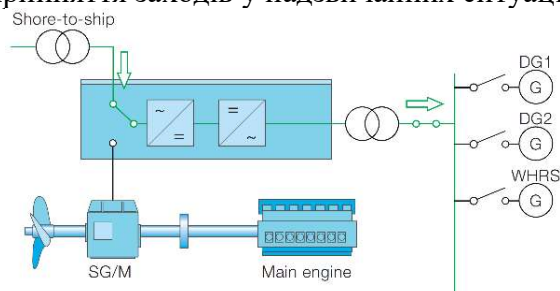


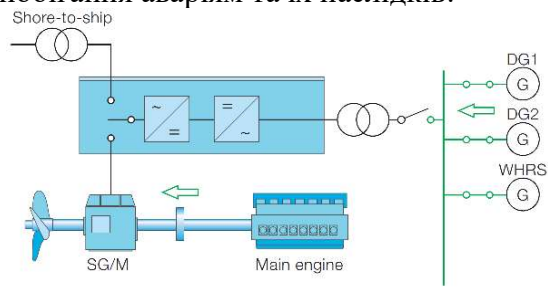
Рис. 2 – Конфігурація типової судової енергетичної системи з приводом валогенератора

Ця система з централізованим збором даних, управлінням і диспетчеризацією (Supervisory Control And Data Acquisition – SCADA) всіх джерел і споживачів енергії має п'ять режимів руху які дозволяють адаптуватися до вимог різних умов експлуатації: STS – берегове живлення, MAIN – основний механічний, PTO – при живленні судової електричної мережі від валогенератора та WHRS, PTI – при підсумовуванні потужності від ME і SM, PTH – коли ME зупинився і гвинт працює від SM (рис. 3, а-д) [10].

Не менш важливою проблемою є забезпечення і підвищення живучості та безпеки на судах, одним з основних факторів яких є надійність і надмірність енергосистеми [11]. У цьому напрямку проводяться численні дослідження, спрямовані на аналіз аварійних умов в узагальнених моделях і для конкретних ситуацій на морі, аналіз керованості і топології судових мереж для швидкого прийняття заходів у надзвичайних ситуаціях, запобігання аваріям та їх наслідків.



а)



б)

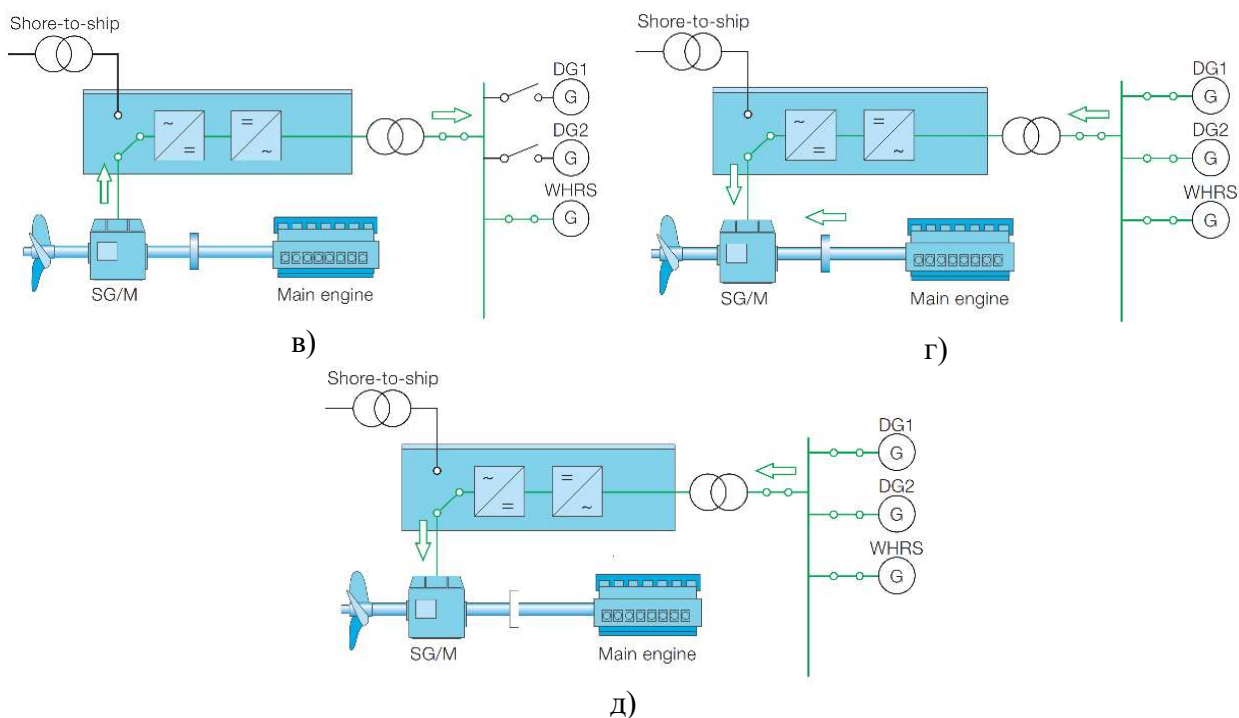


Рис. 3 – Режими пропульсивних установок з валогенератором:

а) STS; б) Main mechanical mode; в) PTO; г) PTI; д) PTH

#### Питомі витрати палива суднових двигунів внутрішнього згорання

Для прикладу розглянемо суднову ПУ контейнеровозу «Mathilde Maersk» (рис.4), параметри машин якої надано в таблиці 3 [12].

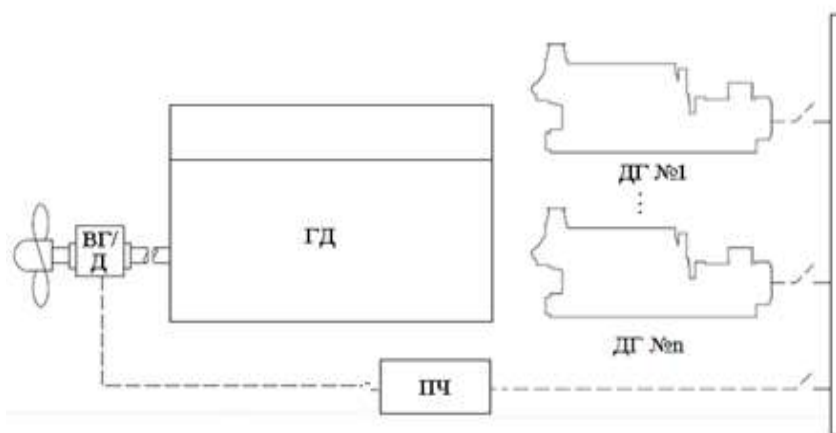


Рис.4 – Структурна схема суднової комбінованої ПУ: ГД – головний двигун (ДВЗ), ВГ/Д – валогенератор/електродвигун, ДГ – дизель-генератор, ПЧ – перетворювач частоти.

Таблиця 3 – Технічні характеристики силових агрегатів «Mathilde Maersk»

|                     |                                                                                                                                                                                            |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Головні двигуни     | 2x MAN-B&W/Doosan 7S80ME-C9.4 - 2 stroke 7 cylinder 800 x 3.450 mm combustion engines each 29,300 kW at 77,7 rpm<br>Manufacturer: Doosan Engine Co., Ltd.                                  |
| Валогенератори      | 2x Siemens AG I AC 222 each 3.000 kW                                                                                                                                                       |
| Генератори          | 1x Turbo generator 6.000 kW<br>2x MAN-B&W 6L32/40 diesel generatorsets each 2.800 kW<br>1x MAN-B&W 9L32/40 diesel generatorsets each 4.300 kW<br>Manufacturer: HHI Electro Electric System |
| Підрулюючі пристрої | 2x 2.500 kW each                                                                                                                                                                           |

Гребний гвинт приводиться в дію синхронним ВГ/Д, ротор якого встановлений в лінію гребного валу. Живлення гребного електродвигуна (ГЕД) виконується від суднових допоміжних ДГ через перетворювач частоти (ПЧ).

В якості ПЧ можуть бути використані перетворювачі частоти фірми SIEMENS – Sinamics SL150 (SM150) [13] морського виконання. Sinamics SL150 це IGBT (IGCT) циклоконвертор (cycloconverter) для тихохідних синхронних й асинхронних двигунів з високим обертовим моментом і перевантаженнями (табл.4).

Перевагою названих перетворювачів частоти є можливість забезпечити роботу СМ на частотах обертання нижчих 30 об/хв., а також регулювання моменту за рахунок використання принципів векторного управління.

Таблиця 4 – Технічні характеристики перетворювача частоти Sinamics SL150

|                                |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| Потужність, МВА                | 7,6                        |
| Значення напруги живлення, В   | 6600                       |
| Частота мережі живлення, Гц    | 50/60                      |
| Струм, А                       | 350                        |
| Коефіцієнт потужності          | 0,8                        |
| ККД, %                         | ≥ 99                       |
| Закони управління              | U/f; векторне              |
| Вихідна частота, Гц            | 0 - 30                     |
| Перевантажувальна спроможність | 200 % (60 с); 250 % (20 с) |
| Обмін даними                   | Profibus DP                |

На рис.5 приведена блок-схема ПЧ з активним випрямлячем та схема підключення ПЧ SINAMICS SM150 у версії IGBT.

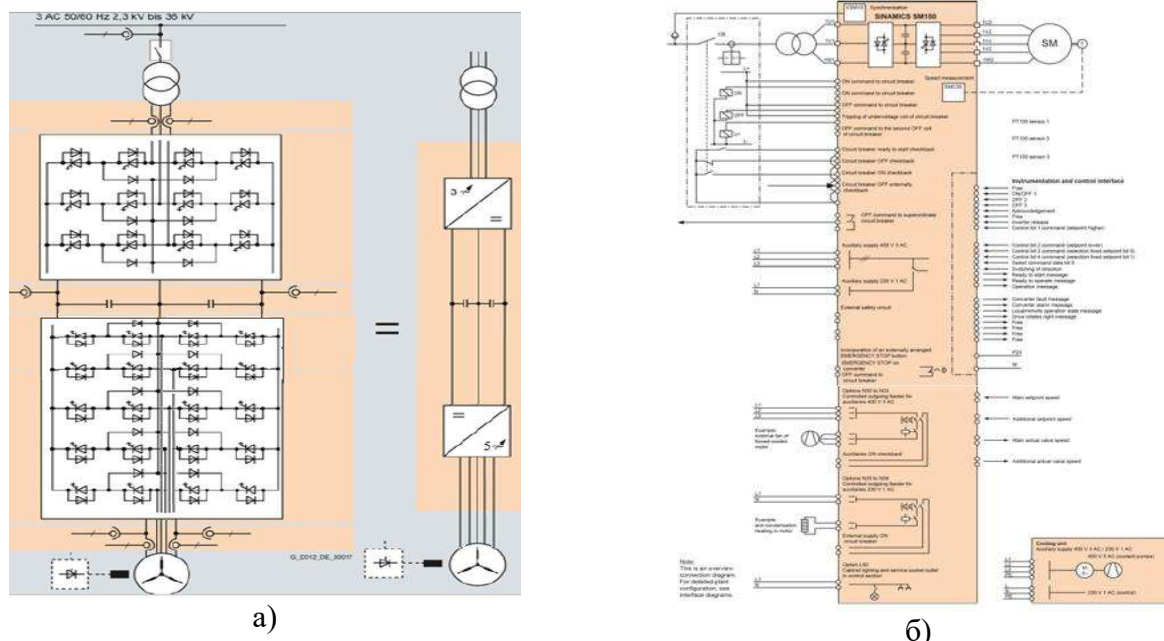


Рис.5 – Блок-схема ПЧ (а) та схема його підключення до СМ (б)

Проаналізуємо режими роботи суднової енергетичної системи і витрати палива основного двигуна і дизель-генераторів в різних діапазонах навантажень.

Сумарна номінальна потужність головних двигунів складає  $P_{MEн} = 58.6 MW$ . у маневреному режимі цього судна необхідна потужність на гребних гвинтах становить  $P_{ME} = 5.057 MW$ , на підрулюючих пристроях – до  $P_{BT} = 5.0 MW$ . З представлених даних випливає, що в цьому режимі потужність головних двигунів можна порівняти з потужністю дизель-генераторів суднової енергетичної системи. Якщо сумарна потужність

пропульсивної установки  $P_{ME}$  і підключених електричних споживачів  $P_{ShipGrid}$  не перевищує сумарної потужності дизель-генераторів, то можна здійснити перемикання в режим РТН – один з режимів, можливість якого є принципово новою властивістю інтегрованих енергосистем. Крім того, в електричній мережі судна можливо виконати перерозподіл живлення і споживачів: підрулюючи пристрої можуть отримувати енергію від турбо-генератора, суднова мережа (в тому числі рефрижераторні контейнери) – від дизель-генератора MAN-B&W 9L32/40, а валогенератори – від двох дизель-генераторів MAN-B&W 6L32/40.

Покажемо, що такий перехід доцільний з міркувань економії палива і, як наслідок, підвищення екологічної чистоти судна. Залежності питомої витрати палива (BSFC) основного двигуна і дизельних генераторів при відносному навантаженні  $5\% \leq L \leq 100\%$  можуть бути апроксимовані поліноміальними функціями другого порядку, які для розглянутих машин на підставі експериментальних даних з офіційних специфікацій представлені у вигляді графіків і формул поліноміальних трендів в [14], а в більш зручній формі – в [15]:

$$BSFC_{ME} = 0.01L_{ME}^2 - 1.513L_{ME} + 226.3 \left[ \frac{kg}{MWh} \right], \quad (1)$$

$$BSFC_{DG} = 0.006L_{DG}^2 - 0.959L_{DG} + 230.2 \left[ \frac{kg}{MWh} \right], \quad (2)$$

де  $L$  – відносна потужність у відсотках:  $L_{DG} = 100P / 5.6$  при роботі дизель-генераторів;  $L_{ME} = 100P / 58.6$  для головного двигуна.

В області наднизьких навантажень  $L \leq 5\%$  залежності  $BSFC(L)$  апроксимуються іншими функціями, але цей діапазон не є актуальним для судових енергетичних систем.

Витрата палива визначається за формулою:

$$SFC(P) = BSFC(L) \cdot P. \quad \text{Те}$$

Важливою особливістю функцій (1) і (2) є існування оптимальної точки в області 80 ... 85% номінальної потужності двигуна, що відповідає принципам проектування ДВЗ. При такій потужності відбувається найбільш повне згорання палива, що призводить до більш ефективного перетворення енергії згорання палива в механічну енергію і найменшого рівню шкідливих викидів.

Перетворимо вирази (1) і (2) від відносних величин потужності у відсотках до абсолютних значень для кожного двигуна та побудуємо графіки питомої  $BSFC$  (рис.6) та повної  $SFC$  (рис.7). витрати палива в області малих навантажень у системі координат з єдиною віссю абсцис для всіх ДВЗ.

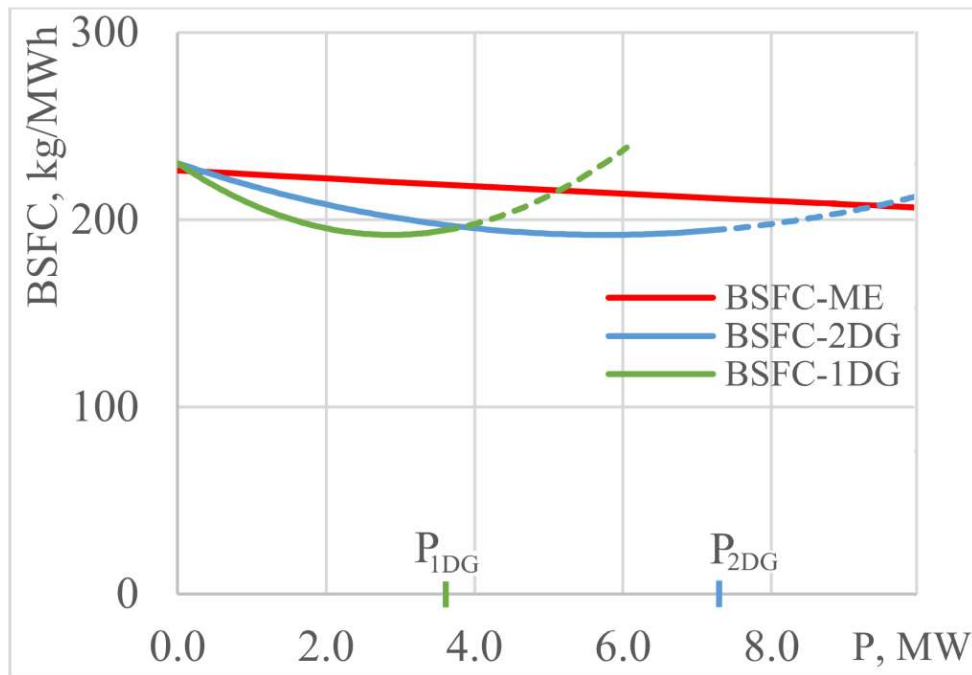


Рис 6. – Питомі витрати палива в області малих навантажень

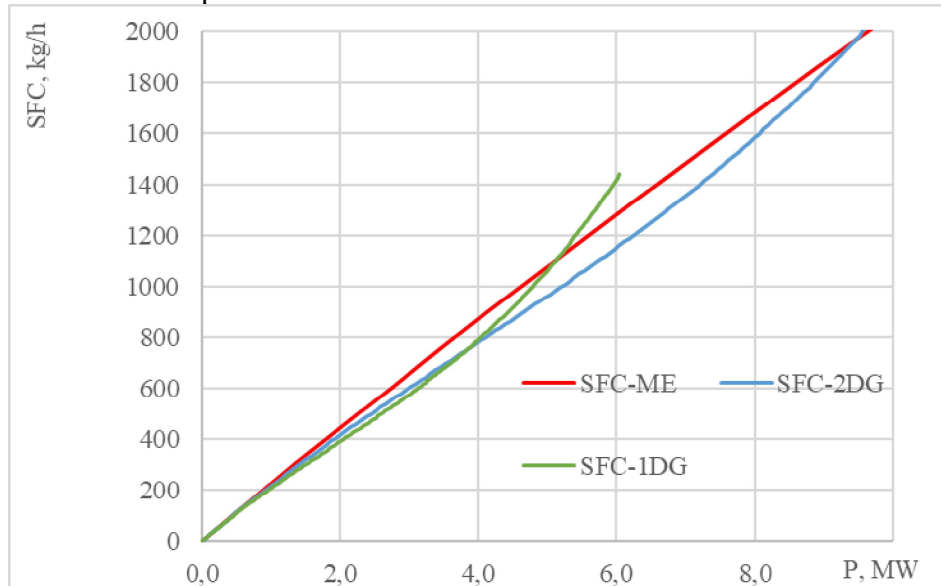


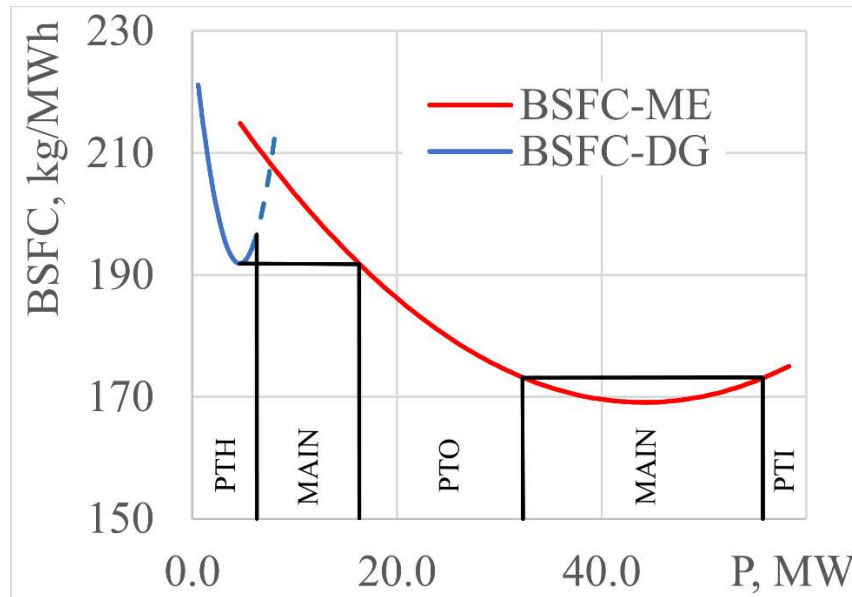
Рис 7. – Повні витрати палива в області малих навантажень

Видно, що точки перетину функцій  $SFC_{1DG}(P)$  і  $SFC_{2DG}(P)$  з  $SFC_{ME}(P)$  знаходяться далі  $P_{1DG}$  і  $P_{2DG}$  відповідно. Так як в області малих навантажень  $BSFC_{ME}(P)$  головного двигуна значно більше  $BSFC_{DG}(P)$  дизель-генераторів, то в діапазоні низьких навантажень, зокрема при маневреному режимі роботи, доцільно перевести рухову установку в режим РТН.

Аналогічний аналіз у діапазоні високих навантажень (рис. 8) показує, що для будь-якої потужності основного двигуна більше 20 МВт його питома витрата палива менша, ніж у дизель-генераторів СЕЕС.

Рис.8 – Питомі витрати палива та принцип селекції режимів

Проведемо аналіз витрат палива та умов роботи ДВЗ в режимах РТН, РТО та РТІ.



Розрахуємо витрати палива при роботі головних двигунів або двох дизель-генераторів, нехтуючи на даному етапі досліджень додатковими втратами від дизель-генераторів до гребного валу.

Витрата головних двигунів складе:

$$L_{ME} = 100 \frac{5.057}{58.6} = 8.63 \%,$$

$$SFC_{ME} = 5.057 BSFC_{ME} (L_{ME}) =$$

$$= 5.057 (0.01 L_{ME}^2 - 1.513 L_{ME} + 226.3) = 1082.3 \frac{kg}{h}. \quad (4)$$

Аналогічно для двох дизель-генераторів отримуємо:

$$L_{DG} = 100 \frac{5.057}{5.6} = 90.3 \%,$$

$$SFC_{DG} = 5.057 BSFC_{DG} (L_{DG}) =$$

$$= 5.057 (0.006 L_{DG}^2 - 0.959 L_{DG} + 230.2) = 971.8 \frac{kg}{h}. \quad (5)$$

Таким чином, економія палива складе:  $SFC_{ME} - SFC_{DG} = 108.0 \frac{kg}{h}$ , тобто

$$100 \frac{108.0}{1079.8} = 10.0 \%, \text{ що істотно перевищує можливі втрати енергії в каналі DG-FC-SG/M.}$$

Проаналізуємо ще одну область навантаження від 5.6 MW до 17 MW, в якій витрата палива головних двигунів більше, ніж мінімальна витрата палива дизель-генераторів. В цьому випадку спільна робота ME і DG – SG / M (режим РТІ) недоцільна, так як навантаження ME мале, а його зменшення за допомогою DG – SG / M тільки погіршує енергетичні показники.

Нехай, наприклад,  $P_{ME} = 15 MW$ . Витрата головних двигунів складе:

$$L_{ME} = 100 \frac{15.0}{58.6} = 25.6 \%,$$

$$SFC_{ME} = 15.0 BSFC_{ME}(L_{ME}) = 2912.3 \frac{kg}{h}. \quad (6)$$

Нехай дизель-генератори працюють з оптимальним навантаженням 80%. Тоді отримуємо:

$$L_{DG} = 80 \%,$$

$$P_{DG} = 0.8 \cdot 5.6 = 4.48 \text{ MW},$$

$$SFC_{DG} = 4.48 BSFC_{DG}(L_{DG}) = 859.6 \frac{kg}{h};$$

$$L_{ME} = 100 \frac{15.0 - 4.48}{58.6} = 100 \frac{10.52}{58.6} = 17.95 \%,$$

$$SFC_{ME} = 10.52 BSFC_{ME}(L_{ME}) = 2129.2 \frac{kg}{h}. \quad (7)$$

$$(8)$$

Підсумовуючи результати розрахунків (7) і (8), в результаті знаходимо:

$$SFC = SFC_{DG} + SFC_{ME} = 2988.8 \frac{kg}{h}. \quad (9)$$

Очевидно, що витрата палива збільшується. Тому необхідний режим роботи системи – MAIN (незалежна робота ME і DG).

Далі, в діапазоні середніх навантажень головних двигунів більш 17 MW його питома витрата палива менше, ніж у дизель-генераторів. Тому стає доцільним перехід в режим РТО, коли всі потреби суднової електричної мережі забезпечують валогенератори SG і WHRS. З одного боку, це наблизить головні двигуни до оптимальної робочій точці, а з іншого – збереже моторесурс дизель-генераторів.

Так, якщо  $P_{ME} = 25 \text{ MW}$ , витрата головних двигунів складе:

$$L_{ME} = 100 \frac{25.0}{58.6} = 42.7 \%,$$

$$SFC_{ME} = 25.0 BSFC_{ME}(L_{ME}) = 4499.6 \frac{kg}{h}. \quad (10)$$

Нехай дизель-генератори працюють з оптимальним навантаженням 80%. Тоді отримуємо:

$$L_{DG} = 80 \%,$$

$$P_{DG} = 0.8 \cdot 5.6 = 4.48 \text{ MW},$$

$$SFC_{DG} = 4.48 BSFC_{DG}(L_{DG}) = 859.6 \frac{kg}{h}. \quad (11)$$

Підсумовуючи результати розрахунків (10) і (11), знаходимо:

$$SFC = SFC_{DG} + SFC_{ME} = 5359.6 \frac{kg}{h}. \quad (12)$$

В режимі РТО головні двигуни забезпечують як рух судна, так і через валогенератори та перетворювачі частоти – живлення суднової мережі. Тому витрата палива складе:

$$L_{ME} = 100 \frac{25.0 + 4.48}{58.6} = 100 \frac{29.48}{58.6} = 50.3 \%,$$

$$SFC_{ME} = 29.48 BSFC_{ME}(L_{ME}) = 5174.4 \frac{kg}{h}. \quad 13)$$

Очевидно, що витрата палива зменшується. Тому режим РТО доцільний. В діапазоні навантажень від 65% до 85 ... 90%  $P_{ME}$  головний двигун працює в режимі, близькому до оптимального, тому також є доцільним перехід в режим MAIN.

І, нарешті, коли необхідна потужність ME стає вище 90 ... 95%  $P_{ME}$ , необхідно переключитися в режим РТІ. Тоді дизель-генератори і WHRS збільшать загальну потужність, яка передається гвинту на величину  $P_{DG} + P_{WHRS} - P_{Ship\ Grid}$ , що дозволить знизити навантаження головного двигуна, знову наближаючись до оптимальної величини з точки зору як витрати, так і повноти згорання палива.

### Математична модель системи «Суднова мережа – СД з векторним управлінням – Навантаження»

Для підтвердження отриманих результатів проведено математичне моделювання електромеханічних перехідних процесів у системі "Ship Power System – Field Oriented Control SM – Load" для одного з режимів. Базова модель – AC8 – «5-фазний синхронний привод» з бібліотеки Simscape Power Systems, який складається з синхронного двигуна, що живиться від високочастотного інвертора з широтно-імпульсною модуляцією (рис.9).

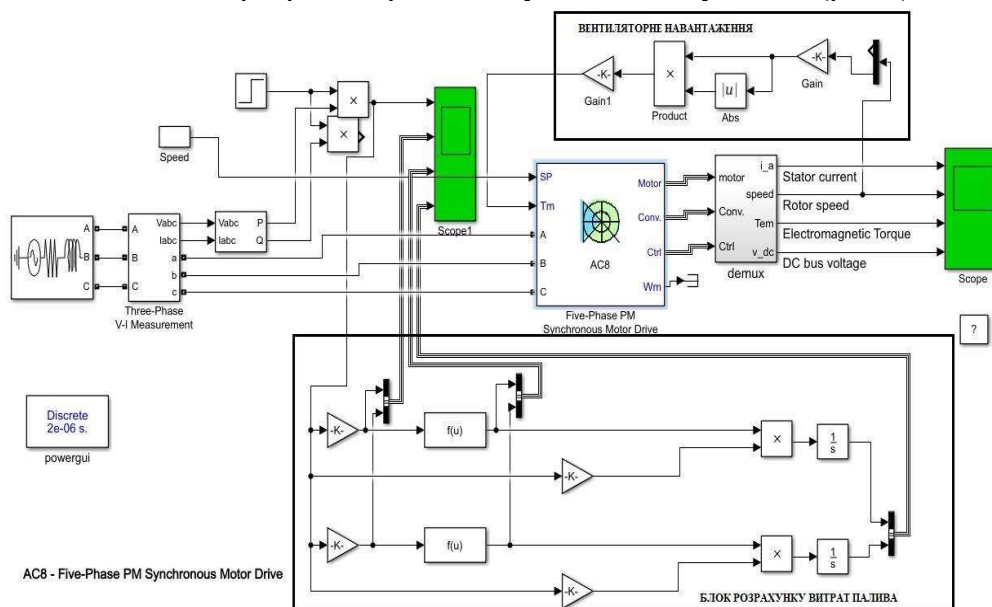
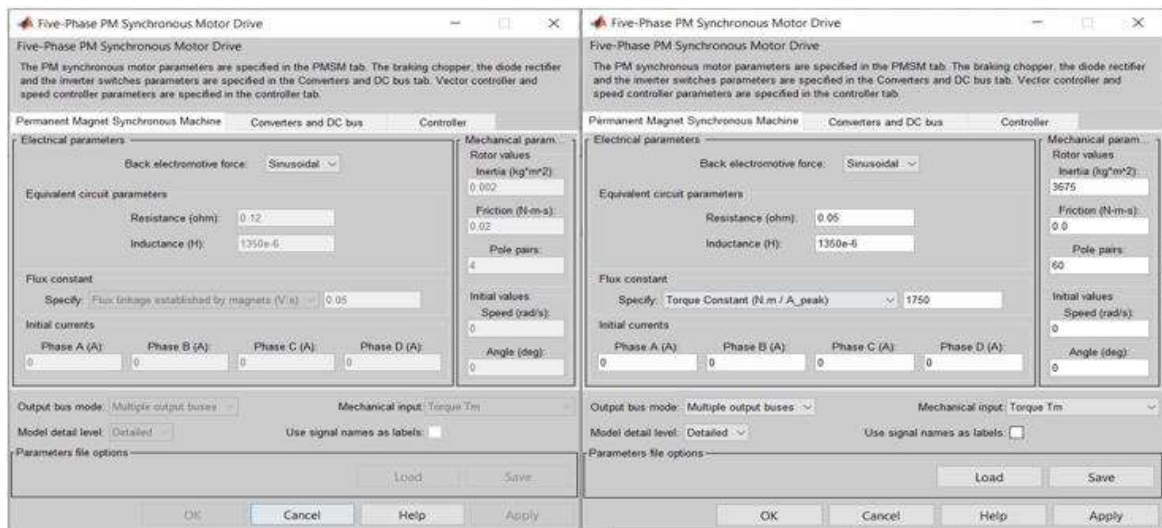


Рис. 9 – Модель пятифазного синхронного электропривода с векторным управлением

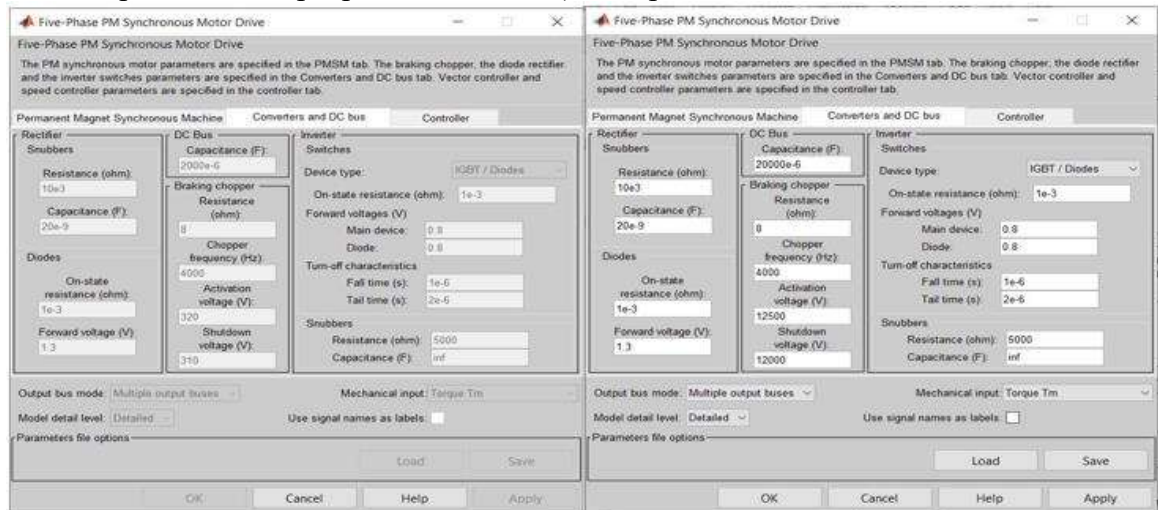
Виходячи з технічних даних про судно та головний двигун, розрахунки для номінального режиму показали, що потужність СМ становить майже 5 МВт при близько 40 об/хв. Нижче на рисунках 10, 11, 12 підібрані параметри для моделі п'ятифазного синхронного двигуна, та порівняно з запропонованими програмою Matlab.



а)

б)

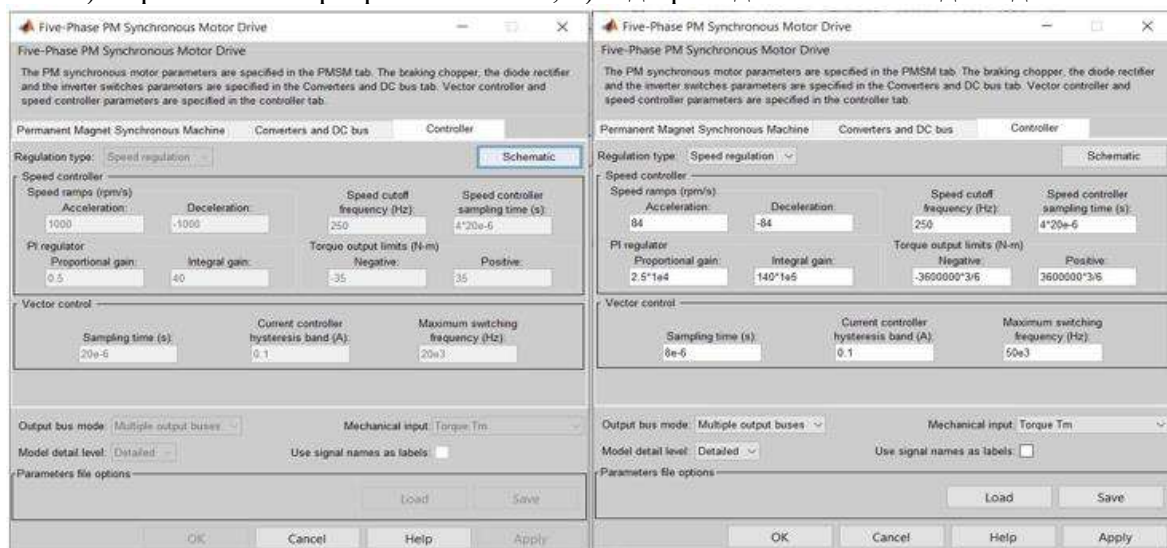
Рис. 10 – Розрахункові параметри схеми заміщення СМ з постійними магнітами: а) запропоновані програмою Matlab; б) підібрані для виконання дослідження



а)

б)

Рис.11 – Параметри шини постійного струму інвертора: а) запропоновані програмою Matlab; б) підібрані для виконання дослідження



а)

б)

Рис.12 – Параметри пропорційно-інтегрального регулятора: а) запропоновані програмою Matlab; б) підібрані для виконання дослідження

Зведемо параметри моделі у відповідність з паспортними параметрами машин і навантажень суднової енергетичної високовольтної системи:

– параметри схеми заміщення СМ –  $R = 0.05 \text{ Ohm}$ ,  $L = 1350 \cdot 10^{-6} \text{ Hn}$ , кількість пар полюсів 60 – забезпечують відповідність струму статора номінальній величині при номінальному механічному навантаженні;

– вентиляторний характер механічного навантаження гвинта з номінальним моментом  $T_n = 1136.4 \text{ kNm}$ ;

– номінальні параметри суднової енергосистеми: номінальна напруга (6600 V) і частота (60 Hz);

– параметри шини постійного струму і інвертора:  $C = 20000 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ ,  $f = 4000 \text{ Hz}$ .

– блок захисту конденсатора від перенапруги (переривник)  $U_{act} = 12.5 \text{ kV}$ ,  $U_{shut} = 12 \text{ kV}$ ;

– ПІ-регулятор  $k_{rsp} = 25000$ ;  $k_{rsi} = 14 \cdot 10^6$ ;  $T_{\max} = 3T_n$ ;  $T_{\min} = -3T_n$ .

Отримані графіки перехідних і сталих процесів (рис.13) дозволили розрахувати і порівняти витрати палива в режимах MAIN і PTH (рис.14).

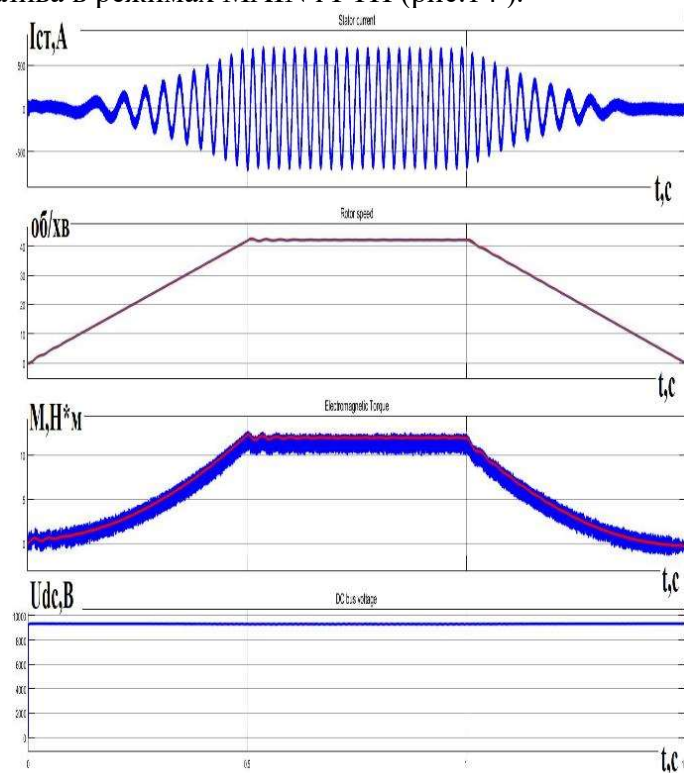


Рис.13 – Графіки перехідних процесів струму статора, швидкості і електромагнітного моменту в синхронній машині

Отже, за допомогою блока розрахунку витрат палива (ВП) отримано графіки перехідних процесів зміни активної протужності ( $P = f(t)$ ) споживаної з мережі при пуску ( $t=0-0,5 \text{ c}$ ), роботи під навантаженням ( $t=0,5-1 \text{ c}$ ) та у режимі зупинки ( $t=1-1,5 \text{ c}$ ) потужної СМ (рис.14). Навантаження ( $L$ , %) в усталеному режимі на ДГ при переході на електроживлення складає  $L_{ДГ} = 70 \%$ ,  $L_{ГД} = 8,5 \%$ . За допомогою залежності  $ВП = f(t)$  розрахуємо витрати ГД:  $(191,2 - 38,4) \cdot 2 = 305,6 \text{ г/с}$  та витрати двох ДГ:  $(171,9 - 35,6) \cdot 2 = 272,6 \text{ г/с}$ . Таким чином різниця в витраті палива складає  $305,6 - 272,6 = 33 \text{ г/с}$ , або  $118 \text{ кг/год}$  [15].

На підставі отриманих даних з урахуванням поділу витрат палива в перехідних і сталих процесах знайдена різниця витрати палива в маневровому режимі при перемиканні в режим РТН, яка співпадає з розрахованими раніше за виразами (4), (5).

Це, з одного боку, вказує на доцільність використання режиму РТН при малих швидкостях руху судна, а з іншого боку підтверджує обґрунтування переходів між іншими режимами, наведеними вище.

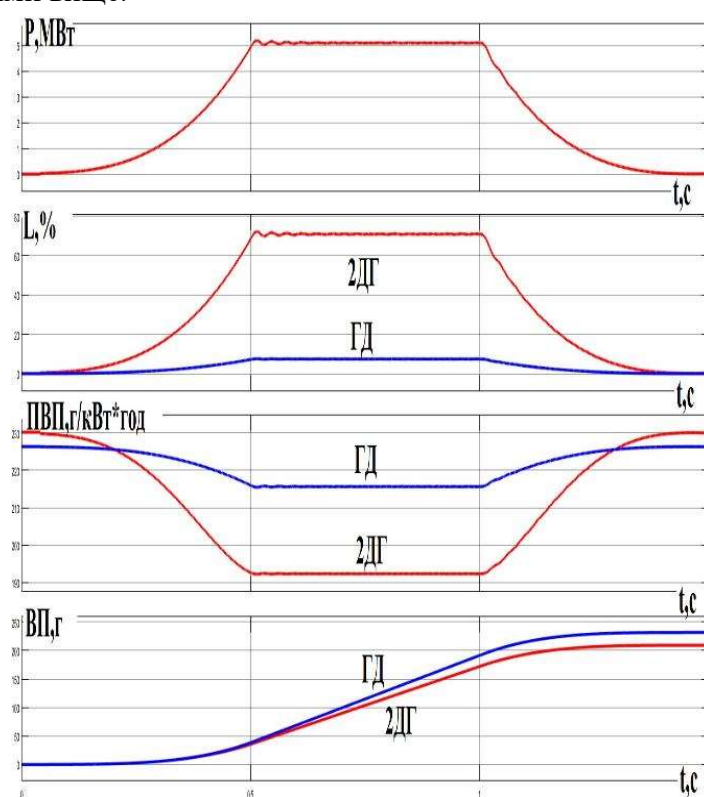


Рис.14 – Витрати палива в дизель-генераторах (синій) і головному двигуні (червоний)

Точніші розрахунки для інших режимів енергетичної системи судна також можуть бути проведені, проте детальний аналіз вимагає суттєвого ускладнення моделі з урахуванням характеристик системи WHRS, інверторів та рекуператорів, що може бути об'єктом подальших досліджень.

#### **Алгоритм перемикання режимів роботи комбінованої енергетичної установки**

Типова система керування судновою електроенергетичною системою складається з спеціалізованих контролерів та виконавчих пристроїв, до яких відносяться системи контролю дизель-генераторів та керована комутаційна апаратура. На рис.15 надано типову функціональну схему сучасної СЕЕС.



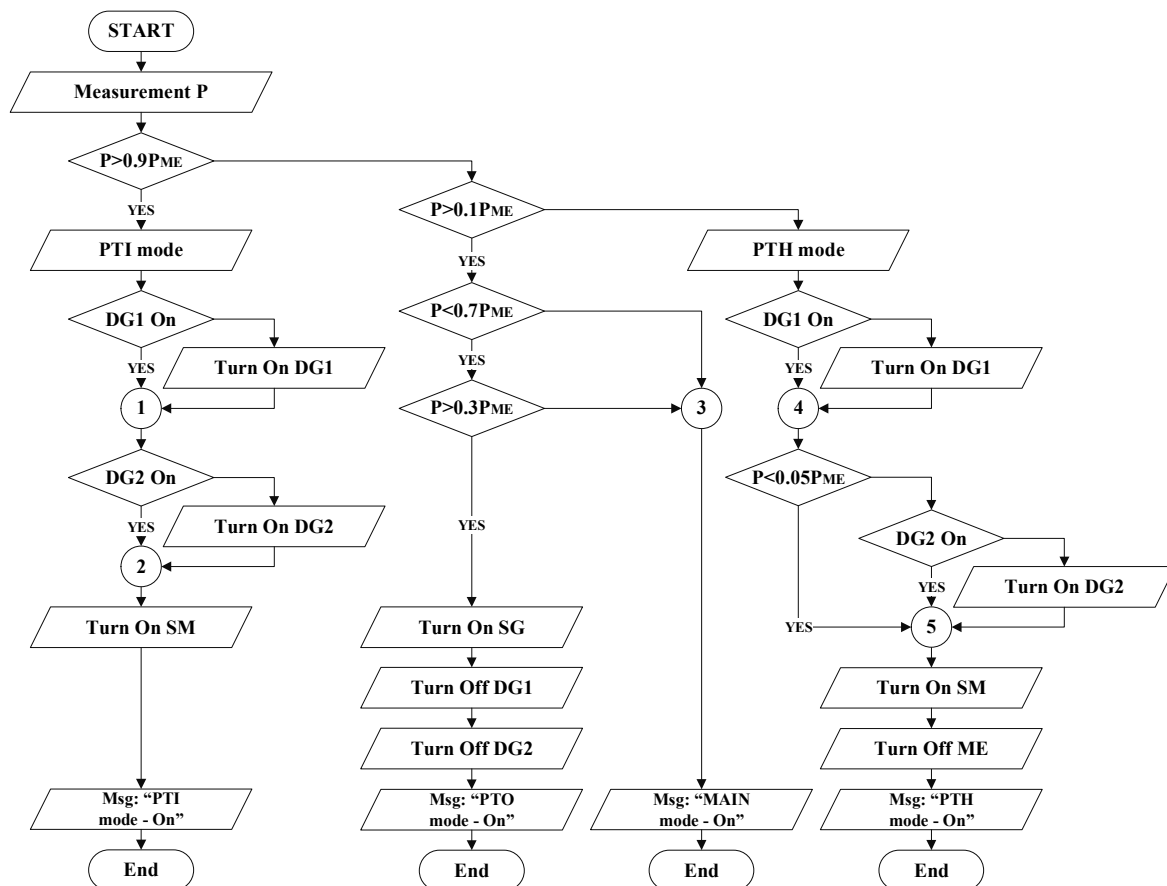


Рис.16 – Алгоритм підпрограми «Зміна режимів PTI – PTO – MAIN – PTH»

На кафедрі Електричної Інженерії та Електроніки національного університету «Одеська морська академія» розроблено фізичний тренажер суднової електроенергетичної системи (СЕЕС), який включає в себе два дизель-генератор потужністю 8 kW, аварійний дизель-генератор 1.5 kW, модуль берегового живлення, модуль валогенератора на базі асинхронного генератора 1.5 kW з перетворювачем частоти, модуль управління навантаженням, модуль корекції коефіцієнта потужності (Power Factor Correction), комутаційну апаратуру морського виконання.

Система керування тренажером складається зі спеціалізованих контролерів SELCO C6200 для окремих підсистем, центрального промислового контролера Schneider Electric M340 та мережі комп'ютерів зі SCADA на базі платформи Citect v.7.40.

Конфігурація обладнання тренажеру дозволяє реалізувати декілька з перерахованих вище режимів:

- а) Умовне берегове живлення від міської мережі з контролем порядку фаз;
- б) Основний режим з живленням навантаження від одного або двох дизель-генераторів з ручним, напівавтоматичним або автоматичним запуском дизель-генераторів з функцією їх синхронізації;
- в) Режим Power-Take-Off з живленням навантаження від валогенератора;
- г) Режим Power-Take-Home з живленням валогенератора від дизель-генераторів.

Відповідно до цього розроблено програмне забезпечення системи керування.

Так як основною задачею тренажера є навчання курсантів правилам роботи СЕЕС, то основні функції керування та протоколювання дій курсантів виконує SCADA: відображення стану кожного з компонентів СЕЕС з необхідним рівнем деталізації; перемикання режимів; формування команд керування окремими пристроями (комутаційною апаратурою та дизель- та валогенераторами).

Промисловий контролер M340 виконує:

- збір даних з локальних контролерів SELCO та комутаційної апаратури за протоколом Modbus;
- трансляцію команд від SCADA до виконавчих пристроїв;
- захист системи від аварійних ситуацій та помилкових дій оператора.

Так як протокол Modbus характеризується відносно невеликою швидкістю (більшість локальних контролерів і пристроїв підтримують тільки 19200 bod), то в контролері M340 передбачено асинхронний прийом та передачу даних з необхідним рівнем деталізації (повний або частковий пакет даних від окремого пристрою) залежно від запиту SCADA.

На рис. 17 надано вигляд головного екрану при роботі SCADA.

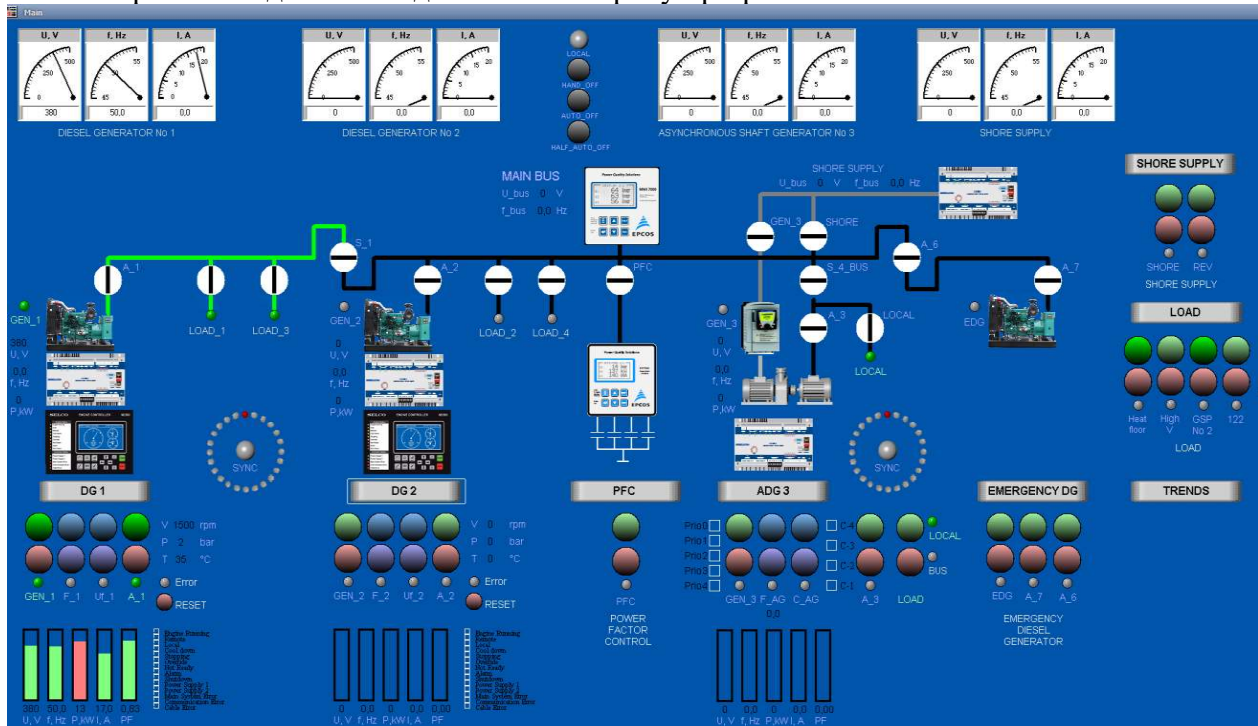


Рис. 17 – Головний екран SCADA «Судова електроенергетична система»

SCADA і контролер забезпечують роботу системи в автоматичному, напівавтоматичному і ручному режимах. З огляду на те, що тренажер побудований на реальних дизель-генераторах і SCADA здатна працювати в режимі реального часу, в керуючих програмах заплановано впровадження системи аналізу потужності навантаження для прогнозування і здійснення переходів між режимами енергетичної системи судна і оповіщення оператора. Для відображення режимів роботи в SCADA передбачено індикацію стану комутаційної апаратури, «стрілочні прилади», гістограми, що вказують напрямок і потужності потоків енергії, надають повну інформацію про стан СЕЕС як для курсантів, так і для розробників.

**Висновки.** У роботі проведено аналіз основних тенденцій розвитку сучасних електроенергетичних систем і запропоновано принцип поділу режимів роботи комбінованої суднової енергетичної системи, виходячи з навантаження головного двигуна. Виділено, крім режиму берегового живлення, чотири основних режими роботи при наявності в системі синхронної машини на гребному валу і перетворювача, що забезпечує роботу цієї машини як у руховому, так і в генераторному режимі. Тоді за рівнем навантаження головного двигуна – мала, середня, номінальна і велика – система автоматичного управління може відповідно визначити послідовність перемикання комутаційної апаратури та виконавчих машин і механізмів. Також додатково необхідно відзначити, що можливості перемикання силових агрегатів у комбінованій силовій установці в аварійних режимах підвищують живучість і безпеку судна.

На прикладі декількох режимів роботи контейнеровоза на 16000 контейнерів показано, при яких умовах можливе забезпечення руху судна від дизель-генераторів, а коли доцільно живлення суднової мережі здійснювати від валогенераторів. Це забезпечує економію палива та підвищує повноту згоряння палива головних двигунів та дизель-генераторів.

На підставі аналізу залежності витрати палива від навантаження для головних двигунів і дизель-генераторів і властивостей двигунів внутрішнього згоряння запропоновано алгоритм роботи автоматичної системи управління енергетичною системою судна, який може бути реалізований в судових SCADA, а також, зокрема, на фізичному тренажері в Національному університеті «Одеська Морська Академія». Подальші дослідження може бути спрямовано на уточнення границь переходів між режимами РТО – MAIN як з урахуванням витрат і повноти згорання палива, прогнозування навантаження, так і ризиків, обумовлених частими пусками-зупинками дизель-генераторів.

## References:

1. Clean Shipping Coalition: IMO Too Slow in Tackling Shipping's Climate Impact, available at: <https://www.offshore-energy.biz/clean-shipping-coalition-imo-too-slow-in-tackling-shippings-climate-impact/>.
2. Espen Skjong, Rune Volden, Egil Rødskar, Marta Molinas, Tor Arne Johansen, and Joseph Cunningham. Past, Present and Future Challenges of the Marine Vessel's Electrical Power System, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, pp.1–16. <http://dx.doi.org/10.1109/TTE.2016.2552720>.
3. Рак О.М. Визначення генеруючих потужностей в термoeфективній системі суднової електростанції та її техніко-економічних показників [Текст] / О. М. Рак, О. В. Глазева, С. А. Дудко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка, 2018. – Вип. 28(104). – С. 147–153.
4. <https://www.dnv.com/maritime/hub/decarbonize-shipping/key-drivers/regulations/imo-regulations/seemp.html>
5. Vijayarajan1, A. Shunmugalatha, M. A. Jagabar Sathik. A New Hybrid Multilevel Inverter Topology for Medium and High Voltage Applications./ Applied Mathematics & Information SciencesAppl. Math. Inf. Sci. 11, No. 2, 2017, pp. 497–508 <http://dx.doi.org/10.18048/2016.52.05>.
6. Jin, Z.; Sulligoi, G.; Cuzner, R.; Meng, L.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Next-Generation Shipboard DC Power System: Introduction Smart Grid and dc Microgrid Technologies into Maritime Electrical Networks. IEEE Electr. Mag. 2016, 4, 45–57. <http://dx.doi.org/10.1109/MELE.2016.2544203>.
7. Merlin Chai, B. Dastagiri Reddy, Sobrayen Lingeshwaren., Sanjib K. Panda, Die Wu, Xiao Qing Chen, Progressing towards DC electrical systems for marine vessels, Energy Procedia. Volume 143, December 2017, Pages 27-32 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.643>.
8. Innovative Power Transmission. Propeller Shaft Clutch (PSC). RENK Aktiengesellschaft. RENK. Edition 08/2016. 12 p. <https://www.renk.eu>.
9. Shaft generator drive for marine. ABB No 3AUA0000165329 REV A EN 3.7.2014 #17163. [www.abb.com/marine](http://www.abb.com/marine).
- Самонов, С. Ф. Підвищення ефективності та надійності комбінованих судових пропульсивних установок [Текст] / О. М. Рак, О. В. Глазева // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії = Bulletin of NTU "Kharkiv Politechnic Institute" Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т» - Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – №3 (1357) 2020. – С.29-35. – ISSN 2409-9295 (print). Doi: <http://doi:10/20998/2409-9295.2020.3.05>
- Merlin Chai, B. Dastagiri Reddy, Sobrayen Lingeshwaren., Sanjib K. Panda, Die Wu, Xiao Qing Chen, Progressing towards DC electrical systems for marine vessels, Energy Procedia. Volume 143, December 2017, Pages 27-32 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.643>.
- 'M' class container ship. Operating manual lindø newbuilding L. 216. m/s "MATHILDE MAERSK".
- SINAMICS SL150 Cyclo converters. Highest marks in robustness and reliability. <https://siemens.com/sinamics-sl150>
13. Рак О.М. Визначення генеруючих потужностей в термoeфективній системі суднової електростанції та її техніко-економічних показників [Текст] / О.М. Рак, О. В. Глазева, С.А. Дудко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка, 2018. – Вип. 28(104). – С. 147–153. <http://etks.opu.ua/core/getfile.php?id=1706>
14. Бушер, В.В. Аналіз пропульсивної установки контейнеровоза місткістю 16000 контейнерів при реалізації «РТН mode» / В.В. Бушер, О.В. Глазева, В.Ю. Пісчанський, К. Хандакжи // Матеріали МНТК «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 05.11.2019 - 06.11.2019. – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С.225-231 <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/SEEEA-2019.05.11.19.pdf>
15. Busher, V. Improved Algorithm for Supervisory Control And Data Acquisition of Combined Vessel's Energy System / Victor Busher, Kamal Khandakji, Vadim Zakharchenko, Oksana Glazeva. // Herald of Advanced Information Technology, ISSN 2617-4316 (Print), ISSN 2663-7723 (Online). – 2020; Vol. 3, № 1: pp. 418–427 <https://doi.org/10.15276/hait01.2020.8>