

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОПУЛЬСИВНОЇ УСТАНОВКИ  
КОНТЕЙНЕРОВОЗА МІСТКІСТЮ 16000 КОНТЕЙНЕРІВ**

## АНОТАЦІЯ

### **Актуальність роботи.**

Незважаючи на переваги електронного управління мало обертового ГД, довгочасна його експлуатація з наднизькою частотою обертання неможлива, ефективність робочого процесу дизеля при цьому низька, витрата палива на одиницю потужності і часу велика. Тому дослідження, які спрямовані на розробку варіантів модернізації пропульсивної установки судна, в особливих ситуаціях зі зменшеною потужністю за рахунок суднової електроенергетичної системи і валогенератора/двигуна є актуальним завданням.

### **Мета роботи і задачі дослідження.**

Метою даної роботи є підвищення енергетичної ефективності пропульсивної установки за рахунок оптимізації управління технологічними процесами використання енергії - реалізації РТН mode.

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.
2. Проаналізовано різні експлуатаційні режими пропульсивної установки, які використовують на сучасних судах.
3. Проведено огляд технічних характеристик основних силових агрегатів суднової комбінованої пропульсивної установки судна.
4. Створено математичну модель в пакеті програм MATLAB Simulink SimPowerSystems високовольтної п'ятифазної синхронної машини з векторним керуванням в автономному інверторі в якості гребного електродвигуна (ГЕД).
5. Виконано математичне моделювання електромеханічних перехідних процесів в системі «Суднова мережа - СД з векторним управлінням - Навантаження».
6. Підтверджено економічну доцільність модернізації і використання РТН mode порівнянням витрат палива ГД та ДГ.

**Об'єкт дослідження** – суднова комбінована пропульсивна установка контейнеровоза «Gerda Maersk»

**Предмет дослідження** – експлуатаційний режим роботи пропульсивної установки РТН mode .

**Методи досліджень.** Виходячи з поставлених завдань і з урахуванням особливостей досліджуваного об'єкту, в роботі використано, методи математичного моделювання та векторного керування СД.

Теоретичні рішення, запропоновані в роботі, поєднувалися з імітаційним моделюванням в сучасному програмовому середовищі MATLAB-Simulink.

### **Основні наукові та практичні результати, їх значення.**

В роботі проведено аналіз основних тенденцій розвитку сучасних суднових електроенергетичних систем.

На прикладі контейнеровоза місткістю 16000 контейнерів показано, що при переміщенні судна з малою швидкістю навантаження головного двигуна стає настільки малим, що може бути забезпечено дизель-генераторами суднової енергетичної системи. Тоді перехід в режим РТН, з одного боку, дозволяє економити палива (до 118 кг/год), а з іншого боку підвищує повноту згорання палива, так як дизель-генератори працюють при оптимальному завантаженні на відміну від головного двигуна, робота якого в цьому випадку вкрай несприятлива для машини.

Додатково необхідно відмітити, що в аварійних ситуаціях головний двигун і синхронна машина з перетворювачем частоти можуть забезпечити живлення суднової електроенергетичної системи, що в цілому підвищує живучість і безпеку судна.

Подальші дослідження в цьому напрямку спрямовані на уточнення меж переходів між режимами РТО – MAIN (ГД) як з урахуванням витрат і повноти згорання палива, прогнозування навантаження, так і ризиків, обумовлених частими пусками-зупинками дизель-генераторів.

### **Загальна характеристика наукової роботи.**

Робота складається із вступу, 2 розділів і висновків. Загальний обсяг роботи становить 30 сторінок, в тому числі основний текст на 23 сторінках та список літературних джерел з 19 найменувань на 2 сторінках.

ПРОПУЛЬСИВНІ СИСТЕМИ, ГОЛОВНИЙ ДВИГУН, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ВАЛОГЕНЕРАТОР, ВЕКТОРНЕ УПРАВЛІННЯ, ПИТОМІ ВИТРАТИ ПАЛИВА, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	6
ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	9
Основні режими роботи суднових гібридних пропульсивних установок для підвищення їх енергоефективності.....	9
Сучасні варіанти модернізації пропульсивної установки судна....	11
Аналіз енергетичних показників в режимах Power take home/Power take in / Power take off пропульсивних установок.....	14
Різновиди використання муфт карданного вала (PSC) для реалізації режимів роботи гібридної ПУ.....	17
Побудова навантажувальної діаграми ГД.....	19
Аналіз показників енергії в режимі РТН mode .....	21
Розробка математичної моделі системи «Суднова мережа - СД з векторним управлінням - Навантаження».....	23
Результати моделювання системи «Суднова мережа - СД з векторним управлінням - Навантаження».....	24
Вибір перетворювача частоти для реалізації РТНmode .....	26
ВИСНОВКИ.....	28
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	20

## ВСТУП

Існуючі та впроваджені в дію в сфері морського та річкового транспорту міжнародні вимоги і стандарти спрямовані на всебічне вдосконалення, так званого, енергетичного менеджменту, який реалізують суднохідні компанії і їхні судна в транспортному процесі. До завдань енергетичного менеджменту відносять: збереження ресурсів, захист навколишнього середовища і зниження витрат при безпечному використанні енергії. Енергетичний менеджмент слід розглядати як координацію використання компаніями і їх суднами енергії, що планується, організовується і систематизується в відповідності з вимогами, приймаючи до уваги природоохоронні і економічні аспекти. Однією з цілей енергетичного менеджменту є: зниження суднами витрати палива і, за рахунок цього, шкідливих викидів в навколишнє середовище вуглекислого газу Green Home Gases (GHG), які містять вуглекислий газ CO<sub>2</sub>, оксиди азоту NO<sub>x</sub> і сірки SO<sub>x</sub>, при високій якості транспортних послуг (згідно стандарту ISO 9001), забезпеченні безпеки і природоохоронних мір (згідно з вимогами Морських конвенцій, стандарту ISO 14001) та іншим.

На суднах, що знаходяться в експлуатації, підвищення ефективності використання енергії може бути досягнуто за рахунок впровадження широкого спектра 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, торкається судової рушійної (пропульсивної) установки (ПУ), до складу якої входять двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ).

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Лідери у виробництві обладнання для судів - Siemens, ABB, Mitsubishi Heavy Industries і інші приділяють велику увагу підвищення паливної ефективності і зниження шкідливих викидів в атмосферу.

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 [1]. MERS оптимізує теплову ефективність, автоматично регулюючи потужність відповідно до необхідної електроенергії.

Судова енергетична система орієнтована на зниження споживання мазуту, а також на можливість істотного скорочення викидів CO<sub>2</sub>, парникових газів. 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 NO<sub>x</sub> і SO<sub>x</sub> - двох поширених джерел забруднення повітря. SCR і EGR самі знижують викиди NO<sub>x</sub> більш ніж на 80%, а EGR за допомогою скруббера знижують викиди SO<sub>x</sub> більш ніж на 98%. Ці рішення дозволять дотримуватися правил ІМО Tier III без істотного впливу на продуктивність основного двигуна [1].

Ще одним напрямком є оптимізація режиму роботи основного дизельного двигуна і дизель- (турбо-) генераторів, що забезпечує підвищення ефективності використання палива.

Однією з основних завдань підвищення ефективності та економії двигунів є оптимізація управління технологічними процесами ПУ, що забезпечує підвищення продуктивності як основних двигунів, так і дизель-генераторів. Найбільш придатними для цієї мети є судові дизельні двигуни з електронним

управління [2], гібридні і комбіновані або інтегровані системи (IPS). Важливим компонентом такої IPS є синхронна електрична машина (СМ), яка встановлюється в лінію гребного валу. Синхронний двигун, механічно пов'язаний з ним, може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна [3].

Такі системи, не вимагаючи внесення будь-яких надмірних зміни в конструкцію судна, підвищують його живучість за рахунок отримання додаткового джерела енергії і тяги, і в той же час допускає гнучке управління, яке збільшує термін служби головних двигунів і знижує витрати палива.

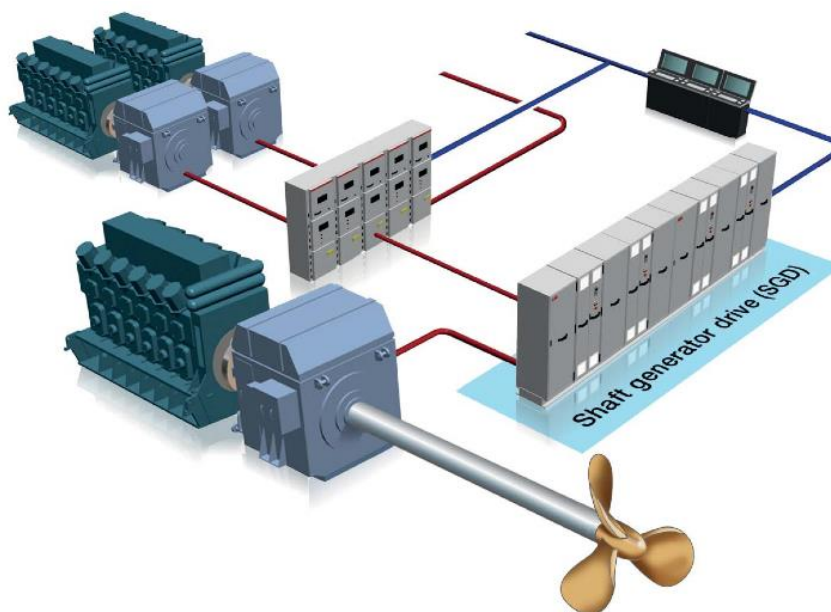


Рисунок 1 – Конфігурація типової судової енергетичної системи з приводом валогенератора

Таким чином, використання валогенератора забезпечує наступні переваги:

- підвищена живучість завдяки появі додаткових джерел енергії і тяги;
- зниження питомої витрати палива (SFC), коли допоміжний двигун замінює головний двигун;
- зниження споживання мастила масла 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.

Це призводить до зниження SFC і довгострокового збільшення терміну служби деталей двигунів через зниження вібрації [3]. 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. 1).

Ця система має п'ять режимів руху: берегове харчування STS, основний механічний з передачею потужності від головного двигуна до СЕЕС корабля РТО, РТІ - при підсумовуванні потужності від ME і SM, РТН - коли ME зупинився і гвинт працює від SM (рис. 2, а-е.) [4]. Ці різні рухові режими можуть адаптуватися до вимог різних умов експлуатації.

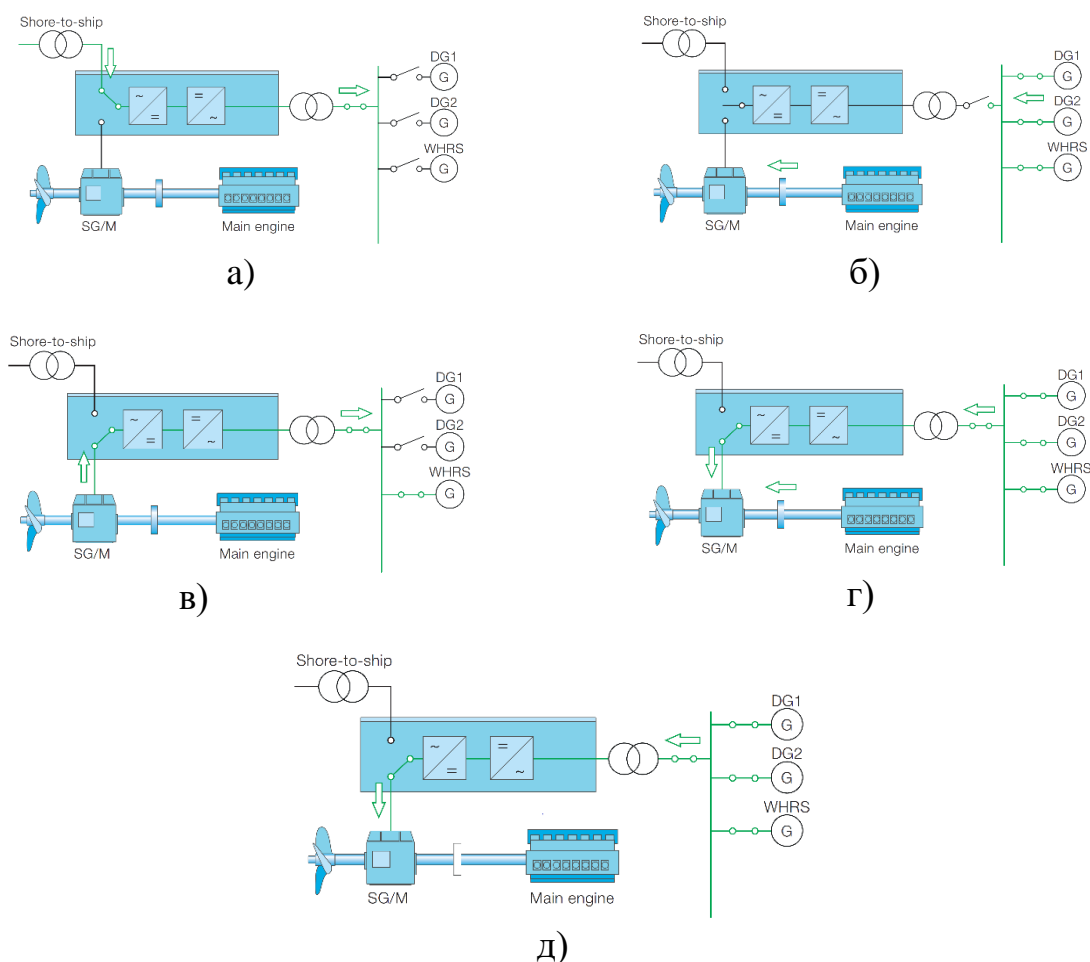


Рисунок 2 – Режими пропульсивних установок з валогенератором:  
а) STS; б) основний режим(Main mechanical mode); в) РТО; д) РТІ; е) РТН

Не менш важливою проблемою є забезпечення і підвищення живучості та безпеки на судах, одним з основних факторів яких є надійність і надмірність енергосистеми [4,5]. У цьому напрямку проводяться численні дослідження, спрямовані на аналіз аварійних умов в узагальнених моделях і для конкретних ситуацій на морі, аналіз керованості і топології суднових мереж, які за своєю складністю не поступаються системам управління міськими будівлями, але вимагають прийняття заходів у надзвичайних ситуаціях для запобігання аварії і їх наслідки [6-8].

## **ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА**

### **Основні режими роботи суднових гібридних пропульсивних установок для підвищення їх енергоефективності**

Завдяки суворим екологічним регламентам та зростаючій стурбованості споживанням енергії в секторі морського транспорту, є серйозні зусилля, щоб зробити судову енергетичну систему більш ефективною.

Підвищення ефективності використання палива розглядається як стійкий захід щодо зменшення викидів парникових газів та загального використання морської енергії. Таким чином, електрифікація судового двигуна була введена як рішення для роботи з більш високою ефективністю і, отже, більшою економією палива. Однак енергоефективність в умовах морського транспорту повинна з часом бути більш жорсткою, як цього вимагає Міжнародна морська організація (ІМО). 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) та-

кож 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 400 валових тоннажів, і вище (рис.3) [9].

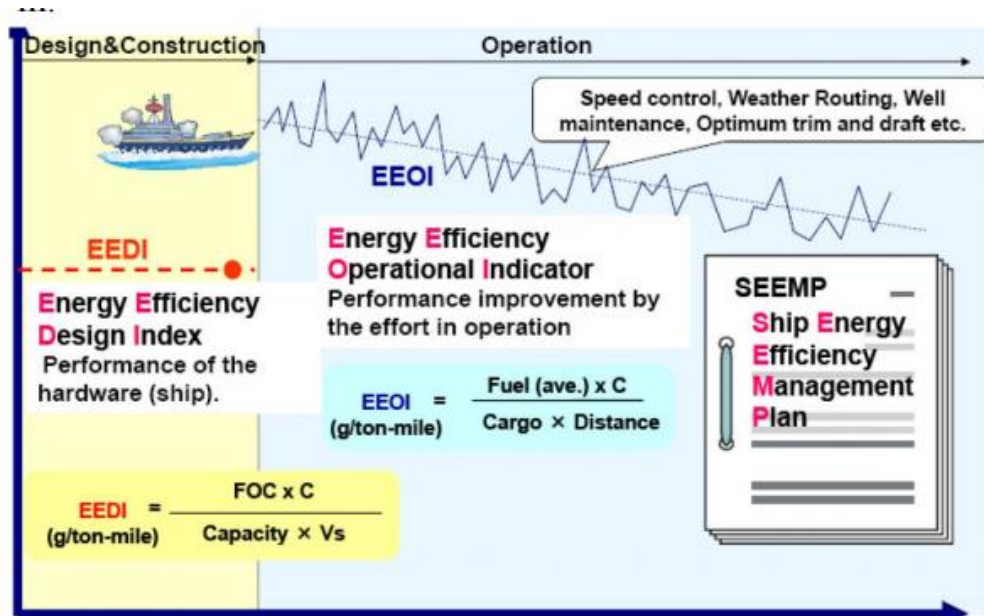


Рисунок 3 – Презентація ІМО по технічним заходам

Також запропоновано кілька енергоефективних методів для подальшого підвищення ефективності використання палива на борту суден. Вони включають інтеграцію системи зберігання енергії, впровадження розподілу постійного струму, оптимального розподілу електроенергії та планування, а також різні експлуатаційні практики, які зараз застосовуються для існуючих звичайних суден.

Дослідники енергетичних проблем в морській індустрії звертають увагу на переваги впровадження на судах, поряд з «класичними» мережами змінного струму, також мереж 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 судів. Особливості мережі змінного струму також перешкоджають підвищенню живучості суднової енергосистеми і якості електроенергії.

Крім того, вбудовування в архітектуру систем постійного струму дозволяє підключати додаткові джерела енергії постійного струму, такі як: сонячні панелі, паливні елементи, супер конденсатори і акумуляторні батареї [10]. Таким чином, гібридні енергосистеми гратимуть все більш важливу роль в конструкціях суден і кораблів наступних поколінь, при цьому акумуляторні батареї або інші пристрої для накопичення енергії будуть використовуватися для забезпечення коротких імпульсів більш високої потужності, коли це необхідно.

Структури суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) [10], в яких реалізовані перераховані переваги базуються на використанні потужних напівпровідникових перетворювачів (IGBT, IGCT, MOSFET): випрямлячів на стороні генераторів і інверторів для всіх суднових споживачів. При цьому передача електроенергії по судну здійснюється на постійному струмі.

### **Сучасні варіанти модернізації пропульсивної установки судна**

У часи, коли потреба в більш розумному використанні палива в морських умовах і гнучких системах приведення в рух велика, сучасні виробники двигунів внутрішнього згорання стикаються з завданням дотримання екологічних стандартів, не приносячи шкоди ефективності руху і експлуатації судна.

Умови запобігання забруднення навколишнього середовища стають суворішими, і в майбутньому, коли більш високі ціни на паливо стають більш імовірними, потрібно запропонувати розумні рішення, які забезпечують власників суден і операторів гнучкими експлуатаційними характеристиками.

Гібридна топологія складається з поєднання механічного та електричного приводу в кінематичному приводі. Отже, ефективність приведення в дію оптимізована, і в той же час швидко та гнучко реагувати на змінну потребу в електроенергії.

У звичайній системі валогенератору з фіксованою швидкістю, валогенератор, що працює від основного дизельного двигуна, використовується для отримання електричної потужності для суднової мережі. Дизельний двигун в свою чергу переміщує основний гвинт судна. Тому частота мережі судна тісно пов'язана зі швидкістю обертання гвинта. Отже, швидкість дизельного двигуна повинна підтримуватись постійною, щоб підтримувати частоту мережі.

Бажана швидкість судна регулюється лише за допомогою кроку гвинта, це означає, що витрачається більше енергії, ніж потрібно, згодом знижуючи ефективність і збільшуючи викиди.

У сучасних гібридних системах приводу включення силової електроніки для управління валогенератору, використовуючи перетворювач частоти, дозволяє дизельному двигуну і гвинтові двигуну працювати зі змінними швидкостями, зберігаючи частоту та напругу мережі в нормі.

На рисунку 4 наведено загальний вид енергетичної системи гребної електричної установки [11].

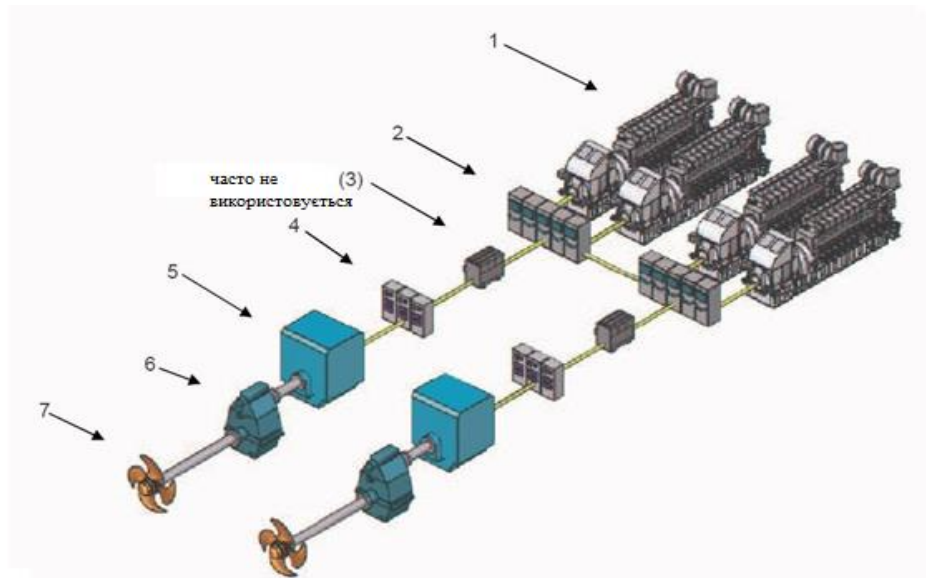


Рисунок 4 – Компоненти енергетичної системи гребної електричної установки:  
1- дизель-генератори; 2- головні розподільні щити; 3-трансформатори (часто не використовуються); 4-напівпровідникові перетворювачі; 5-електричні двигуни з можливістю роботи в генераторному режимі; 6-редуктори; 7-гребний гвинт.

Потужність двигуна подається за допомогою комбінації механічної потужності (подається дизельними двигунами) та / або електричної потужності

(через електродвигуни зі змінною швидкістю). Це поєднання призводить до великої гнучкості в роботі, що дозволяє точно забезпечити потужність і крутний момент у всіх режимах роботи судна.

Велика різноманітність режимів роботи, що підходить для гнучкої потреби в електроенергії, призводить до оптимальної загальної експлуатаційної спроможності установки з швидкими реакціями системи та високою гнучкістю установки.

Гвинтовий двигун може приводитися в рух дизельним двигуном та / або електродвигуном, що призводить до надмірної та надійної системи приведення в рух.

У гібридному режимі дизельний двигун і гвинтовий двигун можуть працювати з змінними оборотами в хвилину (комбінований режим), а мережева частота і напруга є фіксованими та стабільними.

Зниження експлуатаційних витрат заводу за рахунок можливості роботи основних двигунів та допоміжних генераторів у діапазоні, коли необхідна кількість потужності забезпечується комбінацією двигунів, які працюють поруч або при оптимальному навантаженні з мінімальним питомим споживанням мазуту.

Внаслідок високої ефективності установки в широкому діапазоні режимів експлуатації зменшується не тільки витрата мазуту, але й викиди, пов'язані з паливом, як  $SO_x$  та  $CO_2$ . Подальші забруднювачі зменшуються, оскільки відбувається менш неповне згорання, що часто зустрічається в двигунах з низьким навантаженням.

Хоча механічна оптимізація визначається одним або кількома режимами роботи, здатність електричного приводу надзвичайно збільшує гнучкість. Конструкції гібридних силових установок менше, порівняно з чистими конструкціями механічних систем.

В E-режимі з E-двигунами зі змінною швидкістю спричиняється менше шуму і зменшується кавітація бічного тиску на випромінювачі, оскільки це може працювати в оптимальному співвідношенні швидкість / крок. Швидкість

і нахил гвинта можна керувати незалежно. Крім того, рівень підводного шуму може бути зменшений. Це особливо пропонує переваги при повільному плаванні. Залежно від режимів роботи судна основні двигуни та допоміжні двигуни працюють менше годин на рік, а при експлуатації - на більші навантаження. Обидва призводять до менш необхідного обслуговування.

### **Аналіз енергетичних показників в режимах**

#### **Power take home/Power take in / Power take off пропульсивних установок**

Звичайні дизельні механічні приводні установки зазвичай мають загальну кількість енергії, встановленої для виконання робочого режиму з найвищою потребою в потужності. Для звичайних вантажних суден це відповідає експлуатаційному режиму суден, де судно перебуває у дорозі протягом тривалого періоду часу.

Коли судно має режими роботи, де потрібна значно менша потужність приводу, дизельний двигун повинен працювати на малому навантаженні. Дизельні двигуни працюють з найменшим питомим витратою палива при близько 85% навантаження. Взагалі гібридна система приводу двигунів пропонує потенціал в цих режимах роботи з частковим навантаженням. Кращі показники роботи дизельних двигунів можуть протидіяти внесеним додатковим втратам через збільшення кількості комплектуючих.

Нижче певного навантаження (близько 50%), забруднення всередині двигуна також стає проблемою через неповне згоряння палива. Це призводить до екологічних питань та ремонту двигуна.

Гібридна силова установка поєднує в собі особливості дизельної механічної системи з особливостями дизельної електричної установки. У своїй найпростішій формі конфігурація складається з дизельного двигуна, підключеного до редуктора, який, в свою чергу, приводить в рух гвинт. До редуктора також підключена електрична машина (ЕМ), яка може працювати в режимі генератора або в режимі двигуна. Це дає можливість для режиму відключення

живлення **PTO** (Power take off) або режиму збору потужності **PTI** (Power take in). Можливість використання електромотора або дизельного двигуна для приведення в рух (або навіть обох) робить його гібридною системою.

Концепція гібридного приводу має потенціал розширити економічно та екологічно привабливу зону експлуатації судна .

**PTI Hybrid Propulsion** - режим, в якому головний двигун з'єднаний з гребним гвинтом за допомогою редуктора. У режимі PTI електрична машина знаходиться в режимі підсилювача і подає додаткову потужність через редуктор до гвинта. Він приводить в рух гвинт паралельно з дизельним двигуном, тому додаткова потужність передається на гвинт. Ця потужність забезпечується дизель-генераторами у вигляді електроенергії, дивись рисунок 5,а. [12]

Він має перевагу в тому, що електроенергію можна легко транспортувати до споживачів на потреби судна. Деякі судна потребують великої потужності лише для невеликих кількостей їх експлуатаційного профілю. Замість установки більшого головного двигуна, режим PTI може забезпечити цю додаткову потужність. Для цього потрібні допоміжні двигуни.

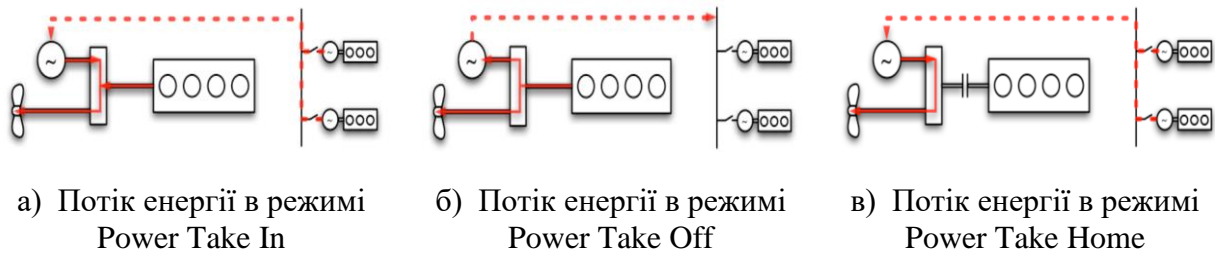


Рисунок 5 – Схемні рішення в сучасних суднових ПУ

Цей режим підходить для транзитного плавання, коли швидкість судна постійна. При цьому знижується витрата палива.

**PTO Hybrid Propulsion** - режим, в якому головний двигун з'єднаний з гребним гвинтом за допомогою редуктора. У звичайному режимі головний двигун приводить в рух гвинт через коробку передач. На редукторі підключений генератор, який забезпечує електроенергію судову мережу, дивись рисунок 5,б. У цьому режимі, головний двигун - єдиний основний двигун в роботі,

який працює на високому і, отже, ефективному навантаженні. У випадку, якщо основний двигун працює на НФО, витрати на пальне для виробництва електроенергії часто будуть нижчими ніж допоміжні двигуни, що працюють на MDO або MGO. Оскільки основний двигун повинен працювати, цей режим часто використовується, коли судно перебуває в транзиті з крейсерською швидкістю.

Даний режим, як правило, використовується для досягнення більшої швидкості судна або для пікових навантажень[12].

**РТН Hybrid Propulsion** – режим, в якому основний двигун не працює, електрична машина використовується як двигун, який подає потужність для гвинта. Дизель-генератори постачають електроенергію як на двигун, так і для споживачів судна. Коли основний дизельний двигун не працює, зчеплювальна муфта (PSC) може відключити його від коробки передач. Потужність двигуна все ще може забезпечуватися електродвигуном, який використовує електроенергію, що подається дизельними генераторами (рисунок 5,в). Це може мати дві програми. Один призначений для суден, які часто плавають на низькій швидкості. При низькому навантаженні дизельний двигун стає менш ефективним, і забрудненість стає проблемою. Двигун буде працювати на електроенергії, що забезпечується гнучким обсягом дизельних генераторів. Взагалі кажучи, більше енергії виробляють дизельні генератори, тому потрібні великі або додаткові двигуни на відміну від звичайної дизельної механічної системи.

Інше застосування - це альтернативна можливість руху. Коли основні двигуни виходять з ладу з будь-якої причини, судно все ще здатне ходити на повільній швидкості за допомогою електродвигуна. Класові товариства встановили правила щодо мінімальної доступної швидкості, відстані та / або потужності.

ІМО випустив нові положення SOLAS, які набули чинності у 2009 році щодо безпеки на борту пасажирських суден. Для заданих сценаріїв нещасних випадків він встановлює вимоги щодо безпечної евакуації пасажирів. Однією з цих вимог є надмірна система приведення в рух або функція Power Take

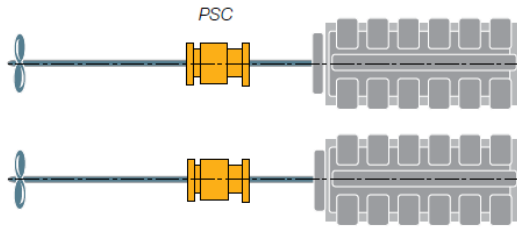
None (PTH). Це гарантує, що судно зможе повернутися до порту з обмеженою швидкістю. Наразі немає вимог щодо швидкості, відстані чи наявної потужності. Також немає явної вимоги, щоб судно могло повернутися до порту у разі затоплення [Lloyds, 2010]. Правила застосовуються до пасажирських суден, побудованих після 1 липня 2010 року, довжиною понад 120 метрів або з трьома і більше вертикальними пожежними зонами.

Можливі будь-які комбінації між цими трьома режимами роботи. Зрозуміло, всі ці конфігурації можливі також на двох і навіть більше програмах. Двохвальна гібридна конфігурація може мати додатковий режим роботи. Якщо з будь-якої причини основний двигун порту виходить з ладу, основний двигун все одно може приводити в рух гребний гвинт. Потім ця електрична енергія може бути передана на електромотор для приводу гвинта.

Електродвигун також може бути безпосередньо з'єднаний на валу гвинта. Це означає, що мотор повинен працювати з такою ж відносно низькою швидкістю, як і гвинт. Щоб підтримувати однакову потужність, обертовий момент, що створюється мотором, повинен бути набагато більшим. Оскільки крутний момент електродвигуна пов'язаний зі струмом, струми будуть збільшуватися. Для того, щоб протистояти цим великим струмам, мотору потрібна більша кількість полюсів і, отже, більша конструкція порівняно з двигунами швидкісного / низького крутного моменту. Витрати на такий двигун також будуть більшими, оскільки витрати на придбання електричної машини багато в чому залежать від кількості міді, що використовується в обмотках.

### **Різновиди використання муфт карданного вала (PSC) для реалізації режимів роботи гібридної ПУ**

Муфти приводів механізмів і машин здійснюють з'єднання валів і є відповідальними вузлами, які визначають в багатьох випадках надійність і довговічність всієї машини. Основне призначення муфт - передача обертання і крутного моменту (без зміни їх величини і напрямків) з одного валу на інший.



*Twin screw and two PSC*

Рисунок 6 – Зовнішній вигляд PSC для двохвальної ПУ

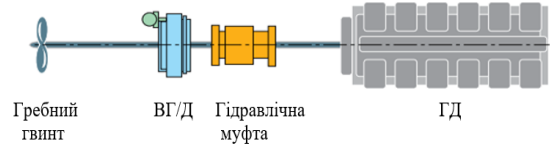


Рисунок 7 – Схемна реалізація режиму PTH mode з використанням PSC

Переваги та ефективність використання PSC при використанні двовальної системи (рис.6) [13]:

- Режим роботи лише з одним гвинтом;
- Якщо судно не повністю завантажене, або якщо не потрібна повна потужність двигуна, можна економити пальне;
- Відключення одного гвинта додатково дозволяє виконувати технічні роботи в морі навіть під час руху.

Переваги та ефективність використання PSC при реалізації схемного рішення PTH mode рис.7:

- Використання режиму PTH для поліпшення безпеки при одношнековому приводі;
- Незалежне електричне джерело енергії, при відключенні головного двигуна запобігає втраті управління судном;
- Електричний привід для повільного проходженні вузькості, плаванні в тумані та інше.

Версії PSC для суднових електричних споживачів наведено на рис.8-9.

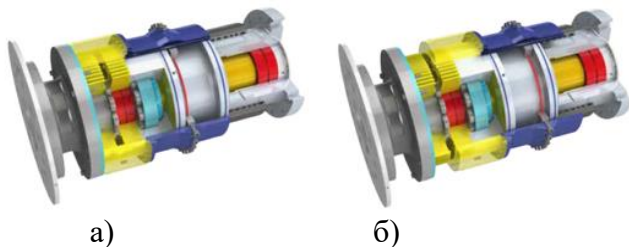


Рисунок 8 – Зовнішній вигляд PSC:  
а) з'єднаною з валом;  
б) роз'єднаною з валом ГД

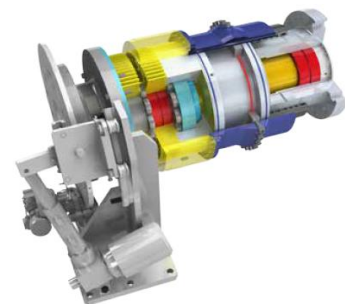


Рисунок 9 – Зовнішній вигляд повністю автоматичного PSC

Режим роботи PSC:

*Напівавтоматичний:* з напівавтоматичною версією потрібно лише трохи ручної роботи, щоб відключити або задіяти PSC. Особливо у випадку відмови головного приводного двигуна для переходу на аварійне управління потрібно лише кілька кроків.

*Повністю автоматичний:* для більшої гнучкості використання суднового приводу, з повністю автоматичним PSC в машинному відділенні не потрібен екіпаж. Увімкнення та відключення PSC контролюється безпосередньо з пульта управління двигуном. [14].

Техніка передач PSC унікальна і дає змогу забезпечити адаптованими компонентами передач та надійного зчеплення. Передача крутного моменту здійснюється без люфту через заземлений та злегка конічний зубчик. Завдяки обмеженню перемикаючого поршня, відсутнє затискання (клинування) заціпки.

### **Побудова навантажувальної діаграми ГД**

Навантажувальна діаграма ГД, представляє собою залежність потужності на валу двигуна від частоти обертання двигуна. Фірма-будівник ГД надає, так звану, навантажувальну діаграму (рис.10), на якій поле можливих режимів роботи двигуна визначено згідно з рекомендацій з урахуванням ряду експлуатаційних обмежень. Навантажувальна діаграма побудована в логарифмічних координатах і відображує прямими лініями межі потужності і частоти обертання валу для тривалої роботи, а також межі перевантажень ГД у відсотках від номінальних значень. Точка «М» відповідає максимально допустимій тривалій потужності двигуна, що працює безпосередньо на гребний гвинт. Ця точка звичайно збігається з точкою  $R_1$  (100 % потужності при 100 % частоти обертання), але в особливих випадках, наприклад, при відборі потужності від ГД валогенератором (PTO mode), може розташовуватись праворуч від  $R_1$  на лінії 7.

Площа між лініями 4 і 1 відповідає умовам роботи при підвищенні спротиву руху судна на мілководді, в умовах шторму та при розгоні судна, тобто

відповідає нестационарній роботі без фактичного обмеження за часом. При обростанні корпусу судна і гвинта межа 6 зсувається до лінії 2. Область режимів, які наближені до номінального, позначена трикутником сірого кольору. В ній здійснюють налаштування параметрів системи управління на зниження шкідливих викидів у відповідності до вимог конвенції МАРПОЛ73/78, скорочення питомих витрат палива, перерахунок параметрів потужності в режимах, які відрізняються від номінального.

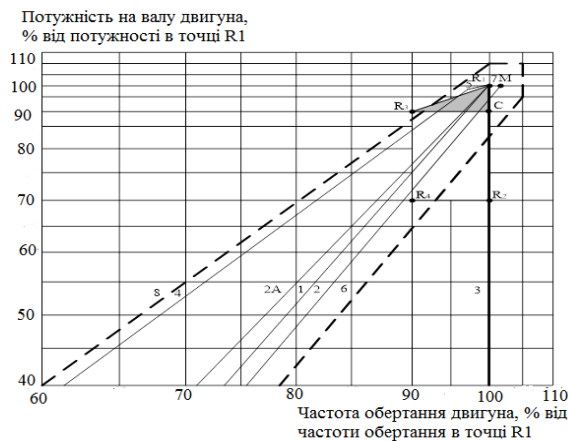


Рисунок 10 – Навантажувальна діаграма ГД

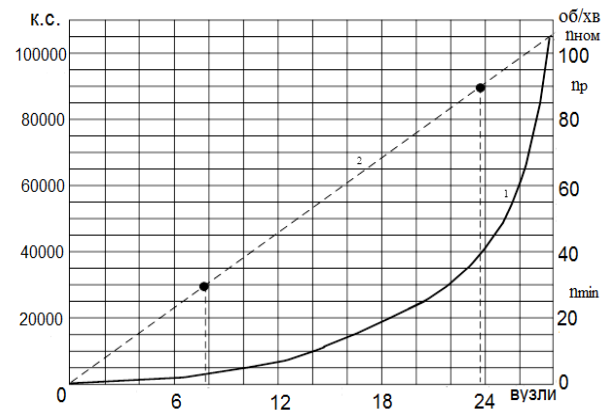


Рисунок 11 – Характеристика комплексу «корпус судна – ГД – гребний гвинт» при повному завантаженні судна

На практиці ГД доволі часто працює зі зниженою частотою обертання: при проходженні вузькостей, плаванні в тумані та інше. З точки зору безпеки мореплавства при цьому великого значення набуває мінімально стійка швидкість обертання ГД, що працює на гвинт фіксованого кроку. Згідно вимог правил Регістра ця величина не повинна бути нижчою за  $0,3n_{\text{ном}}$  [1]. В той же час, чим меншою є мінімально стійка частота обертання, тим кращими вважають маневрові властивості судна. На деяких сучасних мало обертових (МОД) ГД вона може досягати  $(0,16 \div 0,18)n_{\text{ном}}$  і, навіть,  $0,05n_{\text{ном}}$  [1]. Але робота ПУ при таких низьких значеннях пов'язана з негативними наслідками.

При характеристиці потужності на валу двигуна, під час експлуатації, слід показати залежність потужності від експлуатаційної швидкості, які наведено на рисунку 11.

Характеристика комплексу «корпус судна – ГД – гребний гвинт» наведена на рис.11, де позначені наступні режими:  $n_{\text{ном}} = 105$  об/хв – номінальна частота обертання ГД;  $n_p = 90$  об/хв – рекомендована частота обертання ГД;  $n_{\text{min}} = 30$  об/хв - мінімально допустима частота обертання ГД згідно з за вимогами правил Регістра. Робота ГД з рекомендованою частотою обертання  $n_p$  та потужністю, яка їй відповідає, є доцільною з точки зору збереження моторесурсу ГД [15]. Таким чином при мінімально допустимій частоті обертання  $n_{\text{min}} = 30$  об/хв стала швидкість судна на спокійній воді становить  $v = 7 \div 8$  вузлів

### Аналіз показників енергії в режимі РТН mode

Проаналізуємо режим, можливість якого є одним з принципово нових властивостей інтегрованих енергосистем - режим РТН.

Паспортні дані генераторів, включених до складу суднової силової установки, представлені в [16] і в таблиці 1. Значення потужності суднової силової установки в маневреному режимі наведено в таблиці 2. Номінальна потужність основного двигуна дорівнює  $GД = 68,640$  МВт.

Видно, що потужність головного двигуна в цьому режимі можна порівняти з потужністю дизель-генераторів суднової енергетичної системи. Таким чином, можна переключитися в режим РТН.

Порівняємо витрата палива основного двигуна і дизель-генераторів в діапазоні малої потужності  $0 \dots 15\%$  ГД.

Таблиця 1 – Паспортні данні генераторів

Генератор (кількість)	Тип	Потужність, кВА	Частота обертання, об./хв.	Напруга, В	Струм, А	Частота, Гц	$\cos \varphi$
ДГ (3)	«Siemens» 1DK4531-8BF05-Z	3600	1800	6600	315,3	60	0,7
ВГ/Д (1) момент інерції 3675 кг·м <sup>2</sup>	«Siemens» 65L3710-8LG42- 4AW0	3571	45-82	6600	328,5	60	0,7

Таблиця 2 – Значення потужності суднової електростанції в режимі маневрування

Параметри режиму	Режим: Маневрений
Сумарна активна потужність $P_1$ , кВт	5057,37
Коефіцієнт потужності $\cos\phi_{св.}$	0,82
Повна потужність $S$ ,кВА	6173,3

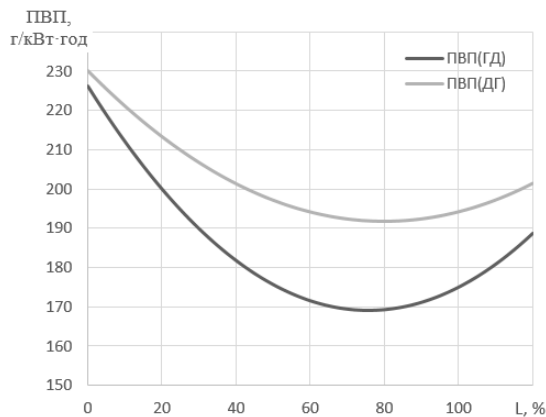


Рисунок 12 – Питомі витрати палива для ГД і ДГ

Розрахунки для номінального режиму показали, що потужність СМ становить майже 5МВт при приблизно 40 об/хв. Тобто для живлення ГЕД буде достатньою потужність двох ДГ, увімкнених на паралельну роботу.

Попередня оцінка ефективності використання РТН mode зроблена підрахунком питомих витрат палива (ПВП) за

добу на ГД порівняно з ПВП за добу на два ДГ, що працюють на ВГ/Д, якщо швидкість руху судна така, що потужність не перевищує 4000 - 5000 кВт.

Наведені на рис.12 ПВП можна апроксимувати поліномом другого ступеню (1) і (2) [17].

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

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

де: ПВП – питомі витрати палива, г/кВт·год;

$L$  – відносне навантаження дизеля, %.

Для підтвердження економічної доцільності модернізації і використання РТН mode виконаємо математичне моделювання електромеханічних перехідних процесів в системі «Суднова мережа - СД з векторним управлінням - Навантаження».

## Розробка математичної моделі системи

### «Суднова мережа - СД з векторним управлінням - Навантаження»

Ефективним способом дослідження роботи синхронної є комп'ютерне моделювання. В даній роботі буде використовуватися програмний пакет MATLAB, який включає в себе модуль Simulink, завдяки якому ми маємо можливість робити симуляцію роботи СМ, а також технічних систем і схем вимірювання.

При розробці моделі в якості базової використано модель AC8-Five-Phase PM Synchronos Motor Drive з бібліотеки Simscape Power Systems, яка складається з синхронного двигуна з постійними магнітами, який живиться від інвертора з високочастотною широтно-імпульсною модуляцією. У контурі управління швидкістю використовується ПІ-регулятор для створення еталонів магнітного потоку і крутного моменту для блоку векторного управління, який використовує п'ятифазний регулятор струму. 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, тому при використанні готової моделі нами було підібрано параметри для моделі п'ятифазного синхронного двигуна, які відрізняються з запропонованими програмою Matlab. Основні вихідні дані при розробці моделі високовольтної системи:

- розрахункові параметри схеми заміщення СМ:  $R=0,05$  Ом,  $L=1350 \cdot 10^{-6}$  Гн, момент інерції ротора  $3675$  кг·м<sup>2</sup>; число пар полюсів – 60 шт.;
- механічні характеристики відцентрового механізму: вентиляторне навантаження з  $M=1136,4$  кНм;
- номінальні параметри суднової мережі: номінальна напруга (6600 В) та частота (60 Гц);
- параметри шини постійного струму інвертора:  $C = 20000 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=4000$  Гц.
- блок захисту конденсатора від перенапруги (чоппер)  $U_{act} = 12500$ В,  $U_{shut} = 12000$  В;

– в параметрах регуляторів (ПІ-регулятор) обрано  $k_{rsp} = 25000$ ;  $k_{rsi} = 14 \cdot 10^6$ ;  $M_{max} = M_H$ ;  $M_{min} = -M_H \cdot 3$ .

Використавши наведені вище параметри, створимо модель СМ при роботі в якості ГЕД (рис.13).

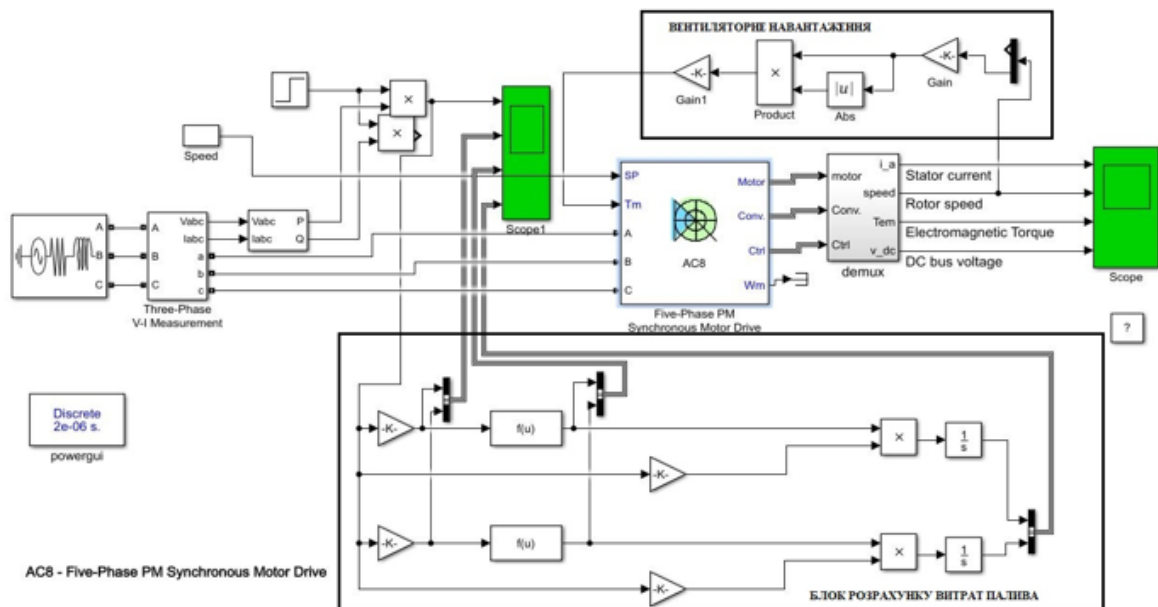


Рисунок 13 – Модель СМ при роботі в якості ГЕД

На рис.13 окремо виділені блоки вентиляторного навантаження та блок розрахунку витрат палива (ВП), за допомогою якого отримано графіки перехідних процесів зміни активної потужності ( $P = f(t)$ ) споживаної з мережі при пуску ( $t=0-0,5$  с), роботи під навантаженням ( $t=0,5-1$  с) та у режимі зупинки ( $t=1-1,5$  с) потужної СМ [18].

## Результати моделювання системи

### «Суднова мережа - СД з векторним управлінням - Навантаження»

Використання моделі системи «Суднова мережа - СД з векторним управлінням - Навантаження» дозволяє моделювати режими пуску, роботи під навантаженням, режим зупинки потужної синхронної машини («Siemens» 65L3710-8LG42-4AW0), отримувати та досліджувати перехідні процеси струму статора, швидкості обертання ротору та електромагнітний момент. Ці перехідні процеси можна спостерігати на рис.14.

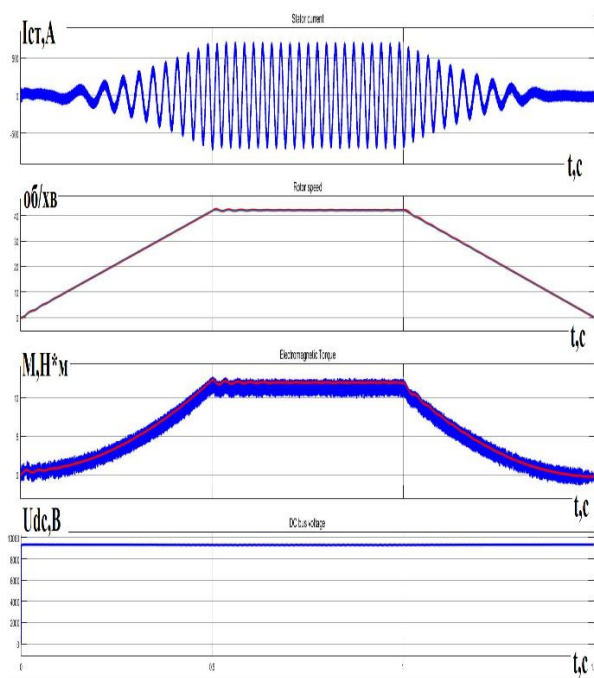


Рисунок 14 – Графіки перехідних процесів СМ з векторним управлінням

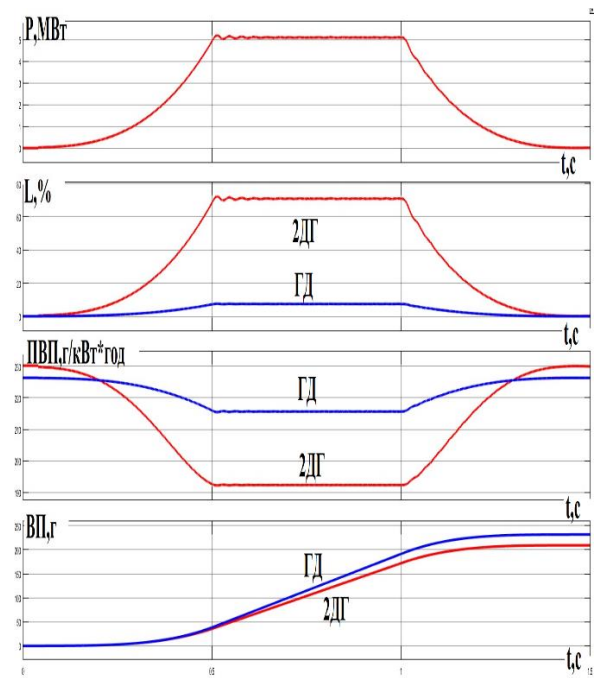


Рисунок 15 – Графіки перехідних процесів блоку розрахунку ВП

За допомогою проведеного дослідження встановлено, що при переміщенні судна на низькій швидкості необхідна потужність ГД зменшується до такого рівня, який може бути забезпечений ДГ суднової електроенергетичної системи. В таких випадках при модернізації ПУ гвинт може обертатися від СМ на осі гвинта, живлення якого в режимі двигуна забезпечується від паралельно працюючих ДГ через перетворювач частоти. З отриманих графіків (рис.15) можна побачити, що навантаження ( $L, \%$ ) в усталеному режимі на ДГ при переході на електроживлення складає  $L_{ДГ} = 70 \%$ ,  $L_{ГД} = 8,5 \%$ . Це суттєво зменшує витрати дизельного палива: витрати ГД:  $(191,2 - 38,4) \cdot 2 = 305,6$  г/с та витрати двох ДГ:  $(171,9 - 35,6) \cdot 2 = 272,6$  г/с г/с. Таким чином різниця в витраті палива складає  $305,6 - 272,6 = 33$  г/с, або 118 кг/год [18].

Додатково необхідно відмітити, що в аварійних ситуаціях головний двигун і синхронна машина з перетворювачем частоти можуть забезпечити живлення суднової електроенергетичної системи, що в цілому підвищує живучість та безпеку судна.

### Вибір перетворювача частоти для реалізації PTH mode

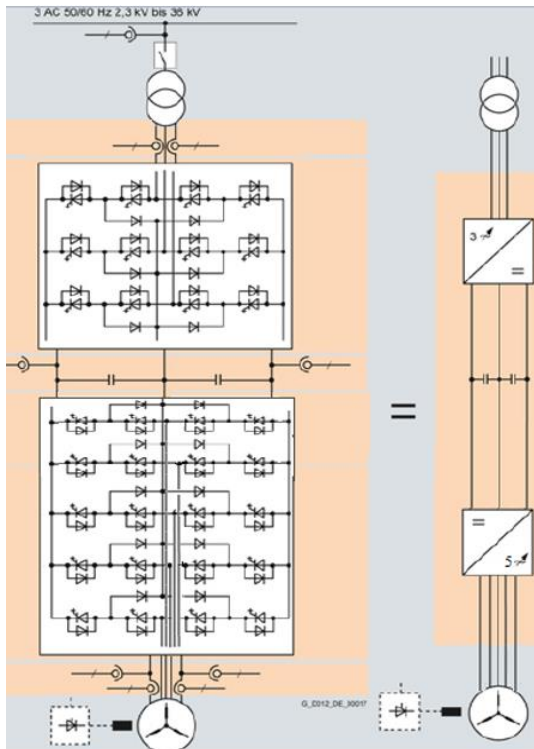
Для приведення в дію гребного гвинта використовують синхронний ВГ/Д, ротор якого встановлений в лінію гребного валу. Живлення ВГ/Д, тобто в цьому випадку, гребного електродвигуна (ГЕД), від суднових допоміжних ДГ може бути здійснено через двохнапрямковий судновий перетворювач частоти (ПЧ) Sinamics SL150 фірми SIEMENS морського виконання, з активним випрямлячем.

Sinamics SL150 це IGBT (IGCT) циклоконвертор (cycloconverter) для тихохідних синхронних й асинхронних двигунів з високим обертовим моментом і перевантаженням (табл.3). 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 [19].

Таблиця 3 – 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, %	$\geq 99$
Закони управління	U/f; векторне
Вихідна частота, Гц	0 - 30
Перевантажувальна спроможність	200 % (60 с); 250 % (20 с)
Обмін даними	Profibus DP

На рис.16 зображено блок-схема суднового ПЧ з активним випрямлячем.



На рисунку 16 – Блок-схема суднового ПЧ з активним випрямлячем

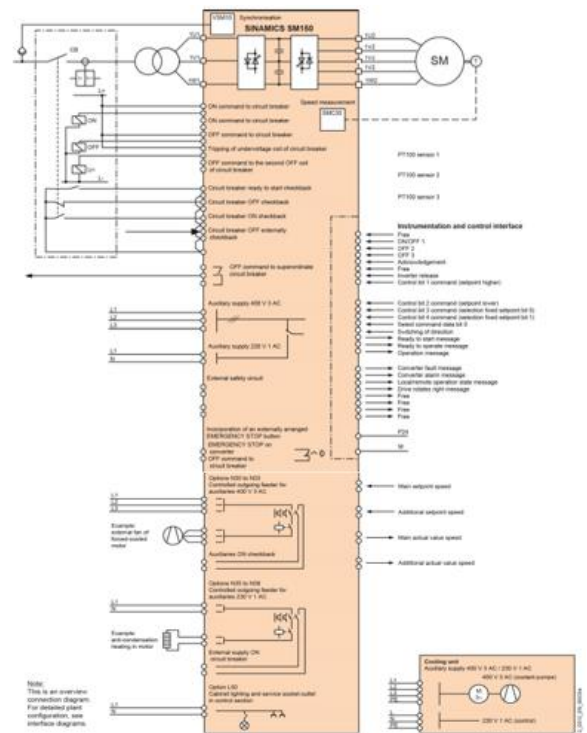
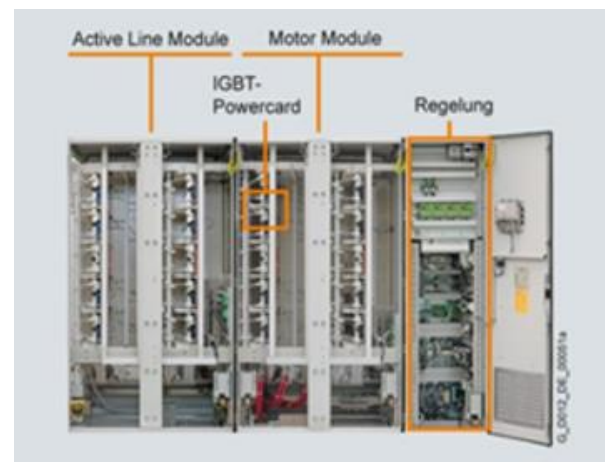


Рисунок 17 – Схема підключення перетворювача частоти



а)



б)

Рисунок 18 – Зовнішній вигляд (а) ПЧ SINAMICS SM150 у версії IGBT та внутрішній дизайн (б) системи водяного охолодження без охолоджуючого агрегату

На рис.17 наведено зовнішній вигляд, а на рис. 18 - схема підключення ПЧ SINAMICS SM150 у версії IGBT та показано внутрішній дизайн водяного охолодження, без охолоджуючого агрегату [19].

## ВИСНОВКИ

В роботі проаналізовано шляхи підвищення енергетичної ефективності, надійності та зниження впливу на навколишнє середовище суднових дизельних пропульсивних установок. Встановлено, що при переміщенні судна на низької швидкості часто необхідна потужність головного двигуна зменшується до такого рівня, який може бути забезпечений дизель-генераторами суднової електроенергетичної системи. В таких випадках при модернізації пропульсивної установки гвинт може обертатися від синхронного двигуна, живлення якого забезпечують дизель-генератори через перетворювач частоти з рекуператором. Це суттєво зменшує витрати дизельного палива.

Крім того, в аварійних ситуаціях головний двигун і синхронна машина з перетворювачем частоти можуть забезпечити живлення суднової електроенергетичної системи, що в цілому підвищує живучість і безпеку судна.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Marine Machinery & Engine 2013 Marine. [https://www.mhi-mme.com/cms\\_docs/products\\_en.pdf](https://www.mhi-mme.com/cms_docs/products_en.pdf) (in English).
2. Shaft generator drive for marine. ABB No 3AUA0000165329 REV A EN 3.7.2014 #17163. [www.abb.com/marine](http://www.abb.com/marine) (in English).
3. Innovative Power Transmission. Propeller Shaft Clutch (PSC). RENK Aktiengesellschaft. RENK. Eddition 08/2016. 12 p. <https://www.renk.eu> (in English).
4. Самонов С. Ф., Рак О. М., Глазева О. В. Підвищення ефективності та надійності комбінованих суднових пропульсивних установок // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. (віддано в видавництво 30.01.20)
5. Rene Prenc, Aleksandar Cuculić, Ivan Baumgartner, «Advantages of using a DC power system on board ship», Pomorski zbornik 52 (2016), pp. 83 – 97P. (in English).
6. R. E. Hebner, F. M. Uriarte, A. Kwasinski, A. L. Gattozzi, H. B. Estes, A. Anwar, P. Cairoli, R. A. Dougal, X. Feng, H.-M. Chou, L. J. Thomas, M. Pipattanasomporn, S. Rahman, F. Katiraei, M. Steurer, M. O. Faruque, M. A. Rios, G. A. Ramos, M. J. Mousavi, and T. J. McCoy, “Technical cross-fertilization between terrestrial microgrids and ship power systems”, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, pp. 161–179. (in English).
7. Shantha Gamini Jayasinghe, Lasantha Meegahapola, Nuwantha Fernando, Zheming Jinand Josep M. Guerrero, «Review of Ship Microgrids: System Architectures, Storage Technologies and Power Quality Aspects Inventions», 2017, 2, 4 pp. 1–19. <http://dx.doi.org/10.3390/inventions2010004> (in English).
8. 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 Electrif. Mag. 2016, 4, 45–57. <http://dx.doi.org/10.1109/MELE.2016.2544203> (in English).
9. О.В. Глазева, В.Б. Власов Применение высоковольтных преобразователей частоты как метод повышения индекса энергоэффективности на объектах морской индустрии / Матеріали науково-методичної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 05.12.2018 - 06.12.2018. – Одеса: НУ «ОМА», 2019. – С.70-78

**10.** С.Ф.Самонов, О.В. Глазева, В.Б. Власов Повышение энергоэффективности судов с электрическими пропульсивными установками. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2019)[Збірка матеріалів [XI Міжнародної науково-практичної конференції (28-30 травня 2019 року, м. Херсон, Україна)]. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2019. – С.406-410.

**11.** Hybrid Propulsion Flexibility and maximum efficiency optimally combined [www.mandieselturbo.com](http://www.mandieselturbo.com)  
[www.mandieselturbo.com](http://www.mandieselturbo.com)

**12.** Eddy Setyo Koenhardono<sup>1</sup>, Amiadji<sup>2</sup>, Rahmat Kristomi<sup>3</sup> The Study of the Application of Hybrid Propulsion System on OPV with Controllable Pitch Propellers In ternational Journal of Marine Engineering Innovation and Research, Vol. 1(4), Sept. 2017. 346-354

**13.** Propeller Shaft Clutch (PSC) w [www.renk.eu](http://www.renk.eu).[www.renk.eu](http://www.renk.eu)

**14.** Tunnel Gearboxes Power-Take-Off /Power-Take-Home Systems for Slow Speed Engines [www.renk.eu](http://www.renk.eu).

**15.** Судновий механік: Довідник / Авт. кол.: За ред.. А. А. Фока. Д-ра техн. наук, суднового старшого механіка. - У 3-х т. – Т.1. – Одеса: Фенікс. 2008 – С. 714 -715

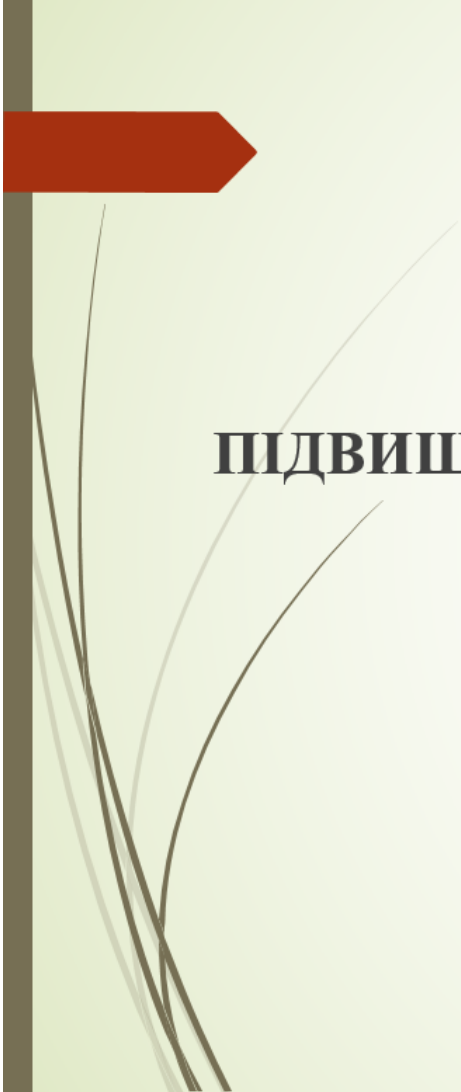
**16.** 'M' class container ship. Operating manual lindø newbuilding L. 216. m/s "MATHILDE MAERSK".

**17.** 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 6<sup>th</sup> Marineline Workshops "Ship Electric Grids" & "Power Management Systems".

**18.** Бушер, В.В. Аналіз пропульсивної установки контейнеровоза місткістю 16000 контейнерів при реалізації «PTH mode» [Текст] / В.В. Бушер, О.В. Глазева, В.Ю. Пісчанський, К. Хандакжи // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 05.11.2019 - 06.11.2019. – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С.225-231

**19.** SINAMICS SL150 Cyclo converters. Highest marks in robustness and reliability. <https://siemens.com/sinamics-sl150>

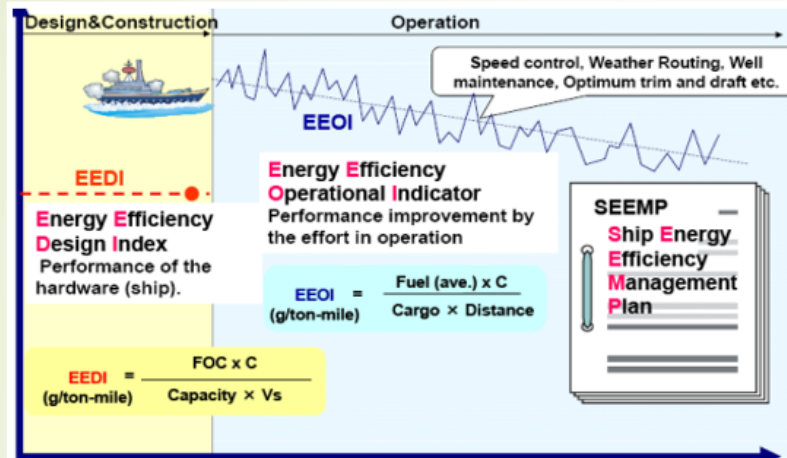
**ДОДАТКИ**



**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОПУЛЬСИВНОЇ  
УСТАНОВКИ КОНТЕЙНЕРОВОЗА  
МІСТКІСТЮ 16000 КОНТЕЙНЕРІВ**

## 2

# Питання енергоефективності



Відповідно до Резолюції ІМО МЕРС.203 (62) з 1 січня 2013 року введено поправки до Додатку VI Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню із суден МАРПОЛ і встановлені дві основні вимоги з управління енергоефективністю судна. Для кожного нового судна валовою місткістю 400 тон і більше, повинні бути визначені необхідний і досягнутий конструктивні коефіцієнти енергоефективності (EEDI).

На кожному новому або існуючому судні валовою місткістю 400 тон і більше, повинен бути і виконуватися Судновий план управління енергоефективністю судна (SEEMP).

## Методи підвищення енергоефективності згідно з Резолюцією МЕРС.213 (63)

1. Планування рейсу;
2. Погодне планування;
3. Тимчасове планування;
4. Оптимізація швидкості судна;
5. Оптимізація потужності, що розвивається головним двигуном;
6. Оптимальне керування судном;
7. Обслуговування корпусу;
8. Оптимізація роботи суднової енергетичної установки;
9. Обслуговування суднової енергетичної установки;
10. Утилізація теплоти;
11. Поліпшення управління судном;
12. Оптимізація вантажних операцій;
13. Управління електроенергією;
14. Використання альтернативних видів палива.

3

## Фактори зниження викидів CO<sub>2</sub> суднами



**Методи підвищення ефективності використання палива за рахунок впровадження електричного руху:**

- інтеграція систем накопичення енергії;
- впровадження розподілу постійного струму;
- оптимальне управління розподілом і використанням енергії;
- **вдосконалення методів експлуатації на існуючих судах** (енергетичний менеджмент).

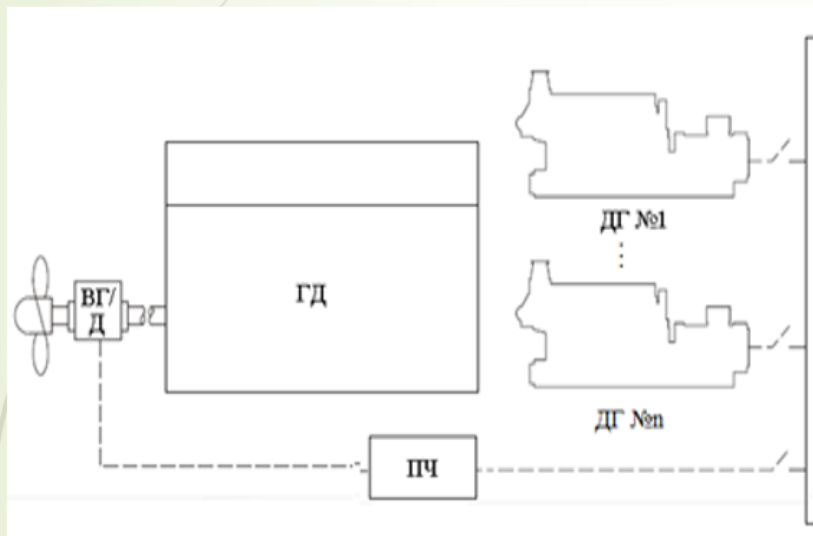
Фактори зниження викидів CO<sub>2</sub> суднами

Найменування факторів	Зниження викидів CO <sub>2</sub> , % на тонно/мілю
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

4

## Структурна схема суднової комбінованої ПУ контейнеровоза місткістю 16000 контейнерів «Gerda Maersk»

Структурна схема суднової комбінованої ПУ



Технічні характеристики ГД

Тип головного двигуна	DOOSAN-WÄRTSILÄ-SULZER RT-flex96C
Потужність, кВт	68640
Тип управління	Електронний
Номінальний момент, Нм	7603850
Частота обертання, об/хв.	105
Питомі витрати палива, г/кВт·год	185

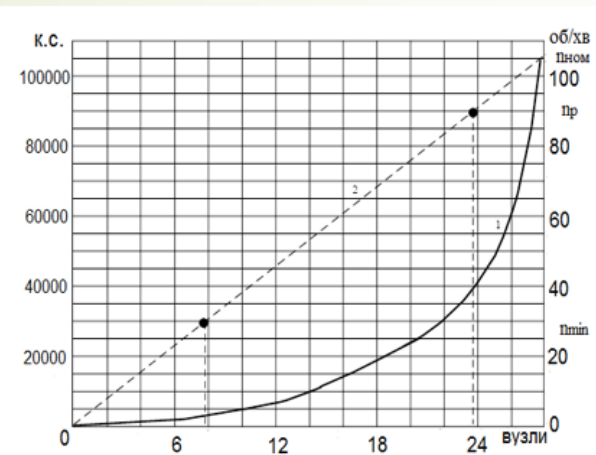
Паспортні данні генераторів

Генератор (кількість)	Тип	Потужність, кВт	Частота обертання, об./хв.	Напруга, В	Струм, А	Частота, Гц	cos φ
ДГ (3)	«Siemens» 1DK4531-8BF05-Z	3600	1800	6600	315,3	60	0,7
ВГ/Д (1)	«Siemens» 65L3710-8LG42-4AW0	3571	45-82	6600	328,5	60	0,7

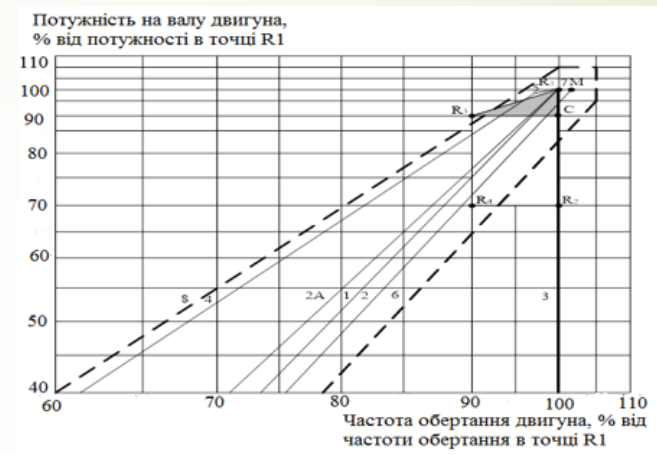
5

# Навантажувальні діаграми ДВЗ

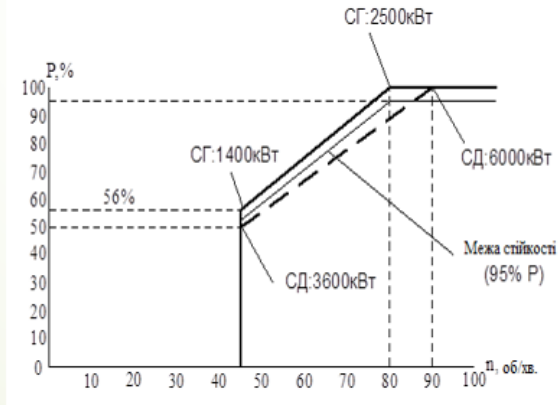
Характеристика комплексу «корпус судна – ГД – гребний гвинт» при повному завантаженні судна



Навантажувальна діаграма ГД

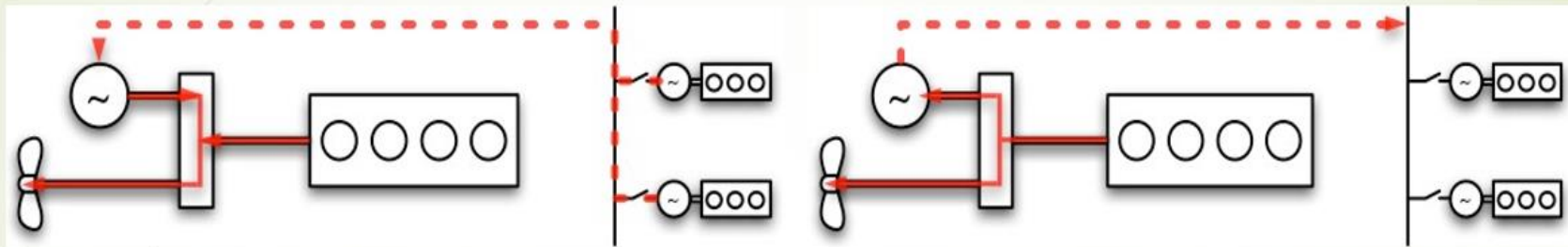


Навантажувальні діаграми ВГ/Д



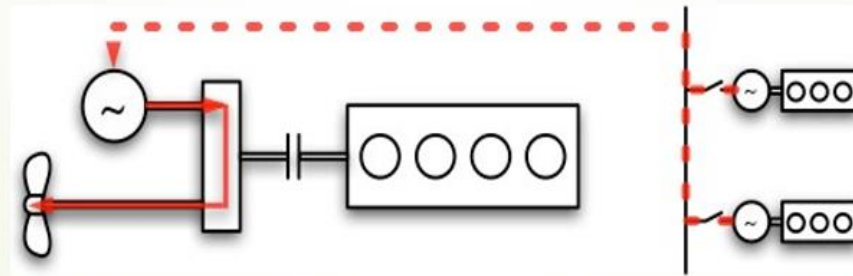
6

## Схемні рішення в сучасних суднових ПУ



**PTI booster(Power take in)**

**Generator mode(PTO-mode)  
Power take off**

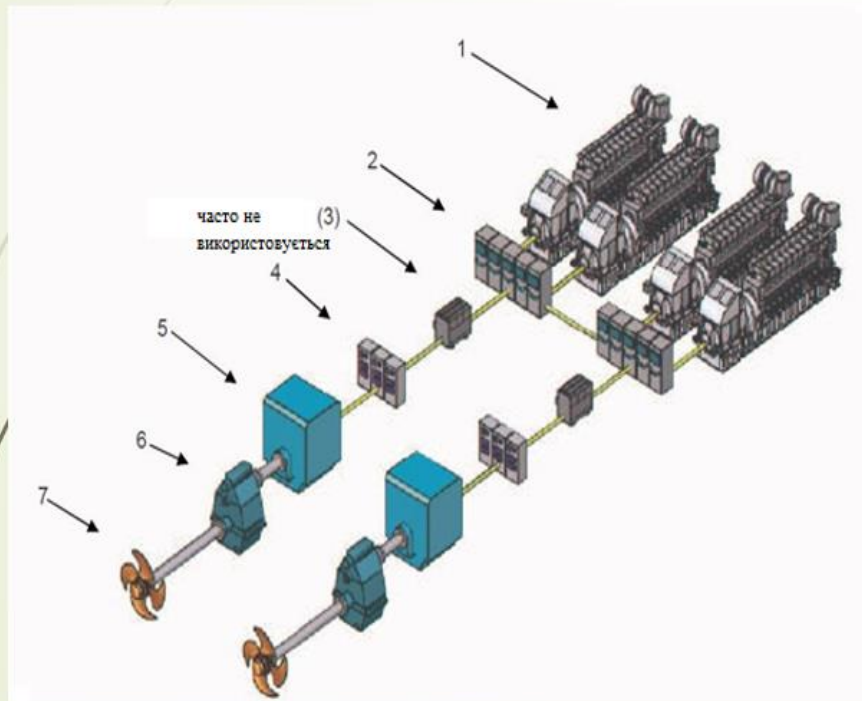


**PTH(Power take home) mode**

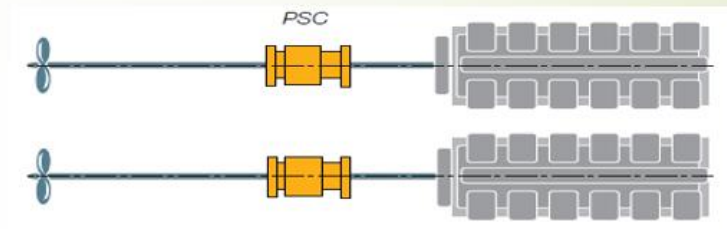
7

## Схемні реалізації режимів РТО та РТН

Компоненти енергетичної системи гребної електричної установки



Схемне використання Propeller Shaft Clutch в двовальній ПУ



Схемна реалізації РТН mode в одновальній ПУ



8

## Порівняння витрати палива для ГД і ДГ

Значення потужності суднової  
електростанції в режимі маневрування

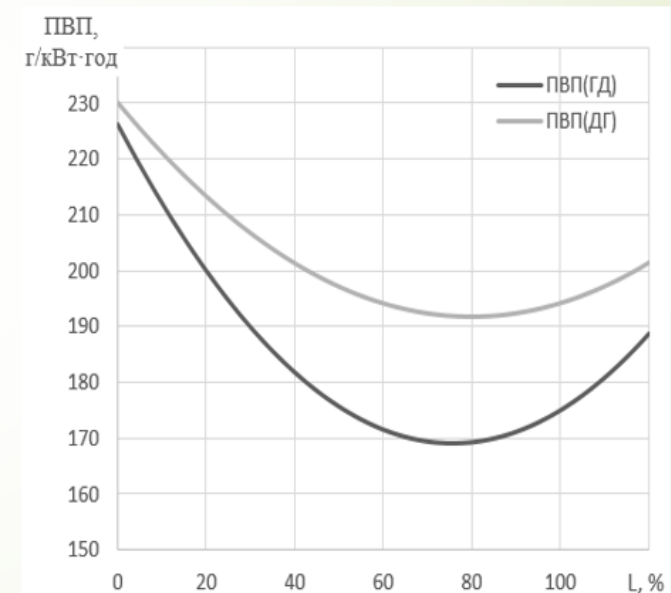
Параметри режиму	Режим: Маневрений
Сумарна активна потужність $P_1$ , кВт	5057,37
Коефіцієнт потужності $\cos\phi_{св}$	0,82
Повна потужність $S$ ,кВА	6173,3

$$ПВП_{ГД} = 0.01 \cdot L^2 - 1.513 \cdot L + 226.33$$

$$ПВП_{ДГ} = 0.006 \cdot L^2 - 0.9586 \cdot L + 230.16$$

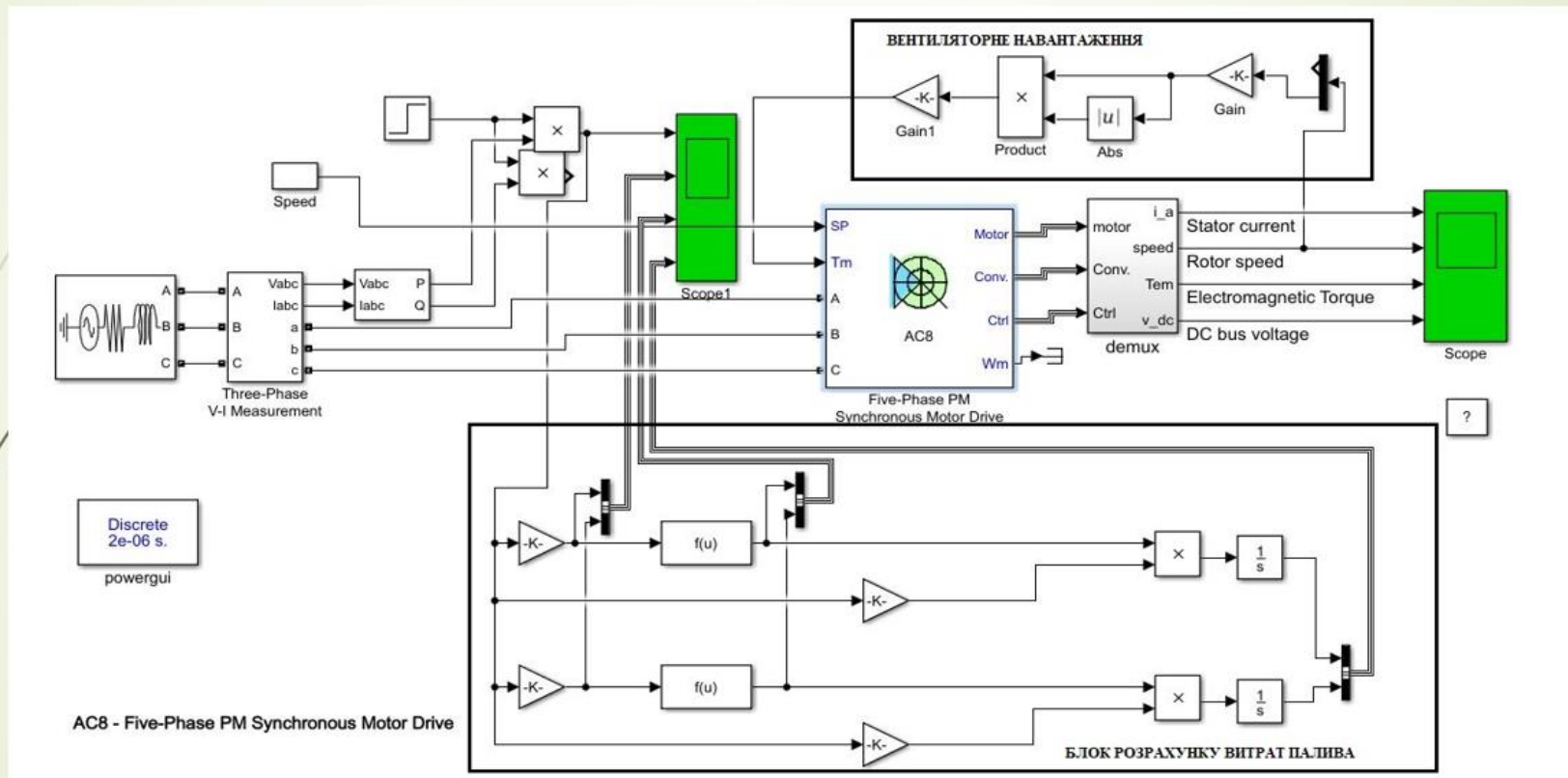
де: ПВП – питомі витрати палива, г/кВт·год;  
 $L$  – відносне навантаження дизеля, %.

Питомі витрати палива для ГД і ДГ



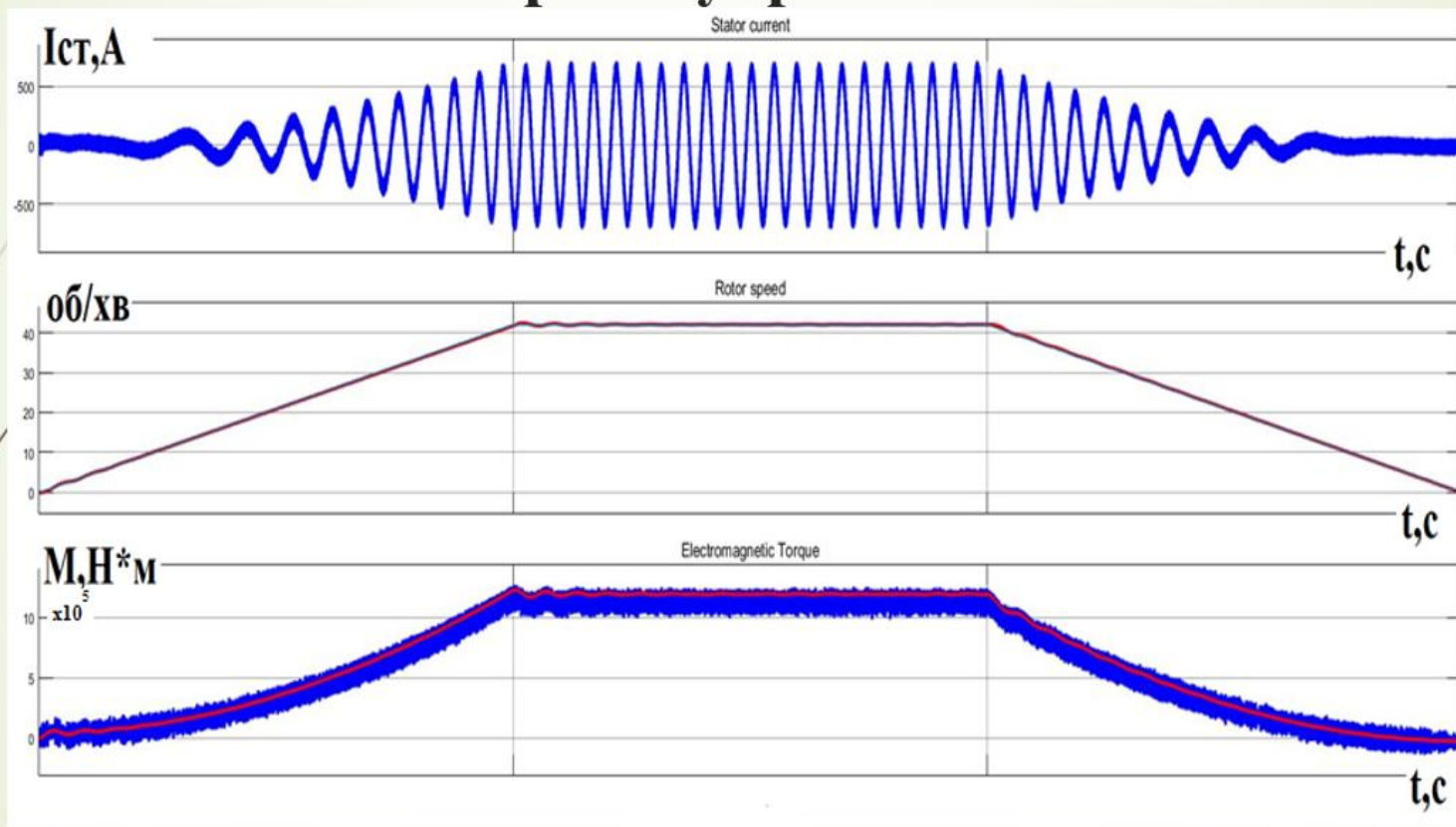
9

## Модель синхронної машини при роботі в якості ГЕД в пакеті MATLAB



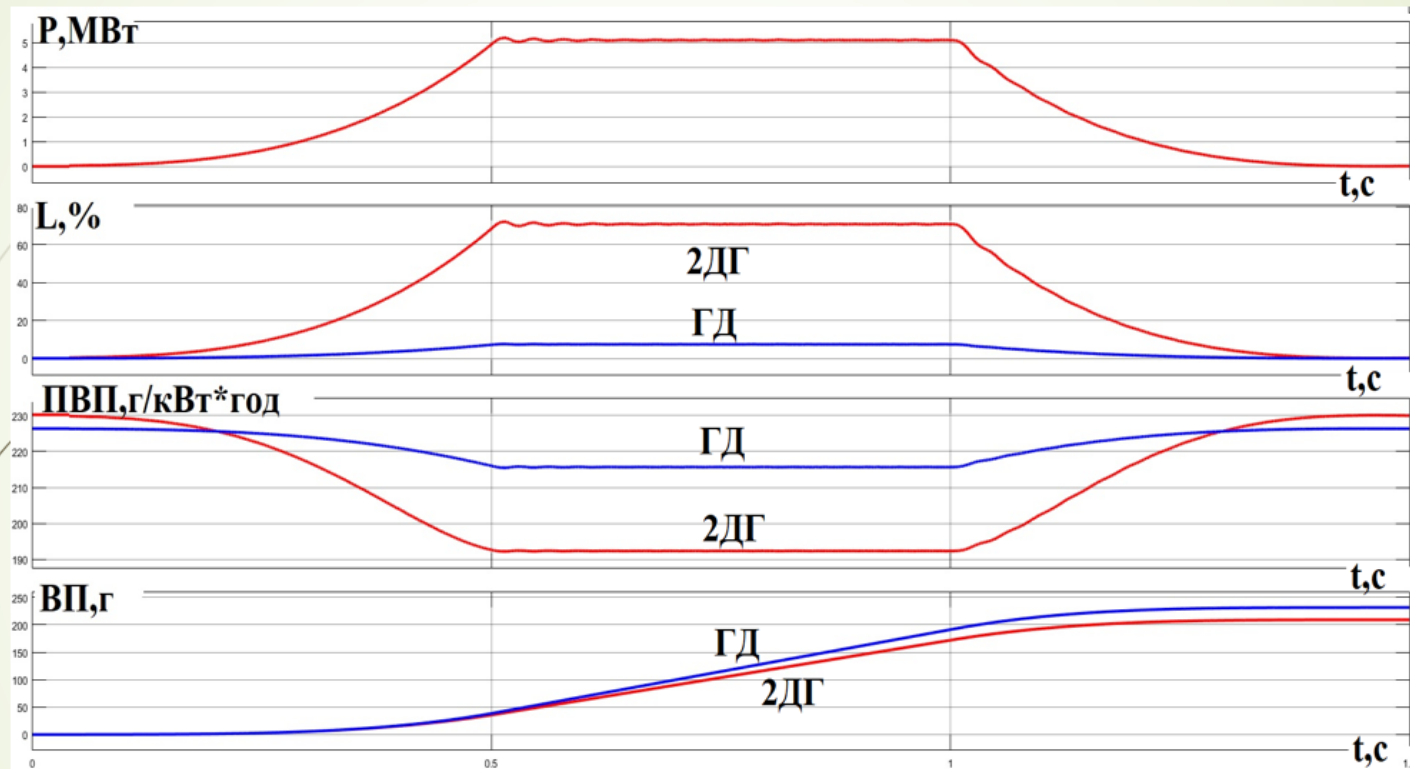
10

## Графіки перехідних процесів синхронної машини з векторним управлінням



## Графіки перехідних процесів блоку розрахунку ВП

11



За допомогою залежності  $VP = f(t)$  розрахуємо витрати ГД:  $(191,2 - 38,4) \cdot 2 = 305,6$  г/с та витрати двох ДГ:  $(171,9 - 35,6) \cdot 2 = 272,6$  г/с. Таким чином різниця в витраті палива складає  $305,6 - 272,6 = 33$  г/с, або 118 кг/год.

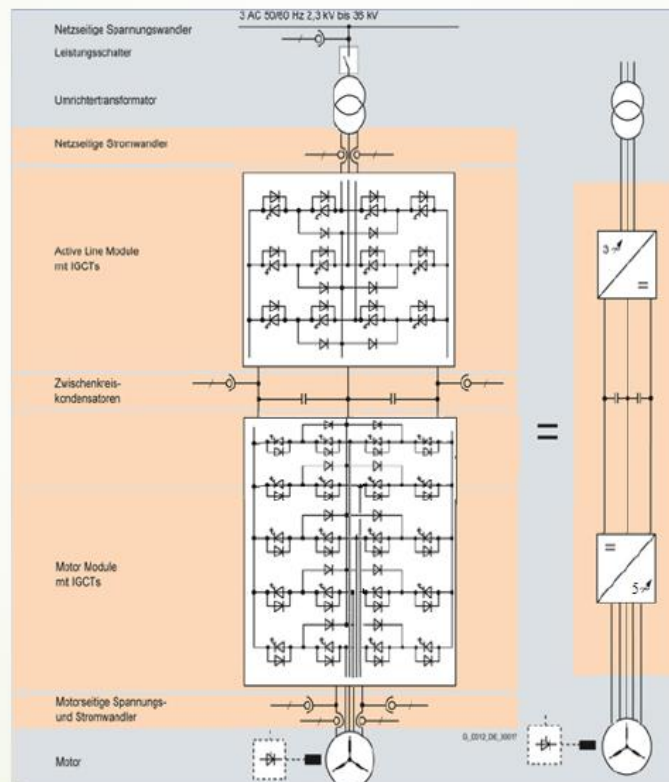
12

## Судновий перетворювач частоти «Sinamics» SL(SM) 150

### Технічні характеристики ПЧ

Потужність, МВА	7,6
Значення напруги живлення, В	6600
Частота мережі живлення, Гц	50/60
Струм, А	450
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

### Блок-схема перетворювача частоти



### Схема підключення ПЧ

