

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра суднових електроенергетичних систем

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

Обрубов А. В.



(підпис)

«15» грудня 2025 р.

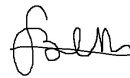
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему:

**„Дослідження перехідних і сталих процесів в системі
електропостачання дизельного криголама”**

Виконав: студент групи 6365м



Зінчук В.В.

(підпис)

Керівник роботи: ст. викладач



Чекунов В.К.

(підпис)

Миколаїв – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра суднових електроенергетичних систем

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма «Системи генерування електроенергії та електропостачання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

Новогрецький С. М.

(підпис)

«10» вересня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Студенту Зінчуку Віталію Вікторовичу

1. Тема роботи: « Дослідження перехідних і сталих процесів в системі електропостачання дизельного криголама »

Керівник роботи ст викладач Чекунов Володимир Костянтинович

Затверджені наказом ректора № 1217-уч. від «14» жовтня 2025 року

2. Термін подання роботи: до 15.12.2025 р.

3. Вихідні дані по роботі: Параметри суднових споживачів; геометричні розміри судна; швидкість ходу; режими роботи рушійних установок.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):

1. Аналіз систем електропостачання.

2. Розробка програми розрахунку потужності суднової електростанції.

3. Розробка програми розрахунку статичних і динамічних

характеристик головних машин рушійних установок.

4. Розробка математичної моделі для дослідження перехідних процесів.

5. Аналіз роботи системи з статичними перетворювачими.

6. Розгляд питань спеціальних частин проекту.

5. Перелік презентаційних матеріалів:

1. Ціль і задачі роботи.

2. Механічні характеристики рушія і гребного двигуна.

3. Структурні схеми ЄЕЕС змінного струму.

4. Розрахунок струмів короткого замикання: схема і результати.

5. Структурна схема ЄЕЕС дизельного криголама.

6. Результати розрахунку THD на шинах при різних напругах.

7. Модель гребної електричної установки в програмному модулі Simulink.

8. Осцилограми перехідного процесу.

6. Дата видачі завдання на кваліфікаційну роботу « 10 » січня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Актуальність і проблематика дослідження перехідних і сталих процесів у системах електропостачання суден.	січень 2025 р.	виконано
2	Дослідження сталих процесів у системах електричного руху у режимі керування.	травень 2025 р.	виконано
3	Дослідження роботи ГЕД зі статичним перетворювачем	жовтень 2025 р.	виконано
4	Моделювання перехідних процесів у системах електричного руху у режимі керування	листопад 2025 р.	виконано
5	Оформлення магістерської роботи.	грудень 2025 р.	виконано

Студент

(підпис)

Зінчук В.В.

(прізвище та ініціали)

Науковий керівник

(підпис)

Чекунов В.К.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО СУДНА, РУЩІЙНИХ УСТАНОВОК ТА СПОСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ І СТАЛИХ ПРОЦЕСІВ	15
1.1. Лінійний дизельний криголам	15
1.2. Призначення, склад і класифікація електричної рушійної установки	28
1.3. Механічні характеристики гребного гвинта	31
1.4. Структурні схеми ГЕУ змінного струму з ЄЕЕС	38
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК НЕОБХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРІВ ЄЕЕС І ГЕУ	45
2.1. Розрахунок величини необхідної електричної потужності	46
2.2. Розрахунок величини необхідної потужності головних дизель-генераторів (ГДГ)	47
2.3. Розрахунок необхідної потужності для споживачів мережі 380/220В	51
2.4. Розрахунок струмів короткого замикання	54
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РОБОТИ ЄЕЕС ЗІ СТАТИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ	62
3.1. Єдина електроенергетична система	63
3.2. Основні елементи єдиної ЄЕС	64
3.3. Еквівалентування параметрів основних компонентів ЄЕС	66
3.4. Моделювання основних режимів роботи ЄЕС	67

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХУ ЗМІННОГО СТРУМУ У РЕЖИМІ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ.....	72
4.1 Пуск ГЕД змінного струму	72
4.2. Реверс ГЕД змінного струму	75
4.3. Комп'ютерне моделювання процесу пуску ГЕД.....	80
4.4 Формування моделі гребної установки	84
4.5 Визначення параметрів моделі	88
4.6 Результати моделювання роботи установки	90
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	93
5.1. Вплив водного транспорту на довколишнє середовище	93
5.2. Методи ліквідації допущених забруднень	97
5.3. Заходи щодо зниження забруднення навколишнього середовища	99
ВИСНОВКИ.....	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	102

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена дослідженню перехідних і сталих процесів в системі електропостачання дизельного криголама із застосуванням програм розрахунку: кількості і потужності генераторів електростанції; струмів короткого замикання; розподілу потужності.

Окремим питанням розглядається аналіз впливу статичних перетворювачів на якість електричної енергії на судні.

У роботі зроблений розрахунок потужності і вибір кількості генераторів, вибір і перевірка автоматичних вимикачів, розрахунок струмів короткого замикання, розрахунок коефіцієнта загального гармонійного спотворення.

Програми були розроблені з використанням універсальної математичної системи MathCAD, електронних таблиць Excel з пакета Microsoft Office, MATLAB.

Графічна частина роботи виконувалася з використанням програми AutoCAD.

Розглянуті питання охорони навколишнього середовища.

ANNOTATION

The work is devoted to the study of transient and steady processes in the power supply system of a diesel icebreaker using calculation programs: the number and power of power plant generators; short-circuit currents; power distribution.

A separate issue is considered to be the analysis of the influence of static converters on the quality of electrical energy on the ship.

The work includes the calculation of power and selection of the number of generators, selection and testing of circuit breakers, calculation of short-circuit currents, calculation of the total harmonic distortion coefficient.

The programs were developed using the universal mathematical system MathCAD, Excel spreadsheets from the Microsoft Office package, MATLAB.

The graphic part of the work was performed using the AutoCAD program.

Environmental protection issues are considered.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АДГ	- аварійний дизель-генератор;
АПС	- аварійно-попереджувальна сигналізація;
АРЩ	- аварійний розподільний щит;
ВПП	- вертолітна посадкова площадка;
ГД	- головний двигун;
ГДГ	- головний дизель-генератор;
ГРП	- головний розподільний пристрій;
ГРЩ	- головний розподільний щит;
ГЕД	- гребний електродвигун;
ГЕУ	- гребна електрична установка;
ДП	- діаметральна площа;
ЄЕЕС	- єдина електроенергетична система;
ЛБ	- лівий борт;
МВ	- машинне відділення;
ПП	- пристрій, що підрулює;
РСУ	- Регістр судноплавства України;
СДГ	- стоянковий дизель-генератор;
ЦПУ	- центральний пост управління;
ЕУ	- енергетична установка.

ВСТУП

В роботі розглянуті дослідження перехідних і сталих процесів в системі електропостачання дизельного криголама. Оскільки сучасні судна вирізняються великою кількістю споживачів електроенергії до яких належать асинхронні, синхронні двигуни; прилади автоматики; перетворюючі пристрої (трансформатори, напівпровідникові перетворювачі); прилади освітлення та ін., то до СЕЕС пред'являють підвищені вимоги ніж до загальних електромереж.

Мета роботи – розрахувати основні параметри і дослідити СЕЕС судна, загальні дані якого наведені в наступних розділах, запропонувати методики розрахунків та проектування, аналізу системи у різних аспектах її майбутнього функціонування (економічний, екологічний, безпека праці та ін.). Окремим питанням розглядається аналіз впливу статичних перетворювачів на роботу суднового обладнання.

Об'єкт дослідження – перехідні і стали процеси в системі електропостачання дизельного криголама.

Основними задачами роботи є:

1. Вивчення методичної бази щодо основних розрахунків при проектуванні.
2. Розгляд етапів проектування, та можливих рішень.
3. Розрахунок потужності генераторних агрегатів.
4. Аналіз впливу статичних перетворювачів на роботу суднового обладнання.
5. Вибір схем захисту.

Теоретичною і методологічною основою для написання роботи є праці вітчизняних та іноземних вчених з питань судової електроенергетики. Також використовувались норми Регістра судноплавства України.

В нижчевикладених розділах розглянутий вибір основних навантажень СЕЕС, електрогенеруючих пристроїв, перевірка на виникнення коротких

замикань.

Судновою електроенергетичною системою (СЕЕС) називається сукупність електротехнічних пристроїв, об'єднаних процесом виробництва, перетворення і розподілу електроенергії, призначених для живлення суднових приймачів електроенергії. СЕЕС складається з джерел електроенергії, ліній електропередачі, електророзподільних щитів і перетворювачів електроенергії. Споживачі електроенергії до складу СЕЕС не входять. Проте вони мають істотний вплив на структуру та основні параметри СЕЕС. Тому в схемах СЕЕС приймачі електроенергії завжди указуються загальноприйнятими умовними позначеннями.

Сукупність ліній електропередачі з розподільними щитами називається електричною мережею.

Як джерела електроенергії на судах використовують генератори змінного струму, що мають привід від турбін або дизелів, а також акумуляторні батареї. Лінії електропередачі виконують за допомогою кабелів і шинопроводів. Електророзподільні щити є пристроями, призначеними для підключення ліній електропередачі. Як перетворювачі електричної енергії застосовують трансформатори, випрямлячі і ін.

Електророзподільний щит, до якого підключені основні джерела електроенергії і суднова силова електрична мережа, називається головним розподільним щитом (ГРЩ).

Електророзподільний щит, до якого підключено аварійне джерело електроенергії і аварійну мережу, називається аварійним розподільним щитом (АРЩ). Сукупність аварійного джерела електроенергії з аварійним розподільним щитом прийнято називати аварійною судновою електростанцією.

Основна електростанція (ОЕ) призначена для забезпечення судна електроенергією у всіх нормальних експлуатаційних режимах роботи.

Аварійна електростанція (АЕ) забезпечує судно електроенергією в аварійних режимах роботи (наприклад, при затопленні основної

електростанції).

Згідно вимогам Регістра РСУ, аварійна електростанція розміщується в приміщенні, що знаходиться поза зоною затоплення судна (на головній палубі або вище). Основна електростанція звичайно знаходиться в районі машинного відділення судна.

Аварійна електростанція розташована в окремому приміщенні в кормовій частині надбудови теплохода.

СЕЕС відрізняються великою різноманітністю. Структура СЕЕС тісно пов'язана з призначенням судна, його архітектурою, умовами експлуатації, видом силової (енергетичній) установки, потужністю приймачів електроенергії і т.д. За одною з ознакою СЕЕС ділять на автономні, з відбором (використанням) потужності від силової установки і єдині (об'єднані) з силовою установкою судна.

Автономна СЕЕС, що має одну основну ОЕ і одну аварійну АЕ електростанції, застосовується на більшості суден річкового, озерного і морського плавання. При цьому джерелами електроенергії є, як правило, дизель-генератори. Як аварійне джерело використовують тільки дизель-генератори або акумуляторні батареї (на невеликих судах). На судах значної водотоннажності встановлюють як аварійний дизель-генератор (іноді більш одного), так і акумуляторну батарею.

ГРЩ і АРЩ, згідно вимогам Регістра, з'єднуються лінією передачі електроенергії, яку прийнято називати перемичкою. Перемичка ПЕ призначена для передачі електроенергії в напрямі від ГРЩ і АРЩ. При зникненні напруги на шинах ГРЩ здійснюється автоматичний пуск аварійного дизель-генератора АДГ, відключення ПЕ від ГРЩ і підключення до нього АДГ.

Структурою кожної СЕЕС передбачений щит живлення з берега ЩЖБ, за допомогою якого здійснюється прийом на ГРЩ електроенергії від берегової електросистеми при стоянках судна в порту (іноді здійснюється передача електроенергії від СЕЕС на берегову електромережу).

Окремими лініями електропередачі безпосередньо до ГРЩ підключаються приймачі електроенергії, потужність яких порівнянна з потужністю генераторів, а також приймачі відповідального призначення. Решта приймачів підключається до ГРЩ через окремі розподільні щити РЩ.

К АРЩ аварійної електростанції підключаються приймачі електричної енергії, необхідні для забезпечення евакуації пасажирів, внутрішньому і зовнішньому зв'язку в аварійному режимі судна (затоплення відсіків, занурення, пожежа).

Автономна СЕЕС, що має дві основні і одну або дві аварійні електростанції, застосовується на крупних морських пасажирських, науково-дослідних і промислових судах, криголамах, суднах з атомною енергетичною установкою, суднах-катамаранах і ін. При цьому як основні джерела електроенергії частіше використовують турбогенератори, як аварійні – дизель-генератори і акумуляторні батареї.

ГРЩ основних електростанцій сполучають перемичками, по яких допускається передача електроенергії в обох напрямках. За наявності двох аварійних електростанцій кожна з них сполучена перемичкою з ГРЩ основної електростанції.

У СЕЕС з відбором потужності від силової установки джерелом електроенергії основної електростанції є один або декілька валогенераторів, тобто генераторів, привід яких здійснюється від гребного валу судна або від валу відбору потужності головного двигуна (ГД). Такі СЕЕС застосовуються в основному на судах, ходовий режим яких характеризується постійністю швидкості і значним часом руху, а також постійністю частоти обертання валогенераторів. До них відносяться деякі транспортні і промислові судна (особливо судна з рушіями типу гвинто-рулеві колонки).

СЕЕС з валогенераторами дають можливість зменшити витрату палива і масла для отримання електроенергії, а також підвищити календарний період витрати технічного ресурсу основних джерел електроенергії дизель-генераторів

і зменшити витрати на їх обслуговування. Це пояснюється тим, що питома витрата палива (кількість грамів палива на одну кіловат-годину енергії) у головних двигунів звичайно менше, ніж у дизель-генераторів. При роботі валогенераторів дизель-генератори знаходяться в стані спокою.

Привід ВГ звичайно здійснюється від ГД за допомогою жорсткої механічної передачі. У зв'язку з цим, при зниженні на 10-15% частот обертання ГД і відповідно частоти обертання (а також частоти струму і напруги) валогенератора, останній повинен відключатися з передачею навантаження на заздалегідь запущений і що підключається до ГРЩ дизель-генератор. При установці ГД в режим „стоп” ВГ перестає функціонувати як джерело електроенергії і його необхідно замінити дизель-генератором. З цієї причини валогенератори тільки умовно відносять до основних джерел електроенергії і розглядають як додаткові джерела СЕЕС.

Застосування валогенераторів у складі СЕЕС неефективно на судах з реверсивними головними двигуном.

Необхідно відзначити, що валогенератори завжди є на дизелях з пуском (в цьому випадку їх називають „навішені генератори”) від електростартеру, які призначені для зарядки акумуляторів стартерів (працюючи з ними паралельно). Ці генератори разом з акумуляторами використовуються на малих судах для живлення приладів контролю і сигналізації, а також освітлення невеликих приміщень, сигнально-відмітних вогнів і т.п.

СЕЕС з використанням енергії силової установки мають у складі джерел електроенергії турбогенератор, що працює в поєднанні з паровим котлом утилізації ПУК. Такі СЕЕС застосовують в основному на крупних транспортних судах (з ГД потужністю понад 10 000 кВт), що здійснюють тривалі ходові рейси з постійною швидкістю і номінальним навантаженням головного двигуна.

Відомо, що теплова енергія вихлопних газів ВГ дизелів складає близько 40 % енергії спалюваного в них палива. Дану енергію можна використовувати в

ПУК для отримання пари, яка поступає в турбогенератор, що виробляє електроенергію. Застосування такого комплексу істотно зменшує витрату палива на отримання електроенергії. Параметри електроенергії (частота струму, напруга) такого турбогенератора значно стабільніше за параметри електроенергії валогенератора.

При установці головного двигуна в режим „стоп” турбогенератор продовжує виробляти електроенергію протягом декількох хвилин, що спрощує процес перемикавання навантаження на дизель-генератори (основні джерела електроенергії). Подібний турбогенератор при деяких обмеженнях може тривало працювати паралельно з дизель-генераторами (валогенератори це не забезпечують). Проте унаслідок залежності від роботи головних двигунів такі турбогенератори (так само як і валогенератори) відносяться до додаткових джерел електроенергії. Недоліком комплексу паровий котел утилізації – турбогенератор в порівнянні з відповідним по потужності дизель-генератором є його велика вартість. При цьому на судні повинні бути спеціальні приміщення і устаткування, а також відповідні фахівці і ін.

Єдиною (об'єднаною з силовою установкою) СЕЕС називається система (або установка), що забезпечує отримання, перетворення і розподіл електроенергії по приймачах, до числа яких входять електроприводи суднових рушіїв. В цьому випадку має місце поєднання суднової гребної електричної установки ГЕУ і СЕЕС. При варіанті джерела електроенергії ПД-Г підключаються до щита гребної електричної установки ЩГЕУ. Живлення гребних електродвигунів проводиться від ЩГЕУ через перетворювачі електроенергії або без них. Живлення загальносуднових приймачів електроенергії здійснюється від ГРЩ, підключеного до ЩГЕУ через трансформатор або мотор-генератор, що залежить від якості електроенергії на шинах ЩГЕУ. Якість електроенергії характеризується в основному спотворенням синусоїдальної форми і нестабільністю значень напруги та частоти. При великих змінах воно вважається незадовільним, при невеликих –

задовільним. В даному випадку якість електроенергії, на шинах ЩГЕУ погіршується, головним чином, роботою перетворювачів. При задовільній якості електроенергії встановлюють трансформатор, при незадовільному – мотор-генератор.

Задовільна (якнайкраща) якість електроенергії на шинах ЩГЕУ характерна для випадку використання рушіїв з приводними синхронними двигунами, підключеними до ЩГЕУ без яких-небудь перетворювачів (швидкість ходу судна при цьому змінюється поворотом лопатей рушія). Незадовільна якість електроенергії неминуха при використанні рушіїв типу гвинт фіксованого кроку (ГФК) з приводними двигунами постійного струму і керованими перетворювачами, які випрямляють і змінюють напругу, що підводиться до двигунів, а також при використанні ГФК з приводними синхронними двигунами і керованими перетворювачами частоти електроенергії, що підводиться до двигунів. Для поліпшення якості електроенергії в таких випадках до шин ЩГЕУ підключають фільтро компенсуючий пристрій.

Застосування єдиних СЕЕС дає можливість зменшити кількість джерел електроенергії і підвищити ефективність експлуатації суден. Єдині СЕЕС застосовують на криголамах, поромах і самохідних суднах технічного флоту (плав кранах, земснарядах, плав майстернях і ін.).

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО СУДНА, РУЩІЙНИХ УСТАНОВОК ТА СПОСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ І СТАЛИХ ПРОЦЕСІВ

1.1. Лінійний дизельний криголам

1.1.1 Основні дані

Лінійний дизельний криголам (рис.1.1) призначений для:

- самостійного провідження суден;
- роботи як допоміжний криголам у складі складних караванів, а також самостійного провідження суден на мілководних ділянках й в устях рік;
- навантаження; транспортування й вивантаження вантажів (у тому числі на припай);
- надання допомоги суднам і виконання аварійно-рятувальних робіт у льодових умовах і на чистій воді;
- виконання експедиційних рейсів;
- забезпечення виконання підводно-технічних робіт з використанням устаткування й спеціальних комплексів, тимчасово встановлюваних на криголах;
- гасіння пожеж на суднах, бурових і нафтовидобувних платформах.

Судно проектується й будується на клас Регістра РСУ КМ ★.

Криголам із середнім гребним гвинтом і бортовими гвинто-рульовими колонками в кормі, з надлишковим надводним бортом, двома палубами й трьома платформами, подвійним дном і подвійними бортами, жилою надбудовою й вертолiтними площадками в носовому й кормовому кряях.

Район плавання – необмежений.

1.1.2 Основні характеристики судна

Головні розміри судна визначені з урахуванням вимог, обговорених у завданні й забезпеченням вимог по розміщенню членів експедиції, устаткування, вимог по забезпеченню остійності й аварійної остійності.

Довжина найбільша	142,8 м
Довжина ватерлінії при осаді 9,5	138,3 м
Довжина між перпендикулярами	132,8 м
Ширина найбільша	29,0 м
Ширина при осаді 9,5 м	28,5 м
Висота борта на міделі до верхньої палуби	15,5 м
Осадка найменша	8,5 м
Осадка по конструктивну ватерлінії	9,5 м
Осадка по вантажну марку	10, 2 м
Водотоннажність при осаді 9,5 м	22240 т

Автономність плавання по запасах палива і провізії становить 60 діб.

Автономність по запасах прісної води становить 12 діб (при 130 чол. на борті), при подальшому поповненні від опріснювальних установок.

Дальність плавання зі швидкістю 16,4 вузли становить 42 500 миль.

Досяжна швидкість судна при осаді 9,5 м на глибокій воді (не менш 6-ти осад судна), при хвилюванні моря 2 бали, вітру 3 бали й свіжо пофарбованому корпусі, при роботі двох ГРК на 100% потужності й середньому гвинті з обмеженням по обертах до 150 об/хв становить 18 вузлів.

Непотоплюваність судна забезпечена при затопленні будь-яких двох суміжних водонепроникних відсіків.

Криголам здатний просуватися безперервним ходом у суцільному крижаному полі товщиною до 2 метрів зі сніжним покривом товщиною 20 см - зі швидкістю 2 вузли.

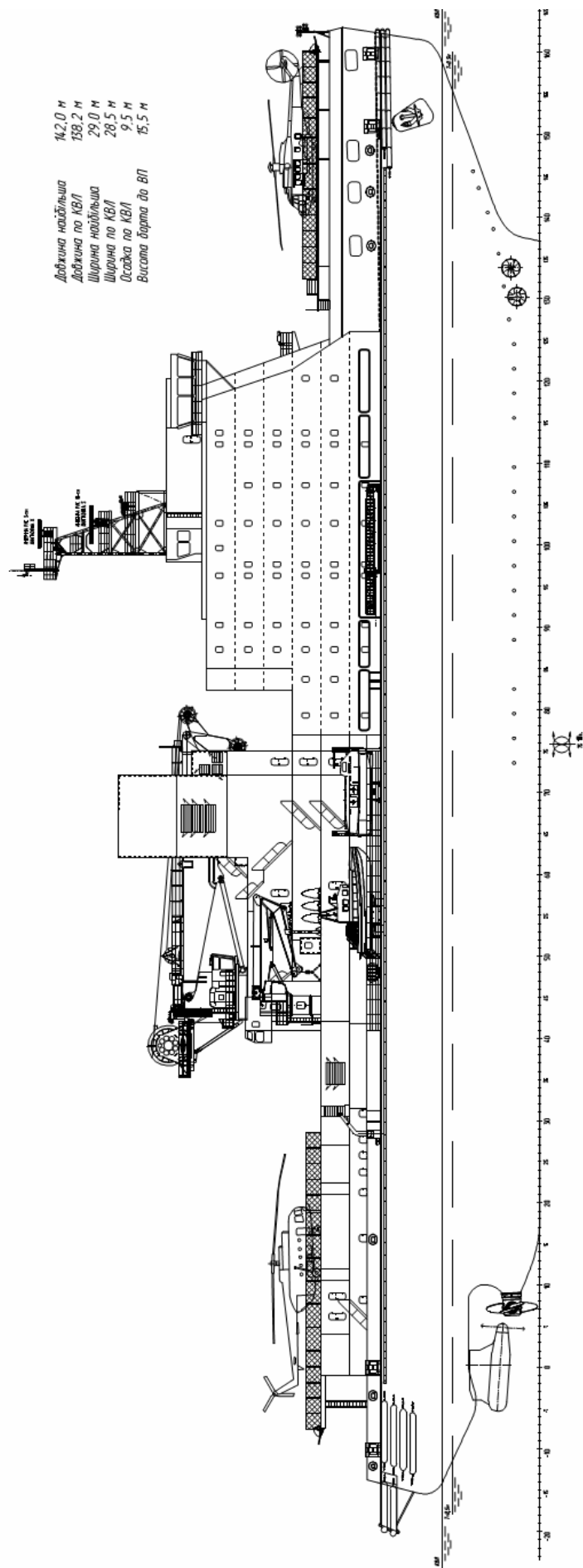


Рис.1.1. Лінійний дизельний криголам

1.1.3. Пропульсивна установка

Машинне відділення розташовується в середній частині судна й має платформи.

Устаткування розташоване з урахуванням забезпечення найбільш зручного доступу при роботі й обслуговуванні систем механізмів.

На судні треба встановити головні дизель-генератори Wartsila. Кожен дизель-генератор монтується пружно на судновий фундамент.

Тип	чотиритактний нереверсивний
Частота обертання	750 об/хв
Паливо	важке паливо
Кількість циліндрів	16
Діаметр циліндра	320 мм
Хід поршня	400 мм
Пуск	стисненим повітрям 3,0 МПа

Головний генератор для дизеля:

Тип	самозбудний, саморегулюючий, без щіткових контактів;
Коефіцієнт потужності	0,9;
Напруга	змінний струм 6300В - 3 фази - 50Гц;
Оберти	аналогічно з дизелем;
Захист	IP 44;
Охолодження	прісна вода, 38°C;
З'єднання з дизелем	фланцем приєднується безпосередньо до маховика дизеля;
Ізоляція	клас F;
Кількість підшипників	2;
Тип підшипників	з боку привода: упорний підшипник

	ковзання; з боку протилежного приводу: самоустановлювальний підшипник ковзання;
Змащення підшипників	самозмащування.

Стоянковий дизель-генератор

Дизель - чотиритактний, нереверсивний двигун із прямим вприскуванням і повітряним охолоджувачем.

Генератор

Тип	без щітковий синхронний з вбудованим автоматичним регулятором напруги;
Коефіцієнт потужності	0,8;
Напруга	400 В;
Рід струму	трифазний, змінний;
Частота	50 Гц;
Ізоляція	Н/В;
Захист	ІР 23;
Охолодження	Повітряне;
Кількість підшипників	2;
Тип підшипника	кульковий;
Змащення	самозмащування;
Обігрів	убудований однофазний обігрівач, 230 В;
З'єднання з дизелем:	ІМ1001.

Аварійний дизель-генератор

На судні повинен бути встановлений аварійний дизель-генератор з автономними системами, в окремому приміщенні, передбаченому спеціально

для АДГ. Треба передбачити електричний запуск від батареї при відмові головного джерела живлення. Додатково двигун має альтернативний пуск, незалежний від головного електричного пуску (гідравлічний пуск).

Генератор - самозбудний, саморегулюючий, без щіткових контактів.

Для маневрування використовуються два носових підрулюючих пристрої ZTT 6001 FP фіксованого кроку із приводом від електродвигунів з регульованою частотою обертання, оснащені вимикачами пуску-зупинки й пультами керування, установленими в кермовій рубці, які забезпечують виконання вимог по динамічному позиціюванню.

Характеристики пристроїв, що підрулюють:

Тип	Тунельний;
Тип гребного гвинта:	фіксованого кроку;
Електродвигуни:	асинхронний, з регульованою частотою обертання, вертикального типу, охолоджувані прісною водою;
Номінальна потужність:	1000 кВт;
Упор кожного ПП:	127 кН;
Частота обертання електродвигуна	$0 \dots 1250 \text{ хв}^{-1}$
Діаметр гвинта:	1750 мм;
Число лопат:	4;
Конструкція лопати:	Kaplan.

Електродвигун кожного пристрою, що підрулює, одержує живлення від шин ГРП напругою 6,3 кВт через трансформатор потужністю 1150 кВА, напругою 6300/725/725 В. Для регулювання частоти обертання електродвигуна пристрою, що підрулює, установлений частотний перетворювач потужністю 1370 кВА.

Електродвигун, трансформатор, частотний перетворювач охолоджуються прісною водою, що подається із суднової системи охолодження прісною водою допоміжних механізмів.

Характеристики встаткування (для двох пристроїв, що підрулюють):

Електродвигун пристрою, що підрулює:

Кількість	2;
Потужність	1000 кВт;
Напруга	690 В;
Частота обертання	0...1250 об/хв.;
Ступінь захисту	IP 44;
Клас ізоляції	F;
Кліматичне виконання за ДСТ 15150	ОМ;
Режим роботи	S2.

Трансформатор пристрою, що підрулює:

Кількість	2;
Напруга вхідна	6300 В;
Напруга вихідна	690 В;
Частота	50 Гц;
Потужність	2000 кВА;
Число фаз	3;
Ступінь захисту	IP 23;
Клас ізоляції	F.

Частотний перетворювач пристрою, що підрулює:

Кількість	2;
Імпульси	12-імпульсний;
Живлення	690 В, 50 Гц;
Ступінь захисту	IP 44.

1.1.4. Електрообладнання

Передбачається єдина електроенергетична система (ЄЕЕС) з дизель-генераторами для живлення гребних електродвигунів (ГЕД), електродвигунів пристроїв, що підрулюють, електродвигунів насосів системи стаціонарного пожежогасіння й загально суднових споживачів.

До складу ЕЕЭС входить наступне основне електрообладнання:

- головний розподільний пристрій (ГРП) 6,3 кВ;
- три гребних електричних двигуни: один центральний потужністю 10 МВт, два бортових (ГРК типу Azipod) потужністю 7,5 МВт кожен;
- сім сухих 12-ти пульсних трьох обмоткових трансформаторів потужністю: один 10500 кВА для живлення частотного перетворювача центрального ГЕД, чотири потужністю по 4320 кВА кожен для живлення частотних перетворювачів двох бортових ГРК типу Azipod і два по 1150 кВА для живлення частотних перетворювачів двох електродвигунів пристроїв, що підрулюють;
- п'ять напівпровідникових перетворювачів для живлення й керування гребними електродвигунами ГЕД і ГРК й електродвигунами пристроїв, що підрулюють;
- п'ять сухих трансформаторів обмоток збудження електродвигунів ГЕД і ГРК потужністю по 500 кВА кожен, напругою 6300/400 В, частотою 50 Гц, IP44, клас ізоляції F;

- два трансформатори відбору потужності 4375 кВА, напругою 6300/400 В, частотою 50 Гц, IP44, клас ізоляції F, для живлення суднових споживачів напругою 380 В;

- один трансформатор живлення Електрообладнання вантажного крана потужністю 3125 кВА, напругою 6300/400 В, частотою 50 Гц, IP44, клас ізоляції F;

- головний розподільний щит 400/230 В;

- допоміжне джерело електроенергії складається із стоянкових дизель-генераторів напругою 400 В, частотою струму 50 Гц, з коефіцієнтом потужності 0,8 для живлення суднових споживачів під час стоянки судна або при виході з ладу основного джерела електроенергії;

- аварійний розподільний щит 400/230В;

- аварійний дизель-генератор напругою 400 В, частотою струму 50 Гц.

Джерела електроенергії

Як основне джерело електроенергії в складі ЕЗЭС використовуються синхронні трифазні генератори 6,3 кВ, 50 Гц.

В схемі ЕЗЭС передбачається паралельна робота всіх головних генераторів на загальні збірні шини ГРП, розділені на два секційні вимикача.

У режимах нормальної експлуатації, з урахуванням втрат у напівпровідникових перетворювачах і трансформаторах, гребні електродвигуни споживають від головних генераторів активну потужність близько 32,4 МВт.

Стоянкові дизелі-генератори напругою 400 В, частотою струму 50 Гц, коефіцієнтом потужності 0,8 забезпечують живлення всіх суднових споживачів під час стоянки судна на рейді або при аварійному стані основного джерела електроенергії.

Один зі стоянкових дизель-генераторів перебуває в «гарячому» резерві й автоматично запускається й приймає навантаження за час не більше 30 секунд при зникненні напруги на шинах ГРЩ.

Для прийняття навантаження під час стоянки судна, схемою ГРЩ передбачена короткочасна (на час перекладу навантаження) паралельна робота стоянкового дизель-генератора із трансформатором відбору потужності.

При стоянці судна в доці живлення споживачів електричної енергії здійснюється від джерела берегового живлення з навантаженням не більше 800А.

Аварійний дизель-генератор напругою 400 В, частотою струму 50 Гц. Для розподілу електроенергії по споживачах відповідно до вимог правил РСУ, а також живлення ІСУ ТС, мережі аварійного освітлення й споживачів, необхідних для запуску стоянкових дизель-генераторів.

Включення живлення споживачів від акумуляторних батарей виконується автоматично при зникненні напруги в мережі живлення.

Гребні електродвигуни

Для привода гребних гвинтів на криголамі застосовані три трифазних синхронних гребних електродвигуни, один із яких - центральний, розташовується в корпусі судна, і два бортових ГРК типу Azipod.

Кожен гребний електродвигун (центральний і бортові ГРК типу «Azipod»), має дві незалежні, статорні обмотки, що живляться через окремий канал напівпровідникового перетворювача, від різних секцій ГРП.

Двох обмоткова конструкція ГЕД має кращі масо габаритні характеристики, чим здвоєні двигуни, а застосування сучасних ізоляційних матеріалів роблять її надійною в експлуатації.

Кожен ГЕД має свої незалежні системи охолодження та змащення. Для стояночного обігріву в ГЕД вбудовуються електричні обігрівачі.

Основне керування частотою обертання кожного ГЕД і його реверсування забезпечуються:

1. З місцевих постів керування в приміщенні ГРК (для ГЕД типу «Azipod») і в приміщенні ГЕД (для центрального ГЕД);
2. Зі ЦПУ;

3. З пультів керування судном у кермовій рубці (носовий, кормовий і бортовий пульти керування на крилах кермової рубки).

Керування розворотом ГРК забезпечується:

1. З місцевого поста керування в приміщенні ГРК;
2. З пультів керування судном у кермовій рубці (носовий, кормовий і бортовий пульти керування на крилах кермової рубки).

Передбачається резервне керування частотою обертання кожного ГЕД і керування, що не стежить, розворотом ГРК із пультів судноводіння кермової рубки. Перемикання на резервне керування передбачається з носового пульта судноводіння кермової рубки.

Центральний гребний електродвигун:

Кількість	1;
Номінальна потужність	10000 кВт;
Номінальна напруга	2955 В;
Номінальний струм	2047 А;
Частота обертання	115 об/хв;
Вага	124 т;
Ступінь захисту	IP44;
Напрямок обертання	реверсивний.

Гребний електродвигун ГРК типу Azipod:

Кількість	2;
Номінальна потужність	7500 кВт;
Номінальна напруга	3050 В;
Номінальний струм	2884 А;
Частота обертання:	177 об/хв;
Вага (модуль із гвинтом)	134 т;
Ступінь захисту	IP44;
Напрямок обертання	реверсивний.

Для забезпечення плавного регулювання частоти обертання у всьому діапазоні частот для кожного ГЕД передбачається:

- один перетворювач частоти для центрального гребного електродвигуна та два перетворювачі частоти для гребного електродвигуна ГРК Azipod (по одному на кожен ГРК) з наступними основними параметрами:

- номінальна потужність - 14 МВА;
- номінальна вихідна напруга - 3050 В;
- ступінь захисту - IP23.

Перетворювачі частоти - широтно-імпульсні, з ланкою постійного струму на основі високовольтних IGBT тиристорів, 24 - пульсні.

Охолодження ПЧ - водяне (прісною водою) від автономної системи, убудованої в одну із секцій ПЧ.

Кожен перетворювач має два канали, що живлять свою статорну обмотку ГЕД.

Кожен канал перетворювача ГРК Azipod, одержує живлення від окремого силового трансформатора. Для центрального ГЕД передбачений один канал перетворювача, що отримує живлення від одного силового трансформатора.

Для підключення перетворювачів частоти до ГРП на судні передбачено 5 силових трьох обмоткових трансформаторів (по два на кожен ПЧ ГРК Azipod й один на ПЧ ГЕД).

Основні параметри трансформаторів:

- номінальна потужність для ГРК Azipod - 4320 кВА, для центрального ГЕД - 11500 кВА;
- первинна напруга - 6,3 кВ;
- вторинна напруга - 1680 В;
- частота - 50Гц;
- клас ізоляції - F;
- ступінь захисту - IP44.

Головний розподільний пристрій.

Для розподілу електроенергії 6,3 кВ, набору схеми головного струму СЕР, підключення трансформаторів, включення або вимикання електродвигунів пристроїв, що підрулюють, пожежних насосів стаціонарної системи пожежогасіння, трансформаторів відбору потужності, на криголамах передбачається головний розподільний пристрій (ГРП), що одержує живлення від головних генераторів у режимах нормальної експлуатації.

Система розподілу електроенергії мережі 6,3 кВ - фідерна, трифазна, трьох провідна, нейтраль генераторів з'єднана з корпусом судна через резистор.

ГРП складається з секцій, розділених між собою перегородками. До складу ГРП входять:

- чотири генераторних секцій;
- шість секцій живлення трансформаторів ГЕД;
- чотири секції живлення пристроїв, що підрулюють;
- три секції живлення насосів стаціонарної системи пожежогасіння;
- дві секції живлення трансформаторів відбору потужності;
- одна секція живлення насоса системи водяних завіс;
- дві секції шинного роз'єднувача;
- одна секція живлення електродвигуна пристрою проти обмерзання.

Номінальний струм шин ГРП - 2 кА.

В секціях ГРП встановлюються вимикачі навантаження, що мають викатну конструкцію, з фіксацією у висунутому положенні.

Схемою головного розподільного пристрою передбачається:

- тривала одиночна й паралельна робота головних дизель-генераторів у будь-якому сполученні;
- автоматична синхронізація ГДГ;
- секціонування шин ГРП з метою підвищення надійності;
- розподіл електроенергії напругою 6,3 кВ.

Якість електроенергії в ЕЕЭС у всіх режимах роботи ГЭУ забезпечується відповідно до вимог Правил РСУ.

Автоматичне керування ГДГ, контроль завантаження ГДГ, споживання потужності від шин ГРП, блокування пуску потужних споживачів при недостатньому запасі потужності здійснюється засобами ІСУ ТС.

Керування вимикачами місцеве або дистанційне зі ЦПУ.

Ступінь захисту оболонки ГРП - ІР 42.

У кожен осередок вбудована апаратура керування, контролю, сигналізації й діагностування, побудована на сучасній мікропроцесорній елементній базі.

Для забезпечення безперебійного живлення вищевказаної апаратури у приміщенні ГРП встановлюється агрегат безперебійного живлення з вбудованими акумуляторами.

1.2. Призначення, склад і класифікація електричної рушійної установки

Основним призначенням електричної рушійної установки є перетворення електричної енергії в механічну з метою забезпечення руху судна. Для перетворення електричної енергії в механічну в складі рушійної установки застосовуються гребні електродвигуни (ГЕД). Для перетворення механічної енергії в упор використовуються судові рушії.

Гребна електрична установка (ГЕУ) в порівнянні з головними тепловими двигунами (дизель, турбіна) має наступні переваги:

- високою перевантажувальною здатністю по моменту;
- гарними регульовальними властивостями, у тому числі забезпечується реверс і регулювання частоти обертання ГЕД у широкому діапазоні;
- високим ККД при роботі на часткових навантаженнях;
- гарними віброшумовими характеристиками й т.д.

До складу ГЕУ входить різне по призначенню, принципу дії й конструкції електротехнічне встаткування, у тому числі: гребний рушій, ГЕД,

щит електричного руху (ЩЕР), перетворювачі електроенергії, джерела електроенергії, система керування.

Призначенням ГЕД є перетворення електричної енергії в механічну з метою привода в рух гребного рушія. У якості ГЕД можуть застосовуватися електродвигуни постійного або змінного струму, у тому числі асинхронні й синхронні.

Як рушії найбільше застосування знаходять гребні гвинти і гвинторульові колонки (ГРК).

Найбільше застосування в складі ГЕУ знайшли гвинти фіксованого кроку (ГФК). Швидкість судна залежить від частоти обертання ГФК. При використанні даних гребних гвинтів у складі ГЕУ швидкість судна змінюється шляхом регулювання частоти обертання гвинта, а гальмування й реверс здійснюють за рахунок зміни напрямку обертання гвинта.

На деяких судах як рушій застосовуються гвинти регульованого кроку (ГРК). У випадку застосування ГРК швидкість судна може мінятися шляхом розвороту лопат, при цьому міняється крокове відношення гвинта.

При використанні ГРК швидкість судна регулюють шляхом зміни крокового відношення гвинта, а реверс виконується за рахунок розвороту лопат. У деяких випадках застосовують спільне керування кроком і частотою обертання ГРК.

Основна перевага ГРК – можливість застосування нереверсивного ГЕД, оскільки зміна напрямку й величини тяги виконується перекладкою лопат. При цьому величина тяги може варіюватися від нуля до максимального значення зміною кроку гребного гвинта при сталості частоти обертання. У зв'язку зі складною конструкцією й відносно низьким ККД ГРК знаходить обмежене застосування на сучасних судах у складі ГЕУ.

На судах, де потрібні високі маневрені показники, застосовуються гвинторульові колонки (ГРК). На судах із ГРК швидкість судна змінюється зміною частоти обертання гвинта, а реверс здійснюється шляхом розвороту

ГРК. ГРК можуть створювати упор у будь-якому напрямку щодо діаметральної площини судна. Для гальмування судна варто зменшувати частоту обертання ГЕД або розвертати ГРК. Тому що реверс судна здійснюється шляхом розвороту колонок, не потрібно змінювати напрямок обертання ГЕД.

ГРК можуть бути механічні (ГЕД розташований у корпусі судна) або електричні (ГЕД розташований у гондолі поза корпусом судна).

Основним призначенням системи керування (СУ) ГЕУ є керування величиною й напрямком упору рушія, що може бути реалізоване шляхом зміни частоти обертання й напрямку ГФК, зміною крокового відношення ГРК або розворотом ГРК.

Для регулювання обертаючого моменту й частоти обертання ГЕД застосовуються силові напівпровідникові перетворювачі (НП). Основним призначенням НП є перетворення параметрів електроенергії: роду струму, величини напруги й частоти з метою регулювання електромагнітного моменту й частоти обертання ГЕД.

Джерелами електроенергії в ГЕУ є генераторні агрегати (ГА). ГА складаються з генераторів і приводних теплових двигунів. Як генератори найбільше поширення одержали синхронні генератори з електромагнітним збудженням. Як теплові двигуни застосовують дизель, парову або газову турбіну.

На невеликих суднах можуть застосовуватися статичні джерела електроенергії - акумуляторні або конденсаторні батареї, сонячні батареї.

Для перетворення величини напруги й живлення НП у ГЕУ застосовуються силові трансформатори напруги. Силові трансформатори, крім функції узгодження параметрів напруги, забезпечують фільтрацію вищих гармонійних складових напруги. Часто трансформатори в ГЕУ виконують трьох обмотувальними із двома вторинними обмотками, зрушеними на 30 ел. град., що дозволяє зменшити негативний вплив НП на суднову мережу й

компенсувати в судновій мережі вищі гармоніки напруги.

Найбільше поширення одержала класифікація ГЕУ по роду струму. По роду струму ГЕУ можна класифікувати на установки постійного, змінного й подвійного роду струму.

У ГЕУ постійного струму в якості ГЕД застосовують електричні машини постійного струму, що одержують живлення від генератора постійного струму або статичного джерела постійного струму.

У ГЕУ подвійного роду струму джерело електроенергії виробляє електроенергію змінного струму, а ГЕД постійного струму одержує живлення через напівпровідниковий випрямляч або інвертор.

У ГЕУ змінного струму джерело електроенергії змінного струму за допомогою НП живить ГЕД змінного струму. Єдиними електроенергетичними системами (ЄЕЕС) називають системи, у яких електроенергія від джерел надходить як на загальні суднові потреби, так і для живлення ГЕУ.

Електроенергію в ЄЕЕС виробляють головні генераторні агрегати (ГА). Достоїнствами ЄЕЕС є:

- зменшення кількості й сумарної потужності ГА й розподільних пристроїв;
- можливість оптимізації режимів експлуатації приводних двигунів (ПД) ГА;
- зниження витрати пально-мастильних матеріалів і підвищення ККД установки;
- підвищення надійності ЄЕЕС і безпеки мореплавання в цілому;
- можливість планування техобслуговування й ремонту ГА шляхом почергового виводу їх з експлуатації й ін.

1.3 Механічні характеристики гребного гвинта

Механічною характеристикою гребного гвинта називають зміни моменту

опору гребного гвинта від частоти обертання. Характеристики одержують експериментальним або розрахунковим шляхом для кожного конкретного гребного гвинта.

На судні характеристики гребного гвинта не є постійними, вони міняються залежно від осідання й умов плавання в діапазоні від характеристики ходу у вільній воді при водотоннажності в порожньому стані до льодової характеристики.

Механічні гвинтові характеристики ГФК представлені на рис. 1.2.

Реверсивна характеристика гвинта – це залежність моменту опору від частоти обертання гребного гвинта при зміні напрямку його обертання на протилежне. Розрахункова реверсивна характеристика будується при незмінній швидкості руху судна, оскільки час реверса гребного гвинта на порядок менше часу реверса судна.

Розгін ГЕД здійснюється по швартовній характеристиці при нерухомому судні. При розгоні ГЕД судно починає рух. Розгін судна здійснюється значно повільніше, ніж розгін ГЕД.

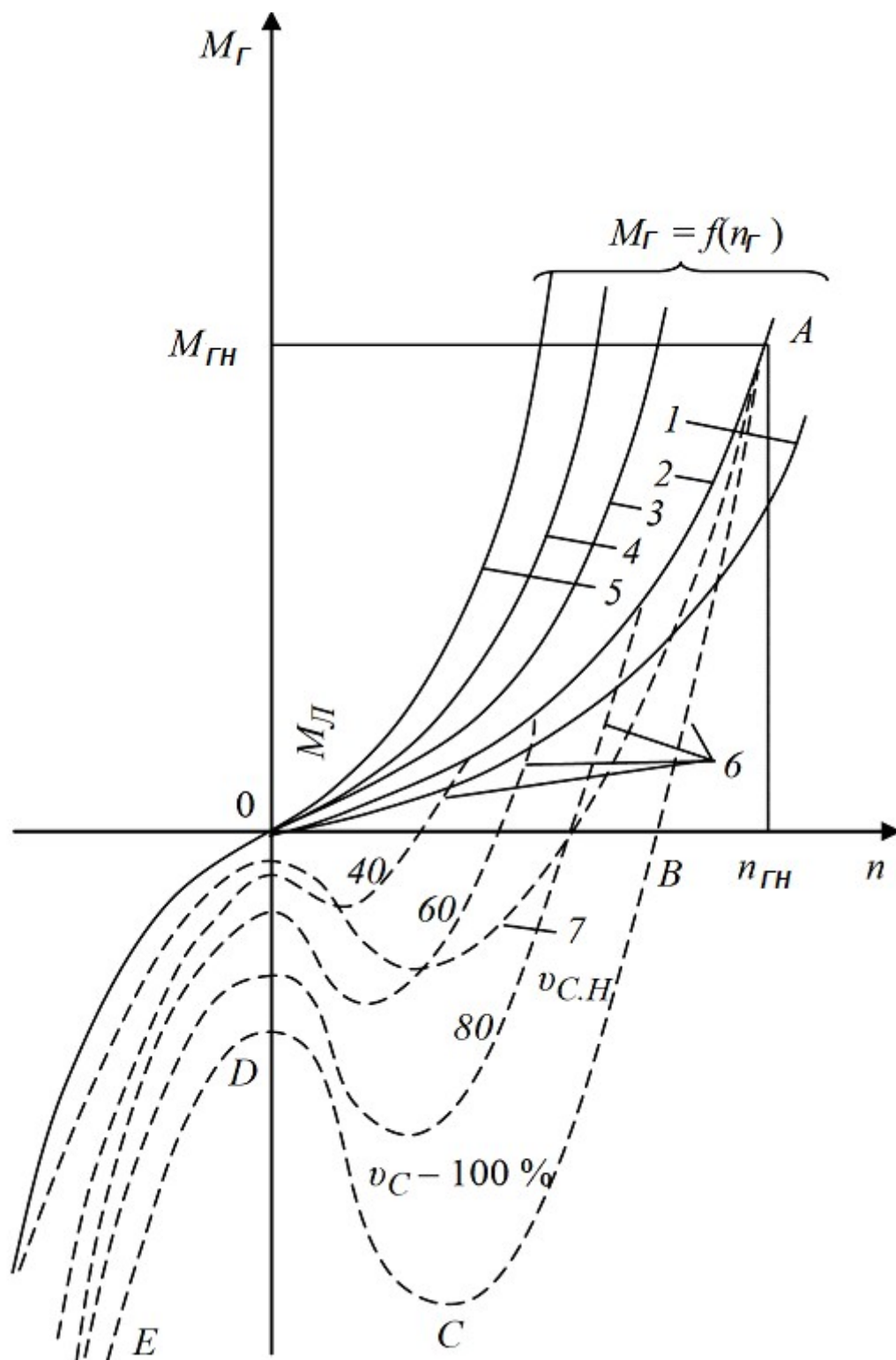


Рис. 1.2. Механічні характеристики гребного гвинта фіксованого кроку:
 1 – хід у вільній воді без вантажу; 2 – хід у вільній воді з номінальним осіданням (з вантажем); 3 – буксирувальна характеристика; 4 – швартова характеристика (при нерухомому судні); 5 – льодова характеристика; 6 – реверсивна характеристика

У процесі розгону судна гвинтова характеристика переходить зі

швартової на хід у вільній воді. Залежно від умов плавання й режиму експлуатації судна розрізняють наступні гвинтові характеристики: 1 – хід у вільній воді зі зменшеним осіданням (без вантажу); 2 – хід у вільній воді з номінальним осіданням (з вантажем); 3 – буксирувальна характеристика; 4 – швартова характеристика (при нерухомому судні); 5 – льодова характеристика; 6 – реверсивні характеристики. Вид реверсивних характеристик гребного гвинта для різних значень первісної швидкості судна наведений на рис. 1.2 (криві б).

Точка А відповідає ходу судна у вільній воді з номінальною швидкістю й номінальною частотою обертання гребного гвинта. Після припинення подачі електроенергії до ГЕД частота обертання знижується до значення 0,6...0,75 від номінальної величини, що відповідає кроку нульового моменту (точка В).

За рахунок енергії потоку води, що набігає, гребний гвинт продовжує обертатися в ту ж сторону, працюючи в режимі гідротурбіни, і на ділянці ВС сам розвиває обертаючий момент (негативний момент опору), працюючи в режимі гідротурбіни. Максимальне значення моменту (до 0,9 номінального значення) досягається при частоті обертання близько 0,35...0,45 номінального значення (точка С).

Для зупинки гвинта необхідно, щоб ГЕД розвивав гальмовий момент (негативний обертаючий момент) більший, ніж обертаючий момент гвинта, що працює в режимі гідротурбіни. Під дією гальмового моменту ГЕД гребний гвинт загальмовується (у точці D) і при моменті близько 0,4 номінального значення починає обертатися в протилежному напрямку (ділянка DE), створюючи ефективне гальмування руху судна. Під дією обертів в протилежну сторону гвинта судно зупиняється й потім почне розгін у зворотному напрямку.

Як правило, на задньому ходу частота обертання гребного гвинта при номінальному моменті значно менше, ніж на передньому ходу, що обумовлено зростанням опору руху судна, пов'язаного з формою корпусу.

У процесі реверса ГЕД швидкість судна знижується. Реальна реверсивна

характеристика, що враховує зміни швидкості судна під час реверса, має вигляд кривій 7, представленої на рис. 1.2.

При реверсі у швартовому режимі ($V_c = 0$) виключається робота гвинта в режимі гідротурбіни, і реверсування відбувається по симетричній кривій, що проходить через початок координат.

Гвинтова характеристика ГРК трохи відрізняються від характеристик гребного гвинта. Відмінність гвинтової характеристики ГРК полягає в тім, що в даному русії виключається реверс гвинта й гальмування судна відбувається шляхом розвороту ГРК щодо діаметральної площини судна. При цьому при розвороті ГРК гвинтова характеристика по суті переходить від режиму ходу у вільній воді у швартовий режим.

Механічна гвинтова характеристика ГРК представлена на рис. 1.3.

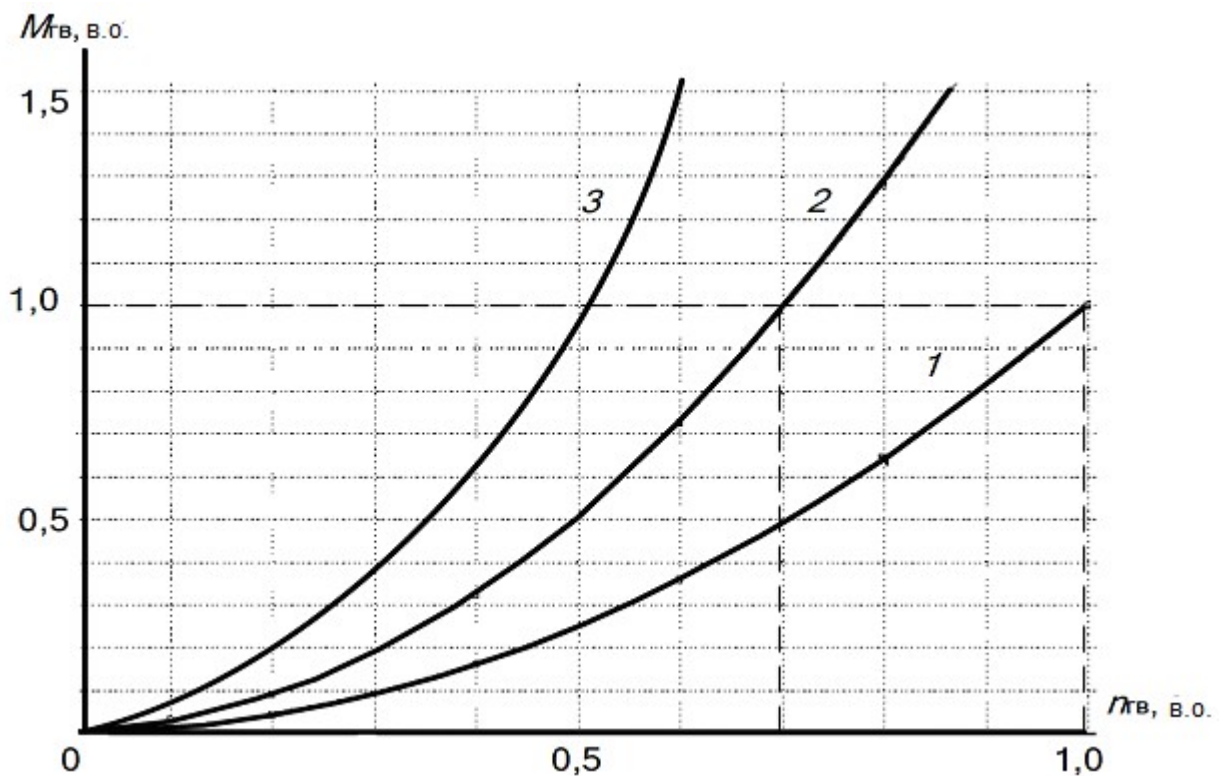


Рис. 1.3. Гвинтова характеристика ГРК: 1 – хід у вільній воді; 2 – швартова характеристика; 3 – розворот ГРК при русі судна

Реверс судна здійснюється шляхом розвороту ГРК. При розвороті ГРК можливо короткочасне значне збільшення моменту опору гвинта, що може

привести до зниження частоти обертання ГЕД.

Максимальний момент опору гвинта спостерігається при розташуванні ГРК перпендикулярно діаметральної площини судна.

Керування рушійною установкою

Керування ГЕУ необхідно здійснювати з метою зміни швидкості й напрямку руху судна. Швидкість і напрямок руху судна змінюються за рахунок зміни величини й напрямки упору, що створює рушій. Упор рушія міняється за рахунок зміни частоти обертання або крокового відношення гвинта. Напрямок упору може мінятися за рахунок розвороту ГРК.

ГЕД споживає електричну енергію й розвиває обертаючий електромагнітний момент. У сталому режимі обертаючий момент ГЕД дорівнює моменту опору гребного гвинта.

Механічна характеристика ГЕД, що працює на ГФК, представлена на рис. 1.4.

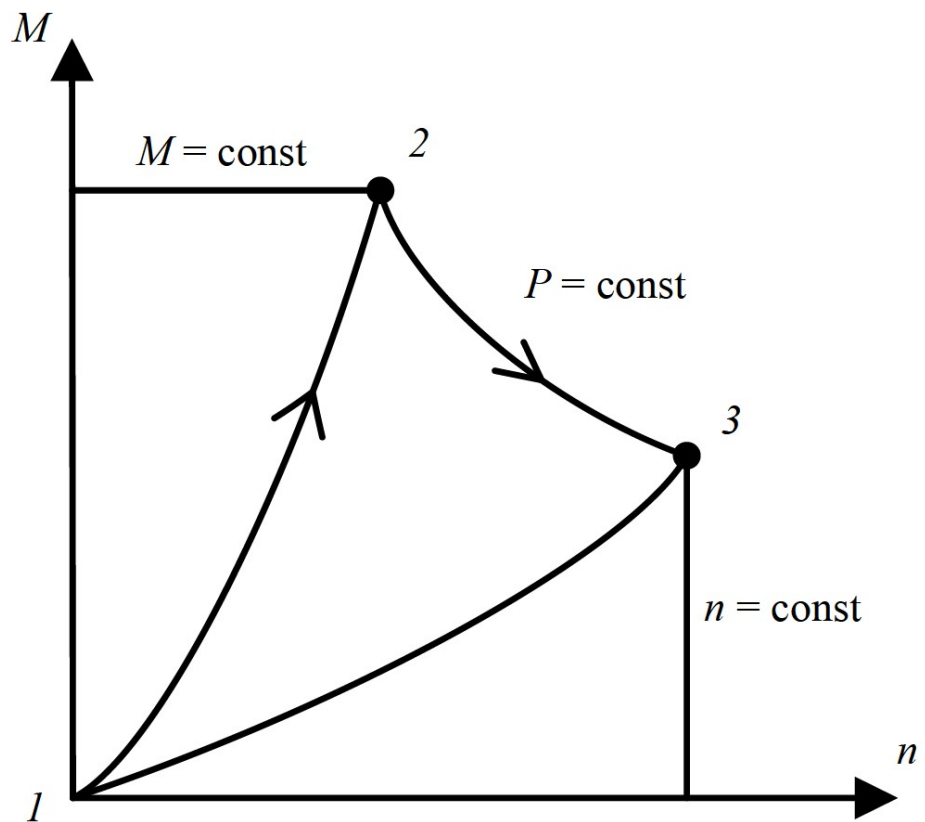


Рис. 1.4. Механічна характеристика ГЕД (ідеальна)

Механічна характеристика ГЕД має обмеження по моменту, потужності й частоті обертання. Обмеження потужності необхідно, щоб не перевантажити генераторні агрегати суднової електростанції (СЕС). Обмеження по моменту необхідно, щоб уникнути механічної поломки ГЕД, валопроводу, ГРК або редуктора. Обмеження по частоті обертання необхідно для виключення поломки ГЕД.

При розгоні ГЕД у швартовому режимі, коли судно нерухомо (від точки 1 до точки 2, рис. 1.4) ГЕД виходить на обмеження по максимальному моменту або максимальній споживаній потужності й перестає розганятися. Частота обертання ГЕД у швартовому режимі не досягає номінального значення, тому що обмежується максимальним значенням по моменту або потужності. Розгін ГЕД при пуску здійснюється в режимі підтримки сталості моменту: $M_{\text{ГЕД}} = \text{const}$.

При розгоні судна гвинтова характеристика зі швартової переходить на хід у вільній воді, знижується гальмовий момент на гребному гвинті й частота обертання ГЕД зростає.

Другий етап розгону ГЕД здійснюється в режимі підтримки сталості потужності. У діапазоні від робочої точки 2 до робочої точки 3 $P_{\text{ГЕД}} = \text{const}$ (рис. 1.4). Тривалість розгону судна й роботи ГЕД у даному режимі може становити від декількох хвилин.

Після виходу ГЕД на номінальну частоту обертання (робоча точка 3, рис. 1.4) підтримується режим сталості частоти обертання ГЕД $n_{\text{ГЕД}} = \text{const}$.

У ходових режимах застосовуються два способи регулювання ГЕД:

- підтримка сталості частоти обертання $n_{\text{ГЕД}} = \text{const}$;
- підтримка сталості потужності $P_{\text{ГЕД}} = \text{const}$.

Швидкість судна залежить від частоти обертання гвинта. При ході судна на хвилюванні або в льоді при роботі в режимі $n_{\text{ГЕД}} = \text{const}$ періодично міняється споживана потужність ГЕД, що приводить до підвищеного зношування приводних двигунів ГА й можливій відмові.

У зв'язку із цим на судах льодового плавання й криголамах застосовують режим підтримки сталості потужності ГЕД $P_{\text{ГЕД}} = \text{const}$.

1.4. Структурні схеми ГЕУ змінного струму з ЄЕЕС

У цей час найбільше застосування знайшли ГЕУ змінного струму з напівпровідниковими перетворювачами частоти (НПЧ). У даних ГЕУ в якості ГЕД застосовуються електричні двигуни змінного струму.

На рис. 1.5 наведена ЄЕЕС із ГЕУ змінного струму на базі безпосереднього напівпровідникового перетворювача (БНП) із прямою передачею обертаючого моменту на гвинт.

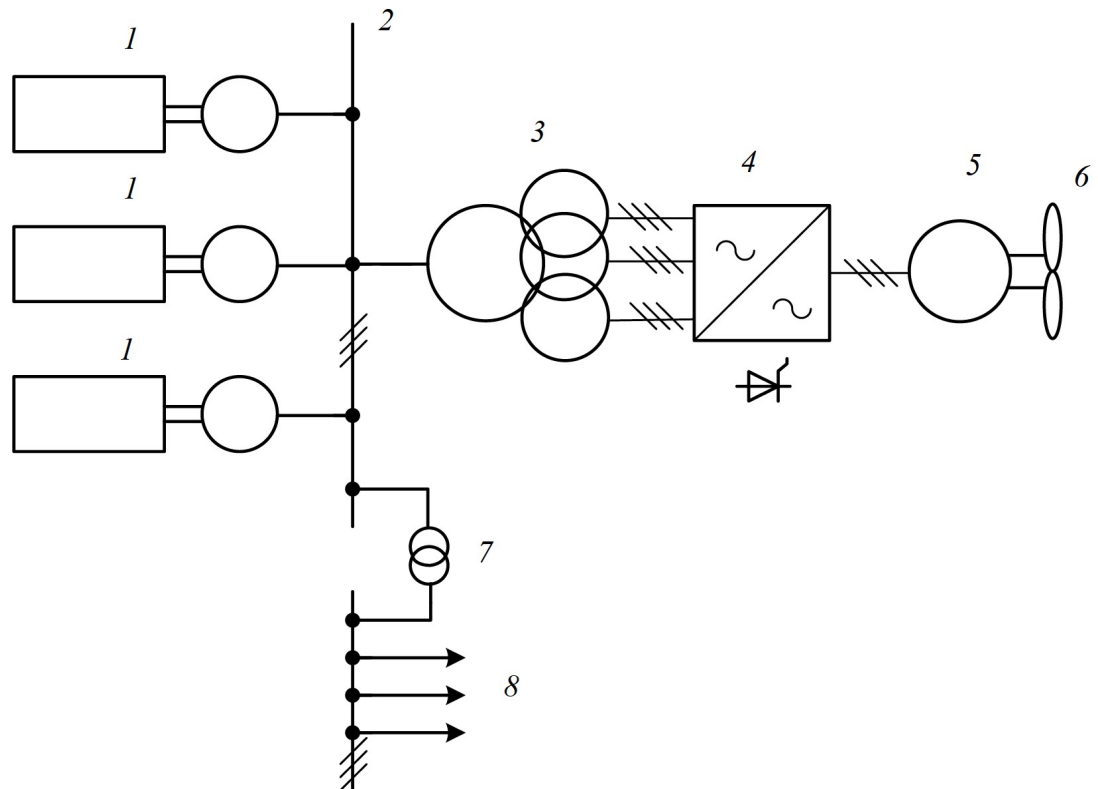


Рис. 1.5. ЄЕЕС змінного струму на базі: 1 – ГДГ; 2 – ЩЕР; 3 – багато обмотувальний трансформатор; 4 – БНП; 5 – ГЕД; 6 – ГГ; 7 – допоміжний трансформатор; 8 – суднові приймачі електроенергії

Достоїнством перетворювачів з безпосереднім зв'язком є застосування порівняно недорогих і надійних одноопераційних тиристорів і можливість

реалізації рекуперативного гальмування ГЕД.

У всіх СЕР із прямою передачею обертаючого моменту на гвинт присутня проблема гальмування ГЕД. При гальмуванні ГЕД переводиться в генераторний режим. Для забезпечення гальмового моменту на валу необхідно навантажувати ГЕД електричним струмом. Оскільки потужність ГЕУ значно перевершує потужність загально суднових приймачів електроенергії, рекуперативне гальмування в судову мережу малоефективне, і для гальмування використовують гальмові опори.

У міру створення потужних біполярних і комбінованих (IGBT) транзисторів у суднобудуванні стали знаходити застосування напівпровідникові перетворювачі з ланкою постійного струму.

На рис. 1.6 наведена ЄЕЕС із ГЕУ змінного струму на базі НП із ланкою постійного струму й прямій передачею обертаючого моменту на гвинт.

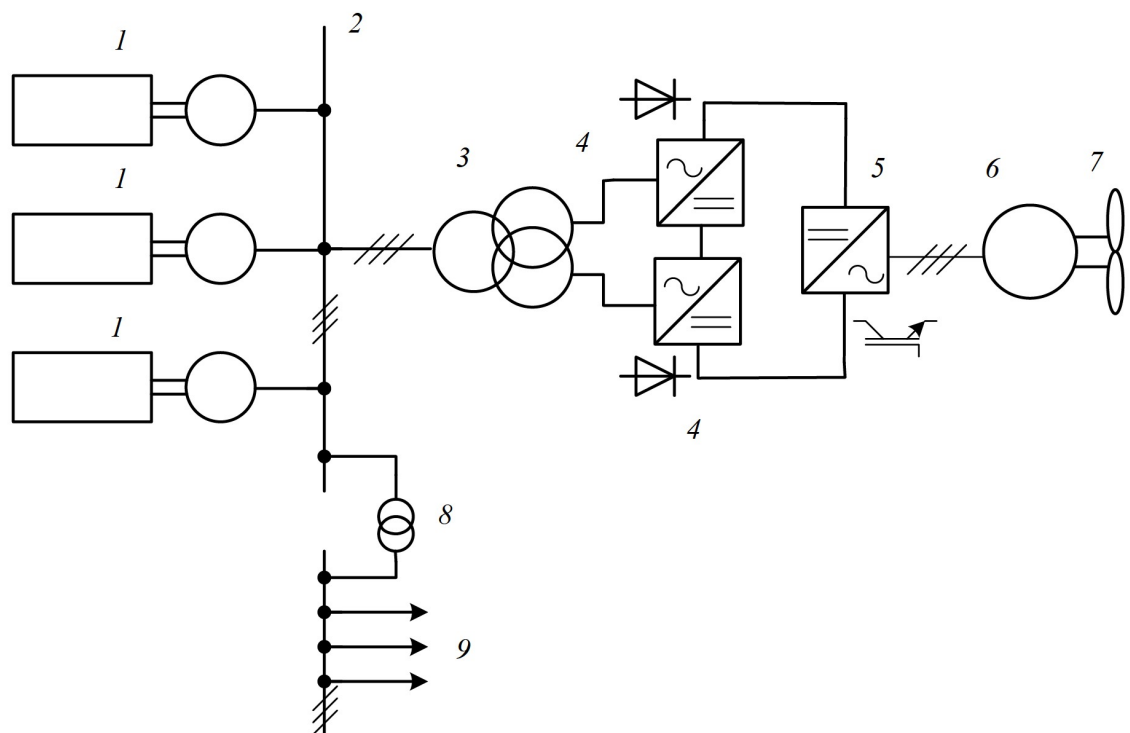


Рис. 1.6. ЄЕЕС із ГЕУ змінного роду струму й перетворювачем частоти з ланкою постійного струму: 1 – ГДГ; 2 – ЩЕР; 3 – трьох обмотувальний трансформатор; 4 – некерований випрямляч; 5 – автономний інвертор; 6 – ГЕД; 7 – ГФК; 8 – допоміжний трансформатор; 9 – судові приймачі електроенергії

Для гальмування ГЕД використовуються гальмові опори, установлені в ланці постійного струму НП, що одержує живлення від силового трьох обмотувального перетворювача.

На сучасних судах знаходять застосування НП із ланкою постійного струму, у яких застосовуються активні випрямлячі. Структурна схема ЄЕЕС із ГЕУ змінного струму на базі перетворювача з активним випрямлячем наведена на рис. 1.7.

Достоїнством даних перетворювачів є мінімальне спотворення напруги й можливість підключення до суднової мережі без трансформаторів, що погодять, і дроселів. Електроенергію в ЄЕЕС виробляють ГДГ, які підключені до ЩЕР. Від ЩЕР одержує живлення НП, виконаний з ланкою постійного струму на базі активних випрямлячів (АВ) і автономних інверторів (АІ).

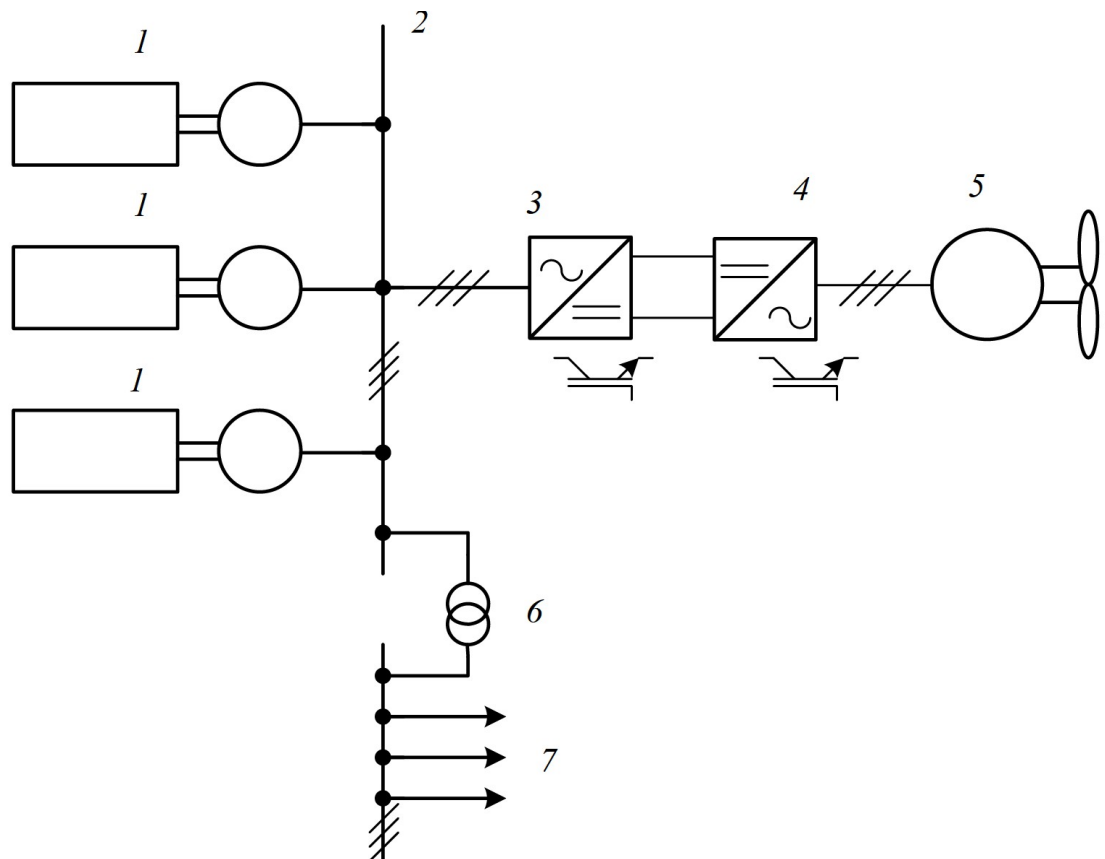


Рис. 1.7. ЄЕЕС із ГЕУ й перетворювачем частоти на базі активного випрямляча: 1 – головні ДГ; 2 – ЩЕР; 3 – активний випрямляч; 4 – автономний інвертор; 5 – ГЕД; 6 – допоміжний трансформатор; 7 – суднові приймачі електроенергії

Даний НП є оборотним, тому при гальмуванні ГЕД переходить у режим генератора й виробляє електроенергію, що надходить через НП до ГРЩ і живить загальсуднові приймачі електроенергії. Для більшого ефективного гальмування ГЕД у ланці постійного струму НП додатково встановлюють гальмові опори.

В останні роки ГРуЛК знаходять усе більше широке застосування на судах різного призначення в складі ГЕУ.

Застосування ГРуЛК у складі дозволяє:

- забезпечити високі маневрені показники судна на всіх режимах експлуатації;
- підвищити корисний обсяг судна, за рахунок відсутності валопроводу й кормового пристрою, що підрулює;
- зменшити обсяг машинного відділення й здійснити його більш раціональне компонування;
- понизити рівень вібрації й шуму;
- виключити необхідність реверса й гальмування ГЕД.

У цей час провідними виробниками випускають різні по виконанню ГРуЛК, які по місцю розташування ГЕД можна розділити на механічні й електричні (електромеханічні). У механічних колонках ГЕД розташовується в корпусі судна й з'єднується за допомогою муфти із вхідним валом ГРуЛК. В електромеханічних ГРуЛК ГЕД розташовується безпосередньо в гондолі, що перебуває поза корпусом судна. ГРуЛК можуть виконуватися без насадки або з насадкою на гвинті. Застосування насадки підвищує пропульсивний ККД, однак може бути використано тільки на судах, що працюють у вільній воді.

В електричних ГРуЛК використовується мало оборотний ГЕД, що прямо пов'язаний із гребним гвинтом. Маса габаритні показники середньо-оборотних ГЕД значно краще, ніж у мало оборотних.

На судах з ГЕУ середньої й малої потужності найбільше застосування знайшли механічні ГРуЛК із ГЕД асинхронного типу. До недоліків ГЕУ з

механічними ГРулК варто віднести обмеження перевантажувальної здатності по моменту, що пов'язане з наявністю зубчастих передач. В електромеханічних ГРулК перевантаження по моменту на гребному гвинті значно вище, оскільки ГЕД прямо з'єднаний із гребним гвинтом або безпосередньо монтується на ньому.

При використанні в складі ГЕУ азимутальних ГРулК виключається необхідність реверсування гвинта, що дозволяє застосовувати нереверсивні середньо оборотні ГЕД і нереверсивні НП. Керування курсом, гальмування й реверс судна здійснюються розворотом колонок.

Як правило, на судні в складі системи електричного руху використовують не менш двох ГЕД із ГРулК. При цьому ГЕД можуть перебувати в корпусі судна або розміщатися безпосередньо у ГРулК. У другому - ГЕД виконується із двома незалежними якірними обмотками, кожна з яких одержує живлення від свого напівпровідникового перетворювача, або два ГЕД у тандемі на одну колонку. Висувна ГРулК може застосовуватися в складі носового пристрою, що підрулює.

Структурна схема ЄЕЕС із ГЕУ змінного струму на базі двох механічних ГРулК наведена на рис. 1.8.

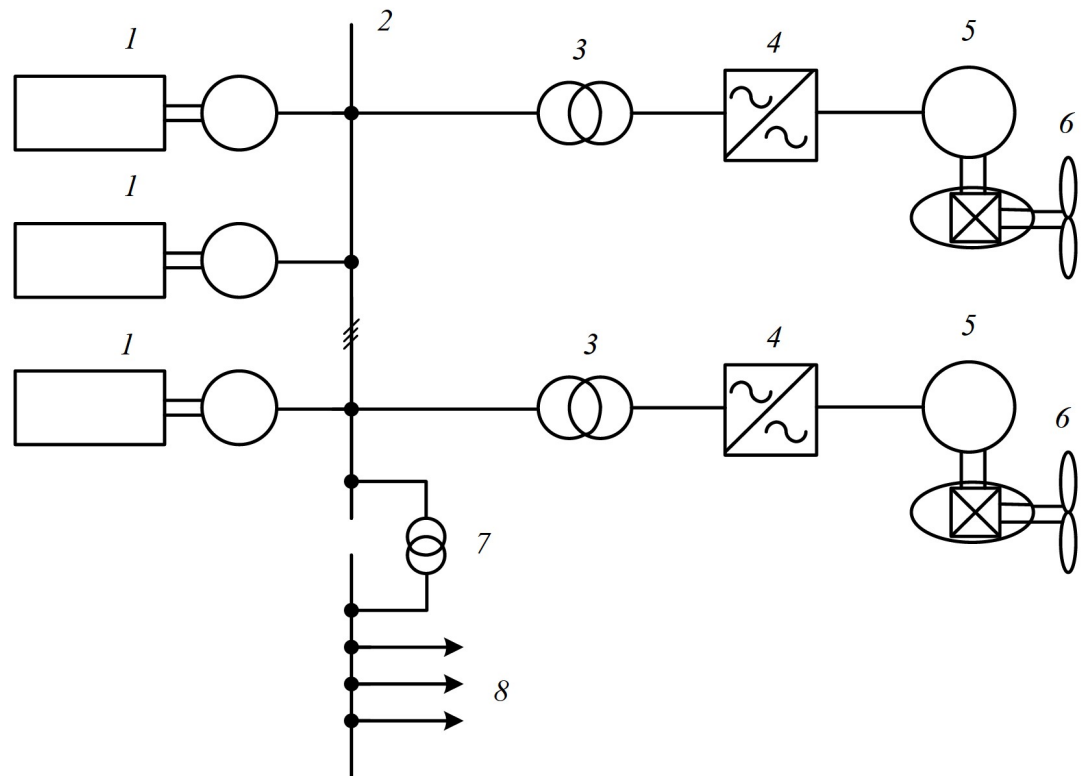


Рис. 1.8. СЕЕС із ГЕУ й механічної ГРК: 1 – ГДГ; 2 – ЩЕР; 3 – пропульсивний трансформатор; 4 – НП; 5 – ГЕД; 6 – ГРК; 7 – допоміжний трансформатор; 8 – суднові приймачі електроенергії

У ГЕУ із ГРулК гальмування й реверсування судна здійснюється за допомогою розвороту колонок, у зв'язку із чим немає необхідності реверсировать і гальмувати ГЕД з рекуперацією електроенергії в мережу. Для розсіювання електроенергії при генераторному гальмуванні ГЕД застосовують гальмові резистори, що підключають до ланки постійного струму НП.

У якості ГЕД у ГРулК застосовуються асинхронні й синхронні електричні машини, у тому числі з електромагнітним збудженням і збудженням на постійних магнітах. У якості НП можуть використатися перетворювачі з ланкою постійного струму з активними випрямлячами (АВ).

Перетворювачі даного типу не вимагають застосування трансформаторів, що погодять, і завдяки широтно-імпульсному регулюванню вносять незначні спотворення в суднову живильну мережу. Основним недоліком електричних ГРулК є складність конструкції, висока маса й габарити, що пов'язане із застосуванням малооборотних ГЕД. До достоїнств варто віднести звільнення

внутрішнього простору судна й високих перевантажувальних здатностей по обертаючому моменту ГЕД.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК НЕОБХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРІВ ЄЕЕС І ГЕУ

Наведений розрахунок має на меті показати величину необхідної потужності головних дизель - генераторів (ГДГ), що входять до складу єдиної електроенергетичної системи (ЄЕЕС), для всіх режимів роботи судна:

- ходовий з буксировкою на чистій воді;
- ходовий на чистій воді;
- ходовий в льодах;
- маневрування;
- тушіння пожежі на інших суднах.

Розрахунок виконаний для наступного варіанта складу ГЕУ:

- два гвинто-кермових комплекси типа “AZIPOD” с потужністю на гвинті 7500 кВт кожний;
- один гребний електродвигун з потужністю на валу 10000 кВт.

Розрахунок виконаний на підставі характеристик електроустаткування фірми “ABB”.

У розрахунку прийняті наступні скорочення:

$\eta_{д(а)}$ — коефіцієнт корисної дії електродвигуна гвинто-кермового комплексу “AZIPOD”;

$\eta_{д(в)}$ — коефіцієнт корисної дії гребного електродвигуна;

$\eta_{пр(а)}$ — коефіцієнт корисної дії перетворювача гвинто-кермового комплексу “AZIPOD”;

$\eta_{пр(в)}$ — коефіцієнт корисної дії перетворювача гребного електродвигуна;

$\eta_{тр(а)}$ — коефіцієнт корисної дії трансформатора гвинто-кермового комплексу “AZIPOD”;

$\eta_{тр(в)}$ — коефіцієнт корисної дії трансформатора гребного електродвигуна;

$\eta_{тр(сн)}$ — коефіцієнт корисної дії трансформатора відбору потужності в суднову мережу 380 В;

$\eta_{(в)}$ — коефіцієнт корисної дії валопроводу і упорних підшипників

гребного електродвигуна;

$\eta_{(a)}$ – коефіцієнт корисної дії гвинто-кермового комплексу “AZIPOD”.

2.1. Розрахунок величини необхідної електричної потужності

2.1.1. Для забезпечення заданої механічної потужності на гвинтах гвинто-кермового комплексу “AZIPOD” і гребного електродвигуна визначимо необхідну електричну потужність, яка виробляється електростанцією.

Для визначення електричної потужності необхідної для роботи гребного електричного двигуна визначаємо коефіцієнт корисної дії лінії «Гвинт ГЕД - електростанція» по формулі:

$$KKД(в) = \eta_{(в)} \cdot \eta_{\partial(в)} \cdot \eta_{np(a)} \cdot \eta_{np(в)} = 0,98 \cdot 0,956 \cdot 0,985 \cdot 0,989 = 0,913.$$

Для визначення електричної потужності необхідної для роботи гвинто-кермового комплексу «Азіпод» визначаємо коефіцієнт корисної дії лінії «Гвинт «Азіпод» - електростанція» по формулі:

$$KKД(a) = \eta_{(a)} \cdot \eta_{\partial(a)} \cdot \eta_{np(a)} \cdot \eta_{np(в)} = 0,98 \cdot 0,956 \cdot 0,985 \cdot 0,986 = 0,91.$$

Необхідну електричну потужність для роботи гребного електродвигуна визначимо за формулою, (кВт)

$$P_e = \frac{P_{(в)}}{KKД(в)},$$

$$P_e = \frac{P_{(в)}}{0,913}.$$

Необхідну електричну потужність для роботи винто-рулевого комплексу “AZIPOD” визначимо по формулі, (кВт)

$$P_e = \frac{P_{(a)}}{KKД(a)}$$

$$P_e = \frac{P_{(a)}}{0,91}$$

2.2. Розрахунок величини необхідної потужності головних дизель-генераторів (ГДГ)

Розрахунок величини необхідної потужності в спеціфікаційних режимах роботи судна наведений у таблиці 2.1.

У таблиці 2.1 прийняті наступні скорочення:

n - кількість установлених споживачів;

m - кількість споживачів, що працюють у даному режимі;

K_z - коефіцієнт завантаження механізму;

K_o - коефіцієнт одночасності;

P_m - потужність механізму;

P_e - установлена потужність електродвигуна;

$P_{\text{пот}}$, $Q_{\text{пот}}$ - активна і реактивна споживані потужності.

У розрахунку використані наступні формули:

Розрахункова електрична активна потужність механізму в режимі, (кВт)

$$P_{\text{ном}} = \frac{P_m \times n \times m \times K_z}{KKД}.$$

Розрахункова електрична реактивна потужність механізму в режимі, (квар)

$$Q_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \times \text{tg} F.$$

Потужність споживачів власних потреб у режимах виконана для споживачів силової мережі 380В/220В и вибору трансформаторів.

Таблиця 2.1. Розрахунок величини необхідної потужності в специфікаційних режимах роботи судна

Найменування електроспоживача	Кількість, шт.	Рм, кВт	Ходовий з буксируванням у чистій воді					Ходовий у чистій воді				
			m / Кз	ККД	COS F	Р пот, кВт	Q пот, квар	m / Кз	ККД	COS F	Р пот, кВт	Q пот, квар
Гвинто - кермовий комплекс Azipod	2	7500	2/1	0,91	0,99	16483,5	3268,1	2/1	0,91	0,99	16483,5	2348,8
Гребний електродвигун	1	10000	1/1	0,9163	0,99	10952,9	2197,6	0/0	0,9163	0,99	0,0	0,0
Носовий пристрій, що підрулює	2	1000	0/0	0,96	0,85	0,0	0,0	0/0	0,96	0,85	0,0	0,0
Електронасос системи спеціального пожежогасіння	3	900	0/0	0,953	0,88	0,0	0,0	0/0	0,953	0,88	0,0	0,0
Компресор системи пневмообмиву	1	2000		0,96	0,88	0,0	0,0		0,96	0,88		
Споживачі власних потреб					0,86	2677,4	1527			0,86	2556,6	1460
Разом						30113,8	5436,5				19040,1	3808,8
З обліком коефіцієнта втрат	1,03		31017,2					19611,3				
Середньозважений Cos F			0,98					0,98				
Кількість працюючих генераторів/ Завантаження в %	4x8400 кВт		4				92	3				78
Кількість резервних генераторів			0					1				

Продовження табл. 2.1.

Найменування електроспоживача	Кількість, шт.	Рм, кВт	Ходовий у льодах					Маневрування				
			m / Кз	ККД	COS F	Р пот, кВт	Q пот, квар	m / Кз	ККД	COS F	Р пот, кВт	Q пот, квар
Гвинто - кермовий комплекс Azipod	2	7500	2/1	0,91	0,99	16483,5	2348,8	2/1	0,91	0,99	16483,5	2348,8
Гребний електродвигун	1	10000	1/1	0,9163	0,99	10952,9	1560,7	1/0, 2	0,9163	0,99	2190,6	312,1
Носовий пристрій, що підрулює	2	1000	0/0	0,96	0,85	0,0	0,0	2/1	0,96	0,85	2083	1291,1
Електронасос системи спеціального пожежогасіння	3	900	0/0	0,953	0,88	0,0	0,0	0/0	0,953	0,88	0,0	0,0
Компресор системи пневмообмиву	1	2000		0,96	0,88	2083,3	1124,5		0,96	0,88	0,0	0,0
Споживачі власних потреб					0,86	2558,1	1462			0,86	2297	1306
Разом						32077,9	6462,7				23054	5258,0
З урахуванням коефіцієнта втрат	1,03		33040,2					23746,1				
Середньозважений Cos F			0,98					0,97				
Кількість працюючих генераторів/ Завантаження в %	4x8400квт		4			98		3			94	
Кількість резервних генераторів			0					1				

Продовження табл. 2.1.

Найменування	Кількість,	Рм, кВт	Гасіння пожежі на інших судах				
			m / Кз	ККД	COS F	Р пот	Q пот
						кВт	квар
Гвинто - кермовий комплекс Azipod	2	7500	2/1	0,91	0,99	8241,8	1174,4
Гребний електродвигун	1	10000	1/0,2	0,9163	0,99	2190,6	312,1
Носовий пристрій, що підрулює	2	1000	2/0,5	0,96	0,85	1041,7	645,6
Електронасос системи спеціального пожежогасіння	3	900	3/ 0,58	0,953	0,88	1636,9	878,0
Компресор системи пневмообмиву	1	2000	0/0	0,96	0,88	0,0	0,0
Споживачі власних потреб					0,86	2469,0	1300,3
Разом						15579,9	4315,9
З урахуванням коефіцієнта втрат	1,03		16047,3				
Середньозважений Cos F			0,96				
Кількість працюючих генераторів/ Завантаження в %	4x8400кВт		2			96	
Кількість резервних генераторів			2				

Висновки

За результатами розрахунку, для забезпечення руху судна в заданих режимах експлуатації, у складі ЄЕЕС передбачаються чотири головних дизель - генератори потужністю по 8400 кВт кожен виробництва компанії АВВ, Фінляндія.

Самими енергоємними режимами експлуатації судна є ходовий режим у чистій воді з виконанням буксирування і ходовий режим у льодах, у яких потрібна робота всіх головних дизель-генераторів. У випадку виходу з ладу кожного дизель-генератора передбачається зниження потужності на електричний рух не більше ніж на 8400 кВт, що складе не більше 30 % від необхідної.

2.3. Розрахунок необхідної потужності для споживачів мережі 380/220В

Розрахунок електричних навантажень виконаний по вимогам РСУ.

Зміна коефіцієнта потужності й ККД від завантаження механізму в режимах прийнято по стандарту, схваленому РСУ.

Коефіцієнт, що враховує втрати в мережах, прийнятий рівним 1,03.

У таблиці прийняті наступні скорочення:

n - кількість установлених споживачів;

m - кількість споживачів, що працюють у даному режимі;

K_z - коефіцієнт завантаження механізму;

t - час роботи механізму в даному режимі в годинниках;

T - тривалість режиму в годинниках;

K_o - коефіцієнт одночасності;

P_m - потужність механізму;

P_e - установлена потужність електродвигуна;

$P_{\text{пот}}, Q_{\text{пот}}$ - активна й реактивна споживані потужності.

Розрахунок може підлягати уточненню після остаточного вибору типу електроустаткування споживачів суднової мережі.

Таблиця 2.2. Розрахунок потужності стоянкових дизель-генераторів і розподільних трансформаторів 6.3/0,38кВт(результати розрахунку)

№ п/ п	Найменування	Ходовий з буксируванням		Стоянка на рейді		Стоянка при живленні з берега		Маневрування (зйомка з якоря)		Гасіння пожежі на інших судах		Аварійний (пожежа поза МВ на стоянці)	
		Р кВт	Q кВАр	Р кВт	Q кВАр	Р кВт	Q кВАр	Р кВт	Q кВАр	Р кВт	Q кВАр	Р кВт	Q кВА
Разом по групах (у зимовий період):													
1	Електромеханізми енергетичної установки	1054,9	641,4	378,72	189,7	219,97	90,42	993,14	598,23	1028	626,2	209,8	107,1
2	Загальсуднові системи й пристрої (без урахування Ко / з Ко)	368,3 300,0	212,6 2	368,93 300,0	211,6 4	378,91 300,0	218,52	430,55 300,0	251,73	393 300,0	227,7	399,9 300,0	233,2
3	Палубні електромеханізми	160,5	93,27	59,86	36,69	55,61	34,00	187,49	112,89	40	24,9	92,2	55,3
4	Засоби керування й РЕА	69,8	33,55	42,89	20,50	42,89	20,50	69,83	35,71	74	35,7	42,9	20,5
5	Освітлювальні й світлосигнальні пристрої, побутові споживачі	469,8	75,56	509,56	64,55	532,05	168,05	677,15	131,14	476	77,7	450,0	49,4
Разом		2423,4	1056	1659,9	523,1	1529,43	531,5	2658,17	1129,7	2312	992,1	1494,8	465,6
З урахуванням коефіцієнта втрат		2496,1		1709,7		1575,31		2737,9		2381		1539,6	
Середньозважений Cos φ		0,92		0,95		0,94		0,92		0,92		0,95	
Кількість працюючих генераторів				2СДГх1000								2СДГх1000	
Кількість резервних						2СДГ х1000							
Кількість працюючих трансформаторів при роботі ГДГ		1х3700кВА (2900кВт)						1х3700кВА (2900кВт)		1х3700кВА (2900кВт)			
Кількість резервних трансформаторів при роботі ГДГ		1х3700кВА (2900кВт)						1х3700кВА (2900кВт)		1х3700кВА (2900кВт)			
Разом по групах (у літній період):													
1	Електромеханізми енергетичної установки	1054,9	641,4	378,72	189,7	219,97	90,42	993,14	598,23	1028	626,2	209,8	107,1
2	Загальсуднові системи й пристрої (без обліку Ко/з Ко)	368,3 476,0	641,4 1	378,72 476,0	189,7 3	219,97 476,0	90,42	430,55 476,0	598,23	393 476,0	626,2	399,9 0,0	107,1
3	Палубні електромеханізми	160,5	93,27	59,86	36,69	55,61	34,00	187,49	112,89	40	24,9	92,2	55,3
4	Засоби керування й РЕА	69,8	75,56	42,89	20,50	42,89	20,50	69,83	35,71	74	35,7	42,9	20,5
5	Освітлювальні й світлосигнальні пристрої	469,8	75,56	509,56	64,55	532,05	168,05	677,15	131,14	476	77,7	450,0	49,4
Разом		2599,4	1527	1845,7	501,1	1546,4	403,4	2834,1	1476,2	2488	1390,	1194,8	339,5
З урахуванням коеф. втрат		2677,4		1901,1		1592,8		2919,2		2563		1230,6	
Середньозважений Cos φ		0,86		0,97		0, 97		0,89		0,87		0, 96	
Кількість працюючих				1СДГх1000								1СДГ х1000	
Кількість резервних				1СДГх1000		1СДГ х1000						1СДГ х1000	
Кількість працюючих трансформаторів при		1х3700кВА (2900кВт)						1х3700кВА (2900кВт)		1х3700кВА (2900кВт)			
Кількість резервних трансформаторів при		1х3700кВА (2900кВт)						1х3700кВА (2900кВт)		1х3700кВА (2900кВт)			

**Таблиця 2.3. Розрахунок потужності аварійного дизель-генератора
(результати розрахунку)**

№	Найменування	Аварійний (знеструмлення ГРЩ 380В)		Аварійний (пожежа при роботі АДГ)	
		P , кВт	Q , кВАр	P , кВт	Q , кВАр
	Разом по групах:				
1	Електромеханізми енергетичної установки без обліку K_o	40,8	33,26	9,57	7,39
	з обліком K_o	40,8		9,57	
2	Загальсуднові системи й пристрої				
	без обліку K_o	43,2	24,84	247,00	167,80
	з обліком K_o	43,2		247,00	
3	Палубні електромеханізми (без обліку K_o /з обліком K_o)	284,6 284,6	154,96	145,68 145,68	79,99
4	Засоби керування й РЕА				
	без обліку K_o	62,2	0,00	47,78	0,00
	з обліком K_o	62,2		47,78	
5	Освітлювальні й світлосигнальні пристрої, побутові споживачі без обліку K_o /з обліком K_o	78,5 78,5	14,42	69,55 69,55	18,48
Разом					
без обліку K_o		509,3	227	519,58	273,66
з обліком K_o		509,3		519,58	
З урахуванням коефіцієнта втрат		524,5		535,17	
Середньозважений $\cos\varphi$		0,91		0,88	
Коефіцієнт завантаження генератора, %		77,71		79,28	

У результаті розрахунку обрані чотири головних синхронних трифазних генератора з безщітковим збудженням, потужністю 8400 кВт кожний, напругою 6,3 кВ, частотою струму 50 Гц, $\cos\varphi = 0,9$, частотою обертання 750 об/хв.

Допоміжне джерело електроенергії складається із двох стоянкових дизель-генераторів потужністю 1000 кВт кожний, напругою 400 В, частотою струму 50 Гц, коефіцієнт потужності 0,8, для живлення суднових споживачів під час стоянки судна або при виході з ладу основного джерела електроенергії.

Аварійний дизель-генератор потужністю 675 кВт, напругою 400 В, частотою струму 50 Гц.

2.4.2 Вихідні дані

Трансформатор 6,3/0,38кВ:

- номінальна потужність

$$S_{T1_ном} := 4375 \text{ кВА};$$

- середня номінальна напруга мережі до якої підключена обмотка ВН трансформатора

$$U_{ср_вн} := 6300 \text{ В};$$

- середня номінальна напруга мережі до якої підключена обмотка НН трансформатора

$$U_{ср_нн} := 400 \text{ В};$$

- втрати короткого замикання в трансформаторі

$$P_{T1к_ном} := 34.9 \text{ кВт};$$

- напруга короткого замикання

$$U_{T1к} := 7.01\%;$$

- діюче значення періодичної складової струму при трифазному КЗ у виводів обмотки ВН трансформатора (відповідно до 22600.360066.107)

$$I_{T1к_вн} := 4.1 \text{ кА};$$

- кількість включених на паралельну роботу трансформаторів 6,3/0,38 кВ у режимі короткого замикання

$$n := 1.$$

Трансформатор 0,38/0,22кВ:

- номінальна потужність

$$S_{T3_ном} := 630 \text{ кВА};$$

- втрати короткого замикання в трансформаторі

$$P_{T3к_ном} := 4.1 \text{ кВт};$$

- напруга короткого замикання

$$U_{T3к} := 3.5\%;$$

- активний опір трансформатора 0,380/0,220кВ, наведений до щабля низької напруги

$$R_{T3} = \frac{P_{T3K_НОМ} \cdot 220^2}{S_{T3_НОМ}^2} = 0,5 \text{ ,мОм};$$

- індуктивний опір трансформатора 380/220 В, наведений до щабля низької напруги (X_{T3}), мОм

$$X_{T3} = \frac{\sqrt{U_{T3K}^2 - \left(\frac{100 \cdot P_{T3K_НОМ}}{S_{T3_НОМ}} \right)^2 \cdot \left(\frac{220}{10^3} \right)^2 \cdot 10^4}}{S_{T3_НОМ}} = 2,642 \text{ , мОм.}$$

Еквівалентний індуктивний опір системи, приведений до щабля нижчої напруги (X_c), мОм

$$X_c = \frac{U_{cp_HH}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{T1K_B} \cdot U_{cp_BH}} = 3,576 \text{ ,мОм.}$$

Активний опір трансформатора 6,3/0,38кВ, наведений до щабля нижчої напруги мережі (R_T), мОм

$$R_T = \frac{P_{T1K_НОМ} \cdot U_{cp_HH}^2}{S_{T1_НОМ}^2} = 0,292 \text{ , мОм.}$$

Індуктивний опір трансформатора 6,3/0,38кВ, наведений до щабля нижчої напруги мережі (X_T), мОм

$$X_T = \frac{\sqrt{U_{T1K}^2 - \left(\frac{100 \cdot P_{T1K_НОМ}}{S_{T1_НОМ}} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_{cp_HH}}{10^3} \right)^2 \cdot 10^4}}{S_{T1_НОМ}} = 2,547 \text{ , мОм.}$$

Параметри точок короткого замикання

Таблиця 2.4. Параметри точок короткого замикання

Точки КЗ	Кабель (від ГРЩ до точки КЗ)	
	Перетин, мм ²	Довжина, м
F4 (щит 1П)	2х(3х50)	82
F5 (щит 2П)	2х(3х120)	107
F6 (щит 3П)	3х70	106
F7 (щит 5П)	3х50	98
F8 (щит 3В)	2х(3х70)	65
F9 (щит 1В)	3х(3х95)	96
F10 (щит 13П)	3х95	74
F11 (щит 4В)	2х(3х120)	49

2.4.3. Розрахунок струмів КЗ у точках короткого замикання

Точка КЗ F1 на шинах ГРЩ 380В:

- перетин кабельної лінії $3 \times 120 \text{ мм}^2$;
- довжина кабельної лінії $L_{f1} = 8 \text{ м}$;
- кількість паралельних кабелів у лінії $N_{f1} = 34$;
- питомий активний опір кабелю $R_{f1_уд} = 0.168 \text{ мОм/м}$;
- питомий індуктивний опір кабелю $X_{f1_уд} = 0.059 \text{ мОм/м}$;
- активний опір кабелю

$$R_{k_f1} = R_{f1_уд} \cdot \frac{L_{f1}}{N_{f1}} = 0,04 \text{ , мОм};$$

- індуктивний опір кабелю

$$X_{k_f1} = X_{f1_уд} \cdot \frac{L_{f1}}{N_{f1}} = 0,014 \text{ , мОм};$$

- сумарний активний опір ланцюга короткого замикання до точки F1

$$R_{f1} = \frac{R_t + R_{k_f1}}{n} = 0,331 \text{ , мОм};$$

- сумарний індуктивний опір ланцюга короткого замикання до точки F1

$$X_{f1} = \frac{X_t + X_{k_f1}}{n} + X_c = 6,137 \text{ , мОм};$$

- початкове значення періодичної складової струму трифазного короткого замикання без обліку струму підживлення еквівалентного АД

$$I_{nof1max} = \frac{U_{cp_нн}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{f1}^2 + X_{f1}^2}} = 37,575 \text{ , кА};$$

- ударний коефіцієнт, ($K_{уд1}$) відповідно до кривій 1 ДСТУ28249-93 залежно від R/X

$$\frac{R_{f1}}{X_{f1}} = 0,054 \text{ , } K_{уд1} = 1,7;$$

- ударний струм короткого замикання ($I_{удf1}$),

$$I_{удf1} = \sqrt{2} \cdot I_{nof1max} \cdot K_{уд1} = 90,336 \text{ кА};$$

- сумарний номінальний струм асинхронних двигунів

$$I_{ном_ад} = 3,5 \text{ , кА};$$

- ударний струм еквівалентного АД

$$I_{уд_ад} := 7.8 I_{ном_ад} = 27.3 \text{ , кА};$$

- діюче значення періодичної складової струму КЗ від АД

$$I_{по_ад} = 5 I_{ном_ад} = 17.5 \text{ кА};$$

- діюче значення струму КЗ у точці F1

$$I_{f1} = I_{nof1max} + I_{по_ад} = 55.075 \text{ кА};$$

- значення ударного струму КЗ у точці F1

$$I_{уд_f1} := I_{удf1} + I_{уд_ад} = 117.636 \text{ кА};$$

Точка КЗ F2 на шинах ГРЩ 220В :

- перетин кабельної лінії (ГРЩ/380В-ТЗ) - $5 \times (3 \times 120) \text{ мм}^2$;

- довжина кабельної лінії

$$L_{f21} = 8 \text{ м};$$

- кількість паралельних кабелів у лінії

$$N_{f21} = 5;$$

- питомий активний опір кабелю

$$R_{f21_уд} = 0.168 \text{ мОм/м};$$

- питомий індуктивний опір кабелю

$$X_{f21_уд} = 0.059 \text{ мОм/м};$$

- активний опір кабелю

$$R_{k_f21} = R_{f21_уд} \cdot \frac{L_{f21}}{N_{f21}} = 0.269 \text{ мОм};$$

- індуктивний опір кабелю

$$X_{k_f21} = X_{f21_уд} \cdot \frac{L_{f21}}{N_{f21}} = 0.094 \text{ мОм};$$

- перетин кабельної лінії (ГРЩ/220В) - $9 \times (3 \times 120) \text{ мм}^2$

- довжина кабельної лінії

$$L_{f22} = 6 \text{ м};$$

- кількість паралельних кабелів у лінії

$$N_{f22} = 9;$$

- питомий активний опір кабелю

$$R_{f22_уд} = 0.168 \text{ мОм/м};$$

- питомий індуктивний опір кабелю

$$X_{f22_уд} = 0.059 \text{ мОм/м};$$

- активний опір кабелю

$$R_{k_f22} = R_{f22_уд} \cdot \frac{L_f22}{N_{f22}} = 0,112 \text{ мОм};$$

- індуктивний опір кабелю

$$X_{k_f22} = X_{f22_уд} \cdot \frac{L_f22}{N_{f22}} = 0,039 \text{ мОм};$$

- сумарний активний опір ланцюга короткого замикання до точки F2

$$R_{f2} = R_{f1} + R_{k_f21} + R_{k_f22} + R_{т3} = 1.212 \text{ мОм};$$

- сумарний індуктивний опір ланцюга короткого замикання до точки F2

$$X_{f2} = X_{f1} + X_{k_f21} + X_{k_f22} + X_{т3} = 8.913 \text{ мОм};$$

- початкове значення періодичної складової струму трифазного короткого замикання без обліку струму підживлення еквівалентного АД

$$I_{nof2max} = \frac{U_{сп_нн}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{f2}^2 + X_{f2}^2}} = 25,674 \text{ кА};$$

- ударний коефіцієнт, ($K_{уд2}$) відповідно до кривій 1 ДСТУ28249-89 залежно від R/X

$$\frac{R_{f2}}{X_{f2}} = 0,136, K_{уд2} = 1,6;$$

- ударний струм короткого замикання

$$I_{удf2} = \sqrt{2} I_{nof2max} K_{уд2} = 58.095 \text{ кА};$$

Точка КЗ F3 на шинах АРЩ:

– перетин кабельної лінії - $8 \times (3 \times 120) \text{ мм}^2$;

– довжина кабельної лінії

$$L_{f3} := 13 \text{ м};$$

- кількість паралельних кабелів у лінії

$$N_{f3} := 8;$$

- питомий активний опір кабелю

$$R_{f3_уд} := 0.168 \text{ мОм/м};$$

- питомий індуктивний опір кабелю

$$X_{f3_уд} := 0.059 \text{ мОм/м};$$

- активний опір кабелю

$$Rk_{f3} = Rf3_{уд} \cdot \frac{L_{f3}}{Nf3} = 0,273 \text{ мОм};$$

- індуктивний опір кабелю

$$Xk_{f3} = Xf3_{уд} \cdot \frac{L_{f3}}{Nf3} = 0,096 \text{ мОм};$$

- сумарний активний опір ланцюга короткого замикання до точки F3

$$Rf3 = Rf1 + Rk_{f3} = 0.604 \text{ мОм};$$

- сумарний індуктивний опір ланцюга короткого замикання до точки F3

$$Xf3 = Xf1 + Xk_{f3} = 6.233 \text{ мОм};$$

- початкове значення періодичної складової струму трифазного короткого замикання без обліку струму підживлення еквівалентного АД

$$Inof3_{max} = \frac{U_{cp_нн}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{Rf3^2 + Xf3^2}} = 36,878 \text{ кА};$$

- ударний коефіцієнт ($K_{уд3}$) відповідно до кривій 1 ДСТУ 28249-89 залежно від R/X

$$\frac{Rf3}{Xf3} = 0,097, K_{уд3} = 1,7;$$

- ударний струм короткого замикання

$$I_{удf3} := \sqrt{2} Inof3_{max} K_{уд3} = 88.66 \text{ кА};$$

Точки F4...F11

Розрахунок ТКЗ для точок F4... F11 аналогічний для точки F3, тому докладно не приводиться. Результати розрахунку для цих точок наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Результати розрахунку для точок F1... F11

Точка КЗ	R_f , мОм	X_f , мОм	R_f/X_f	I_{n0} , кА	$I_{уд}$, кА	Тип вимикача	$I_{уд.}$, кА
F1	0,331	6,137	0,054	37,575	117,636	E6H63 PR121/PLS/I	220
F2	1,212	8,913	1,136	25,673	58,095	E2B20 PR121/PLS/I	94
F3	0,604	6,233	0,097	36,878	88,668	T7L 1600 LS/I	200
F4	17,756	8,720	2,036	11,674	16,675	XT4L 250 LS/I	120
F5	9,319	9,294	1,003	17,547	26,056	XT4L 250 LS/I	120
F6	9,235	9,264	0,997	17,654	27,464	T5L 400 LS/I	200
F7	41,982	12,311	3,41	5,279	7,465	XT2L 160 LS/I	120
F8	9,821	8,152	1,205	18,093	26,876	XT4L 250 LS/I	120
F9	7,115	8,057	0,883	21,484	33,422	XT2L 160 LS/I	120
F10	16,019	10,517	1,515	12,031	17,184	XT2L 160 LS/I	120
F11	4,447	7,583	0,587	26,271	44,584	T5L 400 LS/I	200

Висновок

Розрахунок показав, що обрані автоматичні вимикачі витримують ударний струм КЗ і забезпечують відключення сталих струмів короткого замикання.

3. АНАЛІЗ РОБОТИ СЕЕС ЗІ СТАТИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Відповідно до МЕК 61000-6.2 Загальний стандарт по ЕМС «Методи розрахунку коефіцієнта несинусоїдальності кривій напруги в суднових електроенергетичних системах», коефіцієнт спотворення визначається у відсотках, як величина, рівна відношенню кореню квадратного із суми квадратів амплітудних або діючих значень вищих гармонійних складові напруги до амплітудного або діючого значення його основної гармонійної складової. У технічній літературі цей коефіцієнт зветься загального гармонійного спотворення (Total Harmonic Distortion) і позначається THD.

Необхідність проведення розрахунків THD обґрунтовується таким чином: розрахунок коефіцієнта несинусоїдальності кривій напруги доцільно робити, коли сумарна повна потужність, споживана статичними перетворювачами, перевищує 5% від сумарної повної потужності генераторів, що працюють у розрахунковому режимі («Методи розрахунку коефіцієнта несинусоїдальності кривій напруги в суднових електроенергетичних системах»). Для ЕЕС криголама повна потужність, споживана статичними перетворювачами в розрахунковому режимі, перевищує 50% від повної потужності чотирьох основних генераторів. Величина випрямного навантаження на один генератор перевищує 7% від номінальної потужності машини.

Значення коефіцієнта несинусоїдальності кривій напруги визначається по формулі[6]:

$$K_U = \frac{1}{U_c} \sqrt{\sum_{n=2}^{200} U_n^2} \cdot 100 \%,$$

де U_c - діюче значення напруги мережі;

U_n - діюче значення напруги гармонійної складової n-ого порядку;

n - порядок вищої гармонійної складової.

Відповідно до того ж пункту «Правил класифікації.....» коефіцієнт несинусоїдальності кривій напруги для повністю укомплектованої суднової електроенергетичної системи не повинен перевищувати 10%.

Якщо коефіцієнти THD й K_U при розрахунках в ЕЕС менше 10% їхні значення чисельно рівні один одному, що дозволяє в таких випадках використати для розрахунків кожне з перерахованих вище виражень.

Відповідно до вимог МЕК коефіцієнт несинусоїдальності кривій напруги в ЕЕС може бути розрахований двома методами: графічно або аналітично (наприклад з використанням мови програмування). Графічний метод може бути використаний лише для нескладних структур ЕЕС, що містять який-небудь один або кілька однотипних перетворювачів частоти й джерел електроенергії.

Тому для розрахунку коефіцієнта несинусоїдальності кривій напруги для ЕЕС застосований аналітичний метод розрахунку, із заміною мови програмування на «MATLAB» як більше сучасний і широко використовуваний у подібного роду розрахунках.

Розрахунок коефіцієнта несинусоїдальності кривій напруги для ЕЕС для головних шин напругою 6300 В и розподільних шин напругою 400 В виконаний для двох розрахункових режимів: повного й часткової (половинної) завантаження основних джерел напруги. Структура ЕЕС криголама наведена на рис 5.1.

Всі підготовчі розрахунки, пов'язані з еквівалентуванням джерел електроенергії, перетворювачів частоти, вибором режимів роботи, моделюванням окремих вузлів ЕЕС, вибором точок структури ЕЕС для визначення THD, виконані відповідно до МЕК 61000-6.2 Загальний стандарт по ЕМС «Методи розрахунку коефіцієнта несинусоїдальності кривій напруги в суднових електроенергетичних системах».

3.1. Єдина електроенергетична система

Єдина електроенергетична система містить чотири однотипних генератори з повною потужністю $S_{\text{ген}} = 9333$ кВА кожен напругою 6,3 кВ і три основних рушії: два по 7500 кВт типу Azipod й один 10000 кВт.

Електроенергетика рушіїв типу Azipod виконана з використанням 24-пульсної схеми випрямлення, електроенергетика основного рушія – з

використанням 12-пульсної схеми випрямлення. Потужність інших споживачів, що використовують перетворювачі частоти менше 5% від сумарної потужності джерел, тому вони надалі в розрахунку не враховувалися.

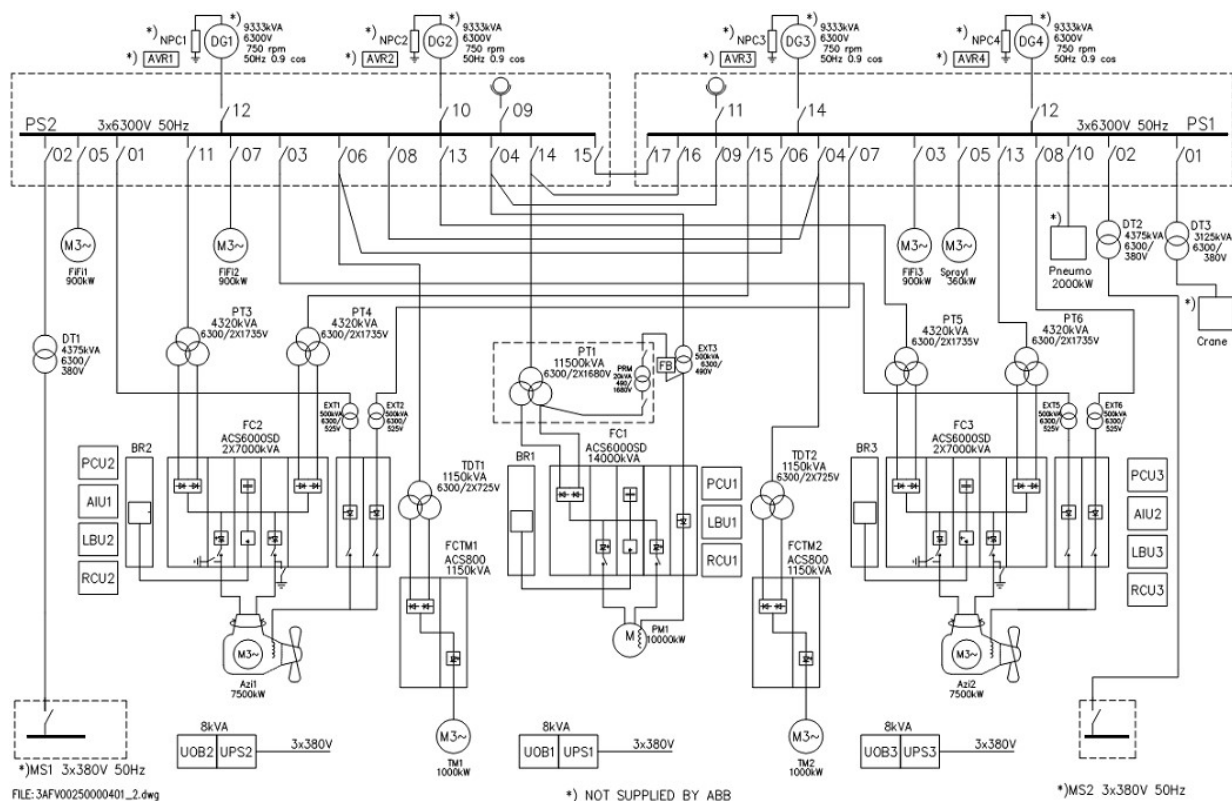


Рис 3.1. Структурна схема єдиної ЕЕС криголама

3.2. Основні елементи єдиної ЕЕС

Дані елементів ЕЕС, що враховують у розрахунку коефіцієнта несинусоїдальності кривій напруги основної мережі – 6,3 кВ і розподільної власних потреб – 0,4 кВ наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Розрахункові дані елементів ЕЕС

Генератори (основні джерела)	
Кількість генераторів	4
Повна номінальна потужність, (кВА)	9333
Сверхпереходна реактивність по поздовжній осі (в.о.)	0,168
Сверхпереходна реактивність по поперечній осі (в.о.)	0,191
Номінальна напруга, (В)	6300
Трансформатори живлення ГРК типу Azipod	
Кількість	4
Повна потужність, (кВА)	4320

Номинальна напруга первинної обмотки, (В)	6300
Номинальна напруга вторинних обмоток, (В)	1728...
	1738
Напруга короткого замикання U_k , (%)	8,0
Зрушення фаз (ел.град.)	$\pm 7,5$
Трансформатори живлення ГРК типу Azipod	
Кількість	4
Повна потужність, (кВА)	4320
Номинальна напруга первинної обмотки, (В)	6300
Номинальна напруга вторинних обмоток, (В)	1728...
	1738
Напруга короткого замикання U_k , (%)	8,0
Зрушення фаз (ел.град.)	$\pm 7,5$
Трансформатор живлення лінійного ГЕД	
Кількість	1
Повна потужність, (кВА)	115000
Номинальна напруга первинної обмотки, (В)	6300
Номинальна напруга вторинних обмоток, (В)	1669 ... 1679
Напруга короткого замикання U_k , (%)	8,0
Кількість	1
Повна потужність, (кВА)	115000
Трансформатор живлення мережі власних потреб	
Кількість	1
Повна потужність, (кВА)	4375
Номинальна напруга первинної обмотки, (В)	6300
Номинальна напруга вторинної обмотки, (В)	400
Напруга короткого замикання U_k , (%)	8,0
Кількість	1
Повна потужність, (кВА)	4375

Таблиця 3.2. Дані двигунів систем електричного руху

Кількість	3
Вихідна потужність, (кВА)	2x7500 1x10000
Пульсність систем електричного руху	2x24 1x12
Кількість	3

3.3. Еквівалентування параметрів основних компонентів ЕЕС

Для проведення розрахунків коефіцієнта несинусоїдальності форми кривої напруги вихідні дані (наведені вище) повинні бути перетворені до нормалізованого виду.

Вихідні дані при перетворенні до розрахункових параметрів були виражені в безрозмірних відносних одиницях системи, базисні величини якої і їхні розрахункові вираження наведені нижче.

Еквівалентування основних джерел електроенергії виконано для двох основних режимів:

$$S_{\text{баз}} = S_{\text{ном.г}} \times N;$$

$$\text{Для повного завантаження генераторів: } S_{\text{баз1}} = 9333 \times 4 = 37332 \text{ кВА};$$

$$\text{Для часткового завантаження (працюють дві машини):}$$

$$S_{\text{баз2}} = 9333 \times 2 = 18666 \text{ кВА};$$

$$U_{\text{баз}} = U_{\text{ном}} = 6300 \text{ В};$$

$$Z_{\text{баз}} = U_n^2 / S_{\text{баз}}.$$

Для повного завантаження генераторів: $Z_{\text{баз1}} = 1,063 \text{ Ом}$; Для часткового (працюють дві машини): $Z_{\text{баз2}} = 2,126 \text{ Ом}$; Для повного завантаження генераторів:

$$x''_{de} = 1 / \sum (1 / x''_{dn}) \times S_{\text{ном.г}} / S_{\text{баз}} = 0,168 \text{ в.о.}$$

Для часткового завантаження (працюють дві машини):

$$x''_{qe} = 1 / \sum (1 / x''_{qn}) \times S_{\text{ном.г}} / S_{\text{баз}} = 0,191 \text{ в.о.}$$

Розрахунковий опір генераторів ЕЕС у режимі повного завантаження:

$$x''_{ze} = (x''_{de} + x''_{qe})/2 = 0,179 \text{ в.о. (0,19 Ом)}.$$

Розрахунковий опір генераторів ЕЕС у режимі використання двох генераторів (часткова – половинне завантаження):

$$x''_{ze} = (x''_{de} + x''_{qe})/2 = 0,179 \text{ в.о. (0,38 Ом)}.$$

Трансформатори електропривода основних рушіїв криголама можуть бути еквівалентовані у дві групи по пульсності випрямлення вхідної напруги, тоді модель електричного руху повинна складатися із двох агрегатів:

- трансформатор живлення ГРК типу Azipod повною потужністю $S=4.4320=17280$ кВА при активному навантаженні 15 МВт;
- трансформатор живлення лінійного ГЕД повною потужністю 11500кВА при активному навантаженні 10 МВт.

3.4. Моделювання основних режимів роботи ЕЕС

Використовуючи отримані дані по еквівалентуванню однотипних вузлів ЕЕС у графічному редакторі MATLAB реалізована модель електростанції й промодельовані два основних режими роботи[7]:

1. Повне завантаження системи в складі:

- чотири генератори по 9333 кВА;
- два 24-пульсних пропульсивних рушіїв по 7500 кВт кожний;
- один 12-пульсний основний пропульсивний рушій потужністю 10МВт;
- один розподільний трансформатор повною потужністю 4375 кВА, навантажений на мережу власних потреб на 2500 кВт.

2. Частковий, (половинне завантаження системи) у складі:

- два генератори по 9333 кВА;
- два 24-пульсних пропульсивних рушіїв по 5425 кВт кожний;
- один 12-пульсний основний пропульсивний рушій потужністю 1075 кВт;

- один розподільний трансформатор повною потужністю 4375 кВА, навантажений на мережу власних потреб на 2500 кВт.

У кожному з режимів визначався THD (коефіцієнт несинусоїдальності форми кривої напруги) для головних шин - 6,3 кВ і розподільної мережі - шин 0,4 кВ. Як приклад на рис. 3.2 і рис. 3.3 наведені результати моделювання основного режиму роботи ЕЕС криголама.

Значення THD склали:

Режими роботи ЕЕС криголама	Шини 6,3кВ, (%)	Шини 0,4кВ, (%)
Повне завантаження ЕЕС	3,03	2,98
Половинне завантаження ЕЕС	3,54	3,09

Точність отриманих результатів становить $\pm 5\%$ THD.

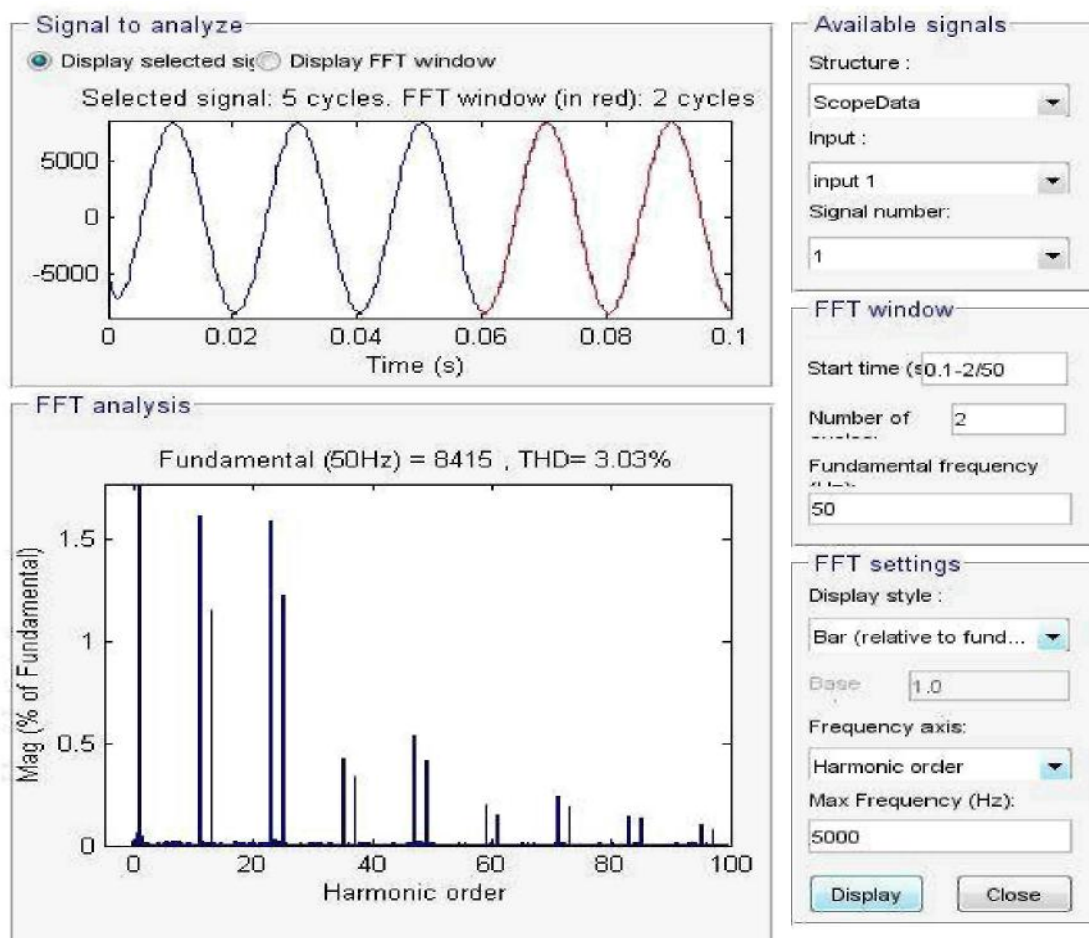


Рис 3.2. Напруга на шинах 6,3 кВ при повному завантаженні ЕЕС

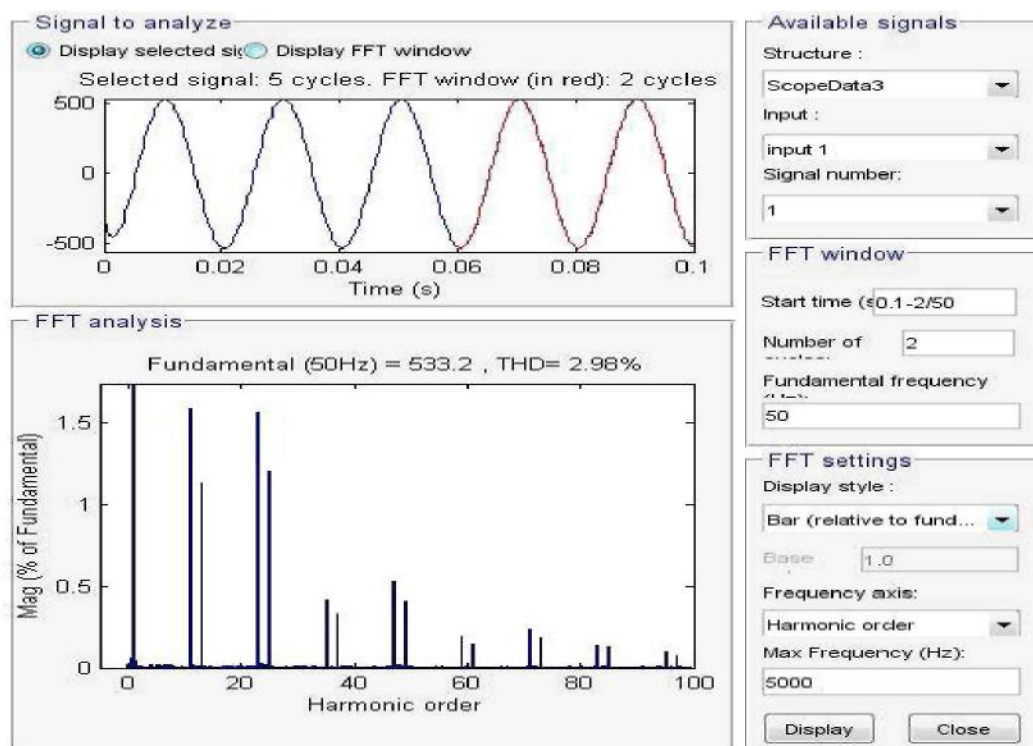


Рис 3.3. Напряга на шинах 0,4 кВ при повному завантаженні ЕЕС

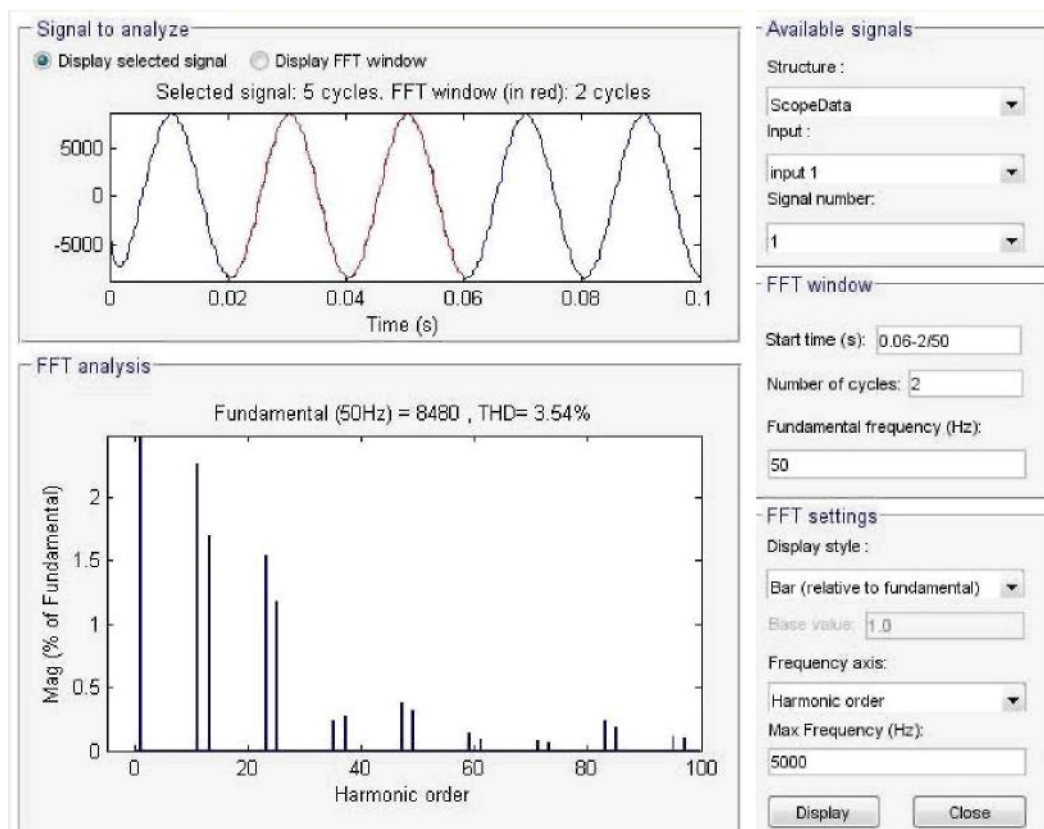


Рис 3.4. Напряга на шинах 6,3 кВ при половинному завантаженні ЕЕС

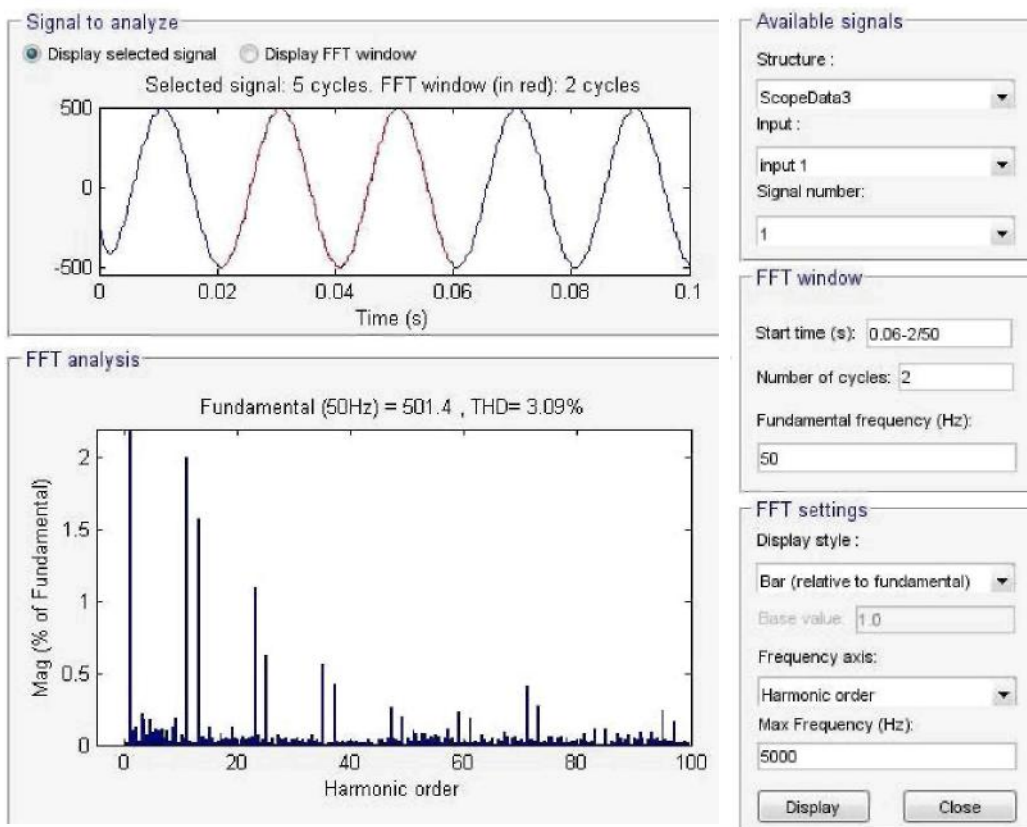


Рис 3.5. Напруга на шинах 0,4 кВ при половинному завантаженні ЕЕС

Виводи

У всіх режимах роботи ЕЕС коефіцієнти несинусоїдальності форми кривої напруги як на головних шинах - 6,3 кВ, так і на розподільних власних потреб - 0,4 кВ не перевершують 10%, що задовольняє вимогам Правил класифікації й побудови морських суден РСУ.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХУ ЗМІННОГО СТРУМУ У РЕЖИМІ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ

4.1. Пуск ГЕД змінного струму

Синхронні ГЕД пускаються при незбуджених генераторах замиканням вимикачів кола головного струму з наступним включенням чи поступовим підвищенням струму збудження генераторів. Відбувається асинхронний пуск. Великий пусковий струм викликає сильне зниження напруги генератора, що при номінальному збудженні значно менше величини, обумовленою залежністю $U = U_n f I^*$. Внаслідок цього асинхронний момент може виявитися менше моменту опору при пуску з місця. Для збільшення пускового моменту в період усього пуску здійснюється форсування збудження генератора. У ГЕУ допускається збільшення струму збудження генераторів у 3-5 разів стосовно струму холостого ходу.

На рис. 4.1 крива 1 – механічна асинхронна характеристика ГЕД при номінальному струмі збудження, крива 2 – при форсуванні збудження, крива 3 – швартовна характеристика.

Коли ГЕД розженеться до під синхронної швидкості, включають обмотку збудження ГЕД і останній під дією синхронізуючого моменту входить у синхронізм.

Практикою встановлено, що для надійного входження синхронного двигуна в синхронізм наприкінці асинхронного пуску *підсинхронний* чи *вхідний* момент повинні перевищувати на 25% момент опору.

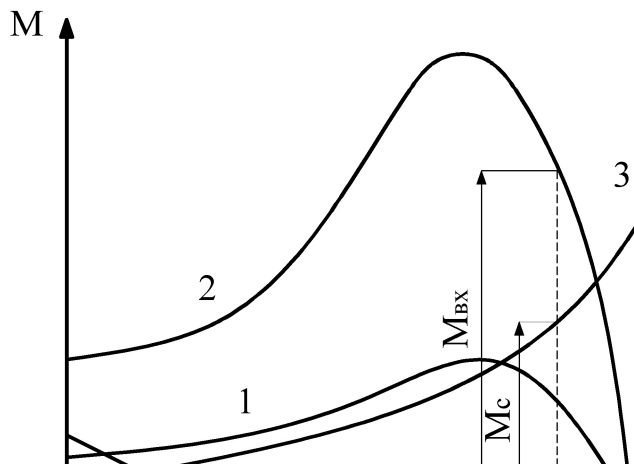


Рис. 4.1. Пуск ГЕД змінного струму

Підсинхронним (вхідним моментом) називається асинхронний момент наприкінці асинхронного пуску при *абсолютному ковзанні 5%*, абсолютне ковзання при входженні в синхронізм дорівнює

$$S_{\dot{a}.\dot{a}\dot{o}} = \frac{n_1 - n}{n_{1i}} = 0.05 ,$$

де n_{1H} – синхронна частота обертання двигуна при номінальній частоті.

А відносне ковзання, що відповідає підсинхронній швидкості, буде дорівнювати

$$S_{\dot{a}\dot{o}} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

чи

$$S_{\dot{a}\dot{o}} = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot \frac{n_{1i}}{n_{1i}} = \frac{n_1 - n}{n_{1i}} \cdot \frac{1}{n_1/n_{1i}} = \frac{S_{\dot{a}.\dot{a}\dot{o}}}{n_1/n_{1i}} = \frac{S_{\dot{a}.\dot{a}\dot{o}}}{f_{1*}} .$$

Виходить, при номінальній частоті 50 Гц і частоті запуску 25 Гц

$$S_{\dot{a}\dot{o}} = \frac{0.05}{25/50} = \frac{0.05}{0.5} = 0.1 .$$

Перезбудження генератора повинне бути таким, щоб при частоті ковзання ротора $f_2 = f_{1H} \cdot S_{a.BX} = 2.5$ Гц (чи $S_{a.BX} = 0,05$) і частоті пуску 2,5 Гц вхідний момент перевищував момент опору на 25 %.

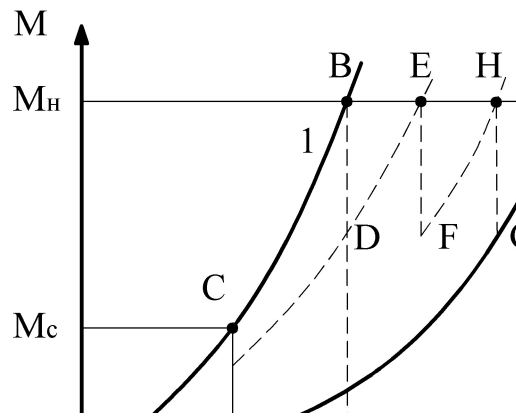


Рис.4.2. Розгін ГЕД змінного струму

У більшості випадків виявляється, що не тільки при номінальній частоті, але і при частоті, що відповідає швидкості обертання $n_{ш}$ на швартовній характеристиці (рис. 4.2), необхідний вхідний момент значно менше моменту обертання, що електродвигун може розвинути при найбільшому перезбудженні генератора. Тому пуск виробляється при зниженій частоті, обумовленою найменшою стійкою швидкістю теплового двигуна.

При частоті пуску f_n , після синхронізації ГЕД обертається зі швидкістю $n_{п}$ і гребний гвинт працює в крапці С. Подальше збільшення швидкості проводиться підвищенням частоти. Швидко збільшують швидкість обертання теплових двигунів і доводять частоту до $f_{ш}$. Гвинт працює в крапці В. Далі в міру розгону судна, поступово підвищуючи частоту, збільшують швидкість ГЕД так, щоб гвинт послідовно проходив крапки В, D, E, F, H, G, A. Частоти повинні збільшуватися плавно, щоб машини не перевантажувалися по моменті і щоб ГЕД не випав із синхронізму.

Послідовність операцій при пуску ГЕД від одного генератора така:

1. Пускається турбо- чи дизель-генератор і розганяється до найменшої стійкої швидкості;
2. При незбудженому генераторі включаються апарати кола головного струму;
3. Включається обмотка збудження або генератора, або збудника генератора з необхідною форсировкою;

4. Після досягнення ГЕД підсинхронної швидкості подається живлення на його обмотку збудження;

5. Після входження ГЕД у синхронізм знижується збудження генератора.

Струм збудження генератора і ГЕД встановлюється по величині навантаження обох машин для зниженої частоти $U \sim f_l$ і $\cos \varphi = 1$.

Подальший розгін ГЕД виробляється підвищенням частоти і струму збудження генератора і ГЕД відповідно до збільшення навантаження.

При пуску ГЕД від паралельно працюючих генераторів, наприклад у ДЕГУ, процес пуску ускладнюється. Після розгону дизель-генераторів проводиться синхронізація їх при зниженій частоті і вирівнювання ЕРС таким чином, щоб між генераторами були відсутні зрівняльні струми.

Після синхронізації виключається збудження генераторів і при напрузі, рівній нулю, включається ГЕД. Потім виконуються операції, зазначені в п. 2 - 5.

4.2. Реверс ГЕД змінного струму

При реверсі, як і при пуску, ГЕД працює в асинхронному режимі при великих струмах у головному колі, унаслідок чого напруга генератора сильно знижується, а разом з ним зменшується і момент, що розвивається ГЕД в асинхронному режимі.

Існують два способи реверса ГЕД:

1. ГЕД включається в режим противключення як звичайний асинхронний двигун;

2. ГЕД включається попередньо в режим динамічного гальмування за допомогою опорів, що підключаються до затисків статора; потім ГЕД зупиняється механічним гальмом і пускається в протилежному напрямку; при цьому відбувається гальмування судна і знижується швидкість.

Реверс ГЕД по 1-му способу

На рис. 4.3 показані характеристики гребного гвинта 1 і ГЕД 2 при реверсі переключенням у режим противключення ГЕД.

Реверс здійснюється наступним шляхом: відключається збудження генераторів і ГЕД, знижується частота обертання теплових двигунів до найменшої стійкої, змінюється черговість проходження фаз головного кола і ГЕД пускається в зворотному напрямку включенням збудження генераторів.

За час зняття збудження генераторів гвинт знижує частоту обертання до n_0 і працює в режимі гідравлічної турбіни. Поле статора ГЕД обертається в іншу сторону з частотою n_1 , а ротор ГЕД обертається разом із гребним гвинтом з частотою n_0 . Ковзання ГЕД виявляється рівним приблизно двом. Момент, що розвивається ГЕД, протилежний і більше моменту обертання гвинта. Завдяки цьому гвинт гальмується і його частота обертання знижується до частоти, обумовленою крапкою B . Подальше гальмування гребного гвинта неможливо доти, поки судно не знизить свою швидкість. Зі зменшенням швидкості ходу судна гвинт переходить на реверсивну характеристику 3. Гальмовий момент ГЕД стане більше моменту, що розвивається гребним гвинтом, внаслідок чого гвинт зупиниться і під впливом надлишкового моменту ГЕД почне розганятися в зворотному напрямку до підсинхронної частоти обертання. При такому реверсі час реверса затягується, що може привести до перегріву електричних машин і несвоєчасному виконанню реверса.

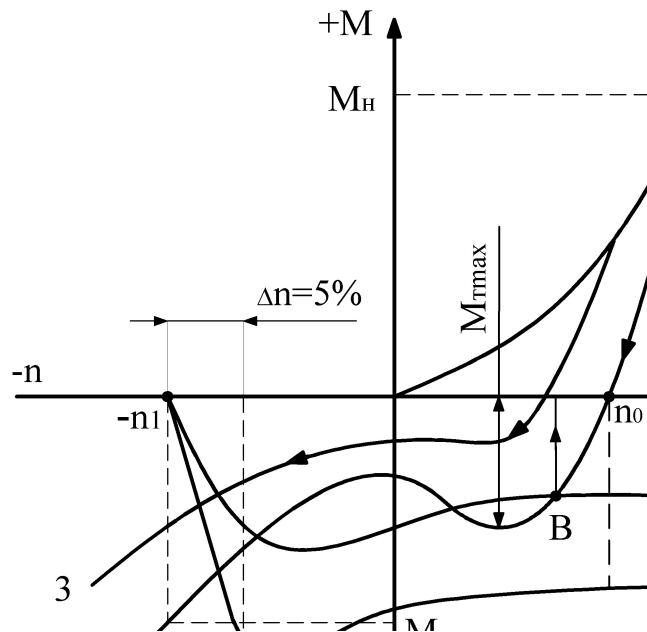


Рис. 4.3. Реверс ГЕД змінного струму проти включенням

Для швидкого реверсування необхідно, щоб гальмовий момент ГЕД перевищував максимальний обертаючий момент гребного гвинта M_{gmax} у режимі гідравлічної турбіни. З цією метою струм збудження генератора збільшують у більшому ступені, чим при пуску. Механічна характеристика ГЕД при форсировці збудження генераторів крива 4 на рис. 3.

Реверс ГЕД по 2-му способу

Для здійснення швидкого і надійного реверса застосовують динамічне гальмування ГЕД. У цьому випадку після зняття збудження ГЕД відключається від шин генераторів і включається на трифазний опір, з'єднаний зіркою і рівне $0.15 \cdot z_n$ (z_n - номінальні опори двигуна), після чого знову включається збудження ГЕД. Останній працює як синхронний генератор зі змінною частотою обертання. Гребний гвинт у режимі гідравлічної турбіни в інтервалі від n_0 до $n=0$ обертає ротор ГЕД. Поле ротора перетинає стрижні обмотки статора і наводить у них ЕРС, що створює струм у гальмовому опорі, що є навантаженням для ГЕД, що працює в генераторному режимі. На валу ГЕД створюється гальмовий генераторний момент, залежність якого від частоти обертання представлена кривою 2 на рис. 4.4.

Під дією цього гальмового моменту гребний гвинт знижує частоту обертання до мінімальної (крапка B), при якій обертаючий момент гребного гвинта дорівнює гальмовому генераторному моменту ГЕД, і подальше гальмування стає неможливим. Частота обертання $n_{\min}$ складає усього кілька відсотків від номінальної, тому гребний гвинт зупиняється механічним гальмом (стрічковим чи колодковою), що включається електромагнітом.

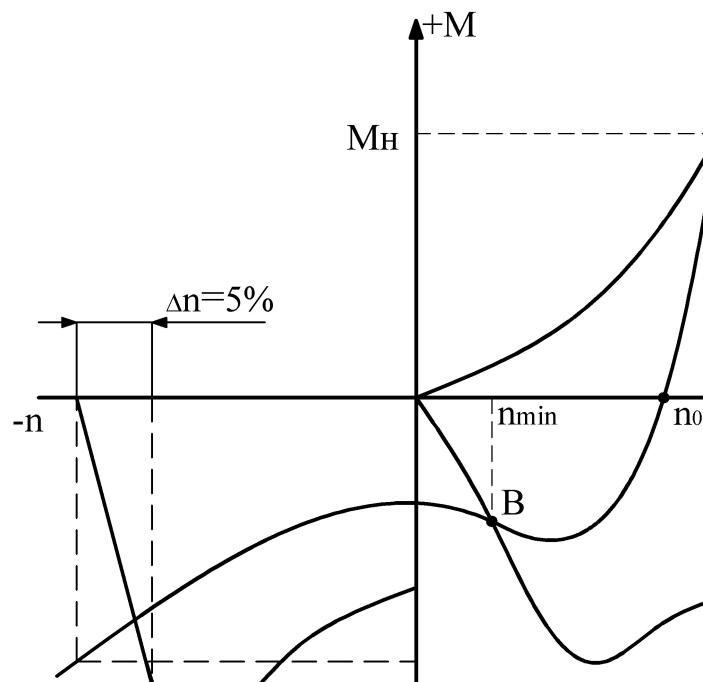


Рис. 4.4. Реверс ГЕД змінного струму динамічним гальмуванням

Після зупинки гребного гвинта виконується синхронізація генераторів, відключається збудження генераторів і ГЕД, відключається опір динамічного гальмування, змінюється порядок проходження фаз реверсивним перемикачем і включається ГЕД. При цьому одночасно звільняється механічне гальмо. Відбувається пуск ГЕД у зворотну сторону при форсованому порушенні генераторів по асинхронній характеристиці (крива 3).

Досвід показує, що швидкий реверс ГЕД приводить до вібрації кормової частини судна і появи перенапруг у корпусі. Тому там, де можна, переважніше застосовувати реверс ГЕД по першому способі. При цьому відпадає необхідність в опорах динамічного гальмування.

При реверсі ГЕД виконуються наступні операції:

Перший спосіб

1. Виключається збудження генераторів і ГЕД, виключається реверсивний перемикач і знижується швидкість обертання теплових двигунів до мінімальної стійкої, після чого виконується синхронізація генераторів і виключається їхнє збудження;
2. Включаються реверсивний перемикач у положення «Хід назад» і збудження генераторів з необхідної форсировки;
3. Після зміни напрямку обертання ГЕД і розгону його до підсинхронної швидкості в зворотному напрямку включається його збудження;
4. Після входження ГЕД у синхронізм знижується струм збудження генераторів до номінальної величини;
5. Подальший розгін ГЕД, якщо в цьому є потреба, виробляється, як і при пуску, поступовим підвищенням швидкості теплових двигунів.

Другий спосіб:

1. Знімається збудження генераторів і ГЕД, виключається реверсивний перемикач, знижується швидкість обертання теплових двигунів до мінімально стійкої, виробляється синхронізація генераторів і виключається їхнє збудження;
2. Включається обмотка статора ГЕД на опір динамічного гальмування і подається живлення в його обмотку збудження;
3. При досягненні ГЕД мінімальної швидкості обертання включається електромагніт механічного гальма;
4. Відключається опір динамічного гальмування і знімається збудження ГЕД;
5. Включається реверсивний перемикач у положення «Хід назад», одночасно виключається електромагніт механічного гальма і подається збудження генераторів з форсировкою;
6. Після досягнення ГЕД підсинхронної швидкості в протилежному напрямку включається його обмотка збудження;

7. Після входження ГЕД у синхронізм струм збудження генераторів знижується до номінальної величини;

8. Подальше збільшення частоти обертання ГЕД досягається поступовим підвищенням частоти обертання теплових двигунів.

4.3. Комп'ютерне моделювання процесу пуску ГЕД

Об'єм роботи при моделюванні:

1. Визначення умов пуску та параметрів схеми.
2. Складання розрахункової моделі пуску.
3. Проведення комп'ютерного моделювання.
4. Критичний аналіз отриманих перехідних характеристик.

До початку моделювання обирається схема пуску двигуна змінного струму з наступних:

1. Синхронний генератор (СГ) – синхронний двигун (СД)
2. СГ – випрямляч – інвертор – СД
3. СГ – асинхронний двигун (АД)
4. СГ – випрямляч – інвертор – АД.

Розглянемо розрахунок процесу пуску гребного двигуна в схемі СГ –СД. У відповідності до існуючих методів пуску можлива наступна послідовність пускових операцій:

- незбуджений СГ приєднується до незбудженого СД;
- регулятор первинного двигуна СГ встановлюється на найменшу можливу стійку частоту обертання ($n_{\text{пуск}} \approx 0,2 \dots 0,33 n_{\text{ном}}$)
- виконується форсування збудження СГ таким чином, щоб у сталому режимі напруга якоря СГ $U_{\text{пуск}}$ відповідала наступній тотожності (рекомендоване значення коефіцієнту $\alpha \approx 0,8$):

$$U_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}^{\alpha} = U_{\text{пуск}} / n_{\text{пуск}}^{\alpha} ;$$

- під дією асинхронного моменту виконується пуск СД

- коли частота обертання досягає підсинхронної частоти обертання, яка відрізняється від синхронної не більш ніж на 5%, включається збудження СД;
- під дією синхронізуючого моменту СД входить в синхронізм.

Припустимо, що за завданням необхідно розрахувати пуск СД потужністю 910 кВА та частотою обертання 50 об/хв. Для комп'ютерного моделювання скористаємося пакетом *Simulink*, який входить до складу програмного забезпечення *Mathlab*. Для того, щоб скористатися цим пакетом, у середовищі *Mathlab* відкриваємо вікно *Model (File / New)*, в якому збираємо розрахункову схему (рис. 4.5) з елементів, що знаходяться в бібліотеці, яка активується за наступною адресою *View/Library Browser*. Для з'єднання блоків моделі достатньо підвести курсор мишки до необхідного виходу, натиснути на ліву кнопку мишки і, утримуючи її, провести лінію до точки з'єднання.

В бібліотеці знаходиться велика кількість пакетів математичних моделей, але для складання розрахункової схеми достатньо двох: *Simulink* та *SimPowerSystem*.

Розглянемо функції, які виконують в розрахунковій схемі (рис. 4.5) моделі з цих пакетів:

1. Блок *Constant (Simulink / CommonlyUsedBlocks)* дозволяє ввести в модель наступні постійні величини: *Constant1* – задає стале значення напруги якоря СГ ($U_{\text{пуск}} = 0,3 U_{\text{ном}}$); *Constant2* – задає стале значення частоти обертання СГ ($n_{\text{пуск}} \approx 0,22 n_{\text{ном}}$).

2. Блоки *Add* та *Product (Simulink / MathOperations)* – виконують підсумовування та перемноження вхідних сигналів

3. Блок *MathFunction (Simulink / MathOperations)* – дозволяє виконати різні математичні функції від вхідного сигналу; в схемі обрана функція *sqrt*, яка визначає квадратний корінь і в даному випадку дозволяє розрахувати поточне значення напруги якоря СГ:

$$U = \sqrt{U_q^2 + U_d^2},$$

де U_d та U_q – подовжня та поперечна складова напруги якоря.

4. Блок *Gain (Simulink / MathOperations)* – виконує підсилення вхідного сигналу у визначену кількість разів k : *Gain1* ($k = -3,6$) – моделює зміну моменту опору на валу СД по швартовній характеристиці гребного гвинта ($M_{оп} = 3,6 \cdot \omega_d^2$ в.о., де ω_d – частота обертання валу СД у відносних одиницях); *Gain2* ($k = -20$) – моделює зміну механічного моменту на валу СГ ($M_{сг} = 20 \cdot (1 - \omega)$ в.о., де ω – частота обертання валу СГ у відносних одиницях); *Gain3* ($k = 0,3$) – моделює включення напруги збудження СД ($U_{фсд} = 0,3$ в.о.) при досягненні підсинхронної частоти обертання ($\omega_d = 0,21$ в.о.); *Gain4* ($k = -100$) – моделює регулювання напруги збудження СГ по відхиленню напруги якоря ($U_{фсг} = 100 \cdot (0,3 - U)$, де U – поточне значення напруги якоря СГ).

5. Блок *Relay (Simulink / Discontinuities)* – реалізує релейний блок та при досягненні частоти обертання СД $\omega_d = 0,21$ в.о. змінює значення вихідної величини з нуля на одиницю (в блоці встановлені наступні параметри: *SwitchOnPoint* – 0,21; *SwitchOffPoint* – 0; *OutputThenOn* – 1; *OutputThenOff* – 0).

6. Блок *Saturation (Simulink / Discontinuities)* – обмежує значення вхідної величини: *Saturation1* – напруга збудження СГ може змінюватися в межах 0...8 в.о. (*UpperLimit* – 8, *LowerLimit* – 0); *Saturation1* – механічний момент на валу СГ може змінюватися в межах 0...2 в.о. (*UpperLimit* – 2, *LowerLimit* – 0).

7. Блок *Scope (Simulink / CommonlyUsedBlocks)* – осцилограф, що дозволяє зафіксувати зміну у часі наступних величин: *Scope1* – електромагнітного моменту двигуна; *Scope2* – струму фази A ; *Scope3* – моменту підключення напруги збудження СД; *Scope4* – лінійної напруги BC обмотки якоря; *Scope5* – відносного значення діючої напруги якоря; *Scope6* – частоти обертання СГ; *Scope7* – частоти обертання СД.

8. Блок *VoltageMeasurement (SimPowerSystem / Measurements)* – датчик напруги.

9. Блок *Three-PhaseSeriesRLCBranch (SimPowerSystem / Elements)* – трифазне статичне навантаження в схемі необхідне для забезпечення умов розрахунку, тому що синхронні машини включені послідовно і моделюються в

системі, як джерела струму (параметри блока ResistanceR – 1000 Ом; InductanceL – 0 Гн; CapacitanceC – 0,000001 Ф).

10. SynchronousMachinePuStandard (SimPowerSystem / Machines) – математична модель синхронної машини у відносних одиницях: SynchronousMachinePuStandard 1 – синхронний генератор (механічний момент на валу позитивний); SynchronousMachinePuStandard 2 – синхронний двигун (механічний момент від'ємний). Машину необхідної потужності обирають з каталогу існуючих моделей (PresetModel) або задають свої параметри. Для СД в нижній графі Init.Cond. виставляють наступні вихідні данні [-99.9, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0], а для СГ – [-78, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]. Перше число характеризує у відсотках відмінність початкової частоти обертання машини від номінальної, тому початкова швидкість СД приблизно дорівнює 0, а початкова швидкість СГ – дорівнює 0,22 в.о. Останні числа характеризують початкове значення напруги збудження, і нуль в цій графі говорить про те, що машини на початок моделювання були незбудженні. Вхід Pm призначений для вводу значення механічного моменту на валу машини, а вхід Vf – для вводу значення напруги збудження. Вихід m дозволяє отримати чисельні значення режимних параметрів машин за допомогою блоку BusSelector (Simulink / CommonlyUsedBlocks).

Для моделювання необхідно встановити параметри розрахунку. Це можна зробити через опцію Simulation / ConfigurationParameters, в якій треба встановити наступні параметри в розділі Solver: StartTime – 0; StopTime – 4; Solver – ode23tb; RelativeTolerance – 0,0001; Type – Variable-step; ZeroCrossingControl – UseLocalSettings; інші параметри – auto. В цьому випадку при натисненні Start в опції Simulation будуть розраховані перехідні процеси, що протікають в моделі у продовж 4 секунд.

Для більш детального ознайомлення з можливостями пакету Simulink, особливостями роботи з ним та його математичними моделями рекомендується ознайомитися з розділом Help.

4.4. Формування моделі гребної установки

Моделювання гребної електричної установки представляє собою складну задачу як з точки зору формування коректної структури так і з боку складності обчислень, що проводяться під час моделювання.

Складні моделі елементів та висока частота виконання операцій устаткуванням установки зумовлює досить низьку швидкість проведення розрахунків. Причому складність моделі обмежує не лише швидкість розрахунків, а й тривалість імітованого процесу. Тому під час створення моделі паралельно має вирішуватися задача приведення її до стану, який сприятиме скороченню часу моделювання без істотних втрат точності результатів. Це може бути досягнуто спрощенням моделі, раціональним вибором функціональних елементів та переходом до дискретного моделювання з фіксованим шагом.

Мінімальна частота дискретизації моделі ГЕУ з АІН обмежується частотою комутації вентилів інвертору. Зменшення частоти комутації при моделюванні призводить до погіршення форм сигналів та змушує збільшувати ємність компенсуючого конденсатору. В моделі використовувалася частота комутації вентилів 4000 Гц, тому вже при частоті дискретизації 10^{-5} с стають помітні відхилення від коректних результатів. Для наданої моделі ГЕУ використовувалося дискретне моделювання з фіксованим шагом $2 \cdot 10^{-6}$ с

Бібліотеки Simulink містять певну кількість блоків, що застосовують до прийнятого сигналу операції, які описуються у окремій підпрограмі. До них відносяться блоки обчислення діючих значень вхідного сигналу, виділення певних гармонік та частина вимірювальних блоків. За високої частоти дискретизації звертання на кожному шагу до такої підпрограми призводить до значного уповільнення процесу. Це визначає необхідність пошуку альтернативних методів вимірювання параметрів. Так, замість отримання струму двигуна на основі миттєвих значень, що вимірюються «амперметром», він визначався з величин складових за повздовжньою та поперечною вісями.

Гребна електрична установка судна може бути розділена на дві рівні

частини. Якщо предметом досліджень не є саме сумісна робота цих частин, достатньо обмежитись розглядом половини установки.

В ГЕУ зі статичними перетворювачами використовуються генератори, обладнані автоматичними регуляторами збудження для підтримки номінального значення напруги. Дизель-генераторний агрегат як об'єкт моделювання являє собою складну структуру, робота якої спрямована на підтримання номінального значення напруги та частоти струму на щиті електричного руху при зміні навантаження.

При проведенні розрахунків гребних установок зі статичними перетворювачами – як змінно-постійного, так і змінно-змінного струму – напруга генераторів вважається відомою сталою величиною, а струм генераторів визначається навантаженням. Отже, під час моделювання замість складної моделі дизель-генератору можна використовувати джерело ЕРС з внутрішніми опорами $r_{\phi 2}$ та $x_{\phi 2}$.

При проведенні розрахунків роботи гребних електричних установок зі статичними перетворювачами сукупність загальносуднових споживачів приводиться до єдиного активно-індуктивного навантаження. Аналогічне спрощення проводиться і при моделюванні роботи ГЕУ. З огляду на те, що моделюється половина установки, потужність загальносуднових споживачів теж має бути розділена навпіл.

Найбільшу цікавість представляє собою система «статичний перетворювач – гребний двигун». Використання некерованого випрямляча зумовлює сталість напруги в ланці постійного струму. Проведенням розрахунків гребної установки було визначено, що відхилення напруги у різноманітних режимах від напруги у номінальному режимі не перевищує 6 %. Це дозволяє обмежитись моделюванням системи «інвертор – гребний двигун» без значної зміни результатів. Однак при цьому неможлива оцінка форми кривих струму та напруги на ЩЕР.

Генератор імпульсів за законом синусоїдальної ШІМ для керування роботою інвертору входить до бібліотеки стандартних блоків. Але він призначений лише для роботи з фіксованою частотою на виході інвертору та

фіксованим коефіцієнтом модуляції. Для отримання можливості зміни напруги та частоти живлення двигуна проводиться зовнішнє формування синусоїдальних сигналів які використовуються для подальших операцій. На рис. 4.6 наведена структура джерела синусоїдальних сигналів, що дає змогу керувати двигуном за законом

$$\frac{U}{f^{1,2}} = const$$

Вхідним сигналом для цього блоку слугує бажана частота обертання синхронного двигуна ω_m^* у відносних одиницях.

При моделюванні не враховувалися певні динамічні особливості IGBT-модулів, а саме час «затягування» та час «хвоста». Вони відіграють велику роль при наближенні коефіцієнта модуляції до одиниці. За нижчих значеннях μ ними можна зневажати для підвищення швидкості моделювання.

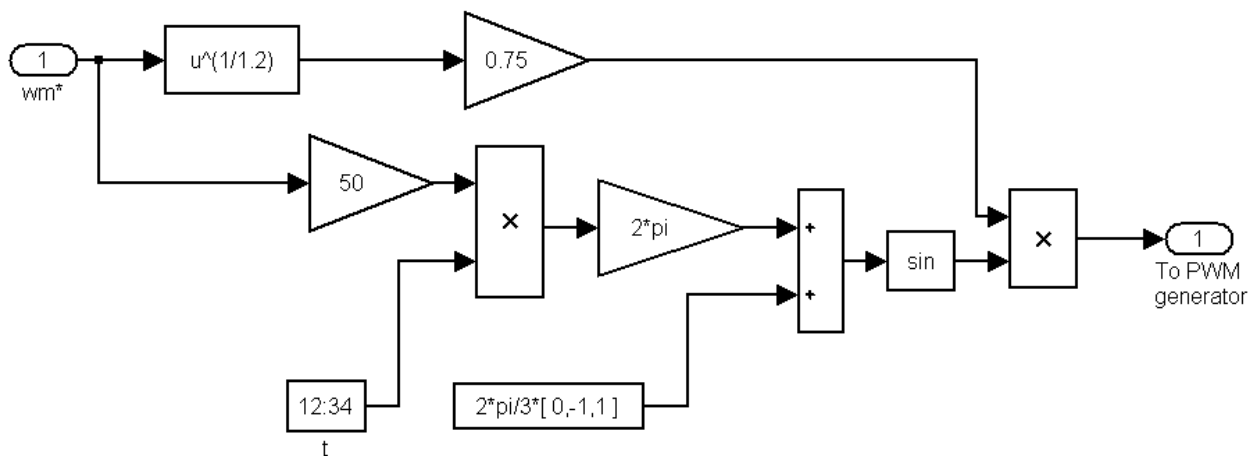


Рис. 4.6. Внутрішня структура блоку скалярного керування.

Зміна моменту навантаження на валу гребного двигуна визначається залежністю від швидкості обертання валу. Для цього використовується блок, що реалізує залежність

$$P_m = -\omega^3$$

Знак «мінус» вказує на те, що потужність відбирається в ГЕД.

Структура моделі гребної установки наведена на рис. 4.7.

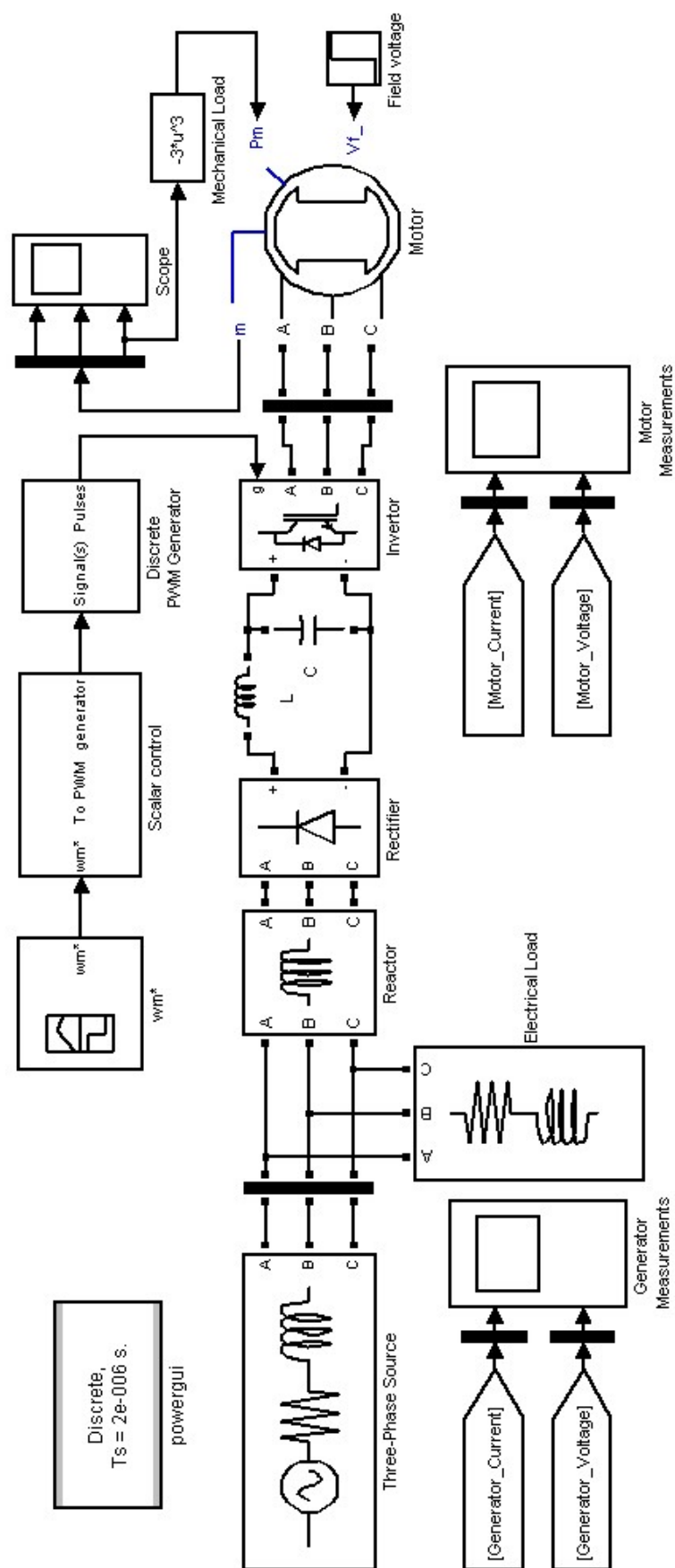


Рис. 4.7. Модель гребної електричної установки в програмному модулі Simulink

4.5. Визначення параметрів моделі

При створенні моделей на основі готових функціональних блоків достатньо оперувати лише невеликою кількістю основних «зовнішніх» параметрів моделі, більшість з яких попередньо відома. Внутрішні параметри моделей елементів визначаються автоматично.

Для проведення моделювання необхідно вказати основні параметри гребного двигуна: P_n , U_n , f_n , r_1 , x_d , x'_d , x''_d , x_q , x'_q , x''_q , x_f , T_d^i , T_d'' , T_q'' . Не усі з вказаних параметрів наводяться у переліку номінальних параметрів ГЕД, отже виникає необхідність розрахунку їх значень.

Індуктивний опір обмотки статора за повздовжньою віссю

$$x_d = x_1 + x_{ad} = 0,142 + 0,928 = 1,07.$$

Індуктивний опір обмотки статора за поперечною віссю

$$x_q = x_1 + x_{aq} = 0,142 + 0,558 = 0,7.$$

Індуктивний опір демпферної обмотки за повздовжньою віссю

$$x_{rd} = x_{ad} + x_{rds} = 0,928 + 0,14 = 1,068$$

Індуктивний опір демпферної обмотки за поперечною віссю

$$x_{rq} = x_{aq} + x_{rqs} = 0,558 + 0,112 = 0,67.$$

Індуктивний опір обмотки збудження

$$x_f = x_{fs} + x_{ad} = 0,322 + 0,928 = 1,25.$$

Перехідний індуктивний опір обмотки статора за повздовжньою віссю

$$x'_d = x_1 + \frac{x_{ad} \cdot x_{fs}}{x_{ad} + x_{fs}} = 0,142 + \frac{0,928 \cdot 0,322}{0,928 + 0,322} = 0,381.$$

Надперехідний індуктивний опір обмотки статора за повздовжньою віссю

$$x''_d = x_1 + \frac{x_{ad} \cdot (x'_d - x_1)}{x_{rd} + x'_d - x_1} = 0,142 + \frac{0,928 \cdot (0,381 - 0,142)}{1,068 + 0,381 - 0,142} = 0,312.$$

Перехідний індуктивний опір обмотки статора за поперечною віссю:

$$x'_q \approx x_q = 0,7$$

Надперехідний індуктивний опір обмотки статора за поперечною віссю

$$x_q'' = x_1 + \frac{x_{aq} \cdot x_{fs}}{x_{aq} + x_{fs}} = 0,142 + \frac{0,558 \cdot 0,322}{0,558 + 0,322} = 0,446.$$

Стала часу обмотки збудження при розімкнених обмотці статора та демпферній обмотці:

$$T_{do} = \frac{x_f}{\omega \cdot r_f} = \frac{1,25}{314,2 \cdot 0,00366} = 1,087 \text{ с},$$

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,2$ рад/с – синхронна швидкість обертання.

Стала часу обмотки збудження при замкненій обмотці статора та розімкненій обмотці збудження

$$T_d' = T_{do} \cdot \frac{x_d^i}{x_d} = 1,087 \cdot \frac{0,381}{1,07} = 0,387 \text{ с}.$$

Стала часу демпферної обмотки за повздовжньою віссю при розімкненій обмотці статора та замкненій обмотці збудження

$$T_{do}'' = \frac{x_{ad} \cdot x_{fs} + x_{rd} \cdot x_f}{\omega \cdot r_{rd} \cdot x_f} = \frac{0,558 \cdot 0,322 + 1,068 \cdot 1,25}{314,2 \cdot 0,146 \cdot 1,25} = 0,022 \text{ с}.$$

Стала часу демпферної обмотки за повздовжньою віссю при замкнених обмотках збудження та статора

$$T_d'' = T_{do}'' \cdot \frac{x_d''}{x_d^i} = 0,022 \cdot \frac{0,312}{0,381} = 0,018 \text{ с}.$$

Стала часу демпферної обмотки за поперечною віссю при розімкнених обмотках статора та збудження

$$T_{rqo} = \frac{x_{rq}}{\omega \cdot r_{rq}} = \frac{0,67}{314,2 \cdot 0,185} = 0,015 \text{ с}.$$

Стала часу демпферної обмотки за поперечною віссю при короткозамкненій обмотці статора

$$T_q'' = T_{rqo} \cdot \frac{x_q''}{x_q} = 0,015 \cdot \frac{0,446}{0,7} = 0,009 \text{ с}.$$

Модель складається для половини установки та повинна враховувати роботу двох генераторів на половину загальносуднового навантаження, один

перетворювач та один синхронний двигун.

Замість дизель-генераторного агрегату використовується блок джерела трифазної напруги з внутрішніми опорами $r_{дж}$ та $x_{дж}$.

Активний внутрішній опір джерела напруги

$$r_{дж} = \frac{r_{фз}}{2} \cdot z_{бз} = \frac{0,00077}{2} \cdot 0,305 = 0,000118 \text{ Ом.}$$

Активний внутрішній опір джерела напруги

$$x_{дж} = \frac{x_{фз}}{2} = \frac{0,004}{2} = 0,002 \text{ Ом.}$$

Внутрішня індуктивність джерела напруги

$$L_{дж} = \frac{x_{дж}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,02}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 6,37 \cdot 10^{-5} \text{ Гн.}$$

Активна потужність загальноосуднових споживачів

$$P_{спож} = \frac{P_{сход}}{2} = \frac{480}{2} = 240 \text{ кВт.}$$

Реактивна потужність загальноосуднових споживачів

$$Q_{спож} = \frac{Q_{сход}}{2} = \frac{298}{2} = 149 \text{ кВАр.}$$

Коефіцієнт інерції

$$H_s = \frac{J \cdot \omega^2}{P_\partial} = \frac{5866 \cdot 19,635^2}{2000000} = 0,565 \text{ с,}$$

$$\text{де } \omega = \frac{\pi \cdot n_\partial}{30} = \frac{\pi \cdot 187,5}{30} = 19,635 \text{ рад/с.}$$

4.6. Результати моделювання роботи установки

Представлена модель призначена для проведення імітації пуску синхронного гребного двигуна при частоті 10 Гц. Пуск проводиться в асинхронному режимі. Після розгону двигуна по швартовній характеристиці до подсинхронної частоти на восьмій секунді на нього подається збудження.

Осцилограми, що були зафіксовані при проведенні пуску ГЕД наведені на рис. 4.8.

Тривалість перехідного процесу відповідає результатам осцилограм, зафіксованих для реальних суден під час ходових випробувань, що наведені у [3, 4].

Регістром судноплавства України передбачено забезпечення перевантажувальної здатності перетворювачів на рівні не менше 250 % від номінального струму на протязі 2 секунд. Отримані пускові характеристики не виходять за межі зазначеного діапазону

Також під час пуску фіксувалися миттєві значення струмів та напруги. На основі цих показників можна провести аналіз форми кривих.

Результати гармонічного аналізу форм кривих наведені на рис. 4.9 та рис. 4.10.

Поліпшенню гармонічного складу вихідного струму перетворювача сприяє підвищення частоти комутації силових вентилів інвертору. За несучої частоти 4 кГц вміст вищих гармонік у струмі ГЕД становить 1,69 %. Під час вибору ГЕД його номінальна потужність була обрана на 2 % більшою за розрахункову. Таким чином присутність вищих гармонік у струмі ГЕД не призводить до його перегріву.

Для зниження викривлень, що вносяться роботою перетворювача до суднової мережі використовується реактор індуктивністю 50 мГн. Було досягнуто значення викривлення форми струму на вході перетворювача на рівні 5,5 %.

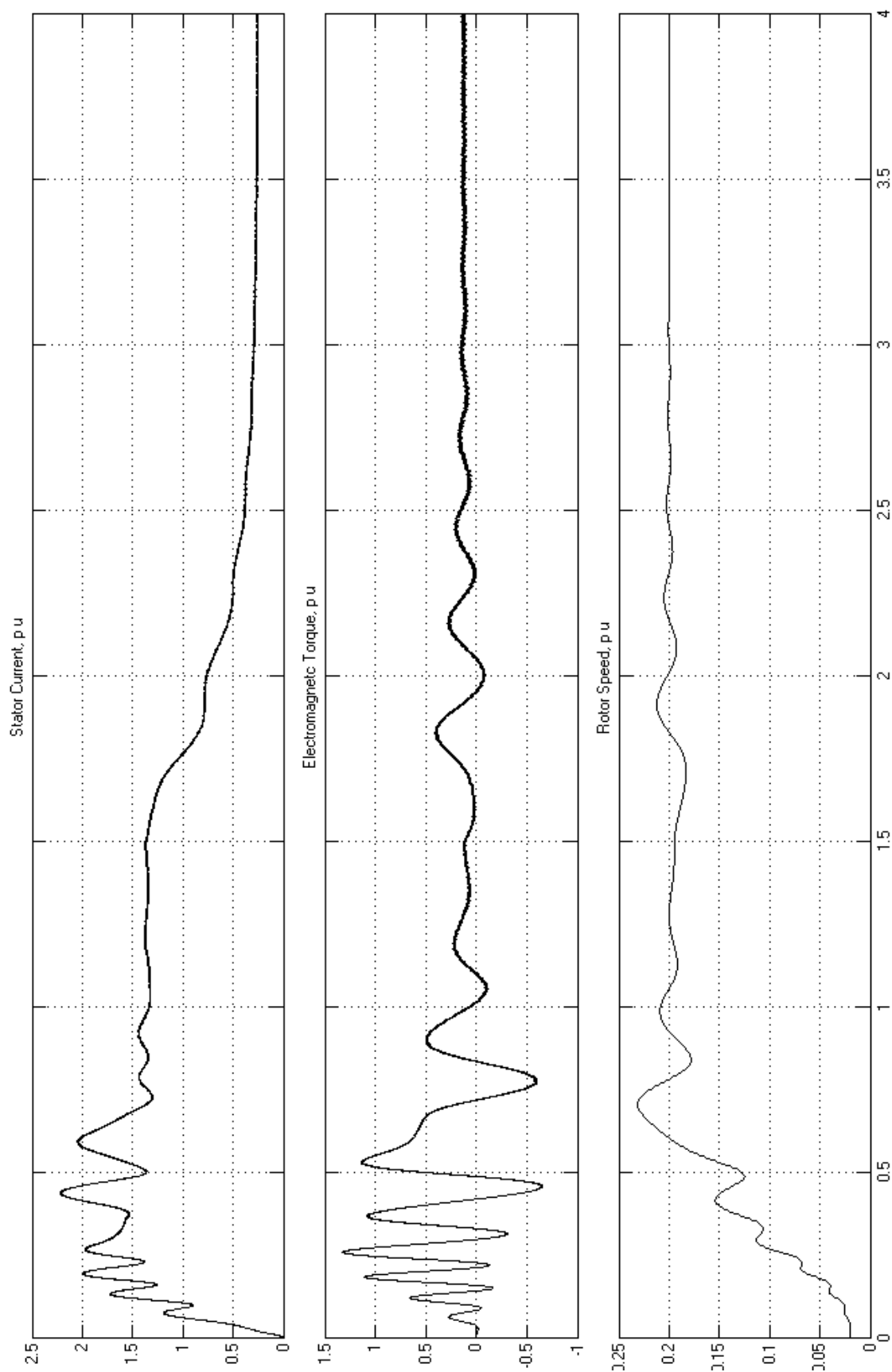


Рис. 4.8. Осцилограми струму ГЕД, електромагнітного моменту та швидкості при пуску на частоті 10 Гц

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Забруднення акваторії Світового океану та континентальних водойм здійснюється через три основні джерела:

- стічні води промисловості;
- стоки сільськогосподарських виробництв;
- стоки населених пунктів.

Для України особливо важливим є стан Чорного моря, яке є майже повністю «закритим» водоймищем» і тому особливо чутливим до забруднення. За останні десятиріччя надходження до Чорного моря з територій України, Росії, Грузії та Туреччини солей важких металів, пестицидів, залишкової кількості добрив, миючих речовин настільки великі, що чітко реєструється забруднення іхтіофауни, зменшення вилову риби, а виловлена риба все частіше стає непридатною до вживання.

Особливістю Чорного моря є наявність глибоководної сірководневої зони, в якій можливе життя тільки анаеробних організмів. В останні роки з'явилася загроза підняття рівню сірководню до самого виходу його на поверхню. Зараз верхня межа сірководневої зони в центрі моря піднялася до позначки 1000 м. а у берегів – 300 м. Цей процес пов'язаний зі скидами в прибережні води великої кількості неокислених побутових відходів та нафти.

На сьогоднішній день забруднення водойм всіх типів стало таким сильним, що в багатьох з них можливості до самоочищення вичерпалися і розпочався процес незворотної деградації.

Істотну роль у забрудненні вод Світового океану відіграє водний транспорт. Тому при проектуванні нових суден чимало уваги слід приділяти заходам з зменшення викидів речовин, що призводять до погіршення екологічної ситуації.

5.1. Вплив водного транспорту на довколишнє середовище

Забруднення вод Світового океану водним транспортом відбувається по двох каналах: по-перше, морські і річкові судна забруднюють біосферу відходами,

одержаними в результаті експлуатаційної діяльності, і по-друге викидами у випадках аварії суден з токсичними вантажами, здебільшого нафтою і нафтопродуктами.

В умовах звичайної експлуатації основними джерелами забруднення суднові двигуни, і насамперед головна енергетична установка, а також вода, використана для миття вантажних танків, і баластна вода, що зливається за борт із вантажних танків.

Енергетичні установки суден забруднюють відпрацьованими газами передусім атмосферу, звідки токсичні речовини частково, або майже повністю потрапляють у води морів, річок, океанів. Нині переважна кількість суден світового флоту обладнана дизельними двигунами. Невелику частку складають судна з паротурбінними установками, що поступово виходять з експлуатації. Дуже обмежена кількість суден з газотурбінними установками.

Річкові і морські судна рухаються на великі відстані з встановленою швидкістю, при якій двигуни довгий час працюють в оптимальному режимі, і тому відхідні гази містять мінімум токсичних речовин. Нафта та нафтопродукти є основними забруднювачами водного басейну при роботі транспорту. Негативний вплив водного транспорту на гідросферу пов'язаний з тим, що на танкерах, що перевозять нафту та її похідні, перед кожним наступним завантаженням зазвичай робиться промивка танків для видалення решток раніше перевезеного вантажу. Промивна вода і залишки вантажу скидаються за борт. Крім того, після доставки нафтовантажів у порти призначення танкери, як правило, направляються до пункту нового призначення без вантажу. В цьому випадку для забезпечення належної осадки і безпечності плавання нафтові танки судна заповнюються баластною водою. Ця вода забруднюється нафтовими залишками. Тому особлива увага приділяється створенню пристроїв очистки промислових та баластних вод.

Актуальність робіт підтверджується подальшим збільшенням обсягів перевезень вантажів морським шляхом, у тому числі і нафтопродуктів. Разом з тим зростає і кількість токсичних речовин, що потрапляють до Світового океану під час аварій.

За оцінками спеціалістів щороку до морів та океанів виливається до 10 млн. т нафтовантажів на рік. Встановлено, що кожна тонна вилитої нафти може вкрити площу близько 12 км^2 .

За даними океанологів, у моря і океани нафта і інші вуглеводні надходять:

- з суден, що знаходяться в морі – 28%;
- зі стоком річок – 28%;
- з берегів – 16%;
- з суден, що знаходяться в портах – 14%;
- з атмосфери – 10%;
- іншими шляхами – 4%.

Таким чином, одним з головних джерел забруднення морів і океанів є судна, на котрі припадає більше половини безпосереднього скиду вуглеводнів. При цьому на частку танкерів припадає більше 50% забруднення.

Гази CO , CO_2 , C_xH_y важчі за повітря і накопичуються на поверхні водного середовища. CO і газоподібні вуглеводні викиди суднових теплових двигунів беруть участь у окислювальних реакціях і в кінці перетворюються на CO_2 , наявність якого в атмосфері викликає парниковий ефект. У першому наближенні екологічну шкоду водному середовищу можна підрахувати як суму збитків від сірчаного ангідриду, окисів азоту, сажі і викидів незгорілого палива суднових двигунів, а також випаровування нафтовантажів транспортного флоту. Виконані підрахунки екологічної шкоди навколишньому середовищу від функціонування суднових енергетичних установок окремих типів показали значну перевагу газотурбінних перед дизельними енергетичними установками (ДЕУ) з малообертним двигуном. Так, еколого-економічна шкода перших складає приблизно 5% від шкоди других. Додаткова екологічна шкода від викидів суднових енергетичних установок окислів азоту, вуглекислого газу, окислу вуглецю і газоподібних вуглеводнів пов'язана з їх участю у створенні парникового ефекту. Однак, кількісний бік цього питання ще недостатньо вивчений. Крім того, окисли азоту руйнують озон і стратосферу, що призводить до ряду негативних природних явищ. Треба взяти і шкоду водному середовищу

від важких металів і окислів, в тому числі і заліза, а також від шуму і вібрації теплових двигунів.

Приблизні обсяги забруднення Світового океану вуглеводнями наведені у таблиці 5.1

Таблиця 5.1. Складові забруднення Світового океані вуглеводнями

№ п/п	Джерело забруднень	Кількість, млн. т
1	Використання ДЕУ з відпрацьованими газами (ВГ), крім	114,26
2	Випарення нафтовантажів з урахуванням вантажних операцій	19,4
3	Випарення нафтопродуктів на суші і надходження їх у морське середовище з опадами	10,0
4	Викиди незгорілого палива ДЕУ з ВГ	1,83
5	Злив баластних вод з суден	4,3
6	Антропогені викиди на суші і перенос їх через атмосферу в Світовий океан	3,0
7	Викиди вуглеводнів ДЕУ (C_xH_y) у морське середовище з ВГ	14,3
8	Сток річок у Світовий океан	1,9
9	Берегові стоки	0,8
10	Здобича нафти у морі	0,8
11	Природне просочування з дна	0,6
12	Розлив нафтопродуктів при аваріях танкерів	0,3
13	Вплив нафтопродуктів з лальними водами	0,5

При роботі ДЕУ і газотурбінні на часткових навантаженнях (50-60%) у ВГ невисока концентрація окислів азоту і сірчаного ангідриду, сажі, бензаперинів, котрі разом завдають істотнішої екологічної шкоди, ніж кожний компонент окремо. Таку шкоду на цих частинних навантаженнях у два рази нижче ніж на

повній, хоча ефективний ККД на цих режимах лише на 7-8% нижче.

Високотоксичні окисли азоту, двоокис сірки, сажа, концентрація яких висока на великих навантаженнях і поступово знижується на середніх. На середніх навантаженнях істотно зменшується концентрації сажі, SO_2 , NO_x і збільшується CO та C_xH_y . Найбільший викид сажі спостерігається на великих навантаженнях. Однак токсичність CO та C_xH_y невелика.

Із зазначеного вище випливає, що головну роль у забрудненні моря при морських перевезеннях відіграють викиди теплових двигунів, тому постановка питання про заміну мало оборотних дизелів, які використовують високосірчане паливо, на нові більш чисті і економічні енергетичні установки, закономірна. Обґрунтоване також з екологічної точки зору переведення суден з малооборотними дизелями на середньооборотні, оскільки обсяги викиду шкідливих речовин у останніх менший.

5.2. Методи ліквідації допущених забруднень

На сьогоднішній день намітились три основні напрямки очистки забруднених вод морів, а саме:

- механічний збір з поверхні вод сміття і нафтових плівок;
- хімічний вплив на нафтові плівки;
- біологічний розклад плівок.

Найбільшого поширення набув механічний метод. При такому методі великі плавучі агрегати виконують різні за ступенем складності операції – від простого збору з поверхні плаваючого сміття до виловлювання і сепарації нафтопродуктів. Зібране сміття і нафтовмісні води передаються на берегові станції для знешкодження та утилізації. Для ліквідації аварійних розливів нафти в акваторіях і у відкритому морі створені оперативні штати, які вживають екстрених заходів для знешкодження наслідків таких розливів.

Ефективним хімічним методом очистки може виявитися використання абсорбентів – хімічних препаратів, що будучи розпилені над поверхнею моря в змозі поглинати нафтопродукти. Але вступаючи в реакцію з нафтою вони

розкладають її, утворюючи нові хімічні продукти, що іноді виявляються більш не безпечнішими, аніж нафта. Доцільність застосування абсорбентів полягає у тому, що вони сприяють порушенню нафтового шару, котрий перекриває надходження кисню у воду, забруднює узбережжя, вбиває водоплаваючих тварин та птахів.

До категорії хімічних реагентів для боротьби з розливом нафти входять диспергенти – речовини, що зменшують поверхневий натяг плівки, розбиваючи її на окремі краплі. В результаті покращуються обмінні процеси з атмосферою і проникнення сонячного проміння, прискорюється розклад нафти. Але продукти розкладу, певна частина нафти та реактиву залишається у товщі води бо випадає на дно. У зв'язку з цим, а також через токсичність реагентів такі засоби можуть бути застосовані лише в окремих випадках задля уникнення тяжчих наслідків.

Перспективними методами нейтралізації нафтопродуктів є біологічні методи. Дослідження в цьому полі проводяться у трьох напрямках.

Перший напрямок – очистка за допомогою рослин, котрі засвоюють деякі забруднювачі, що містяться у воді, у тому числі і вуглеводні. Застосування цього методу можливе для біологічної нейтралізації нафтовмісних вод в акваторіях портів.

Другий напрямок – пошук та дослідження живих істот, здатних уловлювати та переробляти забруднені води. Найбільше для таких цілей підходять молюски, що пропускають крізь себе за добу до 70 л води.

Третій напрямок – пошук анаеробних бактерій, які в умовах моря могли б швидко розмножуватися на вуглеводнях, плаваючих у воді і розчинених в ній і перероблювати їх у корисні або нейтральні для гідросфери речовини.

5.3. Заходи щодо зниження забруднення навколишнього середовища

Впровадження дизель-електричної гребної установки сприяє зменшенню викидів шкідливих речовин у атмосферу. Використання ДЕГУ дозволяє змінювати малообертові гребні дизелі на середньо обертові дизелі головних генераторних агрегатів. На відміну від суден з механічними дизельними гребними установками, де при зниженні завантаження дизелів підвищуються викиди до атмосфери, в ДЕГУ дизель-генератори завжди працюють в оптимальному режимі як з погляду економічності, так і зі сторони мінімізації забруднення навколишнього середовища.

До основних заходів попередження забруднення водного басейну транспортними засобами треба віднести:

- заборону скидання забруднюючих відходів з суден у внутрішніх водоймах;
- прийняття міжнародних угод про припинення скидання з суден усіх видів відходів і змиву нафтовантажів, забрудненої ними води у відкритих морях і океанах і в межах встановлених зон;
- обладнання суден додатковими засобами і установками для утилізації або знешкодження деяких видів відходів, а також тимчасового накопичення частини відходів з наступною здачею їх на берег для знешкодження або переробки;
- розробку нових конструкцій суден, що більшою мірою гарантували б збереження нафтовантажів і нафтопалива навіть в аварійних ситуаціях.

Проектування універсального суховантажного судна здійснюється згідно вимогам «Міжнародної конвенції з попередження забруднення моря з суден», що була переглянута та доповнена 1978 року. Цей документ визначає перелік та обсяг заходів, що мають бути прийняті на судах задля зменшення впливу на довколишнє середовище.

Основні шляхи забруднення Світового океану суховантажним судном – це викиди нафтовмісних та стічних вод, а отже при проектуванні судна питанням їх зменшення має приділятися чимало уваги.

З метою запобігання потрапляння нафтопродуктів до Світового океану на судні застосовано систему збору та очистки нафтовмісних вод.

Збір нафтовмісних вод буде здійснюватися автономним трубопроводом в окрему цистерну. Для їх передачі судно буде оснащено двома трубопроводами видачі з обох бортів, що матимуть з'єднання міжнародного зразку. Система буде обслуговуватись гвинтовим насосом.

Очищення нафтомісних вод буде здійснюватися спеціальною сепараційною установкою, ступінь очистки в якій досягає 15 частин на мільйон.

Для виключення можливості розливу палива по відкритих місцях крізь повітряні труби паливних цистерн передбачений відвід палива до переливних цистерн, сигналізація про перелив та комінгси навколо повітряних труб паливних цистерн.

Заходи будуть прийняті і для зменшення обсягів потрапляння до моря стічних вод. Стічні води з унітазів санвузлів відводитимуться за борт через установку фізико-хімічного очищення та обеззаражування, розташовану у машинному відділенні. Господарсько-побутові води відводитимуться за борт, але при цьому передбачено можливість відводу їх до спеціальної цистерни.

Передбачені контейнери необхідної місткості для збирання сміття та відходів з метою їх подальшої здачі на берег.

ВИСНОВКИ

У роботі була досліджена суднова електроенергетична система і розглянути питання впливу статичних перетворювачів на роботу СЕЕС.

Був зроблений розрахунок потужності і вибір генераторів, вибір і перевірка автоматичних вимикачів, шинопроводів і кабелів, розрахунок струмів короткого замикання, розрахунок коефіцієнта загального гармонійного спотворення (Total Harmonic Distortion).

Розрахунок кількості і потужності генераторів виконується по програмі в Excel, розрахунок струмів короткого замикання виконується в програмі в MathCAD. Програми мають завершений вид і можуть при необхідності використовуватися в проектних організаціях.

Розрахунок струмів КЗ показав, що обрані автоматичні вимикачі витримують ударний струм КЗ і забезпечують відключення сталих струмів короткого замикання.

У всіх режимах роботи ЕЕС коефіцієнти несинусоїдальності форми кривої напруги як на головних шинах – 6,3 кВ, так і на розподільних власних потреб - 0,4 кВ не перевершують 10%, що задовольняє вимогам глави 11 Правил класифікації й побудови морських суден РСУ.

Комп'ютерне моделювання перехідних процесів в системах електричного руху дозволяє визначити практичний час протікання і визначити динамічні властивості системи.

Максимальні значення пускового струму і провалів напруги дозволяють налаштувати схеми захисту і управління.

Регістром судноплавства України передбачено забезпечення перевантажувальної здатності перетворювачів на рівні не менше 250 % від номінального струму на протязі 2 секунд. Отримані пускові характеристики не виходять за межі зазначеного діапазону;

Поліпшенню гармонічного складу вихідного струму перетворювача сприяє підвищення частоти комутації силових вентилів інвертору.

У роботі розглянуті питання охорони навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматичні вимикачі Compact NS, multi 9, Masterpact, Merlin Gerin. Сайт компанії: s-e.com.ua.
2. Забара С. Моделювання систем у середовищі MATLAB. Київ: Видавництво Університет “Україна”, 2011. – 137 с.
3. Паранчук Я. С. Мороз В. І. Алгоритмізація та програмування. Пакет MathCAD Львівська політехніка, 2012. – 312 с.
4. Подимака В.І., Ставинський А.А., Чекунов В.К. Розрахунок струмів короткого замикання в судових електроенергетичних системах: Методичні вказівки. – Миколаїв: НУК, 2004. – 32 с.
5. Регістр судноплавства України. Правила класифікації та побудова морських суден, том 4, ч XI. Електричне обладнання. Київ, 2011. – 197 с.
6. Рябенський В.М., Драган С.В., Солобуто Л.В. Основи моделювання систем і процесів в електротехніці. Навчальний посібник / Під редакцією проф. Рябенського В.М. – Львів: Новий Світ-2000, 2008. – 385 с.
7. Суднова енергетика: стан та проблеми. Одеська морська академія» / НУК, 2017. – 472 с
8. Суднові електричні установки й судові й стаціонарні наземні блоки. Частина 1: методики розрахунку струмів короткого замикання трифазних систем змінного струму. Міжнародний стандарт ІЕС 61363. 1998. - 42 с.
9. Чен К., Джіблін П, Ірвінг А. MATLAB в математических исследованиях: Пер.с англ. – М.: Мир, 2001. – 346 с.
10. Чорний С.Г., Голіков С.П. Суднові автоматизовані електроенергетичні системи. Ч. 1. Суднові електричні станції, «Кондор», 2016. – 198 с.
11. Яковлев Г.С. Судовые электроэнергетические системы. Л.: - Судостроение, 1987. – 272 с.
12. MATHCAD. Фінансові, інженерні й наукові розрахунки в середовищі Windows. – Львівська політехніка, 1997. – 712 с.