

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**В. К. Чекунов, С. М. Новогрецький,
В. І. Костюченко**

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ РУШІЙНИХ УСТАНОВОК

Навчальний посібник

Рекомендовано Вченою радою НУК



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2026

УДК 621.31(075.8)
Ч-37

Автори:

В. К. Чекунов, старш. викладач;
С. М. Новогорецький, канд. техн. наук, доцент;
В. І. Костюченко, канд. техн. наук, доцент

Рецензенти:

А. А. Ставинський, д-р. техн. наук, професор, зав. кафедрою Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки МНАУ;
В. М. Рябенський, д-р. техн. наук, професор, зав. кафедрою ПЕЕТ ННІАЕ НУК;
І. С. Білюк, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрою автоматики ННІАЕ НУК

*Рекомендовано Вченою радою НУК імені адмірала Макарова
(протокол № 12 від 24.12.2025 р.)*

Чекунов В. К.

Ч-37 Електроенергетичні системи рушійних установок : навчальний посібник / В. К. Чекунов, С. М. Новогорецький, В. І. Костюченко. – Миколаїв : НУК, 2026. – 268 с.

ISBN 978-966-321-504-4

Уміщено теоретичний і практичний матеріал з електроенергетичних систем рушійних установок. Розглянуто принципи побудови рушійних установок, апаратну частину, статичні та динамічні режими роботи змінного, подвійного і постійного роду струму.

Призначено для студентів спеціальностей 271 «Морський та внутрішній водний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», а також для студентів інших технічних спеціальностей, пов'язаних з розробкою, налагодженням та експлуатацією електроенергетичних систем рушійних установок.

УДК 621.31(075.8)

ISBN 978-966-321-504-4

- © В. К. Чекунов, С. М. Новогорецький,
В. І. Костюченко, 2026
- © Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2026

3MICT

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Розділ 1

ПРИЗНАЧЕННЯ Й ТИПИ ЕЛЕКТРОРУШІЙНИХ СИСТЕМ

Суднові системи електричного руху знаходять усе більше широке застосування в якості пропульсивних комплексів суден різного призначення. Істотний вплив на розвиток таких систем за останні роки зробили два фактори – впровадження силових напівпровідникових перетворювачів (НП) і використання як рушіїв гвинто-рульових колонок (ГРК).

Під електричним рухом суден розуміють їхній рух у результаті використання електричної енергії гребними електричними установками.

До складу гребних електричних установок входять (рис. 1.1):

- а) первинні двигуни (дизелі або турбіни) 5, що приводять у рух головні генератори 4;
- б) головні генератори 4, що живлять електроенергією гребні електродвигуни 1, через щит електричного руху 2;
- в) гребний електродвигун 1, безпосередньо з'єднаний з рушієм;
- г) системи збудження і захисту 3;
- д) системи ручного чи автоматизованого керування 6;
- е) пости керування 7.

Генератори ГЕУ називають головними тому, що в порівнянні з генераторами, які живлять загальносуднові споживачі, вони мають значно більші потужності і забезпечують рух судна.

Гребні електричні установки класифікують за родом струму, типом первинного двигуна, призначенням та іншими ознаками.

За родом струму гребні електричні установки (ГЕУ) постійного струму застосовують на суднах, де потрібна висока маневреність і часте реверсування гребного двигуна (криголами, буксири, паромі тощо). ГЕУ змінного струму застосовують на суднах, для яких найбільше значення має економічність установки.

Рис. 1.1. Структурна схема ГЕУ

За типом первинного двигуна ГЕУ поділяють на дизель-електричні (ДЕГУ) і турбоелектричні (ТЕГУ), причому застосований тип первинного двигуна багато в чому визначає властивості ГЕУ.

На суднах малої та середньої водотоннажності, як правило, застосовують двигуни внутрішнього згоряння (дизелі), ККД яких вище за ККД інших теплових двигунів. Сучасні швидкісні судові дизелі (наприклад, Wartsila, MAN B&W) мають ККД (механічний, брутто) 50...52 %, рекордні зразки – до 53 % (наприклад, Wartsila 31 або MAN B&W G-type).

Потужність дизеля й швидкість, яку він розвиває, регулюють, змінюючи кількість подаваного в циліндри палива. Здійснюють це або вручну, або автоматичним регулятором обертання. Залежності ефективної потужності й ефективного моменту обертання двигуна від швидкості при граничній подачі палива називають зовнішніми характеристиками двигуна.

Аналогічні залежності, отримані при меншій подачі палива, називають частковими характеристиками. Як на зовнішніх, так і на часткових характеристиках момент майже не

змінюється при зміні швидкості дизеля. Припустимі перевантаження звичайно не перевищують 10...15 %, Номінальну швидкість дизель розвиває при граничній подачі палива. Подальше збільшення швидкості неприпустиме, оскільки призведе до підвищеного зношування й механічних поломок, а також через обмежену швидкість згоряння палива в циліндрах. Тому при швидкості $n = (1,1 \dots 1,15)n$ спрацьовує граничний регулятор, що припиняє подачу палива паливним насосом. Великі дизелі, крім того, постачені все режимними регуляторами, які за допомогою спеціальної пружини можуть бути встановлені на будь-яке значення швидкості – від мінімально стійкої до номінальної. При цьому варто мати на увазі, що зменшення швидкості дизеля веде до підвищення питомої витрати палива й до зниження ККД всієї установки.

ДЕГУ застосовують як на постійному, так і на змінному струмі.

Тихохідні дизелі великої потужності досить громіздкі, швидкохідні ж мають малий моторесурс й обмежену потужність. Тому великі судна звичайно обладнують не ДЕГУ, а ТЕГУ, найчастіше з газовою турбіною як первинний двигун (максимальний ККД сучасної газової турбіни – близько 43 %).

Частота обертання судових турбін доходить до 10 000 об/хв., з валом генератора вони з'єднані зубчастим редуктором. ТЕГУ звичайно працюють на змінному струмі, де використовується важлива властивість турбіни, що полягає в здатності змінювати швидкість у широких межах (від 100 до 25 % n) шляхом простої зміни кількості (або якості) подаваного газу. На відміну від дизелів турбіни допускають перевантаження на 25...40 % P_n , тому що номінальний режим їхньої роботи забезпечується при неповному відкритті клапанів регулятора.

За призначенням ГЕУ поділяють на головні (або автономні), допоміжні й комбіновані.

У головних ГЕУ гвинт приводиться в рух тільки від

гребних електродвигунів, живлення яких електроенергією є єдиним призначенням головних генераторів.

У допоміжних ГЕУ, установлюваних на плавучих кранах, земснарядах та інших суднах технічного флоту, головні генератори живлять: у процесі роботи – двигуни основних виробничих механізмів, а під час переходів – гребні електродвигуни.

У комбінованих ГЕУ гвинт приводиться в обертання як головним двигуном, так і електродвигуном, що споживає вільну потужність допоміжних генераторів. Додатковий гребний електродвигун у цьому випадку використовують або в допомогу основному двигуну (для збільшення потужності на гребному валі й підвищення швидкості судна), або для самостійної роботи на гребний гвинт на малих ходах судна, неможливих при роботі головного двигуна.

У порівнянні з тепловими гребними установками ГЕУ мають характерні для них переваги й недоліки, з огляду на які можна в кожному конкретному випадку вибрати оптимальний вид установки й визначити найбільш економічний режим її роботи.

До переваг ГЕУ, обумовлених в основному відсутністю в них жорсткого механічного зв'язку між первинним тепловим двигуном і рушієм, відносять:

- свободу вибору на судні місця для первинних агрегатів і гребних електродвигунів, що полегшує раціональне розміщення цього устаткування;
- можливість використання швидкохідних нереверсивних первинних двигунів;
- порівняно гарні маневрені якості, забезпечувані дистанційним керуванням, а також автоматизацією керування, захисту й контролю ГЕУ;
- придатність до роботи з неповним числом первинних агрегатів при знижених швидкостях судна;
- порівняно високу живучість;

- успішну роботу силових установок у тяжких умовах плавання судна, забезпечувану великою перевантажувальною здатністю електричних машин;

- можливість використання головних генераторів для живлення інших електричних споживачів судна.

Недоліками ГЕУ стосовно дизельних і турбінних установок є наступні:

- порівняно низький ККД, що визначається подвійним перетворенням енергії;

- порівняно високі питома вага й початкова вартість (на одиницю потужності);

- можливе збільшення чисельності обслуговуючого персоналу.

1. 2. Вимоги Регістру судноплавства України до гребних електричних установок

Для отримання дозволу на побудову та експлуатацію суден необхідно забезпечити виконання норм та правил, що встановлені класифікаційними спільнотами, надзору яких підлягає створюване судно. Відповідність нормам таких організацій у певній мірі забезпечує належне функціонування судових систем і комплексів, прийняття проєктантами вірних технічних рішень та безпеку експлуатації судна.

Проєктування та побудова суден морського й річкового флоту контролюється Регістром судноплавства України. Комплекс вимог цієї організації до суден морського флоту наведений у «Правилах класифікації та побудови морських суден».

Вимоги до обладнання гребних електричних установок викладені окремим розділом «Гребні електричні установки», але не обмежуються ним. При проєктуванні мають також враховуватися вимоги, наведені в інших розділах керуючого документу.

В гребних електричних установках, що містять напівпровідникові перетворювачі, відбувається внесення спотворень до мережі ГЕУ. Головні генератори та гребні двигуни мають забезпечувати задані технічні характеристики у відповідності з призначенням судна та підтримувати необхідну переважувальну здатність за умов спотворень форми напруги та струмів, що вносяться роботою перетворювачів. Потужність елементів установки мусить обиратися з урахуванням цих спотворень.

Головні генератори, напівпровідникові перетворювачі гребного електричного двигуна, а також апаратура ланцюгів головного струму повинні витримувати перевантаження за струмом не менше ніж 250 % Іном протягом 2 с.

Ступінь захисту частин електричних машин ГЕУ, що розташовані під настилами, повинен бути не нижчим за IPX6. Якщо вони розміщуються в сухому відсіку або захищені від проникнення води водонепроникним фундаментом та передбачена сигналізація, що спрацьовує при потраплянні до відсіку води, можна обмежитись ступенем захисту IPX3.

Для машин гребної електричної установки слід вживати заходів, що перешкоджають протіканню блукаючих струмів через підшипники ковзання.

Генератори гребних електричних установок і гребні електричні двигуни повинні мати обігрів для підтримки температури принаймні на 3 °C вище за температуру навколишнього повітря.

Кабелі головного струму гребних електричних установок повинні прокладатися на відстані не менше ніж 0,5 м від кабелів іншого призначення.

Гребні електричні двигуни з повітряним охолодженням необхідно обладнувати двома вентиляторами примусової вентиляції, кожний з яких має подачу, достатню для забезпечення нормальних умов роботи двигуна. Електричні машини

установки мають бути обладнані фільтрами очистки охолоджуючого повітря.

Напівпровідникові перетворювачі, що працюють у контурах головного струму гребної електричної установки, мають забезпечувати її роботу при знижених параметрах у випадку виходу з ладу систем охолодження. При цьому також має бути передбачена світлова та звукова сигналізація.

Системи збудження електричних машин гребної електричної установки повинні отримувати живлення не менше ніж від двох перетворювачів електричної енергії, причому у випадку ушкодження одного з них інші мають забезпечувати повну потребу в електричній енергії для збудження навіть за збільшеного навантаження при маневрах.

Кола збудження повинні бути обладнані пристроями гасіння енергії магнітного поля при відключенні обмоток збудження.

Системи збудження та автоматичного керування мають бути виконані таким чином, щоб гребні двигуни були захищені від надмірного підвищення частоти обертання при виході з ладу або оголенні гребного гвинта.

В колах збудження не мають бути встановлені автоматичні вимикачі, окрім тих, що діють на зняття збудження з машин за коротких замикань та ушкоджень у колах головного струму.

При необхідності забезпечення певної послідовності комутаційних операцій має бути передбачене блокування, що виключатиме можливість неправильних перемикань. Блокування комутаційних апаратів також має бути передбачене при змозі помилкових переключень у колах головного струму апаратів, що не призначені для проведення комутаційних операцій під струмом.

Силові конденсатори, що використовуються в ГЕУ, повинні мати розрядні пристрої.

Основний пост керування гребною установкою

розташовується в машинному відділенні. Там же розташовується перемикач постів керування при наявності декількох постів. Цей перемикач повинен мати блокуючий пристрій, що не дозволяє переходити на керування з іншого посту без зняття збудження з машин ГЕУ. На новому посту початок роботи гребного двигуна має здійснюватися з положення «стоп».

Нормами Регістру визначається перелік вимірювань, що необхідно проводити під час експлуатації гребної установки. Так, мають бути передбачені наступні вимірювальні пристрої, що забезпечуватимуть постійний контроль параметрів системи:

- вольтметр та амперметр у колі головного струму;
- вольтметр та амперметр у колах збудження для пристроїв з регульованим збудженням;
- тахометр для гребних електричних двигунів або валів;
- частотомір;
- ватметр;
- синхронізуючий пристрій для вмикання генераторів на сумісну роботу;
- пристрій контролю ізоляції.

Системи гребних електричних установок повинні мати захист від короткого замикання на корпус судна. При цьому струм витoku повинен не перевищувати 20 А.

В головних колах та колах збудження машин гребних електричних установок не дозволяється використовувати плавкі запобіжники.

Мають бути прийняті міри для обмеження або використання енергії, що виконується гребним електричним двигуном у перехідних режимах та при зміні напрямку обертання гребного двигуна, якщо ця енергія може призвести до надмірного зростання швидкості обертання первинних двигунів.

Гребна електрична установка повинна мати нульовий захист від самовільного пуску після спрацювання будь-якого

захисту.

Гребні електричні установки повинні мати максимальний захист від струмів короткого замикання та захист від перевантажень. Дія захисту повинна супроводжуватися спрацюванням звукової та світлової сигналізації.

При використанні статичних тиристорних перетворювачів передбачені додаткові види захисту:

- захист від зовнішніх і внутрішніх замикань та перевантажень;
- захист від перенапруги;
- захист від зникнення напруги живлення в схемі керування.

Створення об'єднаних енергетичних систем можливе за умом забезпечення належних показників якості електричної енергії, що спрямовується до загальносуднових споживачів.

Вимоги до параметрів електроенергії в судновій мережі наведені у таблиці 1.

Таблиця 1.1. Показники якості електричної енергії

Параметри	Відхилення від номінальних значень		
	тривале, %	короткочасне	
	%	час, с	
Напруга	+6...-10	±20	1,5
Частота	±5	±10	5

Значення коефіцієнта несинусоїдальності кривої напруги не повинне перевищувати 10 % і визначається за формулою:

де U_c — діюче значення напруги мережі;

U_n — напруга гармонічної складової n-го порядку;

n — порядок вищої гармоніки.

Більш докладні вимоги до суднового електроустаткування можна взяти із четвертого тому «Правил класифікації

та побудови морських суден» Регістра судноплавства України, 11 розділ.

1.3. Опір води й повітря руху судна

На судно, що нерухомо на воді, діють сили тиску, рівнодіюча яким дорівнює силі ваги судна й спрямована протилежно їй. При русі судна рівнодіюча сил тиску P відхиляється від вертикального напрямку, а крапка її прикладення зміщається у напрямку носового краю корпусу судна (рис. 1.2).

Рівновага системи не порушиться, якщо до центра ваги судна O прикласти дві протилежно спрямовані сили P_1 і P_2 , рівні по величині й паралельні силі P . Отримана в такий спосіб пара сил P і P_1 створить момент, що викликає диферент на корму. Розкладена по взаємно перпендикулярних напрямках сила P_2 утворить складові Q й R .

Рис. 1.2. Сили, що діють на судно, що рухається

Вертикальну складову Q називають гідродинамічна сила підтримки, а горизонтальну складову R , спрямовану протилежно руху судна, називають опором води.

Опір води руху судна складається з опору тертя й опору тиску, що у свою чергу ділиться на опір форми й хвильовий опір $R_{хв}$:

$$R = R_{тр} + R_t = R_{тр} + R_{\Phi} + R_{хв}.$$

Опір води руху судна R переборюється у самохідних суден – силою упору, що розвивається судовим рушієм. Фізична сутність цього опору полягає в наступному. Корпус судна надає руху навколишній його масі води й, переборюючи сили інерції, повідомляє їй прискорення. Реакція сил інерції сприймається корпусом як сили тиску, а сума їх являє собою опір тиску R_t . Сили в'язкості води на границі з корпусом

створюють дотичні сили, сума яких становить опір тертя $R_{тр}$.

Опір тертя $R_{тр}$. Цей опір становить більшу частину загального опору води руху судна. Воно обумовлено тим, що прилягаюча до корпусу судна маса води внаслідок своєї в'язкості "прилипає" до корпусу й рухається зі швидкістю судна. Таким чином, між різними шарами рідини виникає деформація зрушення, що свідчить про наявність сил тертя.

Опір тертя $R_{тр}$, можна визначити по формулі

$\alpha_{тр.пл}$ – коефіцієнт опору тертя для гладкої пластини;

$\alpha_{тр.пл} = 0,0315 Re^{-0,145}$;

Re – число Рейнольдса, $Re = VL/\nu$;

V – швидкість судна, м/с;

L – довжина судна по вантажній ватер лінії (ВЛ), м;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості води;

при $t = 4^\circ C$, $\nu = 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

$k_{кр}$ – коефіцієнт кривизни, що залежить від відношення довжини L до ширини B судна:

L/B	6	8	10	12
$k_{кр}$	1,04	1,03	1,02	1,01

$\alpha_{шер}$ – коефіцієнт шорсткості корпусу судна, $\alpha_{шер} = (0,3...0,7)10^{-3}$;

$\rho = 1025 \text{ мг/м}^3$ – щільність морської води;

$S_{зм}$ – змочена поверхня судна;

Число Рейнольдса допомагає зрозуміти, як поводить ся рідина: при низьких значеннях переважають сили в'язкості, а при високих – інерційні сили. Це дозволяє інженерам прогнозувати поведінку потоків і проектувати системи.

Можливі режими плинину:

ламінальний потік ($Re < 2300...2320$), рідина рухається шарами, упорядковано. Швидкість у стінки дорівнює нулю.

перехідний режим ($2300 < Re < 4000$), нестійкий режим

між ламінарним і турбулентним, важко передбачуваний;

турбулентний потік ($Re > 4000$): хаотичний, вихровий рух.

При наявності виступаючих з корпусу судна частин у формулу уводять у вигляді доданка в дужках $\square_{в.ч} = (0,2...0,5)\square_{10-3}$.

Опір форми R_f . Виникає внаслідок перерозподілу тиску, викликаного впливом в'язкості на потік рідини, що обтікає судно. Тому опір форми є проміжним між опором тертя, що залежить винятково від в'язкості рідини, і хвильовим опором, що залежить від різниці тисків у різних зонах корпусу судна.

При русі судна швидкість його потоку, що обтікає, зростає від носа до міделя, де стає максимальною, потім убыває до ахтерштевня. Зменшення швидкості потоку від міделя до корми супроводжується поступовим збільшенням тиску в потоці. Внаслідок цього частки води в прикордонному шарі судна в міру видалення від міделя поступово загальмовуються, поки в деякій зоні не змінять напрямку руху. Так, у поверхні кормової частини судна утворюються вихри з відривом рідини від змоченої поверхні. Енергія, затрачувана на вихроутворення, сприймається як вихровий опір, або опір форми.

Хвильовий опір $R_{хв}$. Виникає під впливом хвиль, що утворюються при русі судна на вільній поверхні. Судно, переміщаючись, безупинно витісняє своїм корпусом деякий обсяг рідини з носового краю й звільняє такий же обсяг її в кормі. У результаті утворюються тиски, які в носовій частині більше, а в кормовій – менше атмосферного. Це приводить до зміни рівня вільної поверхні й дає початок хвиле утворенню, що підтримується тим, що частки води не встигають плавно обтікати корпус судна й під дією сил ваги роблять коливальні рухи. Так утворюються хвилі, що викликають додаткові швидкості потоку, що обтікає, що обумовлює перерозподіл тиску води уздовж змоченої поверхні судна. Енергія, затрачувана на створення додаткових швидкостей потоку, що обтікає, сприймається

судном як хвильовий опір.

Хвилі, утворені судном, що рухається, можна розділити на дві групи: носові й кормові. Хвилі першої групи зароджуються у форштевня, другої – у ахтерштевня. Кожна група складається із системи розбіжних і системи поперечних хвиль. Фронт розбіжних хвиль утворює із ДП кут $36...40^\circ$; поперечні хвилі розташовуються під прямим кутом до ДП судна.

Визначення опору води. Існує кілька методів визначення опору води руху судна. Найбільш точний з них метод механічної подоби Фруда, що дозволяє перераховувати результати випробувань моделі на натурі (судно). Однак оскільки масштаб, прийнятий між моделлю й судном, не можна зберегти при зіставленні в'язкості двох середовищ (рідини басейну й морської води), способом моделювання користуються обмежено – лише для визначення опору тиску. Опір тертя $R_{тр}$, що залежить від в'язкості рідини, визначають аналітичним шляхом. Розрахунок починають із того, що шляхом буксирування моделі в басейні визначають повний опір води її руху. Потім знаходять $g_{тр}$ – опір тертя руху моделі, для чого користуються формулою

$$g_{тр} = \square_{тр} [(\square V_m^2)/2] S_{см.м},$$

де $\square_{тр.м}$ – коефіцієнт опору тертя для моделі, а індекс "м" указує на те, що відповідний параметр ставиться до моделі.

Потужність NR , необхідну для подолання опору R і повідомлення судну швидкості V , називають буксирувальною і визначають із вираження

$$NR = RV.$$

Опір повітря руху судна $R_{пов}$. Крім опору, що робить руху судна вода, при розрахунках необхідно враховувати й опір повітря. Він залежить від вітрильної поверхні судна, швидкості його руху, швидкості й напрямку вітру стосовно напрямку ходу судна.

Опір $R_{пов}$, можна визначити за формулою

$R_{пов} = спов \left[(\square_{пов}(V \square VP) 2/2) S_{пар} \right]$,
де спов – безрозмірний коефіцієнт, орієнтовно рівний (для повітря) 0,8;

$\square_{пов}$ – щільність повітря; $\square_{пов} = 1,197 \text{ кг/м}^3$;

$S_{пар}$ – вітрильна поверхня судна, рівна проєкції його надводної частини на площину міделя, м^2 ;

V – швидкість судна, м/с ;

VB – проєкція швидкості вітру на ДП, м/с (знак плюс береться при зустрічному вітрі, знак мінус – при попутному).

Варто також мати на увазі, що при сильному вітрі збільшується хвилювання й відповідно зростає площа змоченої поверхні корпусу судна. Це викликає підвищення опору води руху судна, що враховують додаванням у рівняння коефіцієнта опору на хвилюванні:

$\square_{хв} = (0,1...0,6) 10^{-3}$.

Висновок: опір руху судна пропорційний квадрату швидкості судна, а потужність ГЕД – кубу, тому незначне збільшення швидкості призводить до суттєвих змін потужності та витрати палива.

Межа розумної швидкості 10...25 вузлів у залежності від характеру вантажу, відстані між портами тощо.

1.4. Суднові рушії

Щоб судно могло рухатися з певною швидкістю, до нього треба прикласти рушійну силу (або силу тяги), що дорівнює опору води і повітря і спрямовану протилежно йому. У самохідних суден цю силу називають упором, вона створюється рушієм, який перетворює механічну енергію первинного двигуна в енергію поступального руху судна.

Суднові рушії бувають двох типів: активні і реактивні. Робота активних рушіїв заснована на принципі використання активної дії повітря. До таких рушіїв відносять ротори

і вітрила. Дія реактивних рушіїв заснована на відкиданні мас води в напрямку, протилежному руху судна. Відкинуті назад маси води отримують прискорення і створюють сили реакції, які сприймаються судном як сили упору. До реактивних рушіїв відносять весло, гребне колесо, гребний гвинт, крильчатий рушій, водометні рушій та ін.

На більшості сучасних суден з ГЕУ застосовуються лопатеві обертові гідравлічні рушії реактивного типу – крильчаті рушії й гребні гвинти.

Крильчатий рушій (рис. 1.3 а) обертається навколо вертикальної осі і являє собою горизонтальний диск, по окружності якого розташовуються від трьох до сьомі вертикальних лопат. При обертанні рушія лопати спеціальним приводом розвертаються навколо своїх вертикальних осей так, щоб всі лопати створювали сумарну тягу, спрямовану убік руху судна. ККД крильчатого рушія 55...70%.

Рис. 1.3. Розташування лопатевих рушіїв

На переважній більшості сучасних суден рушіями служать гребні гвинти (рис. 1.3 б). У порівнянні з іншими рушіями вони мають більш високий ККД (до 0,75), менші розміри і легше відповідають конструктивним вимогам. Виготовляють гребні гвинти з різних сортів латуні, а іноді – сталі або чавуну.

Гребний гвинт складається з 3...8 крило образних лопатей, радіально укріплених на ступці на рівних кутових відстанях одна від одної. У конструктивному вирішенні гвинти бувають трьох типів: з невід'ємними лопатями (гвинт фіксованого кроку ГФК); з від'ємними лопатями; з регульованим кроком (ГРегК).

Елементи і характеристики гребного гвинта. Розмір гребного гвинта характеризується його діаметром D . Мають на увазі діаметр окружності, яка описує найбільш віддалені точки лопатей.

Площу круга радіуса R , утвореного гвинтом при його обертанні, називають площею диска гвинта. Важливою геометричною характеристикою гребного гвинта є дискове відношення $\square$ – відношення сумарної площі всіх лопатей A до площі диска гвинта:

Частину лопаті, яка безпосередньо сполучена з ступицею, називають коренем лопаті. Поверхня лопаті, звернена при передньому ході судна в напрямку руху, називають засмоктуючою (носовою) стінкою (поверхнею) або спинкою лопаті. Поверхню лопаті, звернену до корми, називають нагнітальною (кормовою) стінкою (поверхнею). Лінію перетину засмоктуючої і нагнітальної поверхонь (стінок) називають кромкою лопаті. Кромкою лопаті, звернену в бік обертання гребного гвинта, називають вхідною, протилежну – вихідною.

Встановлений на судні гвинт працює у безпосередній близькості до корпусу судна і взаємодіє з ним. В результаті, по-перше, виникає попутний потік, що зменшує швидкість підтікання води до гвинта, і, по-друге, з'являється сила засмоктування, збільшуючи опір води руху судна.

При русі судна в воді частина рідини «прилипає» до його поверхні і захоплюється разом з судном в напрямку руху. Крім того, у простір, звільнений кормою, спрямовується вода, утворюючи потік, направлений також у бік руху судна. Такий рух рідини в бік переміщення судна називають попутним потоком.

Швидкість попутного потоку $\square V$ виражається в частках швидкості судна за допомогою так званого коефіцієнта попутного потоку $\square$:

Значення $\square$ залежить від форми корпусу судна, розмірів гвинта і зазвичай приймається рівним $0...0,2$. Гвинт щодо навколишньої його маси води рухається зі швидкістю V_p яку можна представити як різницю швидкості судна і попутного

потoku $\square V$:

звідки абсолютну швидкість судна, виражену через коефіцієнт попутного потоку, визначають за формулою

Експериментально встановлено, що швидкість попутного потоку на вертикальній лінії диска гвинта більше, ніж в точках горизонтального діаметра диска. Тому кожна лопать протягом одного обороту потраплятиме в зони з різною швидкістю попутного потоку і, отже, піддаватиметься різним тискам. У цьому полягає додаткова причина вібрації корпусу судна. Гребний гвинт, який працює у районі корпусу судна, засмоктує воду з-під корми судна і відкидає її назад, в результаті чого зменшується тиск води на кормову частину судна. А так як тиск в носовій частині при цьому залишається незмінним, то є додаткова сила, що діє на корпус судна в напрямку, протилежному його руху. Цю силу називають силою засмоктування (позначимо її через $\square R$).

Таким чином, сила упору R гребного гвинта витрачається як на подолання буксировочного опору судна без гвинта R , так і на подолання сили засмоктування :

Частина упору, що йде на подолання буксировочного опору R , називають корисною тягою P_e . Частина упору, що йде на подолання сили засмоктування $\square R$, позначимо через $\square P$. Тоді упор P , створюваний гвинтом, можна представити як суму:

Силу засмоктування виражають у частках упору у вигляді відношення

Це відношення називають коефіцієнтом засмоктування. Значення його, залежне від форми кормового краю судна на

відстані гвинта від корпусу судна та режиму роботи, коливається в межах від 0,02 до 0,3. Через коефіцієнт засмоктування повну силу опору можна представити у вигляді

Ступінь ефективності роботи гребного гвинта за кормою судна визначається пропульсивним ККД, який є мірою досконалості рушійного (пропульсивного) комплексу судна, що складається з гребного двигуна, рушія і корпусу судна. Пропульсивний ККД виражається відношенням потужності буксирування (тяги) до потужності, підведеної до гвинта (витраченої потужності):

Оскільки

пропульсивний ККД дорівнює

,

,

де – ККД ізольованого гвинта;

– коефіцієнт впливу корпусу судна, рівний 0,95...1,1.

Отже, пропульсивний ККД можна виразити як

Нерівномірність потоку води при різних положеннях лопатей гребного гвинта по відношенню до обводів корпусу судна враховують, за пропозицією Фруда, якщо ввести в формулу пропульсивного ККД множник $i = 0,97 \dots 1,0$. Тоді остаточний вираз для пропульсивного ККД приймає вид

Крильчатий рушій. Крильчатий рушій являє собою круглу обертову платформу, розташовану врівень із днищем судна (рис. 1.4). По окружності цієї платформи, перпендикулярно до її площини, розміщені крила – лопати (від чотирьох до восьми). Кінематика механізму рушія така, що при обертанні платформи разом з лопатами останні безупинно повертаються

навколо своїх осей. При найпростішій (класичної) схемі рушія кут між хордою кожної лопати й напрямком на фіксовану крапку N платформи, називану полюсом рушія, зберігається постійним.

Крапку керування N за допомогою спеціального пристрою можна встановити в будь-яке положення стосовно центра диска рушія O, змінюючи цим самим напрямок струменя, що відкидає рушієм, води, а отже, і упору рушія. Якщо поставити крапку N над центром рушія O, то площини всіх лопат будуть розташовані паралельно дотичним до окружності диска, проведеним у крапках, де проходять осі лопат. Сила упору в цьому випадку дорівнює нулю, і, незважаючи на те, що диск рушія буде обертатися, судно не зрушиться з місця. Перемістивши крапку N уліво від центра O, ми даємо судну передній хід, перемістивши вправо – задній хід, а перемістивши крапку N уперед від центра рушія, ми змусимо корму судна рухатися вправо і т.д. Завдяки цьому судно із крильчатим рушієм може рухатися вперед та назад і змінювати напрямки свого руху, не маючи руля, а якщо поставити на судно два рушії, то воно зможе переміщатися навіть боком. Рушії увесь час обертаються в ту саму сторону, а судно переміщається в різні сторони. Користуючись цією властивістю рушія, на судах можна встановлювати більше прості двигуни – нереверсивні, тобто не міняють напрям обертання. Такі двигуни легше по вазі в порівнянні з реверсивними, простіше по пристрою й догляду за ними й значно дешевше реверсивних.

Рис. 1.4. Крильчатий рушії

Однак у крильчатих рушіїв є й недоліки, основним з яких є складність передачі обертання від двигуна до рушія, завдяки чому двигуни більших потужностей (понад 5000 к. с.) із крильчатыми рушіями використати не можна, а це обмежує

розміри суден, на яких такі рушії застосовуються.

Проте основні властивості суден із крильчатими рушіями – можливість мати бічний хід, повертатися на місці, швидко змінювати напрямок руху – роблять такі судна незамінними при плаванні в "вузькостях": у каналах, на ріках й у портах. Крильчаті рушії з успіхом застосовують на річкових пасажирських суднах, на портових кранах і буксирах; виробляються експерименти по застосуванню крильчатих рушіїв на рибальських траулерах.

На суднах крильчаті рушії встановлюються в місцях, які найбільш зручні для даного типу судна. На пасажирських суднах рушії встановлюються в кормі, на буксирах – у кормі або в носі, на портових кранах – посередині корпусу.

У системах електричного руху із прямим приводом гребного гвинта гребний електричний двигун змінного струму розташовується усередині корпусу судна на одному валу із гребним гвинтом без використання редуктора. Частота обертання ГЕД (асинхронного з короткозамкненим ротором або синхронного з електромагнітним збудженням або зі збудженням від постійних магнітів) регулюється перетворювачами частоти, які підключаються до розподільного щита.

Один з нових варіантів побудови ГЕУ заснований на застосуванні системи "Азипод". В 1987 році фахівцями фірми АВВ була запропонована нова ГЕУ (патент Фінляндії FI76977), названа Azipod (Azimuthing Podded Drive – азимутальний рушійний привід гондольного типу).

Azipod – це без редукторна гвинторульова колонка (рис. 1.5), ГЕД якої розташований у заглибній гондолі поза корпусом судна. У складі ГРК використовується ГФШ. Частота обертання гвинта регулюється за рахунок зміни швидкості ГЕД (асинхронного або синхронного з електромагнітним порушенням або з порушенням від постійних магнітів) за допомогою перетворювачів частоти 2, які підключаються до генераторних

агрегатів 3. Судно, оснащене Azipod, не вимагає установки кермових пристроїв і довгих валопроводів.

Рис. 1.5. Гвинорульова колонка типу Азипод 1 – Азипод, 2 – перетворювачі частоти, 3 – дизель-генератори

Гондола із шахтою встановлюються під кормою судна таким чином, щоб відкритий верхній торець шахти виходив на палубу, що перебуває вище ватерлінії. На цій палубі з необхідні для роботи ГЕУ системи. Шахта й гондола із гребним гвинтом може розвертатися за допомогою гідроприводів або електроприводів навколо вертикальної осі. При цьому змінюється напрямок тягового зусилля гвинта щодо поздовжньої осі судна. "Азипод" забезпечує рух судна, а також заміняє кермовий пристрій і кормовий пристрій, що підрулює.

За даними виробника, Azipod застосовується більш, ніж на 25 видах суден, у тому числі на судах льодового класу, криголамах, круїзних суднах, танкерах, судах технічного флоту й багатофункціональних суден постачання.

На рисунку 1.6 представлена схема пристрою "Азипод", що дозволяє зрозуміти склад ГЕУ.

Рис. 1.6 Схема пристрою "Азипод"

Електропостачання електродвигуна й допоміжного устаткування, розміщеного в гондолі, здійснюється або через блок струму знімальних кілець, установленного у верхній частині шахти, або через 19

гнучкі кабелі, що допускають закручування при повороті гондоли із шахтою.

При використанні струму знімальних кілець вузол гондоли може обертатися навколо вертикальної осі на 360° , при використанні гнучких кабелів кут повороту гондоли обмежений.

Керування гребними електродвигунами забезпечується за допомогою напівпровідникових перетворювачів частоти.

Система електричного руху "Азипод" має цілий ряд істотних достоїнств, які дозволили їй одержати широке поширення: забезпечує відмінні динамічні якості й маневреність судна; підвищує безпеку плавання й резервування рухомій установки; виключає потреба в довгій лінії водопроводу, кермі, кормових пристроях, що підрулюють, гвинті регульованого кроку й понижуючих редукторів; допускає більш просту конструкцію корпусу судна; дозволяє заощаджувати корисний простір на судні для вантажів і пасажирів; знижує рівні шуму й вібрації, операційна гнучкість ГЕУ веде до зменшення встановленої потужності, до зниження витрати палива, зменшенню вартості ремонту, поліпшенню екології через зменшення кількості вихлопних газів; · зменшує час простою судна.

В 2001 році розроблена система CRP Azipod® (рис. 1.7). У цій системі використовується комбінація двох гребних установок – один гвинт через традиційний водопровід обертає тепловий двигун, наприклад, дизель, а в потоці води, створюваним першим гвинтом, розташовується рушій CRP Azipod® із гвинтом, що обертається в протилежному напрямку (CRP означає співвісні гребні гвинти протилежного обертання).

Рис. 1.7. Система CRP Azipod

Установка CRP Azipod® забезпечує підвищення маневреності й резервування в порівнянні із двох вальними традиційними ГЕУ.

Стають непотрібними другий валопровід і кормовий пристрій, що підрулює, - звільняється значний корисний обсяг на судні. Крім того, CRP Azipod® дозволяє підвищити ККД ГЕУ, необхідна потужність ГЕУ зменшується на 10%-15%.

Гвинторульові колонки. Другим напрямком розвитку

систем електричного руху є створення й застосування гвинторульових колонок великої потужності.

Гвинторульова колонка – пристрій, що включає муфту для з'єднання з валом гребного двигуна, механічну передачу й гребний гвинт. На рисунку 1.8 показаний пристрій гвинторульовій колонки німецької фірми Schottel.

Рис. 1.8. Пристрій ГРК фірми Schottel

Вал гребного електродвигуна розташовується горизонтально, у гвинторульовій колонці за допомогою конічної зубчастої передачі обертання електродвигуна передається на вертикальний вал і з вертикального вала за допомогою ще однієї конічної зубчастої передачі обертання передається на горизонтальний вал, на якому встановлений гребний гвинт.

ГЕУ з гвинторульовими колонками по багатьом властивостям аналогічні ГЕУ із системою "Азипод". Також як і пристрій Азипод гвинторульові колонки можуть розвертатися навколо вертикальної осі й міняти напрямок тяги гвинта, що дозволяє відмовитися від кермового пристрою й кормового пристрою, що підрулює. ВРК забезпечують відмінні динамічні якості й маневреність судна; підвищують безпеку плавання; виключає потребу в довгій лінії валопроводу, кермі й кормових пристроях, що підрулюють.

Як й у пристроях Азипод у ГРК можна застосувати один або два зустрічно обертові гвинти. ГРК більше компактні, чим пристрій Азипод, і створює менший гідродинамічний опір при русі судна. Тому що в конструкції гвинторульовій колонці використовується редуктор, то для рушія можна використати електродвигун з більшою частотою обертання й менших габаритів, чим у пристроях Азипод. Однак потужність і момент гвинторульовій колонці обмежують зубчасті пари механічної передачі, і в цей час вона становить менше 10 МВт. При

більших значеннях потужності ГЕУ необхідна установка гвинта безпосередньо на вал двигуна.

1.5. Первинні двигуни та їх характеристики

Первинні двигуни для суднових електростанцій – це джерела механічної енергії, які приводять у дію генератори та забезпечують електроживлення суднових споживачів (у т.ч. електричну рушійну установку).

Вимоги до первинних двигунів відповідно до «Правил класифікації та побудови морських суден» Регістра судноплавства України.

Допустимі відхилення частоти обертання.

1. Якщо генератори ГЕУ використовуються також для живлення суднової мережі, то відхилення частоти генераторів при відповідних змінах навантаження, не повинні заважати роботі суднових електроспоживачів.

2. Якщо система керування частотою обертання гребного гвинта вимагає змін частоти обертання первинних двигунів генераторів ГЕУ, то регулятори частоти обертання первинних двигунів повинні мати пристрої як місцевого, так і дистанційного керування частотою обертання.

3. Номінальна потужність, також здатність перевантаження, первинних двигунів, повинна вибиратися із урахуванням забезпечення потужності, необхідної у процесі змінних навантажень загального електричного обладнання, а також змін навантажень ГЕУ при маневруванні, у тому числі при важких (штурмових) погодних умовах у морі.

Паралельна робота. При паралельній роботі генераторів застосовувані системи регулювання повинні забезпечувати стабільний пропорційний розподіл навантажень в усьому діапазоні потужностей первинних двигунів.

Потужність реверсування.

1. При екстреному маневрі із повного переднього ходу на повний хід назад, первинні двигуни повинні бути здатні поглинути (абсорбувати) відповідну частину рекуперованої енергії без спрацювання захисту від “розносу” (без спрацювання граничного вимикача), чи від зворотної потужності.

2. Для абсорбування відповідної частини рекуперованої енергії та гальмування гребного електричного двигуна при реверсі, допускається застосування «резисторів гальмування», що забезпечують необхідне обмеження частоти обертання первинних двигунів і електричних машин у допустимих межах. Величина рекуперованої енергії повинна обмежуватися автоматизованою системою керування ГЕУ.

Сучасна технічна класифікація, з акцентом на практику суден із дизель-електричними та гібридними системами.

1. Дизельні двигуни (Diesel Engine, DE). Найпоширеніші первинні двигуни, які поділяються на: середньо обертові (500...1000 об/хв) – основні суднові ДГ; високо обертові (>1000 об/хв) – допоміжні ДГ; низько обертові – рідко для генерації, переважно в якості головного двигуна.

Паливо, яке використовують для дизелів: HFO, MDO, MGO, біопаливо.

HFO (Heavy Fuel Oil – важкий паливний мазут): це найважчий, найгустіший і найбрудніший вид палива з високим вмістом сірки (High Sulfur Fuel Oil, HSFO) та в'язкістю, яка вимагає підігріву.

MDO (Marine Diesel Oil – морське дизельне паливо): середнє за в'язкістю та складом, отримується шляхом змішування HFO з легшими дистилятами (наприклад, MGO), менш сірчистий, ніж HFO.

MGO (Marine Gas Oil – морський газойль): найлегший, найчистіший (Low Sulfur MGO, LS MGO), має низький вміст сірки (LSMGO), використовується як основне паливо або для змішування з HFO в контрольованих зонах плавання (ЕСА

– Emission Control Areas) для дотримання норм ІМО 2020, де використання HFO з високим вмістом сірки заборонено.

Потужність дизельних двигунів від 100 кВт до 20+ МВт.

Переваги: висока надійність, добре відпрацьована технологія, просте обслуговування.

Недоліки: значні викиди NO_x , SO_x , CO_2 , зниження ККД на часткових навантаженнях

2. Газові та двопаливні двигуни (Gas / Dual-Fuel Engines) це перехідна технологія до «зеленого» флоту.

Паливо: LNG, LBG, метанол, аміак (в перспективі).

LNG (Liquefied Natural Gas) – це зріджений природний газ (метан), охолоджений до -162°C для зручного зберігання та транспортування, а LBG (Liquefied Biogas) – це зріджений біогаз (біометан), який виробляється з органічних відходів, є відновлюваним, має ті ж властивості та може використовуватися в тих самих системах, що й LNG, але з нульовими викидами вуглецю, що робить його екологічно чистішою альтернативою.

Природний газ охолоджується до наднизьких температур (-162°C), що зменшує його об'єм у 600 разів. Біогаз очищується та зріджується, подібно до LNG. Повністю взаємозамінний з LNG, використовується в тих самих транспортних засобах та інфраструктурі, підтримуючи циркулярну економіку.

3. Газотурбінні установки (Gas Turbine, GT). використовуються частіше для швидкохідних та військових суден. Потужність 5...50 МВт.

Переваги: висока питома потужність, мала маса та габарити, швидкий пуск. Недоліки: висока витрата палива, чутливість до якості повітря.

4. Парові турбіни (Steam Turbine).

Джерело пари: котел або ядерний реактор. Застосування: LNG-танкери (старі судна), атомні судна.

Переваги: плавна робота, можливість утилізації тепла,

Недоліки: великі габарити, низький загальний ККД.

5. Паливні елементи (Fuel Cells) – сучасна тенденція електросуден.

Типи: PEMFC, SOFC. PEMFC (Протонообмінний Паливний Елемент) і SOFC (Твердоокисний Паливний Елемент) – два провідні типи водневих паливних елементів, що відрізняються електролітом, робочою температурою та застосуванням: PEMFC працює при низьких температурах (близько 80°C), потребує чистого водню, ідеальний для транспорту, тоді як SOFC працює при надзвичайно високих температурах (500...1000°C) з твердим керамічним електролітом, що дозволяє використовувати різні види палива, забезпечуючи високу ефективність. Паливо: водень, метанол, LNG (через риформер).

Переваги: нульові або мінімальні викиди, високий ККД (до 60%), безшумна робота. Недоліки: висока вартість, обмежена потужність.

6. Додаткові / комбіновані джерела, як первинні або квазі-первинні в гібридних системах:

- акумуляторні батареї (Li-ion);
- відновлювані джерела (PV – сонячна енергія, вітроустановки);
- берегове електроживлення (OPS).

В наш час як первинні двигуни для генераторів ГЕУ частіше застосовують дизелі й турбіни – парові й газові. У судових установках середній ККД дизелів 34...40 %, паротурбінної установки (ПТУ) 24...28 %, газотурбінної установки (ГТУ) 28...40 %.

1.5.1. Дизелі

Завдяки відносно високому ефективному ККД і малому часу підготовки до пуску й роботи дизелі найбільше широко застосовуються в ГЕУ.

Ефективним ККД називають відношення теплоти,

перетвореної в ефективну роботу на валу, до всієї теплоти згоряння палива. Середнє значення ефективного ККД η й питомої витрати палива q суднових дизелів наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Значення питомої витрати палива й ефективного ККД суднових дизелів

Дизелі	Питома витрата палива, кг/(кВт·г)	Ефективний ККД, %
Низько оборотні	0,225-0,195	38,0-34,5
Середнє оборотні	0,240-0,215	36,0-39,5
Високо оборотні	0,250 -0,230	34,0 - 37,0

Ефективною потужністю називають корисну потужність дизеля РПД, що віддається генератору на фланці вала. Номінальна потужність дизеля –ефективна тривала потужність, призначувана підприємством-виготовлювачем при номінальній частоті обертання. Максимальна потужність – короткочасна потужність дизеля, що перевищує номінальну і яка використовується протягом обмеженого часу.

Пуск потужних дизелів виконується стисненням повітрям, що подається в циліндри. Частота обертання, при якій забезпечується заданий ступінь нестабільності, називається мінімально стійкою й становить близько 30% номінальної. При меншій частоті обертання дизель не може працювати й нести навантаження. Суднові дизелі допускають короткочасне збільшення частоти обертання на 10...15% вище номінальній.

Паливо в циліндри подається під тиском спеціальними паливними насосами. Регулювання частоти обертання й потужності дизеля здійснюється зміною кількості подаваного палива за допомогою регулюючої рейки, що змінює хід плунжера одночасно у всіх насосів. У всьому діапазоні частоти обертання дизель працює із практично постійним обертаючим моментом.

Розрізняють наступні характеристики дизеля:

1) швидкісні характеристики (зовнішні й гвинтові).

Зовнішні характеристики – залежності відносних параметрів (РПД, МВ.Р, q) від частоти обертання дизеля n (рис. 1.9), які знімаються при ручному керуванні рейкою паливних насосів з фіксацією її положення при різних постійних значеннях корисного ходу плунжера.

Рис. 1.9. Характеристики дизеля: а – швидкісні; б – регуляторні; в – навантажувальні

Зовнішні характеристики при навантаженні, що допускається короткочасно (1...2 години) і граничній подачі палива називаються максимальними кривими (криві 1 й 1').

Криві 2, 2' й 2'' є основними зовнішніми характеристиками дизеля й знімаються при положенні дозуючих органів, що відповідає номінальній потужності й номінальній частоті обертання.

Крива 3 являє собою зовнішню характеристику експлуатаційної потужності, при якій забезпечується довгострокова й економічна робота дизеля.

Криві 4 й 5 є зовнішніми характеристиками часткових потужностей (часткові характеристики) і знімаються при зменшеній подачі палива.

Крива 5 – часткова характеристика, що відповідає мінімальної потужності при тривалій роботі; вона називається нижньою обмеженою характеристикою.

Всі характеристики обмежуються установкою спрацьовування, що при спрацьовуванні відтинає подачу палива (крива 6).

При з'єднанні дизеля безпосередньо із гребним валом регулювання потужності й частоти здійснюється по гвинтових характеристиках.

2) регуляторні характеристики – залежності параметрів

від частоти обертання при різних установах все режимного регулятора (рис. 1.9, б), що на відміну від однорежимного регулятора (наприклад, граничного) при змінному навантаженні підтримує будь-яку задану частоту обертання зміною подачі палива. Основна зовнішня характеристика (крива 4) і характеристика граничного регулятора (крива 5) залишаються такими ж, що й у випадку, представленому на рис. 1.9, а (криві 2 й 6 відповідно). Дизель із все режимним регулятором при заданій частоті обертання працює по регуляторних характеристиках при астатичному (криві 1, 2, 3) або статичному (криві 1', 2', 3') регулюванні. Нахил кривих 1', 2', 3' (характеризується різницею $\Delta n = n' - n$) визначається статизмом (ступенем нерівномірності) все режимного регулятора.

3) навантажувальні характеристики – залежність параметрів від навантаження при незмінній частоті обертання й змінній подачі палива, тобто при роботі дизеля із все режимним регулятором (рис. 1.10).

На рис. 1.10. наведені характеристики дизеля. Крім зовнішніх характеристик $M_{BP} = f(n)$, $R_{PD} = f(n)$ та $q = f(n)$ на рис. 1.10, а показані залежності механічних втрат у діапазоні (потужності P_c і моменту опору M_c) від частоти обертання, які враховують при розрахунку перехідних процесів. На рис. 1.10, б наведені криві питомої витрати палива залежно від ефективної потужності для різної частоти обертання (навантажувальні характеристики), а на рис. 1.10, в – криві залежності ефективної потужності дизеля від атмосферного тиску при різних температурах навколишнього середовища.

Рис. 1.10. Навантажувальні характеристики дизеля

Керування дизелем виконується в такий спосіб:

Паливо подається насосом, плунжер якого приводиться

від вала дизеля. При зміні навантаження й відхиленні частоти обертання від заданої регулятор через гідравлічний серводвигун, важільну передачу й регулюючу рейку відповідно зменшує або збільшує подачу палива, підтримуючи тим самим сталість заданої частоти обертання. Вимірювальним елементом відключення частоти обертання служать обертові вантажі, укріплені на траверсі регулятора, що приводиться в обертання від вала дизеля.

Зміна установки частоти обертання дизеля виконується зміною затягування все режимної пружини регулятора вручну або дистанційно за допомогою сервомотора.

При роботі вхолосту або з малими навантаженнями (робота нижче обмеженої характеристики) незалежно від частоти обертання погіршується якість розпилення палива, що приводить до розрідження масла незгорілим паливом. Для запобігання цього служить пневматичний механізм відключення ряду паливних насосів; насоси, що залишилися в роботі, збільшують подачу палива, і процес згоряння поліпшується. Пневматичний механізм відключення управляється спеціальним електропневматичним вентилем і переводить регулюючу рейку ряду паливних насосів у положення, що відповідає виключеній подачі палива. Включення й вимикання вентиля забезпечується схемами ГЕУ.

Для екстреної дистанційної зупинки дизеля передбачається блокувальний магніт, що при перемиканні котушки перекриває подачу палива. Передбачається аварійний захист дизеля в наступних випадках:

- а) при підвищенні припустимої частоти обертання – за допомогою відцентрового граничного регулятора;
- б) при зниженні тиску масла нижче припустимого – за допомогою реле тиску, що знімає навантаження й перекриває подачу палива;
- в) при переході одного з послідовно включених генераторів

постійного струму в руховий режим у випадку зупинки його дизеля (захист від зворотного обертання) – за допомогою реле прісної води (якщо вода подається наваженим насосом), що при зниженні тиску до 40...25% номінального знімає збудження з генератора, що зупиняється агрегату. Цей захист можна виконати за допомогою реле напруги, підключеного до наваженого тахогенератора; реле знімає збудження з генератора при зниженні частоти обертання до 20...40% мінімально стійкої.

1.5.2. Парові турбіни

Суднові парові турбіни, застосовувані в ГЕУ, можуть мати агрегати потужністю до 60 МВт.

Відношення ефективної потужності на валу до потужності, що розподіляє турбіни називають ефективним відносним ККД турбоагрегату $\eta_{ос}$, що досягає 75...80 %. Ефективний відносний ККД турбоагрегату (внутрішній відносний ККД турбіни) – це показник, що характеризує досконалість проточної частини самої турбіни, з огляду на втрати енергії через тертя пари, вихрів і витоків, а також втрати енергії на подолання опору стопорних і регульовальних клапанів, але крім втрат на виході з турбіни з відпрацьованою парою й механічні втрати, відбиваючи, наскільки ефективно теплова енергія перетвориться в механічну роботу усередині турбіни. Це ключовий параметр для оцінки конструкції й ефективності лопаткового апарата.

На рис. 1.11 показана зона ефективного відносного ККД турбін залежно від їх потужності.

Рис. 1.11. Ефективний відносний ККД турбін

Механічні втрати в самій турбіні становлять 1...3% її потужності, втрати на обертання непрацюючих щаблів – до 2% і втрати в редукторі при простій передачі 1,5...2% (при

подвійній передачі 3...4%). Значення механічних втрат необхідно враховувати при розрахунку перехідних процесів для запобігання розгону турбіни енергією рекуперації. Відношення дійсної, або валовий, потужності до внутрішньої потужності називається механічним ККД.

Питома витрата пари в сучасних парових турбін досягає 3,4...4,4 кг/(кВт·г); при використанні атомних паро енергетичних гребних установок питома витрата пари збільшується до 5,5 кг/(кВт·г) через низькі параметри пари.

Діапазон регулювання частоти обертання парових турбін – від 25 до 115% номінальної частоти обертання. Регулювання частоти обертання й потужності звичайно виконується спеціальним маневровим клапаном, що змінює кількість подаваної пари (рідше – регулюванням параметрів пари). У ГЕУ постійного, подвійного і змінного струму зі статичним перетворювачем частоти турбіни працюють із постійною частотою обертання. У звичайних ГЕУ змінного струму частота обертання може змінюватися в широких межах.

Для підтримки заданої частоти обертання при змінах навантаження турбіни обладнають швидкодіючим регулятором сталості частоти обертання, що змінює подачу пари в турбіну. Регулятор приводить потужність турбіни у відповідність із навантаженням і підтримує задану частоту обертання, а також забезпечує усталену роботу турбіни при раптовому скиданні або накиді навантаження. При розрахунках системи електричного руху враховують часи накиду й скидання 100% навантаження, максимальні й мінімальні значення частоти обертання при цьому скиданні й накиді, а також статизм і точність регулятора.

Рис. 1.12. Характеристики турбіни

На рис. 1.12 наведені характеристики турбіни. Зовнішня характеристика (крива 4) – це залежність потужності від

частоти обертання при зміні подачі пари. Регулятор сталості частоти обертання забезпечує одержання регуляторних характеристик (криві 1, 2, 3). Нахил кривих, що характеризується різницею $\Delta n = n' - n$ визначається статизмом регулятора (звичайно не більше 5%). При зміні навантаження частота обертання також змінюється по цих характеристиках і підтримується з точністю $\pm 0,5\%$.

Турбіна забезпечується вимикачем граничної частоти обертання (регулятором безпеки), що діє незалежно від інших регуляторів і припиняє подачу пари при досягненні турбіною частоти обертання, рівної 112...115% номінальної.

Для екстреної зупинки турбіни передбачається швидко запірний клапан (ШЗК), установлений на головному паропроводі перед турбіною.

Аварійна зупинка турбіни за допомогою ШЗК передбачається в наступних випадках:

- а) при перевищенні припустимої частоти обертання – за допомогою вимикача граничної частоти обертання;
- б) при зниженні тиску масла в напірному мастилопроводі нижче припустимого – за допомогою масляного вимикача;
- в) при різкому погіршенні вакууму в конденсаторі – за допомогою вакуум-реле.

Крім того, у ГЕУ постійного і змінного струму із ПЧ повинен передбачатися захист від неприпустимого розгону ротора турбіни енергією рекуперації в перехідних режимах. Цей захист може бути здійснений, наприклад, за допомогою реле напруги, підключеного до тахогенератора турбіни, або реле потужності рекуперації. При неприпустимому збільшенні частоти обертання (розгоні) реле спрацьовує й дає імпульс на зниження рухового моменту генератора до значення, меншого, чим момент механічних втрат турбіни. Установка спрацьовування повинна бути нижче установки граничного вимикача – близько 105% номінальної частоти обертання.

1.5.3. Газові турбіни

До складу ГТУ входять турбіна, повітряний компресор і камера згоряння, конструктивно об'єднані в один агрегат. Гази, що виділяються при згорянні палива, з високими температурою й тиском (при горінні температура досягає 1500...2000 °С) після змішування з повітрям утворюють робоче тіло, що володіє запасом потенційної теплової енергії. Компресор і камера згоряння служать для підготовки робочого тіла, що потім надходить у щаблі газової турбіни. Придбана при розширенні газу кінетична енергія робочого тіла перетворюється в механічну так само, як й у щаблі парової турбіни. Компресор приводиться від вала турбіни, тому частина енергії робочого тіла витрачається на одержання стисненого повітря, що забезпечує процес горіння.

Найпростішим варіантом газової турбіни є турбіна, схема якої представлена на рис. 1.13.

Рис. 1.13. Газова турбіна:

- 1 – компресор; 2 – камера згоряння; 3 – газова турбіна;
- 4 – редуктор;
- 5 – генератор

Турбіна 1 нагнітає повітря в камеру згоряння 2, де при спалюванні палива утвориться робоче тіло, що подається в газову турбіну 3. У такій системі мають місце більші втрати тепла у відпрацьованих газах. ККД не перевищує 20 %.

Основним методом підвищення ККД є регенерація, тобто корисне використання теплоти відпрацьованих газів для підігріву повітря, яке подається в камеру згоряння. Прикладом такої турбіни є турбіна на рис. 1.14. Її ККД досягає 26...28 %.

Рис. 1.14. Газова турбіна з регенератором

- 1 – компресор; 2 – камера згоряння; 3 – газова турбіна;

- 4 – редуктор;
5 – генератор; 6 – регенератор

Ще більший ККД може бути отриманий при використанні двоступінчастого компресора – низького й високого тиску (рис. 1.15). ККД такої турбіни досягає 28...30 і більше відсотків.

- Рис. 1.15. Газова турбіна з двоступінчастим компресором:
1 – компресор; 2 – камера згоряння; 3 – газова турбіна;
4 – редуктор;
5 – генератор; 6 – регенератор; 7 – холодильник

Завдяки відсутності котельної установки, конденсаторів й обслуговуючих їхніх систем, ГТУ мають більшу економічність і меншу питому масу в порівнянні із ПТУ тієї ж потужності (табл. 1.3), а також меншими габаритами.

Існуючі типи ГТУ розрізняються робочими циклами, способами з'єднання компресора з турбіною, видом застосовуваного палива, способом його спалювання й т.д.

Застосовувані в суднових ГТУ газові турбіни мають ефективний відносний ККД 85...87 % (одноступінчасті) і 87...89 % (двоступінчасті).

Таблиця 1.3. Порівняльні характеристики ПТУ й ГТУ			
Установка	Питома маса, кг/кВт	Питома витрата палива, г/(кВт·г)	Абсолютний ефективний ККД, %
Паротурбінна (з урахуванням котельної установки)			
136...150	365...380	25	
Газотурбінна	104...110	300...315	28...40

При пуску провертання вала ГТУ походить від спеціального пускового двигуна (наприклад, електродвигуна); первісне запалення палива здійснюється від спеціального блоку

запалювання.

Регулювання потужності ГТУ виконується зміною кількості подаваного в камеру згоряння палива. ГТУ, застосовувані для приводу генераторів, повинні мати відцентровий регулятор, що підтримує при зміні навантаження задану частоту обертання зміною подачі палива. Характеристики ГТУ при автоматичному регулюванні аналогічні характеристикам парової турбіни.

Ефективний ККД ГТУ істотно залежить від температури газу. По виходу з камери згоряння газу змішуються зі стисненим повітрям, що знижує на виході в турбіну температуру робочого тіла до 600...800 °С. Перспективні суднові ГТУ з температурою робочого тіла вище 800 °С, у яких використаються нові жаростійкі матеріали.

У ГТУ передбачається захист, що припиняє подачу палива в наступних випадках:

- а) при досягненні гранично припустимої частоти обертання (110...112 % номінальної) – за допомогою регулятора граничної частоти обертання;
- б) при перевищенні припустимого значення температури газу – за допомогою спеціальної схеми, що працює від термопар;
- в) при зниженні тиску масла й охолодної води нижче граничного значення – за допомогою відповідних реле тиску.

1.6. Механічні характеристики гвинта

Механічні характеристики виконавчих механізмів мають, поряд з характеристиками електродвигунів, важливе значення для розгляду різних режимів роботи електроприводу. При аналізі роботи ГЕУ найбільший інтерес представляють характеристики гвинта. Як і всі механічні характеристики, вони є статичними, тобто кожна точка характеристики відповідає

«своїй» цілком визначеній швидкості судна і визначальній швидкості обертання гвинта.

Робочі характеристики гвинта. Робочою характеристикою гвинта називають залежність моменту опору гвинта M від його кутової швидкості при незмінному напрямі руху і певних умовах плавання судна. Залежність M від при постійності останніх величин є квадратичною параболою:

Проте насправді така залежність можлива лише на невеликій ділянці робочої характеристики (тобто при незначній зміні швидкості). Якщо ж кутову швидкість гвинта змінювати в значних межах, то помітно змінюватимуться як швидкість судна, так і хід гвинта, що відповідно до кривої дії гребного гвинта викличе зміну коефіцієнта моменту. Таким чином, в рівнянні коефіцієнт c не буде величиною постійною, а це означає, що строго параболічна залежність не дотримується.

Розрахунок ГЕУ ґрунтується на використанні наступних характеристик (рис. 1.16): основною, такою, що знімається при номінальному осіданні і вільному русі судна в спокійній воді (крива 1); швартовою, такою, що знімається при нерухомому судні (крива 2). В режимі на швартовах момент опору гребного гвинта буде максимальним. Якщо гребний двигун в цьому режимі розвине номінальну швидкість, то момент M на його валу значно перевищить номінальне значення.

Рис. 1.16. Нерeverсивні характеристики гребного гвинта

При розрахунку ГЕУ криголамів і буксирів необхідно також використовувати наступні характеристики: для криголамів – льодову, що отримується при ході судна в льоду (крива 3); для буксирів – буксировочну, отриману при ході судна з возом (крива 4). По характеру роботи гвинтів у вказаних режимах дві останні характеристики є проміжними між

основною і швартовою характеристиками.

Танкери, лісовози і деякі інші судна в зворотній рейс зазвичай ідуть порожніми (або з баластом). При цьому зменшується осідання судна і опір води його руху. Такому режиму відповідає на рис. 6.1 крива 5. При тих же швидкостях моменти опору на гвинті, що працює по цій кривій будуть порівняно невеликі, а це означає, що робоча характеристика гвинта при ході судна порожнім в спокійній воді розташована нижче основної і інших робочих характеристик.

Варто звернути увагу на те, що при пуску гребного двигуна й нерухомому судні момент опору не дорівнює нулю. У цьому режимі характеристика швартовна проходить через точку $M_{тр} \approx 0,25 M_n$.

Реверсивна характеристика гвинта. Реверсивною характеристикою гвинта називають залежність моменту опору гвинта M від його кутової швидкості ω при реверсі гребного двигуна, що викликає зміну напрямку обертання гвинта при незмінному поступальному ході судна. Не слід змішувати реверс гребного двигуна з реверсом судна, тобто з маневром, при якому напрям руху судна вперед змінюється на протилежний завдяки зміні напрямку упору гребного гвинта. Реверс гребного двигуна здійснюється за декілька секунд, тоді як реверс великих суден триває декілька десятків хвилин. Тому в першому наближенні будемо враховувати, що кожна реверсивна характеристика гвинта відповідає деякому незмінному ходу судна вперед.

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.

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. 1.17 (криві 6).

Рис. 1.17. 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 – реверсивні характеристики; 7 – реальна реверсивна характеристика, що враховує зміни швидкості судна під час реверса

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, представлені на рис. 1.17.

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

Механічна гвинтова характеристика ГКК представлена на рис. 1.18.

Рис. 1.18. Гвинтова характеристика ГКК: 1 – хід у вільній воді; 2 – швартова характеристика; 3 – розворот ГКК при русі судна

Реверс судна здійснюється шляхом розвороту ГКК. При розвороті ГКК можливо короточасне значне збільшення моменту опору гвинта, що може привести до зниження частоти обертання ГЕД.

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

1.7. Побудова ідеальної механічної характеристики ГЕД

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

Залежність частоти обертання ГЕД від його моменту називається механічною характеристикою двигуна.

У сталих режимах ГЕД працює при рівності моменту опору гвинта M_B і обертаючого моменту ГЕД M_D . Частота обертання визначається крапкою перетинання механічної характеристики двигуна $n_D = f(M_D)$ з характеристикою гвинта $M_B = f(n_B)$. У залежності від призначення судна й умов плавання характеристика $M_B = f(n_B)$ може займати будь-яке проміжне положення від характеристики, що відповідає ходу у вільній воді при водотоннажності в порожньому стані, до льодової, а в аварійних режимах (наприклад, при втраті лопатей гвинта чи його стопорінні) – у діапазоні від роботи при $M_D = 0$ до стоянки ГЕД під струмом при $n_D = 0$ (рис. 1.19).

Механічна характеристика ГЕД повинна виключати тривале неприпустиме перевантаження генераторів і первинних

двигунів (ПД), а також обмежувати максимальні момент і частоту обертання. Зона перевантажень по потужності ПД розташована вище за гіперболу сталості потужності $P_{ДН} = M_{Д} \omega_{ПД} = \text{const}$.

ГЕД змінного струму мають жорстку природну механічну характеристику (пряма АД на рис. 1.19, що обмежує частоту обертання, але не обмежує момент, що може привести до перевантаження елементів ГЕУ (точки Д, Е). При $n_g = 0$ максимальний момент на гвинті необхідно обмежити значенням $(1,5 \dots 3,0) M_n$ (точка Г), що і враховується при проектуванні ГЕД, рушійного комплексу й електропривода.

Рис. 1.19. Механічні характеристики ГЕД і характеристики гвинта:

- 1 - льодова; 2 - швартовна; 3 - буксирувальна;
- 4 - при ході у вільній воді; 5 - при втраті лопатей гвинта

З метою виключення перевантаження елементів ГЕУ застосовують регулювання параметрів ГЕД для одержання механічної характеристики, що наближається до гіперболи $M_{Д} \omega_{ПД} = \text{const}$. Ідеальна штучна механічна характеристика має вид кривої АБВГ на рис. 1.19.

У ГЕУ змінного струму штучні механічні характеристики виду АБВГ із різним ступенем наближення до гіперболи $M_{Д} \omega_{ПД} = \text{const}$ одержують за допомогою систем автоматичного регулювання збудження ГЕД і генераторів.

Побудування ідеальної механічної характеристики ГЕД для судна треба розпочинати з побудови робочих характеристик гребного гвинта, що задаються у відносних одиницях і приведені в табл. 1.4, де M_n , n_n – номінальні момент і частота обертання; M_v – момент на гребному валу при ході у вільній воді; – момент швартовної характеристики; – момент льодової характеристики при обертанні гребного гвинта

в дрібнобитому льоді; $M_{\text{воз}}$ – момент при "ході з возом"; – момент реверсивної характеристики при номінальній швидкості ходу судна.

Момент торкання гребного гвинта .

Таблиця 1.4. Механічні характеристики гребного гвинта

1,0	1,0				1,0
0,8	0,64				0,25
0,6	0,36	1,30	1,62	1,08	– 0,30
0,4	0,17	0,55	0,68	0,46	– 0,53
0,2	0,045	0,14	0,175	0,116	– 0,52
0,1	0,015	0,035	0,43	0,029	– 0,45
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	– 0,39
– 0,1			– 0,035		– 0,44
– 0,2			– 0,14		– 0,60
– 0,4			– 0,55		– 1,28
– 0,6			– 1,30		

Для великої кількості суден для побудови вибирають залежності моменту опору на гребному гвинті від частоти обертання й умов плавання: характеристику ходу у вільній воді 1 і швартовну характеристику 2 (рис. 1.19).

Точка номінального режиму ГЕД, на якій експлуатується ГЕУ найбільш тривалий час, вибирається на характеристиці 1.

Розрахунки вартості експлуатації показують, що на будь-якому режимі має максимально використовуватися

встановлена потужність головних машин.

Тому з точки номінального режиму будуюмо гіперболу сталості потужності по формулі $M_{\square n} = M_n \square n$. У результаті одержуємо ділянку АВ.

Рис. 1.20. Побудова ідеальної механічної характеристики ГЕД

Точку В з'єднуємо з точкою D прямою, а точку А – з точкою С. Відрізок ОС дорівнює максимальній припустимій частоті обертання ГЕД (якщо ця величина невідома, то приймають $n_{\square}$). Відрізок OD дорівнює $n_{\square}$. 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. Так одержуємо ідеальну механічну характеристику САВD.

При розгоні ГЕД у швартовому режимі, коли судно нерухомо 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 $M_{ГЕД} = \text{const}$.

У міру розгону 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 В до робочої точки А $P_{ГЕД} = \text{const}$. Тривалість розгону судна

й роботи ГЕД у даному режимі може становити від декількох хвилин.

Після виходу ГЕД на номінальну частоту обертання (робоча точка А, рис. 1.20) підтримується режим сталості частоти обертання ГЕД $n_{ГЕД} = \text{const}$.

У ходових режимах застосовуються два способи регулювання ГЕД:

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

Швидкість судна залежить від частоти обертання гвинта. При ході судна на хвилюванні або в льоді при роботі в режимі $n_{ГЕД} = \text{const}$ 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 $P_{ГЕД} = \text{const}$.

Точне виконання вимог ідеальної механічної характеристики в ряді випадків приводить до невиправданого подорожчання схеми ГЕУ. Тому для електроходів реальна механічна характеристика проходить через дві обрані точки ідеальної характеристики: А і В а на інших ділянках максимально до неї наближається.

Однак основною задачею при проектуванні схеми керування ГЕУ є максимальне наближення реальної механічної характеристики до ідеального при забезпеченні достатньої надійності і мінімальної вартості використаних елементів.

1.8. Розрахунок буксирувальної потужності судна та визначення потужності головних двигунів

Ходкістю називається властивість судна пересуватися з заданою швидкістю за мінімальних витрат потужності або

розвивати максимальну швидкість за визначеної потужності головного двигуна. Для її оцінки необхідні два основних складники: опір руху судна та гідродинамічні характеристики рушіїв. Їх знання дозволяє зв'язати гідродинаміку пропульсивного комплексу «корпус судна – рушії» з характеристиками гребних двигунів та провести оцінку ходових якостей судна.

Необхідна потужність головних двигунів судна визначається ефективністю пропульсивної установки та буксирувальною потужністю, що залежить від опору руху судна.

Повний опір руху судна складається з декількох складників:

- де – опір тертя;
- опір шороховатості;
- опір виступаючих частин;
- хвильовий опір;
- опір форми.

Опір тертя між водою та корпусом виникає внаслідок в'язкості води. В значній мірі він залежить від характеру руху води у граничному шарі, під котрим розуміється область рідини, де відносна швидкість швидко зростає від нульового значення, безпосередньо біля змоченої поверхні судна, до швидкості оточуючого потоку і де в'язкість рідини проявляється найбільш суттєво.

Визначення опору тертя проводиться на основі значення числа Рейнольдса, що дозволяє визначити характер руху рідини та коефіцієнт тертя.

Число Рейнольда визначається за виразом

- де V – швидкість судна, м/с;
- довжина судна, м;
- кінематичний коефіцієнт в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$.

Опір виступаючих частин зумовлений наявністю різних структурних формувань, що розташовуються поза межами

гладкого корпусу – керма, акулкових кілів, кронштейнів гребних валів і тощо.

Хвильовий опір має своєю причиною створення хвиль при русі судна, наявність котрих викликає зміну розподілу тисків на змочену поверхню судна. Внаслідок перерозподілу тисків з'являється додаткова рівнодіюча горизонтальних тисків, спрямована проти руху судна, котра представляє собою хвильовий опір.

Опір шорткості має природу спільну з опором тертя і являє собою додатковий складник, що враховує нерівномірність поверхні корпусу судна.

Природа опору форми пов'язана з тим, що при русі судна швидкість руху частин води у міделового перерізу буде більшою, аніж у зонах, зміщених до носа та корми. Це призводить до утворення вихорів, що супроводжується явищем відриву рідини від змоченої поверхні.

Опір тертя може бути з достатньою точністю визначене розрахунковим шляхом. Опір форми та хвильовий опір залежать від ряду факторів, теоретичне врахування яких пов'язане з багатьма складностями, тому ці дві складові об'єднуються під спільною назвою залишкового опору та визначаються на основі проведення дослідного моделювання:

Опір виступаючих частин та повітря з необхідною точністю також визначають дослідним шляхом на моделі судна. При проведенні розрахунків використовувалися результати модельних іспитів для серій суден аналогічних характеристик.

Визначним параметром при розрахунках ходкості судна є число Фруда, що безпосередньо пов'язане зі швидкохідністю судна.

- де V – швидкість судна, м/с;
– прискорення вільного падіння, м/с²;

– довжина судна, м.

Так в залежності від числа Фруда судна поділяються на тихохідні ($Fr < 0,23$), середньо швидкісні ($Fr = 0,23 \dots 0,35$) та швидкохідні ($Fr > 0,35$).

При $Fr < 0,35$ опір тертя складає більше половини повного опору. З підвищенням шорсткості зовнішньої обшивки питоме значення опору тертя зростає.

В загальній частині залишкового опору значення опору форми за всіх відносних швидкостей відносно невелике, але воно помітніше за невеликих відносних швидкостях та повних обрисах корпусу.

Величина хвильового опору зростає зі збільшенням числа Фруда та починає вигравати суттєву роль у повному опорі за значеннях $Fr < 0,15$.

Опір повітря невеликий та при штилі та слабкому вітрі становить 1,5...3% повного опору. При сильному вітрі воно може досягати 10% та більше.

При проектуванні гребних установок особлива увага приділяється виключенню можливості виникнення кавітації.

Явище кавітації полягає у тому, що при зниженні абсолютного тиску біля лопатей працюючого гвинта до тиску насиченої пари для даної температури оточуючого простору відбувається кипіння води біля поверхні лопатей. Внаслідок цього вода відривається від лопатей, а звільнений простір заповнюється водяною парою та частками повітря та розчинених у воді газів.

Визначають дві стадії кавітації. Перша стадія – коли явище починає розвиватися, але не призводить до помітного зниження ККД. При цьому втрачена площа упору гвинта компенсується перерозподілом тиску по іншій довжині профілю. Шкідливий вплив кавітації на цій стадії зводиться до явища корозії матеріалу гвинта. Друга стадія – коли зона кавітації охоплює усю засмоктуючу поверхню лопаті гвинта. При

цьому відбувається чисельне зниження упору, моменту та ККД гвинта.

В процесі експлуатації судно опиняється в умовах, відмінних від умов приймально-здавальних випробувань (свіжо пофарбований корпус, відсутність вітру та хвиль, глибока вода). Наслідком цього стає збільшення буксировального опору, що враховується на стадії проектування введенням експлуатаційної надбавки .

Для прикладу розрахунок буксировальної потужності проводимо за методикою, викладеною у [3] на основі головних розмірів судна-прототипу, що наведені у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5. Параметри судна

№	з/п	Характеристика	Позначення	Одиниці	вимірювання
		Значення			
1	Дедвейт	DW	т	5900	
2	Довжина	L	м	104	
3	Ширина	B	м	16,6	
4	Висота борту	H	м	7.8	
5	Осадка	T	м	6,06	
6	Коефіцієнт повноти	δ	-	0,6	
7	Швидкість максимальна	V_{max}	вуз	14,5	

Площа змоченої поверхні голого корпусу (за формулою В.А. Семеки):

m^2 .

Площа змоченої поверхні з урахуванням площі поверхні виступаючих части для двогвинтових суден:

m^2

Розрахунок залишкового опору проводиться методом, призначеним для серії вітчизняних швидкохідних та

середньошвидкісних універсальних суховантажних, контейнерних та трейлерних суден. Характерні особливості суден серії наведені у таблиці 8.2

Таблиця 1.6. Характерні особливості суден серії суховантажів

№	Характерна особливість	Судна серії	Проектоване
з/п	суховантажне судно		
1	Форма носової оконечності	V, бульб	бульб
2	4,8...7,0	6,27	
3	2,0...5,0	2,74	
4	0,5...0,65	0,6	

Коефіцієнт залишкового опору судна визначається як

,
де – значення коефіцієнту залишкового опору для стандартних значень співвідношень основних розмірів судна та , що визначається за діаграмою для суден з бульбо образною носовою конечністю;

та – відповідні виправні коефіцієнти, що враховують невідповідність параметрів судна стандартним.

Число Фруда

.
За діаграмою визначається .

Коефіцієнт впливу невідповідності відношення судна та для стандартної серії визначається за допомогою діаграми для визначеного числа Фруда як відношення розрахункового та стандартного

.
За відповідною діаграмою визначається значення; .

Коефіцієнт впливу невідповідності відношення судна стандартному

Значення коефіцієнту, що враховує невідповідність розрахункового відношення судна та для стандартної серії визначається за відповідною діаграмою в залежності від числа Фруда [3].

Коефіцієнт опору шорсткості для морських суден довжиною 50...150 м становить.

Коефіцієнт виступаючих частин для двогвинтових суден з одним кермом у діапазоні коефіцієнтів повноти 0,55...0,6 дорівнює.

Число Рейнольдса:

де m^2/s кінематичний коефіцієнт в'язкості.

Коефіцієнт опору тертя судна (за формулою Прандля-Шліхтінга)

Коефіцієнт буксирувального опору

Опір води руху судна

Н,

де $кг/м^3$ – густина морської води.

Буксирувальна потужність:

Вт.

Опір води руху судна з урахуванням експлуатаційної надбавки

Н,

де – експлуатаційна надбавка для суховантажних суден з $DW < 7000$ т.

Буксирувальна потужність з урахуванням експлуатаційної

надбавки

Вт.

В якості гребних гвинтів будуть застосовані некавітуючі гвинти серії Троста з шаблевидною формою контуру та комбінованим профілем перерізу лопаті, котрі у порівнянні з гвинтами інших серій мають більший на 5-6% ККД та краще пристосовані для роботи в неоднорідному потоці за корпусом судна. Вони використовуються на суднах зі швидкістю руху менше 25...27 вуз, виникнення кавітації на яких практично виключене. Проектування гвинтів цієї серії проводиться за допомогою експериментальних діаграм Троста.

Граничне значення діаметру гвинта

м.

Коефіцієнт побіжного потоку для двох вальних швидкохідних контейнерних суден (,).

Тяга гребного гвинта

Н.

Коефіцієнт діаметра тяги гребного гвинта

Коефіцієнт засмоктування для двох вального контейнеровоза

Розрахункове значення швидкості на диску гребного гвинта

м/с.

Розрахункове значення упору

Н.

Коефіцієнт навантаження гребного гвинта за упором при сталому діаметрі

Значення вказує на необхідність вибору трьох лопатних

гвинтів.

Дискове відношення та відносна товщина лопаті обираються з умови забезпечення достатньої міцності лопатей та відсутності другої стадії кавітації.

Мінімальне дискове відношення за умовами відсутності другої стадії кавітації

де α – коефіцієнт для латунних гвинтів;

β – коефіцієнт, що враховує зростання навантаження у залежності від умов експлуатації;

γ – визначається за діаграмою.

Питоме навантаження

Н/м.

Заглиблення вісі гребного гвинта

м.

За діаграмою для визначення мінімального дискового відношення для забезпечення необхідної міцності гвинта ; з урахуванням 60% запасу

Отже мінімальне дискове відношення становить

За результатами розрахунків обрано гвинт параметри якого наведені в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7. Параметри гребного гвинта

№

з/п	Назва параметру	Позначення	Значення
1	Кількість лопатей		
3			
2	Дискове відношення		
0,35			
3	Відносна товщина лопаті		

- 0,05
4 Відносний діаметр ступиці
0,180
5 Шагове відношення
0,5...1,4
6 Кут відхилення лопаті $\square$ 15°
7 Відносне зменшення шагу гвинта на ступиці q
0%

Розрахунок потужності гребних двигунів проводиться на основі гвинтової діаграми В-3-3,5 для , .

Для використання синхронного гребного двигуна швидкість обертання валу повинна відповідати синхронній швидкості обертання двигуна. Було визначено, що для отримання швидкості обертання валу 187,5 об/хв необхідно використовувати гвинт діаметром 3 м.

Коефіцієнт навантаження гребного гвинта за упором при сталому діаметрі

Швидкість обертання гвинта
об/хв,
де – знаходиться з гвинтової діаграми.
Коефіцієнт взаємодії з корпусом

ККД гвинта
,
де – визначається за гвинтовою діаграмою.

Потужність на гребних валах
Вт,
де – ККД валопроводу.
Потужність гребних двигунів
Вт.

У ГЕУ змінного струму використовуються як синхронні

двигуни (звичайні та зі збудженням від постійних магнітів), так і асинхронні (з короткозамкненим ротором та з перемиканням числа пар полюсів). Знайшли використання також асинхронні синхронізовані двигуни, у яких в кінці пуску в обмотку ротора подається постійний струм, що перетворює двигун в синхронний.

Асинхронні двигуни прості за конструкцією, надійні, мають хороші пускові характеристики і тому цілком придатні для ГЕУ. В той же час вони мають низький коефіцієнт потужності, який дорівнює 0,83...0,86 у швидкохідних двигунів. Тому використання асинхронних двигунів вимагає збільшення розмірів генераторів для отримання необхідної реактивної потужності.

Найбільш низький коефіцієнт потужності, що досягає 0,7, мають тихохідні асинхронні двигуни. В ГЕУ при прямому з'єднанні електродвигуна з гребним валом швидкість обертання мала, не більше 167...200 об/хв, тому електродвигуни мають низький $\cos \varphi$.

Деякі виробники використовують асинхронні двигуни на судах з ДЕГУ змінного струму. Швидкохідні асинхронні двигуни з'єднуються з гребним валом за допомогою редуктора. Редуктори дозволяють використовувати асинхронні двигуни звичайного промислового зразка на підшипниках кочення з малим повітряним зазором, порівняно високим $\cos \varphi$ (не нижче 0,83) і ККД порівняним з ККД синхронних двигунів. Іноді один гребний вал приводиться у обертання двома асинхронними двигунами. Вважається, що при потужності до 1000 кВт вигідніше з точки зору ваги, вартості та розміщення використовувати асинхронні двигуни з редуктором, а при більших потужностях – тихохідні синхронні двигуни, з'єднані безпосередньо з валом.

Впровадження новітніх технологій в області керування електродвигунами підвищує показники регулювання

асинхронних приводів до рівня приводів постійного струму. Окрім того за рахунок повертання енергії індуктивностей на сторону постійного струму та обміну потужністю між фазами інвертора окремі перетворювачі частоти працюють з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,95 \dots 1$, що частково компенсує основний недолік асинхронних двигунів. Це робить доцільним використання асинхронних ГЕД при потужностях до $5 \dots 7$ МВт.

Основна перевага синхронного двигуна – його високий коефіцієнт потужності, що дорівнює близько одиниці. Тому розміри синхронного двигуна менше, аніж асинхронного при тій самій активній потужності. При цьому знижуються і розміри генераторів.

Друга перевага синхронного двигуна – присутність великого повітряного зазору. У асинхронного двигуна зі збільшенням повітряного зазору зростає намагнічувальний струм, через що зростає реактивна потужність і падає $\cos \varphi$. Тому повітряний зазор у асинхронних двигунах робиться як можливо малим. У синхронного двигуна повітряний зазор значно більший, так як на явно виражених полюсах можна укласти достатню кількість витків для створення достатньої намагнічувальної сили.

При більшому повітряному зазорі зменшуються пульсаційні і поверхневі втрати, що дозволяє зробити на статорі більш широкі пази, збільшити кількість укладеної міді і підвищити лінійне навантаження машини. Більший повітряний зазор полегшує збірку машини і допускає більшу просадку вала в підшипниках, що особливо важливо для гребних установок, в котрих зазвичай використовуються підшипники ковзання.

Можливість зносу підшипників і опускання вала, а також умови зборки лінії вала на судні не дозволяють застосовувати асинхронні двигуни з малим повітряним зазором і високим

коефіцієнтом потужності. У створених гребних установках з асинхронними двигунами коефіцієнт потужності знижений до 0,67 через великий повітряний зазор, що призводить до збільшення габаритної потужності самого двигуна приблизно в 1,5 рази порівняно з габаритною потужністю синхронних двигунів рівної активної потужності. У такому ж відношенні збільшується повна потужність генераторів.

Синхронні двигуни мають пускову короткозамкнену обмотку, що створює достатньо великий пусковий момент, незначно відмінний від пускового моменту асинхронного двигуна. Пускова короткозамкнена обмотка на роторі дає можливість пускати синхронні двигуни як асинхронні з вмиканням постійного струму в обмотку збудження ротору в кінці пуску. Таким чином за величиною пускового моменту і пусковим характеристикам синхронні двигуни придатні для ГЕУ.

ККД синхронних двигунів дещо більший ніж у асинхронних через зменшення струму статора і менших втрат у роторі.

Більший повітряний зазор синхронного двигуна зменшує синхронний опір за подовжньою віссю x_d , що призводить до зростання перевантажувальної можливості двигуна.

Синхронний двигун менш чутливий до коливань напруги мережі, бо його максимальний момент обертання пропорційний першому ступеню напруги на відміну від асинхронного двигуна, де спостерігається квадратична залежність.

Використання водометних рушіїв і ГКК з розташуванням ГЕД в корпусі судна дозволяє застосовувати середньо швидкісні двигуни, що значно покращує масо габаритні показники СЕР. Однак при прямій передачі моменту з ГЕД на гвинт необхідно використовувати низько швидкісні ГЕД, недоліком яких є великі габарити та перед усім діаметр статора.

Покращити масо габаритні показники можна за рахунок використання водяного охолодження ГЕД. Зростання

складності системи компенсується зменшенням маси та габаритів обладнання починаючи з потужності 8...10 МВт.

Одним з шляхів підвищення надійності та зниження акустичних шумів ГЕД є збільшення числа фаз та кількості обмоток.

На основі проведених розрахунків можна обрати гребні синхронні двигуни потужністю 2 МВт швидкістю обертання 187,5 об/хв

Момент інерції гвинта (за формулою В.В. Копеєцького)

кг м²,

де кг/м³ – густина латуні;

– відносна ширина лопаті;

м – довжина ступиці.

Зовнішній діаметр валопроводу

мм.

Внутрішній діаметр валопроводу

мм.

Момент інерції валопроводу

кг м².

Момент інерції синхронного гребного двигуна потужністю 2 МВт складає кг м² [1].

Сумарний момент інерції

кг м².

Отримане значення моменту інерції використовується під час моделювання роботи гребної установки.

1.9. Вибір основних параметрів і обладнання ГЕУ

Проектування ГЕУ вимагає послідовного вибору: типа ГЕУ; роду струму, значення напруги і частоти; числа

і потужності гребних електродвигунів; оптимальній швидкості гребних двигунів; головних генераторів; схеми і основних апаратів головного розподільного пристрою; допоміжних механізмів власних потреб ГЕУ.

Структура гребних електричних установок відповідно до «Правил класифікації та побудови морських суден» Регістра судноплавства України.

До складу гребної електричної установки входять наступні компоненти: головні генератори ГЕУ – не менше 2 шт.; головний розподільний щит (ГРЩ), розділений на дві частини між секційним автоматичним вимикачем або роз'єднувачем; силові трансформатори для перетворення напруги ГРЩ у напругу напівпровідникових перетворювачів – по одному для кожного перетворювача; силові напівпровідникові перетворювачі для живлення ГЕД – не менше 2 шт.; гребний електричний двигун (ГЕД) із двома системами статорних обмоток, які отримують живлення кожна від свого напівпровідникового перетворювача; система керування.

Для гребних електричних установок із одним ГЕД синхронні та асинхронні ГЕД повинні мати дві системи статорних обмоток, які можуть незалежно відключатися від відповідного напівпровідникового перетворювача частоти (НПЧ).

Кожний НПЧ повинний бути розрахований принаймні на 50% номінальної потужності ГЕУ.

Гребні двигуни постійного струму повинні бути двоякірними (двоколаторними), причому кожна якірня обмотка повинна бути розрахована принаймні на 50% номінальної потужності ГЕУ. Кожна якірня обмотка повинна отримувати живлення від власного незалежного перетворювача.

Будь-яка одинична несправність у перетворювачі не повинна приводити до повної втрати ходу.

Для гребного вала повинні бути передбачені гальмівні або блокуючі пристрої, що не дозволяють довільно обертатися

відключеному гребному двигуну (валу) за будь-яких погодних умов, або у процесі буксирування судна.

Система ГЕУ повинна відповідати принципу локалізації однієї несправності, тобто у випадку появи несправності у будь-якому одному із компонентів системи ГЕУ хід судна повинний зберігатися, хоча б із частковою потужністю.

При виявленні будь-якої несправності у системі ГЕУ на усіх діючих постах керування повинний бути передбачений аварійно попереджувальний сигнал.

Для усіх допоміжних механізмів та пристроїв відповідального призначення повинні бути передбачені місцеві пости керування, на які переключається керування у випадку несправності будь-якого компоненту дистанційної автоматизованої системи керування ГЕУ.

Вибір типа ГЕУ. Тип ГЕУ вибирають на підставі порівняння статичних даних по параметрах гребних установок або приблизних розрахунків цих параметрів.

ДЕГУ мають перевагу при невеликих потужностях, оскільки в цьому випадку мають в порівнянні з ТЕГУ менші масу і вартість, більшу компактність, ККД, живучість і відрізняються швидшою готовністю до пуску. ТЕГУ навпроти, переважають при великих потужностях, оскільки в цьому випадку вони мають меншу масу і вартість, компактніші і довговічніші.

Вибір роду струму, значення напруги і частоти. Постійний струм переважає змінний в тих випадках, коли потрібні підвищені маневрені якості ГЕУ, він також забезпечує зручність управління. Змінний же струм сприяє поліпшенню таких показників ГЕУ, як маса і вартість установки, ККД, витрата палива, компактність, надійність дії і простота обслуговування.

Напруга визначена для ГЕУ Правилами Регістра судноплавства України: номінальна напруга головних кіл ГЕУ постійного струму не більше 1200 В; номінальна лінійна напруга головних кіл ГЕУ змінного струму - не більше 7500

В; номінальна напруга збудників ГЕУ — не більше 230 В; напруга кіл управління, сигналізації, захисту і таке інше — не більше 220 В постійного струму і 380 В змінного струму.

При виборі напруги для ГЕУ змінного струму виходять з максимально допустимих значень струму у фазах гребного електродвигуна, які не повинні перевищувати 1500 А в ГЕУ малої потужності і 2500 А в ГЕУ великої потужності.

Правила Регістра судноплавства України рекомендують для основного режиму роботи ГЕУ обирати стандартну частоту 50 Гц.

Визначення оптимальної швидкості гребних двигунів. Одночасно з розрахунком потужності на валу гребного двигуна визначають і його кутову швидкість, причому її оптимальне значення можна вибирати залежно від конкретних обставин за умов забезпечення: максимального ККД установки або мінімальних витрат палива; мінімальної маси установки; мінімальних первинних витрат на устаткування ГЕУ; мінімальних річних експлуатаційних витрат.

На судах цивільного флоту найбільш важливим показником роботи ГЕУ часто буває економія палива при повному ході судна. Тому для таких суден оптимальну швидкість гребного двигуна раціонально визначати за умови здобуття максимального ККД гребної установки [3]. Найбільш просто номінальна швидкість гребного електродвигуна визначається точкою перетину характеристики гвинта в основному режимі з прямою

У якості ГЕД у складі ГЕУ застосовуються асинхронні двигуни (АД) і синхронні двигуни з електромагнітним збудженням або на постійних магнітах. Як правило, СД на постійних магнітах використовуються при потужності до 5 МВт, АД – до 8 МВт, СД із електромагнітним збудженням – від 8 МВт і більше.

Останнім часом кілька закордонних фірм вийшли на

ринок з рушіями на базі кільцевих ЕД, у яких конструктивно сполучається ГФК і приводний електродвигун. ГЕД у цьому випадку є безпосередньою частиною ГВ, що входить до складу азимутальної ГРК. Підшипники ЕД даного типу розташовуються по краях ротора, до якого із внутрішньої сторони кріпляться лопати ГФК.

Основною перевагою рушіїв даного типу є мінімальні масогабаритні показники, що пов'язане з відсутністю вала, низькі віброшумові характеристики, практично однаковий упор на обоє бортів.

Серед недоліків – висока вартість, відсутність досвіду експлуатації, порівняно низька ремонтпридатність. Основною областю застосування рушіїв на базі кільцевих ЕД є військові кораблі й судна з низьким рівнем підводного шуму (гідрографічні, науково-дослідні, рибпромислові судна).

На сучасних суднах у складі ГЕУ в якості ГЕД можуть застосовуватися наступні типи електричних машин:

- електродвигуни (ЕД) постійного струму;
- асинхронні ЕД;
- синхронні ЕД з електромагнітним збудженням;
- синхронні ЕД з постійними магнітами;
- вентільно-індукторні (ВІД).

При прямій передачі обертаючого моменту на гвинт застосовують малооборотні ГЕД. При роботі на ГРК використовують середньооборотні ГЕД. Для підвищення потужності на гребному валу застосовують два ГЕД, що з'єднують у тандем, або багато обмотувальний ГЕД із двома або більше трифазними якірними обмотками.

Вибір головних генераторів. Основними джерелами електроенергії на суднах є генераторні агрегати (ГА). По типу приводного двигуна автономні ГА поділяються на дизель-генератори (ДГ), турбогенератори (ТГ) і валогенератори. У ДГ приводним двигуном є допоміжні дизелі, у ТГ – парові або

газові турбіни, які називаються газотурбогенератори (ГТГ) і паротурбогенератори (ПТГ).

ВГ приводиться в рух від головного двигуна, у якості якого, як правило, застосовується дизель. Утилізаційним ТГ називається генератор, що приводиться в рух від утилізаційної турбіни.

Конструктивне виконання корпусу головних генераторів має бути брызгозахищеним або водозахищеним з вентиляцією по замкнутому або розімкненому циклу.

Число головних генераторів буде вибрано правильно, якщо вдасться забезпечити високий ККД установки і її невелику вартість, простоту обслуговування і надійність роботи.

Потужність головних генераторів визначають по потужності гребних електродвигунів і числу генераторів. Швидкість генераторів вибирають відповідно до швидкості первинних двигунів.

В «Правилах класифікації та побудови морських суден» Регістра судноплавства України прописані основні положення роботи головних генераторів.

Загальні вимоги.

1. Генератори, які працюють із напівпровідниковими перетворювачами, повинні бути розраховані на наявність очікуваного рівня гармонійних складових у системі.

Із цією метою повинний передбачатися суттєвий резерв потужності, що компенсує підвищення температури генератора, порівняно із звичайним синусоїдальним навантаження.

2. Статорні обмотки генераторів номінальною потужністю вище 500 кВ·А повинні бути обладнані датчиками температури.

3. Генератори ГЕУ повинні бути обладнані фільтрами очищення охолоджувального повітря при відкритій і замкнутій системі вентиляції.

Для без щіткових генераторів змінного струму із

замкнутою системою вентиляції установалення фільтрів оходжуваального повітря не обов'язкове.

Вентиляційні канали повинні бути улаштовані таким чином, щоб вода не потрапляла усередину машини.

4. Генератори ГЕУ допускається використовувати для живлення допоміжних електричних механізмів і пристроїв, за умови забезпечення стабільності напруги і частоти на усіх режимах, у тому числі маневрових.

5. У колах збудження генераторів не повинні установлюватися автоматичні вимикачі, за винятком тих, які діють на зняття збудження із машин при коротких замиканнях чи пошкодженнях у колі головного струму.

6. Пристрої захисту генераторів повинні відповідати основним вимогам, зазначеним до судових генераторів (викладеним у 8.2. Електрообладнання суден РСУ).

Підшипники генераторів і змащення.

1. Вкладиші підшипників ковзання повинні бути легко замінними.

Повинні бути передбачені засоби контролю змащення підшипників.

Надійне змащення повинне бути забезпечене також і при можливому максимальному диференті. Повинні бути передбачені відповідні ущільнення, перешкоджаючі потраплянню мастила усередину генератора.

2. Якщо застосовуються підшипники із примусовим змащенням (під тиском), то на постах ГЕУ повинні бути передбачені, як мінімум, наступні аварійно-попереджувальні сигнали: несправність системи змащення (відмова насоса змащення, утрата тиску у трубопроводі змащення тощо); максимальна температура кожного із підшипників.

3. Генератори повинні бути обладнані резервними (аварійними) пристроями змащення підшипників, які забезпечують достатнє змащення підшипників протягом часу до зупинки

машини, у випадку виникнення несправності, чи аварії у нормальній системі змащення.

4. Для запобігання пошкодження підшипників повинні бути прийняті заходи, перешкоджаючи можливому протіканню електричних струмів між підшипником і валом машини, для чого один із підшипників повинний бути гальванічно ізольований від корпусу машини.

Охолодження генераторів.

1. Крім термометрів повинні бути передбачені датчики температури охолоджувального повітря, які повинні подавати аварійно попереджувальний сигнал при перевищенні допустимої температури.

2. Для машин із замкнутою системою охолодження і теплообмінним апаратом, потік первинного і вторинного охолоджувального агенту повинний контролюватися. При зникненні потоку повинний подаватися аварійно-попереджувальний сигнал.

3. Протікання води і конденсат не повинні потрапляти на обмотки машини. Повинна бути передбачена сигналізація, яка контролює виникнення протікань.

В ЄЕЕС із ГЕУ використовують автономні ГА, до яких відносять ДГ і ТГ. Приводний двигун ГА в складі ЄЕЕС називають головним, а ГА – головним дизельгенератором (ГДГ), або головним турбогенератором (ГТГ).

Генератор призначений для перетворення механічної енергії в електричну із заданими параметрами електроенергії. В якості генераторів у складі ГА знаходять найбільше застосування синхронні генератори з електромагнітним збудженням. На сучасних судах можуть використатися синхронні генератори на постійних магнітах, асинхронні генератори, вентильно-індукторні генератори й генератори постійного струму.

Раніше широке застосування в складі ГЕУ знаходили генератори постійного струму.

У традиційних ГА частота обертання, а, отже, і частота струму підтримується постійною за допомогою системи автоматичного регулювання частоти обертання приводного теплового двигуна.

Найбільше поширення в складі ГА знайшли явнополюсні СГ із електромагнітним збудженням. У даних ГА частота електроенергії пропорційна частоті обертання ПД, а напругу при зміні навантаження можна підтримувати постійною за рахунок зміни струму в обмотці збудження СГ за допомогою автоматичної системи регулювання напруги (САРН).

СГ із збудженням на постійних магнітах і вентиляно-індукторні генератори можуть застосовуватися тільки в складі вентиляльних ГА, до складу яких входять напівпровідникові перетворювачі. Найбільше застосування на судах знайшли ДГ. ККД сучасних середньооборотних дизелів може досягати 44 %. Серед недоліків ДГ можна виділити низькі масогабаритні характеристики.

Для роботи дизелів необхідна наявність систем пуску, паливних систем і систем охолодження. Останнім часом на судах стали знаходити застосування двохпаливні допоміжні дизелі, що працюють як на важких сортах дизельного палива, так і на газі.

На рис. 1.21 представлений дизель-генераторний агрегат традиційної конструкції, що працює з постійною частотою обертання. У його состав входять допоміжний приводний ПД і синхронний генератор СГ із електромагнітним збудженням, що підключений до розподільного щита РЩ.

Рис. 1.21. Структурна схема традиційного ДГА: ПД – приводний двигун;

СГ – синхронний генератор; РЩ – розподільний щит

ДГА у всьому діапазоні зміни навантаження працює

з постійною частотою обертання, що значно знижує його економічність і підвищує питому витрату палива й масла при роботі на частковому навантаженні.

Газотурбогенераторні агрегати традиційно широко застосовувалися у військовому кораблебудуванні, що пов'язано з їх мінімальними масо габаритними характеристиками. По ККД сучасні газові турбіни незначно уступають дизелям.

Одинична потужність судових генераторних агрегатів на сучасних судах з електричним рухом перевищує десятки мегаватів. На потужностях більше 5 МВт доцільність використання ДГА значно знижується, що пов'язане з їх низькими масо габаритними показниками. У цьому випадку найбільш оптимальним рішенням є застосування в якості приводних допоміжних двигунів двох паливних газових турбоагрегатів, здатних працювати як на газовому, так і на рідкому паливі.

На рис. 1.22 представлений традиційний турбогенераторний агрегат.

До складу ТГА входить газотурбодвигун (ГТД), синхронний генератор і понижуючий редуктор (Р). Редуктор необхідний для зниження частоти обертання ГТД до номінальної частоти обертання електрогенератора, що для явно полюсного синхронного генератора становить не більше 3000 об/хв.

Основними достоїнствами ГТГА є їхня компактність, мала вага, кращі, чим у дизелів, віброшумові характеристики, багатопаливність, легкість запуску при низьких температурах, можливість одержання більших агрегатних потужностей у габаритах, що дозволяють транспортування залізничним й авіаційним транспортом для установки або заміни на суднобудівному заводі або в порту.

Рис. 1.22. Структурна схема традиційного ТГА: ГТД – газотурбодвигун; СГ – синхронний генератор; Р – редуктор; РЩ – розподільний щит

Частота обертання СГ традиційної конструкції з явно вираженими полюсами не перевищує 3000 об/хв. Для узгодження частоти обертання ГТД і генератора застосовується понижуючий редуктор.

Наявність редуктора знижує ККД і надійність ГТГА, підвищує його масо габаритні показники. ГТГА даного типу працюють зі сталістю частоти обертання, що значно знижує його економічність при роботі на частковому навантаженні.

Потужність газових турбін може досягати 40 МВт, при цьому ККД становить 38 % і більше. Частота обертання ГТ перевищує 3000 об/хв. У зв'язку із цим для з'єднання турбіни й синхронних генераторів застосовують понижуючі редукторні передачі, що трохи знижує техніко-економічні й надійнісні показники ГТГА.

ПТГА знаходять застосування в складі ЄЕЕС із ГЕУ на атомних криголамах і танкерах, призначених для перевезення зрідженого природного газу.

На рис. 1.23 представлений традиційний паро турбогенераторний агрегат (ПТГА).

Рис. 1.23. Структурна схема традиційного ПТГА: ПТ – парова турбіна; СГ – синхронний генератор; РЩ – розподільний щит

ПТГА складається з парової турбіни й синхронного генератора з електромагнітним збудженням. У ПТГА частота обертання парових турбін дозволяє безпосередньо без редуктора з'єднувати турбіну з явно полюсними синхронними генераторами.

Частота обертання ПТ підтримується постійної за допомогою системи автоматичного регулювання частоти обертання турбіни (САРЧ). САРЧ змінює кількість пари, що надходить

на турбіну.

САРН СГ здійснює підтримку сталості напруги в судновій мережі за рахунок зміни струму збудження в обмотці збудження, розташованої на роторі генератора.

Суднові силові трансформатори. Для живлення НП ГЕУ широке застосування знаходять силові трансформатори.

Для ГЕУ повинне бути передбачене не менше двох незалежних силових трансформаторів. Повинні використовуватися трансформатори лише із роздільними обмотками.

Температура обмоток трансформаторів, застосовуваних для ГЕУ, повинна контролюватися системою датчиків і сигналізаторів.

Для трансформаторів ГЕУ повинні бути передбачені амперметри на ГРЩ на первинній стороні у кожній фазі.

Для кожного трансформатора ГЕУ повинний бути передбачений захист від перевантаження і короткого замикання на первинній та вторинній стороні.

Захист на вторинній стороні може бути реалізований напівпровідниковим перетворювачем ГЕУ.

Обмотки трансформаторів, які охолоджуються рідиною, повинні бути цілком занурені у рідину, також і при нахилах на будь-яку сторону на кут, включно з $22,5^\circ$.

Трансформатори повинні бути обладнані необхідними пристроями для збирання і накопичення протікань охолоджувальної рідини.

У районі установки трансформатору повинні бути розташовані пристрої виявлення пожежі і пристрої пожежогасіння.

Пристрої пожежогасіння допускаються із ручним керуванням.

Трансформатори повинні бути обладнані системою захисту, що діє при появі газів у охолоджувальній рідині

Температура охолоджувальної рідини повинна контролюватися системою датчиків.

Повинний бути передбачений аварійно-попереджувальний сигнал по перевищенню температури охолоджувальної рідини, а також від окремого датчика повинний бути передбачений захист, що відключає трансформатор, якщо температура рідини перевищить гранично допустиму.

Рівень охолоджувальної рідини повинний контролюватися двома датчиками, один із яких повинний приводити у дію аварійно попереджувальний сигнал, а другий, установлений на гранично допустимий рівень, повинний відключити трансформатор.

Трансформатори ГЕУ, які охолоджуються повітрям.

Робота вентиляторів для охолодження трансформаторів та температура охолоджувального повітря, повинні контролюватися системою датчиків.

При перевищенні температури або виході із ладу вентиляторів повинний подаватися аварійно попереджувальний сигнал.

При застосуванні замкнутої повітряної системи охолодження із повітроохолоджувачем повинні додатково контролюватися: мінімальний потік первинного і вторинного контурів охолоджувальних середовищ (повітря і води); при протіканнях теплообмінного апарату повинний спрацьовувати аварійно-попереджувальний сигнал.

Теплообмінний апарат повинний установлюватися таким чином, щоб протікання води і конденсат не могли потрапляти на обмотки.

Трансформатори виконують двох обмотувальними із двома трифазними обмотками, одна із яких вхідна, друга – вихідна.

У деяких випадках для живлення НП, виконаного із двома вхідними випрямлячами, застосовують трьох обмотувальні трансформатори із двома вторинними обмотками, зрушеними в просторі на 30 ел. град. У цьому випадку якість електроенергії в судновій мережі підвищується й може бути реалізований

принцип єдиної ЕЕС.

Для живлення БНП застосовуються багато обмотувальні трансформатори із трьома вихідними обмотками для живлення перетворювачів кожної фази.

Рис. 1.24. Суднові силові трансформатори

Компанія GELLION TRADE пропонує широкий спектр трансформаторів сухого типу потужністю від 50 кВА до 25000 кВА, напругою до 36 кВ.

Трансформатори з литою ізоляцією сухого типу, виробляються згідно з міжнародним стандартом менеджменту якості ISO 9001.

Обмотки ВН і НН цього типу трансформаторів, покриваються епоксидною смолою під вакуумом. Виробляються в діапазоні потужностей від 250 кВА до 25 МВА, з рівнем напруги до 36 кВ, з природним повітряним охолодженням (AN) або вентиляторним охолодженням (AF). При використанні охолоджуючого вентилятора можна збільшити потужність 40%.

Переваги сухих трансформаторів у порівнянні з традиційними масляними трансформаторами цілком очевидні: Мінімальний ризик займання, відсутність охолоджуючої рідини, простота в обслуговуванні, простота встановлення та низькі витрати на встановлення, низькі експлуатаційні витрати, безпечні для навколишнього середовища, вологостійкі, готові до експлуатації у будь-який час, можливість комплектації кожухом, збільшення продуктивності за рахунок систем примусового охолодження до 40 % від номінальної потужності, висока стійкість до короткочасних перевантажень.

Головний розподільчий щит (ГРЩ) і щит електричного руху (ЩЕР). ГРЩ служить для підключення ГА й розподілу електроенергії між приймачами. У ГРЩ встановлюють захисно-комутаційну апаратуру, електровимірювальні прилади,

пристрої автоматизації СЕС й інше встаткування.

ГРЩ складається з декількох секцій. Зі зворотної сторони ГРЩ горизонтально розташовані шино проводи, по яких відбувається розподіл і передача електроенергії.

ГЕД через НП одержує живлення від ЩЕР. У ЩЕР розташоване встаткування, аналогічне тому, що й у ГРЩ. Якщо на судні встановлений один головний щит, до якого підключені ГА й ГЕД, то він, як правило, називається ГРЩ.

Розподільча система гребної електричної установки повинна бути обладнана пристроєм контролю опору ізоляції. Перемикачі, призначені для оперативних перемикань у ланцюгах гребної електричної установки при знятій напрузі, повинні мати блокувальний пристрій, що не допускає відключення їх під струмом чи помилкового включення.

1. 10. Силові напівпровідникові перетворювачі

Призначення напівпровідникових перетворювачів:

- узгодження параметрів ГЕД й електричної мережі;
- пуск, регулювання частоти обертання й/або моменту, гальмування, реверс й зупинку ГЕД;
- захист силового електроустаткування.

Загальні вимоги.

Для ГЕУ повинні бути передбачені, принаймні, два повністю незалежних, окремо встановлених, напівпровідникових перетворювачі.

Для кожного перетворювача повинна бути передбачена окрема система керування.

Для кожної системи керування повинні бути передбачені два гальванічно ізольовані датчики швидкості. Допускається спільний корпус для обох датчиків. Якщо перетворювач подає живлення на ГЕД із постійним збудженням, то у головному колі “двигун – перетворювач” повинний бути передбачений

вимикач-роз'єднувач, який автоматично повинний розривати головний анцюг у випадку несправності інвертора (випрямляча).

Повинні бути передбачені пристрої діагностики, що виявляють появу таких несправностей.

Перетворювачі для ГЕУ повинні бути розраховані на номінальний момент приводу (номінальний момент на гребном валу). При цьому повинно бути ураховано, щоб короткочасні перевантаження та зміни (провал) частоти обертання, викликані перевантаженням, не приводили до спрацювання захисту перетворювачів.

Конструкція шаф напівпровідникових перетворювачів повинна передбачувати можливість швидкої заміни силових компонентів. Це може бути досягнуте застосуванням модульної конструкції окремих тиристорів, тиристорів однієї фази чи іншим способом.

Охолодження напівпровідникових перетворювачів.

Якщо перетворювачі обладнані примусовою системою охолодження, повинний бути передбачений контроль її стану.

У випадку виходу із ладу системи охолодження, повинні бути передбачені заходи, що запобігають перегріву і виходу із ладу перетворювача.

Для систем охолодження повинна бути передбачена система аварійно-попереджувальної сигналізації. Сигнал АПС повинний бути виконаний по зникненню потоку охолоджувального середовища і по високій температурі напівпровідників.

Одиничні несправності у системі охолодження перетворювачів не повинні приводити до відключення усіх перетворювачів гребної електричної установки судна.

Захист напівпровідникових перетворювачів.

Експлуатаційні перенапруги у системі живлення перетворювачів повинні бути обмежені відповідними пристроями, що

не допускають пошкоджень (пробоїв) тиристорів.

Система керування повинна забезпечувати, щоб у всіх експлуатаційних та найбільше важких умовах номінальний струм напівпровідникових елементів не був перевищений.

Силові напівпровідники повинні витримувати без пошкоджень коротке замикання на клемах перетворювача. Допускається захист від струмів короткого замикання запобіжниками. Відповідні зворотні зв'язки перетворювача повинні контролювати (обмежувати) струм таким чином, щоб жодний компонент не був пошкоджений навіть у випадку, коли перетворювач включений на двигун із загальмованим ротором.

Якщо є викривлення синусоїдальності напруги на шинах ГРЩ то застосовується фільтрація вимоги до якої прописані в «Правилах класифікації та побудови морських суден» Регістра судноплавства України.

Повинні застосовуватися лінійні фільтри, що обмежують до допустимого рівня викривлення синусоїдальності напруги на шинах ГРЩ за будь-яких режимів роботи ГЕУ.

Ланцюги кожного фільтра повинні мати захист від надструмів і струмів короткого замикання.

Цілісність запобіжників у ланцюгах фільтрів повинна контролюватися.

При виході з ладу будь-якого запобіжника повинний бути сигнал АПС.

При конструюванні і використанні лінійних фільтрів необхідно враховувати можливість їх підключення у будь-якій конфігурації.

Зокрема, авторезонанс повинний бути виключений за будь-яких умов навантаження і поєднання працюючих генераторів.

У випадку наявності декількох паралельних ланцюгів фільтра повинна контролюватися симетричність струмів.

Несиметричний розподіл струмів у ланцюгах окремого фільтра, а також несправність самого фільтра повинні

приводити до спрацьовування сигналізації (АПС).

У сучасних ГЕУ змінного струму в якості НП найбільше поширення одержали НП із ланкою постійного струму. НПЧ із ланкою постійного струму складаються з випрямляча й інвертора.

Силові напівпровідникові випрямлячі – пристрої, призначені для перетворення електричної енергії змінного струму в електричну енергію постійного струму. Випрямлячі можуть бути некерованими, керованими, активними.

Найбільш широке застосування в ГЕУ знайшли трифазні мостові некеровані діодні й керовані на тиристорах випрямлячі.

Для зменшення негативного впливу на суднову мережу випрямлячі одержують живлення від силових трансформаторів. Часто в ГЕУ встановлюють два включених послідовно або паралельно випрямляча. У цьому випадку застосовують багато обмотувальні трансформатори, а самі випрямлячі виконують 12-пульсними або 24-пульсними.

У керованих випрямлячах замість діодів використовуються керовані напівпровідникові вентиля – тиристори. Керовані випрямлячі більшою мірою, чим не керовані, спотворюють живильну суднову мережу.

Основним достоїнством КВ є можливість регулювання вихідної напруги, що дозволяє застосовувати ЄЕЕС.

Невід’ємну частину сучасної ГЕУ становлять статичні перетворювачі частоти (СПЧ). Інтенсивний розвиток галузі виробництва силової напівпровідникової техніки призвів до створення потужних багатофункціональних, надійних та компактних перетворювачів частоти. Використання такого елемента в ГЕУ змінного струму дозволило відмовитися від регулювання частоти обертання первинних двигунів та підвищити маневрові характеристики суден, обладнаних системою електричного руху.

Сучасні перетворювачі забезпечують досить високу якість як вихідного, так і вхідного струму, що відкрило можливість створення суден з повноцінною об'єднаною електроенергетичною установкою.

Найширше розповсюдження в системах електричного руху іноземних суден отримали три типи перетворювачів: безпосередні перетворювачі частоти (БПЧ) – циклоконвертори, перетворювачі на базі інвертора напруги, що керуються за законом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) та на базі інверторів струму, що комутуються навантаженням. Обидва останніх перетворювача відносяться до класу перетворювачів, що містять ланку постійного струму.

До останнього часу БПЧ використовувалися в системах електрорушіння значно частіше, ніж СПЧ з ланкою постійного струму. Це пояснювалося більш високим ККД БПЧ. В БПЧ без використання додаткових схемних засобів можна забезпечувати найбільш економічне гальмування ГЕД. За масогабаритними показниками БПЧ, не дивлячись на більшу кількість вентилів в силовій схемі, мали перевагу над СПЧ з ланкою постійного струму на базі автономних інверторів на вентилях, що не зачиняються. Це пов'язане з тим, що в БПЧ використовується природна комутація вентилів, в той час як в інверторах на незапирних вентилях необхідно використовувати пристрої для примусової комутації, які суттєво знижують масогабаритні показники.

Разом з тим ГЕУ з БПЧ має ряд суттєвих недоліків, що було підтверджено експлуатацією вітчизняних та іноземних суден.

Внаслідок застосування природної комутації вентилів БПЧ мають низький коефіцієнт потужності, що сильно залежить від навантаження ГЕД. При регулюванні вихідної напруги вниз від номінального значення він різко знижується. Так при номінальному значенні коефіцієнту потужності 0,7 установки

з синхронним двигуном ($\cos \varphi = 1$) при потужності ГЕД нижче 0,1 від номінальної величини він знижується до 0,2...0,3. Коефіцієнт потужності становиться ще менше, якщо в ГЕУ встановлений ГЕД асинхронного типу.

До серйозних недоліків БПЧ можна віднести їхній суттєвий вплив на якість електроенергії, що призводить до підвищення коефіцієнту нелінійних спотворень (КНС). Так КНС на шинах ГЕУ сягає 17...18%, а на шинах власних потреб 14...15%.

В основі всіх силових БПЧ лежать трифазні мостові або променеві (нульові) вентильні групи, представлені на рис. 1.25.

Безпосередні НПЧ можуть проводити електричну енергію в обох напрямках, тобто є оборотними. ККД у даних перетворювачів трохи вище, ніж у двохзвенних. До їхніх недоліків варто віднести обмеження величини вихідної частоти, як правило, на рівні 30...40 % від вхідної величини. Загальна кількість вентилів у даних перетворювачів більше, що підвищує їхню вартість, ускладнює систему керування, підвищує масу й габарити.

Рис. 1.25. Вентильні групи БНП: а – променеві, б – мостові

За схемою з'єднання силового кола БПЧ можуть виконуватися з нульовими (променевими) або мостовими вентильними групами. Силова схема НПЧ із нульовими вентильними групами містить 18 тиристорів, об'єднаних в 6 вентильних груп, включених попарно паралельно.

БПЧ із нульовими вентильними групами представлений на рис. 1.26.

Рис. 1.26. Безпосередній НП із нульовими вентильними групами

Достоїнства БПЧ, виконаних за схемою з нульовими вентильними групами, полягають у відносно малому числі тиристорів, простоті силової схеми й системи керування, можливості включення навантаження в трифазну групу без застосування багато обмотувального трансформатора.

На рис. 1.27 представлена силова схема БПЧ, виконаного на базі шести мостових вентильних груп.

Рис. 1.27. Безпосередній НП із мостовими вентильними групами

До достоїнств БПЧ, виконаних з використанням трифазних мостових вентильних груп, варто віднести те, що амплітуда пульсацій у кривій вихідної напруги в порівнянні із трифазною нульовою схемою зменшується приблизно у два рази при одночасному збільшенні вдвічі частоти пульсацій. Це істотно підвищує якість вихідної напруги й дозволяє на виході перетворювача одержати більш високе значення частоти. Однак через утворення короткозамкнених контурів у перетворювачі даного типу неприпустимий гальванічний зв'язок між колами навантаження окремих фаз.

У зв'язку із цим, у схемах БНП із мостовими вентильними групами для виключення контурів короткого замикання, що виникають при комутації вентилів, необхідно забезпечувати потенційний поділ фаз.

Потенційний поділ фаз може бути здійснене за рахунок застосування силових багато обмотувальних трансформаторів, які встановлюються на вході або за рахунок гальванічної розв'язки вихідного кола, зокрема, за рахунок виконання ізолюваними фаз якірної обмотки ГЕД.

Слід зазначити і необхідність використання, у випадку звертання до БПЧ, синхронних ГЕД спеціального виконання

з ізольованими фазами, а також розгалуженої силової схеми, внаслідок чого виникає необхідність у використанні більшої кількості силових вентилів і більш складної системи керування. Окрім того, вихідна частота БПЧ в більшості випадків обмежена $1/2 \dots 1/3$ від вхідного значення.

Придатність БПЧ для подальшого використання можна підвищити за рахунок підвищення числа фаз, використанні розв'язуючих мотор-генераторів та встановленні трансформаторів спектру.

Поява нового покоління напівпровідникових елементів, що мають високі швидкодію і граничне значення комутованої потужності при дуже малій потужності керування, суттєво змінює ситуацію в напівпровідниковій техніці.

Поява IGBT-транзисторів з високими характеристиками призводить до витіснення традиційних (SCR) тиристорів з пристроїв потужністю до 1 МВт. В приводах потужністю понад 1 МВт знаходять використання запиірні (GTO) тиристири з комутованою напругою вище за 4,5 кВ. Однак вже в близькому майбутньому в силовому приводі можуть бути використані запиірні вентиля нового покоління, до яких слід віднести польові транзистори, керовані структурою “метал-оксидел-напівпровідник” (MOSFET), і запиірні тиристири з польовим керуванням (МСТ).

ККД перетворювачів з ланкою постійного струму на базі напівпровідникових вентилів четвертого покоління практично дорівнює ККД БПЧ. Для потужних перетворювачів він досягає 99%.

На сучасних суднах у складі ГЕУ застосовують активні транзисторні випрямлячі в складі оборотних перетворювачів частоти з ланкою постійного струму.

Принципова електрична схема активного випрямляча наведена на рис. 1.28.

Рис. 1.28. Принципова електрична схема активного випрямляча

Активний випрямляч за структурою силової частини являє собою автономний трифазний транзисторний інвертор із зустрічно паралельно включеним некерованим випрямлячем. АВ є оборотним. На вході випрямляча встановлюють дросель, необхідний для роботи АВ.

АВ із вхідним реактором по своєму функціональному призначенню являє собою перетворювач підвищувального типу з можливостями корекції коефіцієнта потужності й рекуперації енергії в живильну мережу. При цьому його коефіцієнт потужності при роботі АВ практично досягає теоретично граничного значення, рівного 1, у режимах споживання й рекуперації електроенергії, що означає відсутність у мережі реактивної складової струму по основній гармоніці й вищих гармонійних складових струму.

Силові напівпровідникові інвертори – пристрої, призначені для перетворення електричної енергії постійного струму в електричну енергію змінного струму, що вимагається для живлення ГЕД змінного струму.

Найбільше поширення одержали автономні інвертори напруги (АІН). Умовна позначка й принципова схема АІН наведені на рис. 1.29.

Рис. 1.29. Автономний інвертор напруги

АІН мають гарні масо габаритні характеристики. Коефіцієнт потужності АІН мало залежить від навантаження ГЕД.

Більшість ГЕУ з перетворювачами частоти будуються за схемою випрямляч - інвертор, між якими включаються конденсатори досить великої ємності й гальмові опори. Невід'ємною частиною перетворювача з інвертором напруги в ГЕУ

є ланка постійного струму, що складає в загальному випадку з конденсатора-фільтра, інвертора напруги й блоку гальмування, що здійснює гасіння енергії гальмування й запобігає підвищенню напруги в ланці постійного струму вище припустимого значення.

Електрична схема НП із ланкою постійного струму виконаного за схемою АВ-АІ представлена на рис. 1.30.

НП складається з активного випрямляча, конденсаторів, гальмових опорів й автономного інвертора.

Рис. 1.30. Електрична схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму

Інвертор напруги, як правило, реалізують або на транзисторах, або на повністю керованих тиристорах, що працюють у ключовому режимі. Для усунення перенапруг на елементах схеми при комутації силових ключів їх шунтують паралельними діодами, що забезпечують шлях для протікання струму на інтервалах часу, при яких знаки вихідного струму й формованої напруги протилежні.

Основним призначенням конденсатора у ланці постійного струму є усунення перенапруг, викликаних комутацією силових ключів інвертора й згладжування пульсацій напруги, викликаних роботою випрямляча. Слід зазначити, що напруга в ланці постійного струму під навантаженням перетворювача має форму однополярного сигналу, що періодично змінюється, модульованого в загальному випадку низькочастотною й високочастотною складовими.

Переваги автономних інверторів при використанні запирих вентилів нового покоління стають очевидними. Висока швидкість перемикання дозволяє в повній мірі використовувати переваги ШІМ, отримуючи вихідну напругу з мінімальними спотвореннями. Виконання комутацій на частоті 16 кГц

і вище розв'язує проблему акустичних шумів. Дозволяє зменшити масу та габарити фільтрів вищих гармонік. При великій потужності частоти комутації і вихідної частоти перетворювача значно підвищується швидкодія системи регулювання, що дозволяє поліпшити динамічні характеристики привода.

Одночасно підвищення частоти призводить до зростання динамічних втрат, появи значних перенапружень на елементах перетворювача. Одним з шляхів подолання цієї проблеми є перехід від “жорсткої” комутації з використанням ШІМ до “м'якого” перемикання вентилів при нульовому значенні напруги і струму.

Використання в якості вхідного перетворювача некерованих випрямлячів (НВ) дозволяє суттєво знизити вплив перетворювача на вхідну мережу.

Перевагою СПЧ з автономними інверторами напруги (АІН) є незалежність вихідної напруги від навантаження та його коефіцієнта потужності.

Недоліком таких систем можна вважати те, що забезпечення рекуперативного режиму ГЕУ призводить до значного ускладнення схем таких СПЧ. Через присутність незворотної ланки постійного струму енергія рекуперації повинна розсіюватися у баластному опорі або рекуперуватися посереднім шляхом. Режим динамічного гальмування ГЕД реалізується достатньо легко.

Слід зазначити, що рекуперативне гальмування доцільно використовувати тільки в тих випадках, коли є можливість спожити рекуперовану енергію. Окрім цього, як показує практика, в ряді випадків використання рекуперативного гальмування значно затягує процеси гальмування та реверсу ГЕД. Окрім того в великій кількості випадків, де на судах використані ГКК, реверс гвинта проводиться не реверсом двигуна, а розворотом колонки.

2. Гребні електричні установки змінного струму

2.1. Формування структури головної енергетичної установки

Формування структури головної енергетичної установки проводиться на основі значення буксирувальної потужності судна та таблиці навантажень суднової електростанції.

При потужностях ГЕД більших за 1 МВт використання тихохідних синхронних двигунів сприяє зменшенню масогабаритних показників установки у порівнянні з використанні швидкохідних асинхронних двигунів, що з'єднуються з валом через редуктор. Використання механічної передачі також зменшує ККД установки.

Для керування гребними двигунами використовуються перетворювачі частоти на базі автономних інверторів напруги з широтно-імпульсною модуляцією. Основою перетворювача слугує інвертор на з'єднаних за мостовою схемою IGBT-модулях – повністю керованих вентилях на біполярних транзисторах з ізольованим затвором. Низький вплив на суднову мережу забезпечується використанням перетворювачів з некеруваними випрямлячами. В якості перетворювачів можна частотні перетворювачі морського виконання виробництва ABB серії ACS-800-07.

Запровадження об'єднаної енергетичної установки дозволяє відмовитись від встановлення окремих генераторів, що забезпечуватимуть електроенергією загальносуднові споживачі, та резервних генераторів.

Потужність генератора визначається за виразом:

$P_{\text{ГД}}$,

де $P_{\text{ГД}}$ – потужність гребного двигуна;

$P_{\text{спож}}$ – потужність, що споживається загальносудновими споживачами у аварійному режимі;

$n_{\text{ГД}}$ – кількість гребних двигунів;

mG – кількість генераторів;

□М – ККД двигуна ;

□П – ККД перетворювача частоти.

Напруга головних машин ГЕУ може бути прийнята рівною 220 (230), 380 (400), 660 (690), 3000 (3150), 6000 (6300), 7500, 10 000 В. Підвищена напруга призводить до зниження робочих струмів генераторів, полегшує організацію захисту генераторів та перетворювачів автоматичними вимикачами, дозволяє використовувати скалярне керування двигунами з ШІМ за синусоїдальним законом. Водночас це потребує використання знижуючих трансформаторів для передачі енергії на ГРЩ.

Типова схема кола головного струму автономної ДЕГУ показана на рис. 2.1.

Сумарна потужність генераторів дорівнює потужності гребних електродвигунів з урахуванням утрат та суднових споживачів.

Вимикачі Q1 – Q 6 служать для включення генераторів, вимикач Q7 - для рівнобіжного з'єднання шин 13 і 14 і рівнобіжної роботи генераторів правого і лівого борту. При включенні генераторів правий і лівий борти на рівнобіжну роботу під навантаженням застосовується метод грубої синхронізації через реактор 10. Для цього включаються вимикачі Q 8 і Q9 реактора при розімкненому вимикачі Q 7. Після синхронізації двох систем вимикач Q 7 замикається. SA1-SA2 - реверсивні перемикачі ГЕД. Q 10–Q 11 – вимикачі опорів динамічного гальмування.

Рис. 2.1. Схема головного струму ДЕГУ

У ГЕУ змінного струму використовуються двигуни синхронні й асинхронні (короткозамкнуті з фазним ротором і з переключенням числа пар полюсів). Асинхронні ГЕД, особливо з короткозамкнутим ротором, конструктивно прості,

надійні, володіють гарними пусковими характеристиками і тому цілком прийнятні для ГЕУ. При прямому з'єднанні електродвигуна з гребним валом частота обертання мала, не більш 150-200 об/хв, тому електродвигуни мають низький коефіцієнт потужності, що знижується іноді до 0,67, що викликає збільшення повної потужності самого ГЕД приблизно в 1.5 рази в порівнянні з повною потужністю синхронних ГЕД тієї ж активної потужності. У таких же відношенні збільшується повна потужність живильних генераторів.

Синхронні двигуни мають пускову короткозамкнуту обмотку, що створює досить великий пусковий момент, що незначно відрізняється від пускового моменту асинхронного двигуна. Пускова короткозамкнута обмотка на роторі дає можливість робити асинхронний пуск синхронного двигуна. Наприкінці асинхронного пуску обмотка збудження ротора підключається до збудника постійного струму. Основна перевага синхронного ГЕД - високий коефіцієнт потужності, дорівнює одиниці. Тому розміри синхронного двигуна менше, ніж асинхронного, при тій же активній потужності і менших розмірах живильних генераторів.

Деякі іноземні фірми використовують швидкохідні асинхронні двигуни, з'єднуючи їх із гребним валом через редуктор, що дає можливість застосовувати асинхронні ГЕД на підшипниках гойдання, з малим повітряним зазором, порівняно високим ККД. Іноді один гребний вал приводиться в обертання двома асинхронними ГЕД. Коли потужність ГЕД не перевищує 1000 кВт, вигідніше з погляду зменшення маси, вартості і зручності розміщення застосовувати швидкохідні асинхронні ГЕД з редуктором на підшипниках гойдання, а при великих потужностях - синхронні тихохідні ГЕД, що з'єднуються безпосередньо з гребним валом.

Частота обертання синхронних генераторів залежить від теплових двигунів: у дизель-генераторів вона дорівнює

750...1500 об/хв, а в турбогенераторів – 3000 об/хв і більш. Генератори мають захищене виконання, часто з одним підшипником (другий підшипник є загальним для генератора і теплового чи двигуна вихідного вала механічної передачі), примусову вентиляцію з повітроохолоджувачами чи самовентильацію по замкнутому циклі також з повітроохолоджувачами.

Правила Регістра допускають застосування в ГЕУ змінного струму стандартних напруг, що не перевищують 10 кВ. Більш висока напруга в кожному окремому випадку вимагає узгодження з Регістром.

Структурні схеми ГЕУ змінного струму з ЄЕЕС. У наш 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. 2.2 наведена ЄЕЕС із ГЕУ змінного струму на базі безпосереднього напівпровідникового перетворювача (БНП) із прямою передачею обертаючого моменту на гвинт.

Рис. 2.2. 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 загальсуднових приймачів електроенергії, рекуперативне гальмування в суднову мережу мало-ефективне, 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. 2.3 наведена ЄЕЕС із ГЕУ змінного струму на базі НП із ланкою постійного струму й прямий передачею обертаючого моменту на гвинт.

Рис. 2.3. 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 суднах 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. 2.4.

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

Рис. 2.4. ЄЕЕС із ГЕУ й перетворювачем частоти на базі активного випрямляча: 1 – головні ДГ; 2 – ГРЩ; 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 більше ефективного гальмування ГЕД у ланці постійного струму НП додатково встановлюють гальмові опори.

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

Застосування ГРК 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 ГРК, 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 ГРК. В електромеханічних ГРК ГЕД розташовується безпосередньо в гондолі, що перебуває поза корпусом судна. ГРК 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 ГРК використовується мало оборотний ГЕД, що прямо пов'язаний із гребним гвинтом. Масагабаритні показники середньо-оборотних ГЕД значно краще, ніж у мало оборотних.

На суднах з ГЕУ середньої й малої потужності найбільше застосування знайшли механічні ГРК із ГЕД асинхронного типу. До недоліків ГЕУ з механічними ГРК варто віднести обмеження перевантажувальної здатності по моменту, що пов'язане з наявністю зубчастих передач. В електромеханічних ГРК 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 ГРК виключається необхідність реверсування гвинта, що дозволяє застосовувати нереверсивні середньооборотні 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 ГЕУ із ГРК. При цьому ГЕД можуть перебувати в корпусі судна або розміщатися безпосередньо у ГРК. 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 ГРК може застосовуватися в складі носового пристрою, що підрулює.

Структурна схема ЄЕЕС із ГЕУ змінного струму на базі двох механічних ГРК наведена на рис. 2.5.

Рис. 2.5. ЄЕЕС із ГЕУ й механічної ГРК: 1 – ГДГ; 2 – ГРЩ; 3 – пропульсивний трансформатор; 4 – НП; 5 – ГЕД; 6 – ГРК; 6 – допоміжний трансформатор; 8 – суднові приймачі електроенергії

У ГЕУ із ГРК 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 ГРК 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 судову живильну мережу. Основним недоліком електричних ГРК є складність конструкції, висока маса й габарити, що пов'язане із застосуванням малооборотних ГЕД. До достоїнств варто віднести звільнення внутрішнього простору судна й високих переваг зручності здатностей по обертаючому моменту ГЕД.

Схеми головного струму сучасних суден і параметри судових генераторів представлені у Додатку.

2.2. Робота гребної установки з перетворювачем частоти у часткових режимах

З економічних міркувань при використанні судна може виникнути потреба забезпечення тривалого періоду руху зі зниженою швидкістю. В цьому випадку зменшуються витрати палива на одиницю пройденої відстані порівняно з повним ходом, так як потужність, необхідна для ходу судна, приблизно пропорційна кубу швидкості. Звісно, при цьому збільшується

тривалість рейсу. Іноді такий режим виявляється доцільним, адже вартість палива складає основну частину експлуатаційних витрат. Такі режими ходу називаються економічними.

Швидкість судна може бути зниженою на тривалий час внаслідок штормової погоди, несправності одного з теплових двигунів, зупинки його для профілактичного огляду та ремонту на ходу та значно рідше внаслідок несправності електричного обладнання.

На суднах з безпосередньо з'єднаними з валом тихохідними дизелями у часткових режимах роботи знижується частота обертання дизелів, що сприяє зниженню їх ефективності. За наявності кількох гребних валів частина гребних двигунів може бути відключена, а незадіяні гвинти при цьому вільно обертаються.

В ГЕУ з кількома гребними двигунами при зменшенні кількості працюючих генераторів для отримання економічних режимів доцільним буде не зупиняти частину двигунів, а розподіляти потужність установки між усіма гребними гвинтами. Зниження ККД двигунів внаслідок неповного їх завантаження значно менше вплине на економічні показники, аніж зниження загальної ефективності пропульсивної установки через присутність гвинтів, що будуть вільно обертатися.

Особливістю роботи ГЕУ змінного струму з перетворювачами частоти у парціальних режимах є те, що при відключенні частини генераторних агрегатів немає потреби знижувати швидкість обертання інших генераторів, а отже момент, що може бути отриманий на гребному валу при використанні m генераторів з m_n (з розрахунку на один вал), складатиме

В установках, де передбачено зміну швидкості обертання генераторів для зменшення частоти струму момент складає

Як відомо, момент на гребному валу пропорційний

квадрату швидкості обертання гвинта, а потужність, що при цьому розвивається гребним двигуном – її кубу. Приймаючи за базис номінальні значення та скориставшись умовними одиницями можна записати:

,

Зменшення частоти обертання генераторів ГЕУ без перетворювача супроводжується зменшенням їх потужності, а отже при відключенні частини генераторів

.

За відомих припущень можна вважати

;

.

З урахуванням рівнозначності та матимемо.

;

;

.

Для установок з перетворювачами частоти, де частота обертання генераторів залишається постійною, аналогічно можна записати:

;

;

;

;

;

.

Для перевірки отриманих результатів, розглянемо порядок визначення потужності системи електричного руху у парціальному режимі

.

Отримане значення повністю підтверджує виведені залежності.

Отже при використанні статичних перетворювачів частоти в системах електричного руху може бути досягнута більша ефективність установки у парціальних режимах за рахунок повнішого використання працюючих генераторів.

Для остаточного визначення парціальних режимів установки треба розглянути залежність зміни напруги двигуна від кількості працюючих генераторів. В ГЕУ з перетворювачем

частоти напруга на клеммах генераторів завжди номінальна, в установках без перетворювача – змінюється зі зміною режиму ходу.

Прийнявши , можна записати в умовних одиницях:

Для звичайних установок

;

.

Тобто необхідно знижувати напругу пропорційно частоті. При цьому магнітний потік генераторів підтримуватиметься сталим.

Для установок з перетворювачами

;

.

Відповідно, отримано ту ж залежність, що й для звичайних установок.

Отримані результати говорять про те, що в гребних установках зі статичними перетворювачами частоти існує можливість отримання на гвинті більшого моменту при заданій частоті обертання, аніж в установках змінного струму за схемою «генератор–двигун».

Для суден з об'єднаною енергетичною установкою слід враховувати також сталу частину споживаної потужності, що спрямовується на потреби загальносуднових споживачів. Ця потужність не змінюється зі швидкістю ходу, що вносить деякі корективи до загальноприйнятої методики розрахунку парціальних режимів. Перш за все це відноситься до заміни номінальних кількостей генераторів потужністю, що направляється до ГЕД в парціальному режимі

;

Структурою головної енергетичної установки передбачено забезпечення часткових режимів відключенням частини генераторних агрегатів. При відключенні трьох генераторних

агрегатів відключається один гребний двигун.

В аварійному режимі відповідальні загальносуднові споживачі живлення отримують електроенергію від аварійної електростанції. Один головний генератор живить один гребний двигун.

2.3. Розрахунок параметрів асинхронного двигуна (АД) при зміні частоти мережі і ковзання ротора

Частотне керування ГЕД потребує при проектуванні розрахунку параметрів асинхронного (АД) і синхронного (СД) двигуна. Параметри АД знаходимо за Т-образною схемою заміщення фази двигуна, яка наведена на рис. 2.6.

а б

Рис. 2.6. Т-образна схема заміщення АД

а – первинна, б – перетворена

де E_1 , U_1 , I_1 , r_1 , x_1 – параметри первинного кола (статора);
 E_2 , I_2 , r_2 , x_2 – приведені параметри вторинного кола (ротора);

I_m , x_m – коло намагнічування;

Для перетворення параметрів обертового ротора до нерухомого статора використаємо наступні формули приведення

$$r_2 = k_e^2 r_2; \quad I_2 = I_2 / k_e;$$

$$x_2 = k_e^2 x_2; \quad E_2 = E_2 k_e;$$

де k_e – коефіцієнт трансформації АД.

Всі реактивні опори пропорційні відносній частоті змінного струму джерела живлення f_1^* :

$$f_1^* = f_1 / f_{1H},$$

де f_1 – реальна частота суднової мережі;

f_{1H} – номінальна частота суднової мережі.

Ковзання ротора

.

де f_2 – частота струму у роторі.

Використання Г-образної схеми заміщення АД не рекомендується через велику похибку (при зміні частоти), що є наслідком неприпустимих спрощень коефіцієнта розсіювання:

$$\sigma_1 = 1 + Z_1 / Z_m$$

За Т-образною схемою заміщення ділянки між крапками m і n мають опір

$$Z_m = jx_m \sigma_1 f_1^*; \quad Z_2 = r_2 \sigma_1 f_1^* / f_2^*;$$

;

;

$$\text{де } Z_{2m2} = r_2 \sigma_2^2 / f_2^{2*} + (x_m + x_2);$$

І, як кінцевий результат одержуємо схему (б) з якої передана електромагнітна потужність ротору дорівнює потужності на опорі r_{mn} , тому що у колі намагнічування практично немає активного опору ($r_m \approx 0$):

$$P_{em} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_{mn} \cdot f_1^*,$$

де I_1 – фазний струм;

m_1 – кількість фаз.

Електромагнітний момент ГЕД:

$$M = \frac{P_{em}}{\omega_1},$$

де ω_1 –

p – число пар полюсів двигуна;

σ_1 – астота обертання ГЕД.

Якщо mM ГЕД одержує живлення від mG паралельно включених генераторів, то наведені до одного генератора опори навантаження мають вигляд у відносних одиницях.

;

;

де $Z_b = U_N / I_N$ – базисний опір; U_N , I_N – номінальне значення фазних напруги і струму.

2.4. Розрахунок параметрів синхронного двигуна (СД) при

зміні частоти і ковзання

При роботі в перехідних процесах синхронний двигун працює в асинхронному режимі. Для розрахунку його параметрів можна представити синхронний двигун двома схемами заміщення по поздовжньої d і поперечної q осях рис. 14.1.

а

б

Рис. 2.7. Схема заміщення СД

а – по вісі d , б – по вісі q

На рис. 2.7. r_1 , x_1 – активні і індуктивні опори розсіювання фази статора СД;

x_{ad} , x_{aq} – індуктивний опір реакції якоря по поздовжній і поперечній осях;

r_{kd} , x_{kd} , r_{kq} , x_{kq} – активний і індуктивний опір пускової (заспокоїливої) обмотки по поздовжній і поперечній осях.

Момент і струм СД, що працює в асинхронному режимі, визначається за схемою заміщення (рис. 14.2), яка не відрізняється від перетвореної схеми заміщення АД (див. рис. 13.1,б))

Рис. 2.8. Перетворена схема заміщення СД

На рис. 2.8 $r_{mn} = (r_{mnd} + r_{mnq}) / 2$; $x_{mn} = (x_{mnd} + x_{mnq}) / 2$;

r_f , x_f – активний і індуктивний опір замкнутої обмотки збудження (з розрядним опором включно).

Електромагнітна потужність СД

$$P_{em} = m_1 \cdot I_{l2} \cdot r_{mn} \cdot f_1^*$$

Електромагнітний момент СД

, Н·м

де ,

p – число пар полюсів;

f_1 – частота обертання ГЕД.

Якщо mM ГЕД одержує живлення від mG паралельно включених генераторів, то наведені до одного генератора опори навантаження мають вигляд у відносних одиницях.

;

де $Z_6 = U_H / I_H$ – базисний опір; U_H , I_H – номінальне значення фазних напруги і струму.

2.5. Розрахунок струму і напруги СГ у статичі (метод Касьянова)

Приймаємо, що індуктивний опір пропорційний відносній частоті $f_1^* = f_1 / f_{1H}$.

Розрахунок статичних режимів ГЕУ ведеться у відносних одиницях. Приймаємо за базові величини: номінальну фазну напругу генератора U_{1H} ; номінальний фазний струм I_{1H} ; базовий опір $Z_6 = U_{1H} / I_{1H}$.

Для розрахунку повинні бути задані: параметри навантаження r_n , x_n ; активний опір фази генератора r_1 ; індуктивний опір розсіювання фази x_1 ; індуктивний опір реакції якоря по поздовжній і поперечній осях генератора x_{ad} , x_{aq} ; характеристика холостого ходу СГ.

Характеристику холостого ходу креслимо два рази: перший раз її виконуємо в абсолютних одиницях; другий раз – у відносних (базова напруга – номінальна, а базовий струм збудження знаходимо на рис. 2.9 за характеристикою холостого ходу без урахування насичення (спрямлена характеристика).

Рис. 2.9. Характеристику холостого ходу в абсолютних одиницях

Коефіцієнт насичення магнітної системи по поздовжній осі

$$C_0 = ab/al \ll 1.$$

Розглянемо основні відношення для синхронного генератора, які впливають із векторної діаграми Блонделя (рис. 2.10).

Рис. 2.10. Векторна діаграма Блонделя

Вектор струму фази I_1 відстає від вектора напруги фази U_1 на кут φ_1 . Вектор спадання напруги на активному опорі фази $СГ I_1 r_1$ збігається за напрямком зі струмом I_1 , а вектор спадання напруги на індуктивному опорі розсіювання $j I_1 x_1 \approx f_1^*$ перпендикулярний до вектора струму I_1 . Додавання трьох векторів дасть вектор внутрішньої ЕРС E_i . Якщо до неї додати ЕРС реакції якоря по поздовжній і поперечній осях, то на діаграмі одержимо вектор ЕРС холостого ходу E_0 .

З курсу електромашин відомо, що:

$$E_{aq} = I_1 x_{aq} \approx f_1^* = I_1 q x_{aq} \approx f_1^* \cos \varphi,$$

Звідки відрізок:

$$av \approx I_1 q x_{aq} \approx f_1^* = E_{aq} / \cos \varphi.$$

Із трикутника $\triangle ovc$ одержуємо:

;

.

Внутрішня ЕРС по поздовжній осі E_{id} складається із двох відрізків:

$$E_{id} \approx O_m = O_n + nm$$

Відрізок O_n одержуємо із трикутника $\triangle Onc$

$$O_n \approx I_1 (r_1 + r_m) \cos \varphi,$$

А відрізок nm з $\square_{акс}$

$$nm = ak \square I l(x_n + x_l) \square f l * \sin \square.$$

У результаті маємо

$$E_{id} = I l [(r_l + r_n) \cos \square + (x_n + x_l) \square f l * \sin \square].$$

Припустимо, що на характеристиці холостого ходу СГ струм намагнічування (збудження) заданий відрізком ОА (рис. 2.11), а ЕРС холостого ходу $\square$ відрізком AD. СГ навантажений активно-індуктивним струмом і тому він розмагнічується.

Рис. 2.11. Характеристика холостого ходу у відносних одиницях

Величина сили якоря, що розмагнічує, по повздовжній осі АВ $\square F_{ад} = C_0 I l f l * x_{ад} \sin \square$,

на характеристиці холостого ходу зображена відрізком АВ=СN.

Відзначимо що

Кут $\square \square$ визначається через параметри генератора і навантаження з урахуванням масштабів ЕРС (mE) і сили, що намагнічує (mF).

При проектуванні ГЕУ змінного струму розглядаються два завдання:

1. Розрахунок напруги СГ при заданому струмі збудження.
2. Розрахунок струму збудження по заданій напрузі або по заданому струму навантаження СГ.

Для отримання напруги СГ на характеристиці холостого ходу, відмічаємо намагнічуючу силу збудження відрізком ОА, у точці А проводимо під кутом $\square \square$ пряму АС до перетину з характеристикою холостого ходу. Відрізок ВА дорівнює розмагнічуючій силі реакції якоря по повздовжній осі d і тому

фазний струм СГ

$$I_1 = F_{ad} / (C_0 f_1 * \chi_{ad} \sin \square).$$

Напруга СГ:

,

де m , χ_p – активний і індуктивний опір навантаження (двигуна).

Якщо задано фазну напругу СГ, то розраховується фазний струм I_1 , одержуємо НС реакції якоря по повздовжній осі F_{ad} і внутрішню ЕРС по повздовжній осі E_{id} . Позначаємо відрізком BC ЕРС E_{id} і від отриманої крапки B вправо відкладаємо намагнічуючу силу реакції якоря. Відрізок OA дорівнює струму збудження СГ, який треба було знайти.

2.6. Динамічне гальмування ГЕД змінного струму

Динамічне гальмування асинхронних двигунів змінного струму – це метод швидкої зупинки, при якому статор відключається від мережі змінного струму і підключається до джерела постійного струму, створюючи нерухоме магнітне поле, що індукуює в роторі гальмівний струм, який взаємодіє з магнітним полем статора, створюючи електромагнітний момент, спрямований проти обертання, що сповільнює двигун. Відбувається перетворення енергії: кінетична енергія обертання перетворюється на теплову в колі ротора. Регулювання гальмівного моменту забезпечується зміною рівня підведеної напруги. Постійний струм подається лише на короткий час гальмування, після чого двигун відключається від джерела постійного струму.

Гальмування синхронного двигуна здійснюється переключенням його в генераторний режим. Застосовують схему динамічного гальмування, принцип якого наведений на рис. 2.12 (генераторний режим при роботі СД незалежно від мережі змінного струму).

Рис. 2.12. Схема динамічного гальмування синхронного двигуна

У цій схемі обмотки статора синхронного двигуна 2 відключаються від мережі змінного струму й включається на додаткові резистори 1, а обмотка збудження залишається підключеною до джерела збудження U_z через резистор 3.

Значення опору динамічного гальмування із практики:

де U_{1n} – номінальна фазна напруга живлення двигуна;
 I_{1n} – номінальний фазний струм.

ГЕД працює в режимі синхронного генератора, який обертається гребним гвинтом. Електромагнітний момент ГЕД

де n – частота обертання ГЕД, об/с;

r_1 – активний опір фази ГЕД;

m_1 – кількість фаз ГЕД;

I_1 – струм фази ГЕД (визначається по методу Касьянова за заданим значенням струму збудження).

2.7. 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 $U = U_n \cdot f_1^*$. 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 короточасне збільшення струму збудження генераторів у 3...5 разів стосовно струму холостого ходу.

На рис. 2.13 крива 1 – механічна асинхронна характеристика ГЕД при номінальному струмі збудження, крива 2 – при форсуванні збудження, крива 3 – швартовна характеристика гвинта.

Коли ротор ГЕД розженеться до підсинхронної швидкості, включають обмотку збудження ГЕД, і під дією синхронізуючого моменту двигун 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. 2.13. Пуск ГЕД змінного струму

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

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

А відносне ковзання, що відповідає підсинхронній швидкості, буде дорівнювати

,
або

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

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

У більшості випадків виявляється, що не тільки при номінальній частоті, але і при частоті, що відповідає швидкості обертання пш на швартовній характеристиці (рис. 2.13), необхідний вхідний момент значно менше моменту обертання, що електродвигун може розвинути при найбільшому перезбудженні генератора. Тому пуск виконується при зниженій частоті, обумовленою найменшою стійкою швидкістю теплового двигуна (15 Гц).

Подальше збільшення швидкості судна проводиться підвищенням частоти живлення двигуна при розгоні судна. Частоти повинні збільшуватися плавно, щоб машини не переважувалися по моменту 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 подсинхронної 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 машин для зниженої частоти $\square f_1$ і $\cos \square = 1$.

Подальший розгон ГЕД виконується 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, близької до нуля, включається ГЕД. Потім виконуються операції, зазначені в п. 2 - 5.

2.8. Реверс ГЕД змінного струму

При реверсі, як і при пуску, синхронний і асинхронний 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.

Існують два способи реверса ГЕД:

1. ГЕД включається у режимі противключення як звичайний асинхронний двигун;
2. ГЕД включається попередньо у режимі 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 за першим способом

На рис. 2.14 показані характеристики гребного гвинта 1 і ГЕД 2 при реверсі переключенням у режим противключення ГЕД.

Рис. 2.14. Реверс ГЕД противключенням

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 дорівнює 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 В. 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.

Для швидкого реверсування необхідно, щоб гальмовий момент ГЕД перевищував максимальний обертаючий момент гребного гвинта $M_{\max}$ у режимі гідравлічної турбіни. З цієї метою струм збудження генератора збільшують. Механічна характеристика ГЕД при форсировці збудження генераторів зображується кривою 4 на рис. 2.14.

У випадку єдиної судової електроенергетичної системи зміна напруги і частоти живлення ГЕД здійснюється за допомогою статичного перетворювача частоти. При цьому параметри живлення на головних шинах підтримуються незмінними.

Реверс ГЕД за другим способом

Для здійснення швидкого і надійного реверса синхронного двигуна застосовують динамічне гальмування ГЕД. У цьому випадку після зняття збудження ГЕД відключається від шин генераторів і включається на трифазний опір, з'єднаний зіркою і якій дорівнює $\square R_{\Gamma} = 0.15 U_{1n} / I_{1n}$ (U_{1n}, I_{1n} – номінальні фазні напруга і струм 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. 2.152.

Рис. 2.15. Реверс ГЕД змінного струму з динамічним гальмуванням

Під дією цього гальмового моменту гребний гвинт знижує частоту обертання до мінімальної (крапка В), 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 колодковим), що включається електромагнітом.

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 збудженні генераторів по асинхронній характеристиці (крива 3).

Досвід показує, що швидкий реверс ГЕД приводить до вібрації кормової частини судна і появі перенапруг у корпусі. Тому там, де це можливо, доцільно застосовувати реверс ГЕД за першим способом. При цьому відпадає необхідність в опорах динамічного гальмування.

При реверсі ГЕД виконуються наступні операції:

Перший спосіб:

1. Включається збудження генераторів і ГЕД, виключається реверсивний перемикач і знижується швидкість обертання теплових двигунів до мінімальної стійкої, після чого виконується синхронізація генераторів і включається їхнє збудження.

2. Включаються реверсивний перемикач у положення «Хід назад» і збудження генераторів з необхідним форсуванням.

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, за потреби, виконується, 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, виконується синхронізація генераторів і виключається їх 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 форсуванням.

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.

2.9. Фізична сутність електромагнітних перехідних процесів у машинах змінного струму. Основні припущення теорії Парка-Горєва

Перехідні процеси можна розділити на наступні:

1) Механічні перехідні процеси, які розраховуються по статичних електричних характеристиках, тобто вільні струми в електроколах відсутні, а є тільки примусові;

2) Електромагнітні перехідні процеси протікають при незмінній частоті обертання електричних машин, при цьому розглядаються вільні й примусові струми;

3) Електромеханічні перехідні процеси □ при зміні частоти обертання електромашин з обліком вільних і примусових складових (скидання й наброс навантаження, к.з. і т.д.);

Вільна складова статорної обмотки створює нерухомий у просторі магнітний потік, що поступово зменшує положення магнітного потоку, викликаного вільними складовими струму

залежно від часу включення. Тому той самий двигун має одну статичну механічну характеристику і безліч динамічних.

Особливості динамічних характеристик:

1. Момент у початковій точці дорівнює нулю, тому що струм дорівнює нулю.

2. При ковзанні до критичного, момент різко міняється, тому що протікають вільні складові струмів.

3. При підході до критичної частоти обертання перепади моментів відсутні, і в цьому районі спостерігається різке зменшення струмів.

4. Однак внаслідок електромагнітної інерції постійна часу обмотки збудження при підході і ковзанню рівному нулю, струм не дорівнює нулю і тому не дорівнює нулю електромагнітний момент.

5. При згасанні струмів, поступово встановлюється ковзання рівне нулю.

6. СГ у процесі пуску й реверса працює як асинхронний.

Для аналізу роботи ГЕУ змінного струму в перехідних режимах варто застосовувати теорію Парка Горєва. Рівняння Парка-Горєва є фундаментальними для моделювання роботи машин змінного струму, зокрема синхронних і асинхронних машин, оскільки вони дозволяють описувати складні перехідні процеси (запуск, короткі замикання, регулювання) через перехід до обертової системи координат (осі d-q), значно спрощуючи диференціальні рівняння та враховуючи їхню електромагнітну взаємодію, що критично важливо для точного аналізу динамічної поведінки та розробки систем керування.

Ключове значення рівнянь Парка-Горєва (d-q модель):

- Спрощення моделі: Замість складних трифазних систем з часовими гармоніками, вони переходять до двоосьової системи, де осі фіксовані відносно ротора (d-квадратурна, q-директивна), що перетворює змінні струми та напруги

з часових на функціональні, спрощуючи розрахунки.

- Аналіз перехідних процесів: Дозволяють детально вивчати стани, що виникають при зміні режимів роботи (наприклад, при включенні, зміні навантаження, режимі короткого замикання).

- Опис електромагнітних зв'язків: Точно враховують взаємодію між обмотками якоря (статора), ротора (збудження та демпферних) та магнітним насиченням.

- Основа для керування: Є математичною базою для розробки сучасних методів керування електроприводами та генераторами (наприклад, керування за вектором струму), що забезпечує високу якість роботи машин змінного струму.

Таким чином, рівняння Парка-Горєва є незамінним інструментом для інженерного розрахунку, проектування та симуляції динаміки машин змінного струму.

Основні припущення теорії Парка-Горєва

1. Фазні обмотки статора й ротора приймаються однаковими, симетрично розташованими.

2. Розглядаються тільки перші гармоніки струмів і магнітних потоків. Вищі гармоніки, які з'являються через зубчастість магнітної системи статора і ротора, і інших причин, не враховуються.

3. Магнітна проникність магнітної системи $\square$ дорівнює константі, тобто відсутній гістерезис і насичення машини. Характеристика холостого ходу має вигляд прямої лінії. Параметри машини і її насичення ураховуються зміною нахилу цієї прямої. У результаті ми можемо використати принцип накладення.

4. Заспокоїлива обмотка синхронної машини представляється у вигляді двох роздільних обмоток, розташованих по двох осях d й q .

У результаті перетворення Парка-Горєва представляють машину у формі двох трансформаторів по осях d і q . Ці два

трансформатори не мають електромагнітного зв'язку один з одним.

Існує поняття вектора, що зображує, для намагнічуючих сил струмів, потоків, напруг.

Розглянемо статорну обмотку, струми, у якій змінюються по будь-якому довільному закону, але за умови, що сума дорівнює нулю. У цьому випадку існує вектор, що зображує, проекція якого на осі фаз дає миттєве значення струмів. При цьому вважаємо, що фази однакові і симетрично розташовані.

Зображаючий вектор дорівнює

$$I_z = (2/m) i_r,$$

де m – число фаз;

i_r – результуючий вектор.

Для трифазної системи

$$I_z = (2/3) i_r.$$

У цілому ряді випадків сума струмів не дорівнює нулю. Існує нульова складова

Для цього випадку перетворення Парка-Горєва охоплюють пряму і зворотну послідовність, а нульову не враховують. Це визначається тим, що нульова послідовність спрямована по осях однаково і у результуючий i_r та вектор i_z вони не входять.

Щоб врахувати струм i_0 вирішують окрему систему рівнянь для нульової складової і отримане рішення потім додають до рішень по рівняннях Парка-Горєва.

2.10. Диференціальні рівняння Парка-Горєва СМ в абсолютних одиницях

Рівняння Парка-Горєва – це ключовий математичний інструмент для моделювання синхронних машин, що дозволяє перетворити трифазні змінні (струми, напруги) у двовісьову

систему координат (d - q вісі), яка обертається разом із ротором, значно спрощуючи розрахунки динамічних процесів та стійкості, описуючи перехідні режими роботи та синхронізацію, хоча й вимагає врахування насичення магнітного поля.

Основні особливості та переваги рівнянь Парка-Горєва

Найважливіша особливість: трифазні змінні (A , B , C) перетворюються на дві ортогональні осі (d -вісь та q -вісь), що синхронно обертаються з ротором машини.

Це усуває залежність від часу для синусоїдальних величин, перетворюючи складні диференційні рівняння на простіші алгебраїчні та диференціальні рівняння в постійній системі координат.

Спрощення динамічних процесів: дозволяють аналізувати перехідні процеси (пуск, коротке замикання, синхронізація) та стійкість синхронної машини в умовах несиметричних навантажень та при зміні режимів.

Опис взаємодії обмоток чітко описують взаємодію обмоток статора та ротора (збудження, демпферні) через індуктивні зв'язки, що важливо для розуміння процесів.

При моделюванні насичення рівняння спрощують систему, але вони також враховують нелінійні ефекти, такі як насичення магнітної системи, що робить модель більш точною, особливо при великих струмах збудження.

Рівняння Парка-Горєва застосовуються в моделях для аналізу стійкості, розрахунку автоматичних регуляторів збудження (АРЗ), систем керування, що є фундаментальними для сучасної електроенергетики та симуляції.

Не перетворена по П-Г система рівнянь СМ має вигляд:

Статорні рівняння

;
;
.

Рівняння для обмотки ротора

;
;
;

$$P_1 = U_A i_A + U_B i_B + U_C i_C$$

де $U_A, U_B, U_C; i_A, i_B, i_C; \varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – фазні напруги, струми і потокозчеплення статорних обмоток;

r_1 – активний опір фази обмотки статора;

U_f, i_f, r_f, φ_f – напруга, струм, опір, і потокозчеплення обмотки збудження;

$i_{rd}, r_{rd}, \varphi_{rd}$ – струм, опір і потокозчеплення заспокійливої обмотки по повздожній осі;

$i_{rq}, r_{rq}, \varphi_{rq}$ – струм, опір і потокозчеплення заспокійливої обмотки по поперечній осі;

M – електромагнітний момент СМ;

$M_{диз}$ – момент опору (або дизеля);

J – сумарний момент інерції;

p – число пар полюсів СМ;

ω – кутова швидкість обертання ротора СМ;

P_1 – споживана електрична потужність.

Наведена система рівнянь є не повною. Вона повинна бути доповнена рівняннями залежності потокозчеплень від потоків через коефіцієнти само- і взаємоіндукцій з урахуванням потоків розсіювання. При цьому виявляється, що коефіцієнти само- і взаємоіндукцій періодично змінюються і залежать від положення ротора.

Наприклад: коефіцієнт взаємоіндукції фази статора є найбільшим, якщо вісь d ротора збігається з віссю фази й мінімальна при повороті ротора (вісь d) на 90 ел. градусів.

Метою рівнянь П-Г є виключення періодичних коефіцієнтів ($\sin \varphi, \cos \varphi, \dots$) з рівнянь й одночасне скорочення їх числа.

Існує дуже велика кількість систем рівнянь П-Г для однієї і тієї ж машини ($210=1024$). Найбільше використовуються $27=128$.

Рівняння відрізняються обраним напрямком осей і системою базисних величин.

Напрямок осей вибирають таким чином, щоб відобразити реальні умови роботи електромашини.

Позитивний напрямок осей СМ показаний на рис. 2.16.

Рис. 2.16. Векторна діаграма СМ

Такий напрямок осей відповідає СГ, який працює на індуктивне навантаження з перезбудженням. Вісь d спрямована уздовж осі ОЗ, а вісь q перпендикулярна до неї. Осі d й q жорстко пов'язані з ротором і обертаються разом з ним. Осі А,В,С нерухомі. Струми i_{rd} й i_{rq} (умовне позначення) обрані довільно.

Із рисунка бачимо, що можна одержати складові струмів, напруг і потокозчеплень по осях d і q залежно від струмів, напруг і потокозчеплень осей А,В,С. при цьому керуємося тим, що існує результуючий і зображуючий вектор, і тим, що проекція зображуючого вектора на дану вісь дорівнює сумі проекцій складових векторів на ту ж вісь.

Перейдемо до отримання рівнянь П-Г. Рівняння зв'язку

;
;
.

Коефіцієнт $2/3$ — оскільки користуємося властивістю зображуючого вектора.

Аналогічні рівняння отримуємо для напруг:

;
;
.

І потокозчеплень:

;
;
.

Розглянемо зворотні перетворення (фазні величини). Коефіцієнт $2/3$ відсутній, тому що маємо справу із проекціями зображуючого вектора:

;
;
;
.

;
;
;
.

І для потоків зчеплення

;
;
;
.

Перейдемо безпосередньо до рівнянь П-Г.

Розглянемо рівняння напруги для фази А

.

Підставимо в це рівняння отримані раніше співвідношення:

Перетворимо це рівняння:

.

Згрупуємо:

Одержимо рівняння виду:

Це рівняння повинне бути справедливо для кожного $\square$ у будь-який момент часу. Це можливо тільки тоді, коли кожні складові в круглих дужках дорівнюють нулю. У результаті отримуємо рівняння Парка-Горева для статорних обмоток СМ. Рівняння обмоток ротора не перетворюються, тому, що вони жорстко зв'язані з осями d і q .

$\square$ рівняння для статорних обмоток.

$\square$ рівняння для роторних обмоток.

де

;
;
;
;
;
;
;

Доповнимо рівняннями потужності, електромагнітного моменту та приводу:

;
;
;

де $\square d$, $\square q$, – потокозчеплення перетворених обмоток статора по осях d і q ;

L_d , L_q $\square$ індуктивність перетвореної обмотки статора (враховують коефіцієнт у неявній формі).

L_f , L_{rd} , L_{rq} – індуктивність обмоток ротора – збудження і заспокоїливої обмотки по повздовжній і поперечній осях;

M_{1f} = M_{1f} , M_{1rd} = M_{rd1} , M_{1rq} = M_{rq1} – коефіцієнти взаємної індукції між обмотками збудження і заспокоїливої по повздовжній вісі. При отримуванні рівняння для потокозчеплення нас цікавить реальне потокозчеплення машини.

Струми i_d і i_q – це проекції зображуючого вектору, що

менш результуючого на . Тому в рівняннях застосоване коефіцієнти .

Однак у представлених рівняннях складових L_{q1q} , L_{d1d} коефіцієнт відсутній, це пояснюється тим, що величини x_d , x_q , x_{ad} , x_{aq} визначаються по результуючому вектору експериментально, або розрахунковим шляхом.

Якщо зневажати обмотувальними коефіцієнтами фаз і величиною зміни повітряного зазору під полюсом ротора, то розглянуті коефіцієнти можна записати в наступній формі:

;

де w_1 – число витків фази статорної обмотки;

w_f – число витків обмотки збудження;

$\square_d$, $\square_q$ – магнітна провідність по поперечній і подовжній осях;

У судновій мережі нульова точка зазвичай не виводиться, тому струми, напруги і потокозчеплення нульової послідовності відсутні і надалі ми їх розглядати не будемо. У результаті одержимо рівняння, за якими перетворюється СМ.

Активний опір перетвореної обмотки дорівнює активному опору не перетвореної обмотки. Сама фаза теж не змінювалась.

У розглянутій машині витримується пропорційність між струмом намагнічуючою силою, магнітним потоком і потокозчепленням на підставі прийнятих раніше допущень (не враховуючи насичення). Отже, якщо струми в не перетвореній системі координат помножити на коефіцієнт пропорційності K_p , те одержимо сили, що намагнічують, F_A , F_B , F_C . Тоді можна записати, що:

Але якщо для двох обмоток – перетвореної і не перетвореної – зберігається коефіцієнт пропорційності, то це означає, що обмотувальний коефіцієнт обох обмоток однаковий.

2.11. Диференціальні рівняння Парка-Горєва СМ у відносних одиницях

Перевага рівнянь Парка-Горєва у відносних одиницях полягає в універсальності, спрощенні розрахунків для різних потужностей машин (не залежать від номінальних параметрів), виділенні основних динамічних процесів, незалежності від магнітного насичення, і зручності аналізу динамічних характеристик, що робить їх ідеальними для моделювання перехідних процесів та систем автоматичного регулювання в енергетиці, на відміну від громіздких абсолютних одиниць, які вимагають перерахунку для кожної конкретної машини.

Переваги відносних одиниць в рівняннях Парка-Горєва:

- Універсальність моделі: Одна і та ж система рівнянь описує машини різної потужності, оскільки всі параметри (напруги, струми, потокозчеплення, моменти) нормуються відносно номінальних значень, що спрощує розробку універсальних програм моделювання.

- Зменшення громіздкості: Усуваються великі номінальні значення (наприклад, напруга 10 кВ, струм 1000 А), що робить рівняння компактнішими та легшими для аналізу та програмування.

- Виділення динамічних процесів: Рівняння фокусуються на часових змінах і динамічних властивостях (перехідні процеси), абстрагуючись від статичних номінальних параметрів.

- Незалежність від магнітного насичення: Для спрощення часто застосовується модель без насичення, що дозволяє отримати лінійні рівняння та аналітичні розв'язки, що неможливо в абсолютних одиницях без складних нелінійних моделей.

- Простота аналізу регулювання: Використання відносних одиниць спрощує проектування та аналіз систем автоматичного регулювання (САР) напруги та частоти, оскільки

коефіцієнти підсилення САР стають сталими і не залежать від конкретних потужностей.

Недоліки абсолютних одиниць:

Кожна машина потребує індивідуального набору параметрів та нових розрахунків, що ускладнює уніфікацію та програмне моделювання.

Рівняння стають громіздкими через великі номінальні значення, що ускладнює їх аналіз.

Аналіз роботи СМ відбувається за рівняннями у відносних одиницях. У якості базисних можуть прийматися різні значення, однак намагаються так вибрати базисні величини, щоб спростити розрахунок й одержати параметри, які легко визначити в СМ, або вони задані в каталожних даних.

При такому підході можна порівнювати перехідні процеси в різних машинах, менше складностей виникає при визначенні параметрів. Для переходу до відносних одиниць необхідно вибрати систему базисних змінних. Однієї з розповсюджених систем є "система Хад".

Базисні величини СМ в системі Хад

Для статорних обмоток:

1) $I_{1б} = I_{1м}$ – амплітуда номінального струму обмотки статора;

2) $U_{1б} = U_{1м}$ – амплітуда номінальної фазної напруги обмотки статора;

3) $P_{1б} = 3/2 U_{1б} I_{1б}$ – базисна потужність;

4) $M_{1б} = p P_{1б} / \omega_b$ – базисний момент;

5) $\omega_b = 2\pi f_{1н}$ – базисна циклічна частота обертання;

6) $Z_b = U_{1б} / I_{1б}$ – базисний опір.

7) $\sigma_b = U_{1б} / \omega_b$ – базисне потокозчеплення;

8) $t_b = 1 / \omega_b$ – базисний час.

Розглянемо рівняння ротора:

Обмотка збудження	Заспокійлива	(демпферна)
обмотка по осі d	Заспокійлива (демпферна)	обмотка по осі q

Розглянемо рівняння П-Г статорної обмотки по осі d

Ліву та праву частину цього рівняння ділимо на базисну напругу і виконуємо ще перетворення

отримаємо результат у відносних одиницях

Перетворення наступного рівняння по осі q виконується аналогічно, отримаємо результат

Рівняння для обмотки ротора:

- збудження

,

розділимо на ліву та праву частину та перетворимо

,

- заспокійлива по повздовжній осі

, розділимо на

Рівняння для заспокійливої обмотці по поперечній осі виконується аналогічно. Результат:

.

Розглянемо потокозчеплення по подовжній осі d для статорної обмотки:

.

Розділимо на ліву та праву частину:

;

.

Аналогічно отримаємо рівняння по поперечній осі q для обмотки статора

Розглянемо рівняння для обмотки збудження:

.

Розділимо на ліву та праву частину

;

;

;

.

Доведемо рівність одиниці виразу у дужках, якщо взяти до уваги:

У цих виразах ми не врахували обмотувальний коефіцієнт первинної обмотки, який повинен враховуватися скрізь, де фігурує обмотка, проте, тому що цей коефіцієнт близький до одиниці і він фігурує як у чисельнику, так і в знаменнику, то його можна опустити. Коефіцієнт $3/2$ у виразах введений штучно, так як у виразах ми використовуємо проекцію зображуючого вектора, а щоб врахувати реальне потокозчеплення, ми коефіцієнт самоіндукції множимо на $3/2$.

Розглянемо наступні рівняння

розділимо на

Наступне рівняння перетворюємо аналогічно:

Рівняння потужності, електромагнітного моменту та приводу:

;

;

В результаті отримуємо наступну систему диференціальних рівнянь, що описує роботу синхронної машини

;

;

;

;

;

;

;

де

, – індуктивні опори розсіювання відповідних обмоток.

Отримані диференціальні рівняння перетворюються на вид, зручний для чисельного вирішення (вигляд Коші, тобто перетворюються щодо старших похідних), а алгебраїчні рівняння перетворюються щодо струмів.

2.12. Рівняння Парка – Горєва для асинхронних машин

Асинхронна машина має три фазні обмотки на статорі та роторі. На відміну від синхронної машини, провідність повітряного зазору в асинхронній машині в будь-якому напрямку однакова. Тому напрямлення осі d та її частота обертання можуть бути довільними.

У разі порушення будь-якої умови симетрії, осі d і q необхідно пов'язати з тим елементом конструкції, у якого відбулося порушення симетрії. Наприклад, якщо здійснюється динамічне гальмування асинхронного двигуна, при якому постійний струм пропускають через обмотку статора, то осі d і q жорстко пов'язані з обмоткою статора і приймається $\alpha t = 0$.

Рівняння напруги у трифазній системі для обмоток статора і ротора мають вигляд:

$$\begin{aligned} & ; \\ & ; \\ & ; \\ & ; \end{aligned}$$

Осі d – нерухомі, осі q – обертаються із частотою ротора ω_r .
Осі d і q – обертаються з довільною частотою ω .

Розглянемо обмотку статора. З векторної діаграми (рис. 2.17) для фази a отримаємо такі вирази для напруги, струму і потокозчеплення:

;
;
.

Рис. 2.17. Векторна діаграма асинхронної машини

Підставимо отримані значення у вираз:

Отримуємо:

З цього виразу отримуємо:

.

Аналогічно для обмоток ротора:

;

Доповнимо рівняння алгебраїчним виразами, ґрунтуючись на векторній діаграмі:

;
;
;

де – коефіцієнт самоіндукції статорної обмотки;

– коефіцієнт самоіндукції роторної обмотки;

– коефіцієнт взаємоіндукції;

– індукція розсіювання фази первинної та вторинної обмотки;

– коефіцієнт самоіндукції фази первинної та вторинної обмотки, які обумовлені потоком взаємоіндукції при обліку роботи всіх трьох фаз.

Ця індуктивність відповідає Т-образній схемі заміщення
 ;

де – індуктивний опір кола намагнічування Т-подібної схеми заміщення АМ, але побудованої для сторони вторинної обмотки.

Для АМ застосовуються базисні величини у статорах СМ, але щоб їх застосувати і для роторів необхідно виконати приведення. В курсі електричних машин параметри вторинної обмотки АМ приводяться до первинної обмотки на підставі наступних формул:

$$\begin{aligned} & ; \\ & ; \end{aligned}$$

Додатково введемо для потокозчеплення

– де – коефіцієнт трансформації АМ.

Помножимо ліву и праву частини рівняння вторинного кола на коефіцієнт трансформації

У результаті отримаємо рівняння

Необхідно перетворити рівняння потокозчеплення як для статора, так для ротора

- індуктивність розсіювання фази первинної обмотки;
- індуктивність кола намагнічування;

;

;

;

;
;
.

Отримані формули у абсолютних одиницях для асинхронної машини важко застосувати на практиці тому, що у паспортних даних машин відсутні необхідні параметри. Для зручності використання треба перетворити рівняння у відносні одиниці.

2.13. Рівняння Парку - Горєва АМ у відносних одиницях

Для переходу у відносні одиниці необхідно обрати систему базисних величин. У якості базисних величин приймаємо базисні величини СМ для обмотки статора і застосуємо їх для рівнянь як для статора, так для ротора асинхронної машини. Перехід відбувається по аналогії з синхронною машиною: треба поділити на базисні величини рівняння.

;
;
;
;
;
;
;
;
;
;

;
;
;
;
;
;
;
;
;

Отримана система рівнянь у в.о. розв'язується щодо похідних, а алгебраїчна система – щодо струмів.

• ;
• ;
• ;
• ;
• ;
• ;
• ;
• ;
• ;
•

Це повна система рівнянь. Зазвичай осі d і q електричних машинах зв'язані з тим елементом, який має якусь деформацію: магнітну або електричну.

Частоту обертання приймають довільною або рівною частоті обертання осей d і q головного СГ при дослідженні процесу пуску, реверсу, скидання і накидання навантаження.

2.14. Суднове постійне навантаження

До складу суднової електроенергетичної системи судна з електричним рухом входять джерела електричної енергії (як правило синхронні генератори), гребні електродвигуни, двигуни електроприводів, розподільні пристрої, елементи освітлення й інших споживачів. Частина споживачів електроенергії може бути представлено постійним навантаженням. У загальному випадку постійне навантаження можна розглядати

у вигляді послідовного з'єднаного активного опору та індуктивності (рис. 2.18).

Рис. 2.18. Еквівалентна схема суднового постійного навантаження

У не перетвореній системі координат постійне навантаження можна описати рівняннями (аналогічно рівнянням статорної обмотки АМ):

;

;

.

Якщо прийняти

,

то вихідні рівняння збігаються з рівняннями АМ. Отже можна скористатися отриманими рівняннями П-Г для АМ, якщо прийняти напрями осей однаковими.

;

;

;

– решта складових алгебраїчних рівнянь дорівнює нулю.

З урахуванням прийнятих рівнянь для постійного навантаження

.

У відносних одиницях значення x_n і L_n збігаються. Покажемо це:

.

Основним навантаженням суднової мережі є асинхронні двигуни електроприводів, які можна замінити при моделюванні одним еквівалентним АД. Вектори струму кола намагнічування, номінального струму і струму к.з. еквівалентного

двигуна при цьому дорівнюють сумі векторів аналогічних струмів всіх працюючих АД і можуть бути розраховані або частково отримані з розрахунку необхідної потужності суднової електростанції.

За цими даними виконують кругову діаграму еквівалентного двигуна (причому положення лінії електромагнітної потужності розраховується за сумою втрат потужності в первинних обмотках всіх АД у прийнятому режимі роботи. По круговій діаграмі розраховуються параметри еквівалентного АД.

Момент опору на валу еквівалентного АД залежить від характеру навантаження всіх двигунів. Оскільки основними механізмами на судні є насоси та вентилятори, то момент опору можна прийняти пропорційним квадрату частоти обертання еквівалентного двигуна. Момент інерції дорівнює сумі моментів інерції всіх АД. Потужність еквівалентного двигуна досягає 80% потужності суднової електростанції.

2.15. 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 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 визначається з величин складових за повздовжньою та поперечною вісями.

У 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_{fg} та x_{fg} .

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.

Найбільшу цікавість представляє собою система «статичний перетворювач – гребний двигун». Використання некерowanego 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. 2.19 наведена структура джерела синусоїдальних сигналів, що дає змогу керувати двигуном за законом .

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 значення ними можна зневажати для підвищення швидкості моделювання.

Рис. 2.19. 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

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

Структура моделі гребної установки наведена на рис. 2.20.

Рис. 2.20. Модель гребної електричної установки в програмному модулі Simulink.

2.15.1. 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: $\omega_{\text{ном}}$, $T_{\text{ном}}$, $\eta_{\text{ном}}$, $\omega_{\text{крит}}$, $T_{\text{крит}}$, $\eta_{\text{крит}}$, $\omega_{\text{зат}}$, $T_{\text{зат}}$, $\eta_{\text{зат}}$, $\omega_{\text{зат}}$, $T_{\text{зат}}$, $\eta_{\text{зат}}$. Не усі з вказаних параметрів наводяться у переліку номінальних параметрів ГЕД, отже виникає необхідність розрахунку їх значень.

Індуктивний опір обмотки статора за повздовжньою віссю

.

Індуктивний опір обмотки статора за поперечною віссю

.

Індуктивний опір демпферної обмотки за повздовжньою віссю:

Індуктивний опір демпферної обмотки за поперечною віссю

Індуктивний опір обмотки збудження:

Перехідний індуктивний опір обмотки статора за повздовжньою віссю

Надперехідний індуктивний опір обмотки статора за повздовжньою віссю

Перехідний індуктивний опір обмотки статора за поперечною віссю

Надперехідний індуктивний опір обмотки статора за поперечною віссю

Стала часу обмотки збудження при розімкнених обмотці статора та демпферній обмотці

с,

де рад/с – синхронна швидкість обертання.

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

с.

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

, с

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

, с.

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

, с.

Стала часу демпферної обмотки за поперечною віссю при короткозамкненій обмотці статора:

, с.

Замість дизель-генераторного агрегату використовується блок джерела трифазної напруги з внутрішніми опорами та .

Активний внутрішній опір джерела напруги

, Ом.

Активний внутрішній опір джерела напруги

, Ом.

Внутрішня індуктивність джерела напруги

, Гн.

Активна потужність загальносуднових споживачів

, кВт.

Реактивна потужність загальносуднових споживачів

, кВАр.

Коефіцієнт інерції

,

де рад/с

2.15.2 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 підсинхронної частоти на восьмій секунді на нього подається збудження.

Осцилограми, що були зафіксовані при проведенні пуску ГЕД наведені на рис. 2.21.

Тривалість перехідного процесу відповідає результатам

осцилограм, зафіксованих для реальних суден під час ходових випробувань.

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. 2.22 та рис. 2.23.

Поліпшенню гармонічного складу вихідного струму перетворювача сприяє підвищення частоти комутації силових венти́лів 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. 2.21. Осцилограми струму ГЕД, електромагнітного моменту та швидкості при пуску на частоті 10 Гц.

Рис. 2.22. Результати гармонічного аналізу напруги та струму генератору

Рис. 2.23. Результати гармонічного аналізу струму ГЕД при частоті 10 Гц.

Вміст основних гармонік у струмі генератора становить:

- п'ятої – 5,09 %;
- сьомої – 1,56 %;
- одинадцятої – 1,08 %;
- тринадцятої – 0,54 %.

Можливе застосування з цією метою фільтрів та конденсаторів. Фільтри налаштовуються на гармоніки струму. Що мають найбільшу амплітуду – п'яту, сьому та одинадцяту. Однак при розгляді можливості застосування фільтрів слід приймати о уваги, що індуктивність суднової мережі не залишається сталою, а її зміни призводять до порушення налаштування фільтрів. Те ж саме можна сказати і про конденсатори, що разом з індуктивним опором мережі можуть утворювати резонансний контур. Таким чином, найбільш простим та надійним способом зниження вмісту вищих гармонік на стороні генератора є застосування реакторів.

Присутність вищих гармонік у струмі генератора також не призведе до його перегріву, адже перетворювач частоти представляє собою чисто активне навантаження, а генератори розраховані на роботу з коефіцієнтом потужності 0,8.

2.16. Захист ГЕУ змінного струму

У ГЕУ змінного струму основними об'єктами захисту є головні генератори і гребні електродвигуни, всі ушкодження яких можна розділити на зовнішні і внутрішні. До зовнішнього відносять ушкодження, що відбуваються в розподільних пристроях і кабелях, що з'єднують електричні машини й апарати ГЕУ, а саме одне -, двох -, і трифазні короткі замикання, обриви однієї фази, замикання кола збудження на

корпус в двох крапках. До внутрішнього варто віднести такі ж ушкодження, що відбуваються усередині генератора й електродвигуна, а також замикання витків однієї фази і різні перенапруги. Захищати ГЕУ треба не тільки від ушкоджень, але і від таких ненормальних режимів роботи, як перевантаження, випадання двигуна із синхронізму й ін.

Правилами Регістра передбачають наступні види захисту, спрямовані на відключення місця аварії чи на оповіщення про ненормальний режим роботи:

Для генераторів:

1. максимальний захист, що працює на відключення кіл збудження;
2. диференціальний захист, що працює на відключення кіл збудження (для генераторів потужністю 1000 кВт і більш);
3. захист з автоматичною дією на звукову і світлову сигналізацію при заземленні обмоток;

Для гребних електродвигунів:

Захист від перевантаження у головних ланцюгах і ланцюгах збудження повинний бути налагоджений таким чином, щоб виключити його спрацьовування при перевантаженнях, викликаних маневруванням судна, при ході у штормових умовах, чи ході у битому льоду.

Захист від коротких замикань і перевантаження двигуна може забезпечуватися перетворювачем. При цьому повинна бути врахована відмінність у конструкціях гребних електричних машин (машина постійного струму, синхронна машина, асинхронна машина або машина із збудженням від постійних магнітів).

Повинний бути передбачений незалежний пристрій захисту від надмірної частоти обертання (розносу. Гребний електричний двигун повинний витримувати надмірну частоту обертання у межах робочих характеристик захисного пристрою, налаштованого на спрацьовування при заданій

надмірній частоті обертання.

Двигун повинний витримувати без пошкоджень струм раптового короткого замикання на його клеммах при номінальному навантаженні.

Сталий струм короткого замикання двигуна, що має постійне збудження, не повинний приводити до термічних пошкоджень обмоток і його струмоносійних компонентів (струмознімних кілець, кабелів, фідерів чи шинопроводів).

Отже, релейний захист, як правило, працює на відключення обмоток збудження без розриву головного кола, причому дія захисту повинна супроводжуватися включенням звукової і світлової сигналізації. Відключення кіл збудження проводиться автоматом гасіння поля (АГП), що, крім того, замикає обмотку збудження на розрядний опір $r_p = (4 \dots 5) \square r_z$. При цьому запасена в роторі магнітна енергія протягом $6 \dots 8$ с гаситься в опорах обмотки збудження r_z і розрядному гр.

Відключати головне коло ушкодженого генератора недоцільно, тому що дизель-генератори, що залишаються в роботі, можуть раптово перевантажитися і вийти із синхронізму через неоднакове зниження швидкості дизелів. Тому при короткому замиканні в одному з генераторів ГЕУ захист діє на АГП усіх головних машин установки. Після відключення ушкодженого генератора приступають до пуску справних машин у звичайному порядку.

Поряд із зазначеними видами захисту звичайно передбачають температурну сигналізацію на випадок перегріву обмоток і підшипників, виникнення перегріву магнітної системи і т.д.

Основні види захисту головних генераторів

Максимальний захист. Цей захист передбачають на випадок коротких замикань і перевантажень генераторів. Будучи найпростішою, надійною і дешевою, вона здійснюється за

допомогою електромагнітних реле, що включаються через трансформатори струму. Щоб забезпечити захист не тільки від зовнішніх, але і від внутрішніх коротких замикань генераторів, трансформатори слід включати з боку нульової крапки обмотки статора.

У приведеній на рис. 2.24 схемі застосовані два комплекти токових реле КА: перший розрахований на короткі замикання і спрацьовує миттєво, другий — на перевантаження і спрацьовує з витримкою часу, забезпечуваної механічним реле часу КТ. Обидва комплекти реле впливають на проміжне реле КЗ, що замикає коло АГП. Про спрацьовування комплекту захисту сигналізує вказівне реле К2.

Рис. 2.24. Схема максимального захисту ГЕУ змінного струму

Щоб уникнути помилкових відключень при пусках і реверсуванні гребного електродвигуна струм спрацьовування захисту вибирають таким, щоб він був більше пускових струмів, а час витримки реле перевантаження – таким, щоб воно було більше часу пуску і реверсування.

Подовжній диференціальний захист. Цей вид захисту, виконується за схемою з циркулюючими струмами чи за схемою з урівноваженими напругами, призначений для захисту генераторів від внутрішніх коротких замикань. Диференціальний захист із циркулюючими струмами (рис. 26.2) діє від різниці струмів на початку і в кінці ділянки захисного кола і є найбільш точний і чутливий. На границях захисної ділянки ставлять трансформатори струму 1 і 2, вторинні обмотки яких включають так, щоб у них увесь час циркулювали струми.

Для еквівалентної схеми заміщення вторинного кола диференціального захисту (рис. 26.3) можна написати наступні рівняння рівноваги спадань напруги і струмів:

(1)

(2)

(3)

де z_1, z_2, z_p – комплексний опір вторинних обмоток трансформаторів і реле.

Вирішивши приведену систему рівнянь щодо струму реле I_p , одержимо

(4)

Звичайно $z_1 = z_2 = z$, тоді

(5)

При нормальному режимі чи короткому замиканні поза зоною, що захищається, (крапка K1 на рис. 2.25) первинні струми обох трансформаторів повинні бути рівні і $E_1 = E_2$, а $I_p = 0$.

При короткому замиканні всередині зони захисту (крапка K2) первинний струм трансформатора 2 дорівнює нулю, і $E_2 = 0$. Тоді

(6)

У випадку підживлення крапки короткого замикання K2 з боку навантаження струм трансформатора 2 і ЕРС E_2 змінюють знаки, і струм у реле I_p виявиться рівним

(7)

Для забезпечення надійної роботи захисту, опір реле повинний бути настільки малим, щоб навіть незначна ЕРС могла створити струм I_p , достатній для спрацьовування реле.

Рис. 2.25. Принципова схема диференціального захисту з циркулюючими струмами

Рис. 2.26. Еквівалентна схема заміщення вторинного кола диференціального захисту

Захист обмотки збудження від замикання на корпус. Найбільш ймовірним ушкодженням обмоток збудження генератора є замикання на корпус, хоча саме по собі з'єднання обмотки з корпусом в одній крапці небезпеки не представляє. Але досить виникнути замиканню в другій крапці, щоб відбулося шунтування частини обмотки корпусом машини, а це також може бути причиною зниження магнітного потоку генератора і появи великих реактивних струмів при рівнобіжній роботі. Ще велику небезпеку являє собою струм, що проходячи між крапками замикання по шунтуючій перемичці, може випалити сусідні витки обмотки й оплавити залізо сердечника.

Для захисту від замикань обмотки збудження чи генератора синхронного двигуна на корпус у двох крапках застосовують токове реле, що впливає на АГП (рис. 2.27).

На затиски обмотки збудження генератора ОЗГ вимикачем Q1 включають потенціометр R, між повзунком якого і корпусом судна паралельно включений мілівольтметр PV, який періодично замикається кнопкою SB, і токове реле КА, коло якого замикається вимикачем Q2.

Рис. 2.27. Схема захисту обмотки збудження генератора від подвійного замикання на корпус

При нормальному стані ізоляції обмотки збудження прилад і реле відключені. Обслуговуючий персонал повинний періодично перевіряти стан ізоляції обмотки, для чого варто натискати на кнопку SB. Якщо обмотка збудження замкнута на корпус (наприклад, у крапці а), то мілівольтметр покаже напругу між крапкою а і повзунком потенціометра R. Після переміщення повзунка в рівнопотенціальне з крапкою а положення мілівольтметр виявиться включеним у діагональ урівноваженого моста ($U = 0$). Потім включають вимикач Q2,

підготовляючи тим самим схему захисту до можливого замикання на корпус ще в одній крапці. Якщо це трапиться (наприклад, у крапці б), то рівновага пліч моста порушиться і через реле потече струм, викликавши спрацювання захисту.

Захист гребних електродвигунів. У ГЕУ змінного струму електродвигун варто вважати не менш, а іноді (наприклад, у ДЕГУ) навіть більш відповідальним елементом установки, чим генератор. Для синхронних і асинхронних електродвигунів характерні ті ж ушкодження, що і для генераторів, за винятком замикань на корпус обмотки збудження для асинхронних двигунів. Тому електродвигуни мають усі захисти, передбачені для генераторів і, крім того, захист від випадання синхронного двигуна із синхронізму.

В одновальних ТЕГУ іноді застосовують один комплект диференціального захисту, що охоплює генератор і електродвигун. Часто двигун захищають токовим захистом генератора, що має досить високу чутливість.

Прагнення підвищити надійність, швидкодію, чутливість і вибірковість захисту, а також зменшити масу, габарити і споживану потужність окремих її елементів привело до розробки останнім часом безконтактних схем захисту генераторів і гребних електродвигунів із застосуванням мікропроцесорів, підсилювачів на напівпровідниках, датчиків Холу і логічних елементів.

2.17. Системи керування гребними електричними установками

Відповідно до вимог які прописані в «Правилах класифікації та побудови морських суден» Регістра судноплавства України:

2.17.1. Системи керування електроенергетичною установкою ГЕУ

Для систем живлення ГЕУ із генераторами, що працюють паралельно, повинна передбачатися автоматизована система керування електростанцією, що забезпечує адекватне генерування електроенергії відповідно потребам конкретних режимів роботи ГЕУ, у тому числі при ході у морі і маневруванні.

Автоматичне відключення генераторів за сигналом достатності чи надмірності потужності у режимі маневрування не допускається.

У випадку зниження частоти на шинах ГРЩ, перевантаження по струму, чи перевантаженні і реверсі потужності, потужність, яка передається на гребну електричну установку, повинна автоматично обмежуватися (для запобігання знеструмлення шин ГРЩ).

Якщо генератори працювали паралельно і один із них був відключений системою захисту, то автоматизована система керування електростанцією повинна автоматично знизити потужність гребної електричної установки для того, щоб генератори, що залишилися, були захищені від неприйнятних перевантажень і продовжували працювати при допустимих навантаженнях.

Ця ж вимога повинна бути застосована до розділювальних автоматичних вимикачів на шинах ГРЩ.

Спрацьовування автоматичного розділювального вимикача шин ГРЩ не повинне приводити до несправності у системі. При цьому не потрібно, щоб система керування електростанцією залишалася у автоматичному режимі, якщо система живлення розділена.

Будь-яка утрата автоматичних функцій системи керування повинна приводити до спрацювання АПС.

2.17.2. Розташування постів керування ГЕУ

Пости керування ГЕУ можуть бути розташовані у будь-якому зручному місці, у відповідності із призначенням судна.

Якщо передбачаються пости керування поза машинного

приміщення, тобто, на містку, чи в інших місцях, то повинні також бути передбачені пости керування у машинному приміщенні або у ЦПК.

Місцевий пост керування є домінуючим і повинний розташовуватися у безпосередній близькості від приводу або напівпровідникових перетворювачів.

Зміни режимів ГЕУ, які задаються із цього поста, повинні індиціюватися системою, що показує задану і виконану команди.

При наявності декількох постів керування повинний бути передбачений перемикач постів, розташований у приміщенні домінуючого поста керування. Такий перемикач повинний забезпечувати будь-якого, але лише одного поста керування (центрального і бортові пости на ходовому містку розглядаються як один пост).

Кожний пост керування повинний бути обладнаний пристроєм аварійної зупинки ГЕД, незалежним від системи керування, і активним (включеним) постом керування .

2.17.3. Головний і місцевий пости керування

Повинні передбачатися, як мінімум, два незалежних один від одного пости керування ГЕУ – головний пост і місцевий пост керування.

У випадку пошкодження, несправності чи втрати живлення системи керування на головному посту керування (ГПК) повинне бути передбачене керування перетворювачами ГЕУ із місцевого поста керування.

Системи керування на містку повинні бути виконані таким чином, щоб система керування розворотом (змінюю азимуту упору) діяла незалежно від системи керування частотою обертання і реверсом ГЕД гребної електричної установки.

Спрацьовування АПС по усіх параметрах гребної електричної установки повинне квітуватися на місцевому посту керування.

Попереджувальні сигнали, які не вимагають термінового наступного втручання персоналу, можуть квітируватися на головному посту керування (на ходовому містку), із обов'язковим наступним квітируванням на місцевому посту.

Повторний старт (пуск) ГЕУ повинний бути можливий із обох постів керування (місцевого і головного), у залежності від того, який пост був заздалегідь вибраний.

Після знеструмлення ГРЩ повторний пуск ГЕУ повинний бути можливий із головного поста керування.

Якщо керування із щита або із пульта гребної електричної установки здійснюється із застосуванням електричного, пневматичного чи гідравлічного приводу, то вихід із ладу цього приводу не повинний супроводжуватися відключенням гребної електричної установки, а кожний із постів на щиті чи пульті повинний бути негайно готовий до дії вручну.

Допускається застосування механічно зв'язаних постів, установлених у ходовій рубці (на містку), для синхронної їх роботи.

Система дистанційного керування ГЕУ повинна мати таку конструкцію, щоб не була потрібна витримка часу із сторони персоналу, при перекладанні рукоятки керування на посту керування.

Система керування ГЕУ повинна мати блокування, що виключає можливість приведення у дію установки при включених валопровертаючих пристроях.

Кожний пост керування повинний мати візуальну сигналізацію про наявність напруги у колі керування.

2.17.4. Обладнання вимірювання, індикації та контролю

Несправності у системах вимірювання, контролю і індикації не повинні приводити до несправностей у системі керування ГЕУ, наприклад, несправність датчика дійсної величини (частоти обертання) датчика величини опорного сигналу частоти обертання, не повинні приводити до надмірного

збільшення частоти обертання гребного гвинта.

На місцевому (домінуючому) посту керування повинні бути передбачені: амперметри для кожної лінії живлення кожного силового компоненту установки (струм статора кожної обмотки тощо), а також у ланцюзі збудження (для систем із регульованим збудженням); вольтметри для кожної лінії живлення кожного силового компоненту установки, а також для живлення системи збудження (для систем із регульованим збудженням); індикатор частоти обертання кожного гребного вала; індикатор “Електростанція готова до роботи ГЕУ”; індикатор “Електростанція не готова до роботи ГЕУ”; індикатор “Обмеження потужності ГЕУ” (від конвертера); індикатор “Керування із ЦПК”; індикатор “Керування із ходового містка”; індикатор “Керування із місцевого поста керування”.

На головному посту керування (на ходовому містку) повинні бути передбачені: індикатор частоти обертання кожного гребного вала; прилади вимірювання потужності кожного гребного вала; індикатор “Електростанція готова до включення (додаткових генераторів)”; індикатор “Електростанція готова до роботи ГЕУ”; індикатор “Електростанція не готова до роботи ГЕУ”; індикатор “Обмеження потужності ГЕУ”; індикатор “Потрібно зменшити потужність”, – якщо не увімкнена система автоматичного керування або увімкнена кнопка «override» (скасування автоматичного керування станцією); індикатор “Керування із ЦПК”; індикатор “Керування із ходового містка”; індикатор “Керування із місцевого поста”; індикація генераторів, що працюють на ГЕУ; індикатор потужності, що залишається у резерві (рекомендується).

Якщо передбачено два чи більше постів керування для зміни швидкості і кута розвороту лопатей ГРК, то на кожному із цих постів повинні бути передбачені індикатори, як зміни швидкості, так і кута розвороту лопатей ГРК.

На посту керування у ЦПК повинні бути передбачені:

індикатор частоти обертання кожного гребного вала; прилади виміру потужності кожного гребного вала; індикатор “Електростанція готова до включення (додаткових генераторів)”;

індикатор “Електростанція готова до роботи ГЕУ”; індикатор “Електростанція не готова до роботи ГЕУ”; індикатор “Обмеження потужності ГЕУ”; індикатор “Потрібно знизити потужність”, – якщо не увімкнена система автоматичного керування або увімкнена кнопка «override»; індикатор “Керування із ЦПК”; індикатор “Керування із місцевого поста”; індикатор “Керування із ходового містка”; індикація генераторів, що працюють на ГЕУ; Перелік параметрів, контрольованих системою АПС, зазначений у таблицях нижче.

Таблиця 2.1. Перелік контрольованих параметрів ГЕУ із гребними електричними двигунами (ГЕД) змінного струму: синхронними, із постійним збудженням і асинхронними

Контрольований параметр Граничне значення макс/мін Місцевий вимірювальний прилад АПС, дисплей у ЦПК Зниження навантаження Автоматичний “Стоп” ГПК (місток),

	ГЕД:				
	Система змащення		несправність вимірювальне скло		
X	X	X	X		
	Температура підшипників		макс.	термометр	X
	X				
	Температура обмоток статора		макс.	X	X
	X				
	Струмознімні кільця (синхронний ГЕД)			несправність	
	(електр. дуга)		оглядовий лючок	X	
X					
	Система охолодження води / повітря			несправність	
X	X				
	Температура охолоджувального повітря на вході			макс.	
термометр	X		X		

	Охолоджувальна рідинавитік		X	
X	Частота обертання	макс.	X	X
X	Регулювання напруги (синхронний ГЕД)	виход із ладу	X	
X	X			
X	Опір ізоляції статора і фідера живлення	мін.		
X	X			
X	Опір ізоляції системи збудження, фідера (синхронний ГЕД)	мін.	X	
	Трансформатори:			
X	Температура обмоток	макс.	X	X
X	Охолоджувальна рідинавитік		X	
X	Система охолодження	несправність	X	
	X			
	Перетворювачі:			
	Мережа живлення	несправність	X	
пуск	X			
	Система охолодження	несправність	X	X
	X			
	Температура силових секцій	макс.	X	
	макс.1	X		
	макс.2	X		
X	Потік охолоджувача	мін.	X	
X	Охолоджувальна рідинавитік		X	
X	Попередній сигнал			
X	Аварія, вихід із ладу		X	X

X	Датчик швидкості і положення ротора (синхронний ГЕД)			
	несправність	X	X	
	Аварійний “Стоп” (конвертер відключений)			X
X	X			
	Запобіжник напівпровідника	несправність		X
	X	X		
	Температура напівпровідника	макс.	X	
	зниження			
	моменту	X		
	Напруга (ланка постійного струму)	макс.		X
	X	X		
	Струм (ланка постійного струму)	макс.		X
	X	X		
	Струм на виході конвертеру	макс.	X	
X	X			
	Мережа живлення ГЕУ, суднова електрична система:			
	Фільтр гармонійних складових аварія, пошкодження			
	X	X		

2.17.5. Стійкість щодо відмов систем керування

Утрата живлення чи несправності будь-яких систем керування і контролю не повинні приводити до втрати ходу і керування ГЕУ, керованості судна чи азимутального приводу.

Гребна електрична установка, азимутальні приводи та їх системи керування повинні мати систему самоконтролю і АПС для швидкого виявлення несправностей.

Більшість можливих несправностей, таких як утрата живлення, обрив чи коротке замикання у кабелях і проводах, повинні приводити до найменше критичного із усіх можливих нових станів судна (вихід із ладу у безпечну сторону).

Таблиця 2.2. Перелік контрольованих параметрів ГЕУ із

ГЕД постійного струму

Контрольований параметр Граничне значення макс/
мін Місцевий вимірювальний прилад АПС, дисплей у
ЦПК Зниження навантаження Автомати чний
“Стоп” ГПК (місток)

ГЕД:

	Система змащення	несправність	вимірювальне скло
X	X X X		
	Температура підшипників	макс.	термометр X
	X		
	Температура головних полюсів	макс.	X
X	X		
	Температура додаткових полюсів	або	компенсаційних
	обмоток макс.	X X	X
	Система охолодження води/повітря	несправність	
X	X		
	Температура охолоджувального повітря на вході	макс	
	термометр X	X	
	Охолоджувальна рідина витік	X	
X			
	Частота обертання	макс.	X X
X			
	Колектор /щітки несправність		
	(електр. дуга) оглядовий лючок	X	
X			
	Струм якоря макс.	X X	X
	Опір ізоляції ланцюга якоря і фідера живлення		мін.
	(замикання на корпус)	X	X
	Трансформатори:		
	Температура обмоток макс.	X X	
X			
	Охолоджувальна рідина витік	X	
X			

	Система охолодження	несправність	X	
	X			
	Перетворювачі:			
	Мережа живлення	несправність	X	
повтор.				
	пуск	X		
	Система охолодження	несправність	X	X
	X			
	Температура силових секцій	макс.	X	
	макс. 1	X		
	макс.2	X		
	Потік охолоджувача (пряме охолодження)	мін.		
X	X			
	Охолоджувальна рідина витік	X		
X				
	Попередній сигнал			
X				
	Аварія, вихід із ладу	X		X
X				
	Датчик швидкості обертання якоря	несправність		
X	X			
	Аварійний стоп (конвертер відключений)			
X	X	X		
	Запобіжник напівпровідника	несправність		X
	X	X		
	Мережа живлення ГЕУ, суднова електрична система			
	Фільтр гармонійних складових аварія, пошкодження			
	X	X		

3. Гребні електричні установки постійного струму.

3.1. Структура ГЕУ й схеми головного струму

ГЕУ постійного струму застосовують головним чином на судах, які повинні мати високу маневреність, тому що вони забезпечують: простоту дистанційного керування; легкість і плавність регулювання швидкості в широких межах.

Як первинні двигуни в ГЕУ постійного струму звичайно застосовують дизелі. Порядок вибору потужності основних елементів ДЕГУ наочно видний з рис. 3.1.

Рис. 3.1. Структура ГЕУ постійного струму

1 – двигун внутрішнього згоряння; 2 – головний генератор;
3 – гребний двигун; 4 – вал рушія

На рис.1 представлені параметри:

N_i – індикаторна потужність, обумовлена роботою газів у циліндрах двигуна внутрішнього згоряння;

η_m – механічний ККД двигуна внутрішнього згоряння;

N_e – ефективна потужність, тобто потужність на фланці колінчатого вала двигуна;

η_g – ККД генератора;

P_g – потужність головних генераторів;

η_{ec} – втрати в електричній мережі;

η_{dv} – ККД двигуна;

P_{dv} – потужність гребного двигуна;

η_v – ККД валопровода;

N_p – буксировачная потужність, що йде на створення корисної тяги;

η – пропульсивний ККД;

N_v – потужність на валу рушія.

Якщо визначена розрахунком ефективна потужність N_e виявиться занадто великою, то вибирають кілька первинних двигунів (дизелів). Число дизель генераторів одновальної

гребної установки становить до 4...6.

Таким чином, на один гребний двигун працює декілька дизель генераторів, що дозволяє використати швидкохідні дизелі, що мають малі масу й габарити, але вони мають обмежену потужність. З'єднувати генератори в цьому випадку доцільно послідовно (рис. 3.2а), а так само можна використати двоконтурні схеми головного струму (рис. 3.2б).

Рис 3.2. Схеми головного струму

При послідовному з'єднанні генераторів у будь-якому режимі роботи ГЕУ кожний із працюючий дизель генераторів розвиває потужність, рівну номінальної (повністю використовують генератор і його первинний двигун), а гребний електродвигун одержує потужність, рівну сумі номінальних потужностей працюючих генераторів.

У випадку паралельного з'єднання головних генераторів при необхідності відключити один або кілька агрегатів доводиться знижувати напругу залишених у роботі машин, тому що при незмінній номінальній напрузі гребний двигун і гвинт будуть обертатися з колишньою швидкістю й тим викличуть перевантаження включених генераторів й їх первинних двигунів. Таким чином, при паралельному з'єднанні працюючі агрегати (генератори й первинні двигуни) будуть використатися не повністю, а потужність, яка підводиться до електродвигуна виявиться менше потужності, що він споживає в аналогічних умовах при послідовному з'єднанні генераторів. Крім того, при паралельному з'єднанні струми між генераторами розподіляються нерівномірно через розходження їхніх зовнішніх характеристик і неоднакових швидкостей первинних двигунів. Тому паралельне з'єднання генераторів в схемах ГЕУ постійного струму широкого поширення не має.

Паралельне з'єднання гребних електродвигунів, що

перебувають на одному валу, не застосовують зовсім, тому що розбіжність характеристик холостого ходу таких електродвигунів виключає можливість рівномірного розподілу струмів навантаження. Цей недолік усувають при послідовному з'єднанні електродвигунів, а для того щоб напруга між двома будь-якими крапками схеми не перевищувало напруги одного генератора, застосовують так називане поперемінно-послідовне з'єднання генераторів й електродвигунів (див. рис. 3.2).

3.2. Режими економічного ходу й аварійні

Режимом економічного ходу називають режим роботи ГЕУ при ході судна зі зниженою швидкістю. Для переходу на цей режим відключають один або кілька дизель-генераторних агрегатів ГЕУ. При зменшенні швидкості судна потужність необхідна для його руху, різко знижується відповідно зменшується й витрата палива.

Аварійний режим роботи ГЕУ виникає при змушеній зупинці одного або декількох первинних двигунів. Таким чином, від режиму економічного ходу він відрізняється тільки причиною, що викликала відключення дизель-генераторних агрегатів.

Рис. 3.3. Принципова схема кола головного струму ГЕУ

У ДЕГУ постійного струму широке поширення одержала схема, зображена на рис. 3.3. Спеціальними кулачковими контролерами, які називають селекторними (виборчими) перемикачами, роблять набір схеми для різних режимів роботи ГЕУ. У наведеній схемі за допомогою двох однакових перемикачів 1ПГ й 2ПГ, установлюваних у різні положення, можна набрати шість режимів з 33 варіантами схеми включення:

- 1) робота чотирьох генераторів на обоє якорів гребного

двигуна '(1 варіант);

2) робота будь-яких трьох генераторів на обоє якорів гребного двигуна (4 варіанти);

3) робота будь-яких двох генераторів на обоє якорів гребного двигуна (6 варіантів);

4) робота будь-якого одного генератора на обоє якорів гребного двигуна (4 варіанти);

5) робота двох генераторів на один якір гребного двигуна (10 варіантів);

6) робота одного генератора на один якір гребного двигуна (8 варіантів).

Селекторні перемикачі мають також допоміжні контакти, призначеними для одночасного включення ланцюгів збудження, керування, блокування й сигналізації.

Варто мати на увазі, що головні контакти селекторних перемикачів не розраховані на розмикання ланцюгів робочого струму під навантаженням. Тому передбачено блокування електромагнітними замками, які стопорять вал перемикача, не дозволяючи перемикати головні ланцюги при наявності напруги в ланцюгах збудження.

Іноді в ланцюг головного струму крім селекторних перемикачів включають і роз'єднувачі, що служать для створення видимого розриву ланцюга до перемикання контактів перемикачів, що також забезпечується відповідним електромагнітним блокуванням.

З можливих для наведеної схеми шести режимів перший є основним, інші п'ять – режимами економічного ходу або аварійними.

При послідовному з'єднанні якорів гребного двигуна навантаження між ними розподілиться нарівно.

З розрахунків треба, що при неповнім числі працюючих генераторів сумарна напруга, яка підводиться до якорів гребного двигуна, зменшується, а отже, зменшується й кутова

швидкість гребного вала. Це знижує споживану їм потужність. Щоб зберегти, номінальне навантаження працюючих генераторів і первинних двигунів, струм генераторів (і всього головного ланцюга) зберігають номінальним, для чого послабляють магнітний потік полюсів гребного двигуна. Регулювати потік можна, додавая опору в ланцюг обмотки збудження збудників двигуна або ж (якщо збудники живлять й інше навантаження) безпосередньо в ланцюг обмотки збудження гребного двигуна. Але при цьому різко зростають втрати й знижується ККД установки, причому ККД стає тим менше, чим менше залишається в роботі генераторів. Тому режим роботи одного генератора на два якорі гребного двигуна практично не застосовують, замінюючи його, режимом роботи одного генератора на один якір гребного двигуна.

Рис. 3.4. Розподіл потужності при часткових режимах

У розглянутій схемі (див. рис. 3.3) потужність на гребному валу ділиться між чотирма генераторами. Ордината крапки А на характеристиці $P_B = f(\square)$, що відповідає повної потужності установки, розбивається на частині по числу генераторів (рис. 3.4).

При послідовному з'єднанні генераторів й їхньому повнім використанні швидкість гребного гвинта визначиться абсцисами крапок А, В, С, D перетинання відповідних горизонтальних прямих з характеристикою гвинта: $\square_n$, $\square_3$, $\square_2$, $\square_1$.

3.3. Системи збудження в ГЕУ

Для живлення обмоток збудження головних генераторів і гребного електродвигуна застосовують збудники, під якими розуміють усякий пристрій, призначений для живлення обмоток збудження електричних машин і керування цими

машинами шляхом зміни їхнього струму збудження. У ГЕУ як збудників використовують машини постійного струму з незалежним збудженням, а також двох- і трьох- обмотувальні машини, ЕМУ з поперечним або поздовжнім полем, магнітні підсилювачі й тиристорні перетворювачі.

У випадку застосування електромашинних збудників магнітний потік полюсів головних генераторів регулюють, змінюючи струм збудження генераторів або збудника за допомогою спеціальних регулювальних опорів. Якщо струм збудження не перевищує 15...20 А, то регулювальний опір включають у коло обмотки збудження генератора (пряме регулювання збудження). При більших струмах збудження генератора регулювальний опір включають у коло обмотки збудження збудника (непряме регулювання збудження).

Машинні збудники генераторів можуть приводитися в рух як безпосередньо від вала головних генераторів, так і від окремих електродвигунів. У першому випадку збудника з'єднують із валом генератора за допомогою муфти або текстропної передачі, у другому – зі збудниками створюють двох-, трьох-, а іноді й чотирьох- машинний агрегат, у який крім приводного двигуна й збудника головних генераторів можуть бути включені також збудник гребного двигуна й генератор постійної напруги для живлення обмоток збудження збудників й інших ланцюгів керування, сигналізації, контролю й захисту ГЕУ. Приводний двигун одержує живлення від загальної суднової мережі й повинен, запускатися з місцевого й дистанційного постів керування.

З метою підвищення надійності роботи ГЕУ використовують необертювних збудників. Живлення обмотки збудження генератора й гребного двигуна здійснюється через статичні перетворювачі з магнітними підсилювачами або тиристорні.

Рис. 3.5. Тиристорний збудник

Тиристорні збудники являють собою багатофазний міст, що одержує живлення від мережі змінного струму через трансформатор (рис. 3.5) або безпосередньо.

Керування збудником виконується за допомогою сигналів, що подаються на керуючий електрод тиристора через систему імпульсно-фазового керування (СІФУ). Вона складається з фазозрушуючого пристрою, що задає момент подачі керуючого імпульсу, і генератора імпульсів, що підсилює початкові малопотужні імпульси й формує керуючий імпульс.

Для підтримки постійної потужності на гребному валу шляхом зміни магнітного потоку гребного двигуна при переході з одного режиму роботи в інший у тиристорних збудниках двигунів використовують позитивні зворотні зв'язки по струму. У тиристорних збудниках генераторів використовують негативні зворотні зв'язки по струму головного кола, що дозволяє збільшити діапазон регулювання й забезпечити форсування збудження. При зниженні струму збудження тиристорні перетворювачі можуть перейти в інверторний режим, для чого необхідно використати симетричні трифазні мостові схеми.

Вибір збудників роблять по потужності, струму й напрузі з урахуванням забезпечення необхідного форсування збудження в перехідних режимах.

Система генератор – двигун (Г – Д) в схемах ГЕУ постійного струму

Виконавчий двигун звичайної системи Г – Д має жорстку механічну характеристику (крива 3 на рис. 3.6). Якщо в тих же осях координат М, $\square$ зобразити основну (крива 1) і швартовну (крива 2) характеристики гвинта, то крапка А буде відповідати номінальному режиму роботи ГЕУ при повному ході судна у вільній воді, а крапка В – несуттєвому зниженні швидкості гвинта і неприпустимо великому значенню моменту на валу гребного двигуна МВ, що виникає в режимі роботи на

швартовах.

Рис. 3.6. Робочі характеристики гвинта (1 й 2) і жорстка механічна характеристика гребного двигуна (3)

Для вантажних і пасажирських суден звичайним режимом роботи ГЕУ є режим, що відповідає крапці А. У швартовному режимі гвинт працює короткочасно – тільки при розгоні судна, коли момент може бути обмежений, наприклад, зменшенням струму збудження генератора. Навантаження ГЕУ криголамів, буксирів і деяких інших суден часто змінюється в діапазоні режимів, що відповідає ділянці АВ. Тому для забезпечення нормальної роботи основних машин гребної установки таких суден (насамперед первинних двигунів) бажано, щоб при зміні моменту навантаження потужність гребного електродвигуна залишалася постійною, тобто механічна характеристика його на ділянці АВ виражалася рівнянням

$$M n = M_{\text{н}} n = \text{const.}$$

Таким чином, ділянка АВ є частиною гіперболічної кривій (рис. 3.7), на якій гребний двигун й інші машини ГЕУ можуть працювати з постійною номінальною потужністю. Таким чином, ділянка АВ є частиною гіперболічної кривій (рис. 3.7), на якій гребний двигун й інші машини ГЕУ можуть працювати з постійною номінальною потужністю.

Рис. 3.7 Бажаний вид механічної характеристики гребного двигуна

Для завершення побудови бажаної механічної характеристики з точки А і В варто з'єднати із точками D і C на осях координат, обраними так, щоб відрізок OD визначав максимально припустиму швидкість двигуна при відсутності моменту на валу, а відрізок ОС – момент стоянки гребного

двигуна при заклинюванні гвинта.

Якщо гребний двигун працює з постійним магнітним потоком, то його обертаючий момент може змінюватися тільки в результаті зміни струму головного кола.

Тоді для збереження незмінної потужності первинного двигуна номінальна потужність генератора також повинна залишатися постійною й описуватися рівнянням

$$P_{г.н} = U_n I_n = UI = \text{const},$$

тобто на ділянці АВ зовнішня характеристика генератора $U = f(I)$ являє собою гіперболу (рис. 3.8). Продовження характеристики в області менших і більших навантажень здійснюється відрізками AD і BC, причому крапка D відповідає напрузі, що забезпечує максимальну швидкість гребного двигуна, а крапка С – крапку короткого замикання двигуна, що звичайно приймається $(1,5...2) I_n$.

Рис. 3.8. Бажані й дійсна зовнішні характеристики генератора в системі Г – Д

Подібний режим роботи ГЕУ можна одержати, здійснивши зворотні зв'язки по струму й напрузі в системі Г – Д з трьох обмотувальним генератором або трьох обмотувальним збудником генератора (рис. 3.9 й рис. 3.10).

На рисунку 3.9 представлена структурна схема гребної електричної установки (ГЕУ) постійного струму із триобмотковим генератором. Схема дозволяє сформувати механічну характеристику гребного електричного двигуна, близьку до ідеальної. На схемі позначений: Г – головний генератор; Д – ГЕД; КОД – компенсаційна обмотка й обмотка додаткових полюсів ГЕД; i – струм головного кола; ОНГ – обмотка напруги генератора (позитивний зворотний зв'язок); ОСГ – струмова обмотка генератора (негативний зворотний зв'язок); ОЗГ – обмотка збудження генератора (управління); ПУ – пост

управління.

Механічна характеристика ГЕД формується, в основному, за рахунок негативного зворотного зв'язку по струму головного кола. Збільшення моменту опору на валу ГЕД приводить до росту струму в головному колі й збільшенню сили, що намагнічує, ОСГ. У результаті знижується збудження Г и напруга живлення Д. Механічна характеристика ГЕД здобуває круто падаючий характер. ОНГ дозволяє знизити потужність поста управління. ОЗГ використовується для зміни частоти обертання ГЕД і швидкості руху судна. Для реверса ГЕД змінюється напрямок струму в обмотці ОЗГ за допомогою поста управління.

Схема має підвищену швидкодію, але вимагає індивідуального проектування й виготовлення головного генератора. Причому генератор повинен мати підвищені габарити для того, щоб його магнітна система при роботі була не насиченою.

Рис. 3.9. Структурна схема ГЕУ постійного струму з триобмотковим генератором

Розглянемо більш детально вид характеристик, використовуючи рівняння статичних режимів роботи генератора та двигуна. Зовнішня характеристика генератора має наступне рівняння:

де Φ_{Γ} — магнітний потік в повітряному зазорі генератора; Сег — конструктивний коефіцієнт; n_{Γ} — частота обертання генератора; $I_{\Gamma\Gamma}$ — струм якоря генератора; $R_{\Gamma\Gamma}$ — активний опір якоря генератора.

Відповідно до схеми, якщо знехтувати дією реакції якоря, магнітний потік у повітряному зазорі можна представити як алгебраїчну суму постійної складової $\Phi_{\text{ОЗГ}}$, що визначається дією ОЗГ, та змінної складової $\Phi_{\text{ОС}}$, яка пропорційна струму

якоря та визначається дією ОСГ:

Якщо об'єднати ці рівняння, отримаємо остаточний вид зовнішньої характеристики генератора:

Таким чином, зовнішня характеристика має лінійний характер. Її нахил визначається активним опором генератора та коефіцієнтом зворотного зв'язку по стуму якоря кос. Чим більший кос, тим більший нахил зовнішньої характеристики. В той же час напруга холостого ходу визначається ОЗГ.

Електромеханічна характеристика ГЕД є залежність частоти обертання від струму якоря двигуна І_{ад}. Головні машини в ГЕУ постійного струму включені послідовно, тому І_{яг} = І_{ад}. Частота обертання визначається з вираження

Механічна характеристика ГЕД

де $R_{ад}$ — активний опір обмотки якоря двигуна; $2\Delta U_{щд}$ — падіння напруги на щітках двигуна; $\Phi_{д}$ — магнітний потік в повітряному зазорі двигуна; $C_{ед}$ — конструктивний коефіцієнт.

Відповідні значення електромагнітного моменту ГЕД визначаються по формулі:

При сумісному розв'язанні рівнянь останніх трьох рівнянь, маємо наступну формулу для механічної характеристики ГЕД

Таким чином, ОЗГ визначає частоту обертання холостого ходу двигуна, а ОСГ коефіцієнтом кос визначає нахил механічної характеристики так само, як і у випадку зовнішньої характеристики генератора.

На рисунку 3.10 представлена структурна схема гребної електричної установки (ГЕУ) постійного струму із триобмотковим збудником.

Рис. 3.10. Структурна схема ГЕУ постійного струму з триобмотковим збудником

На схемі позначений: Г1 і Г2 – головні генератори; Д – ГЕД; КОД – компенсаційна обмотка й обмотка додаткових полюсів ГЕД; З – збудник головних генераторів; і – струм головного кола; ОНЗ – обмотка напруги збудника (позитивний зворотний зв'язок); ОСЗ – струмова обмотка збудника (негативний зворотний зв'язок); ОУЗ – обмотка управління збудника; ПК – пост керування.

Збудник може насаджуватися на один вал із генератором, але частіше з'єднується з окремим двигуном. В цьому випадку на напругу збудника не впливає частота обертання генератора, яка в динаміці може значно відрізнитися від номінальної.

Механічна характеристика ГЕД формується за рахунок негативного зворотного зв'язку по струму головного кола. Збільшення моменту опору на валу ГЕД приводить до росту струму в головному колі й збільшенню сили, що намагнічує, ОСЗ. У результаті знижується збудження З, знижується збудження Г1 і Г2 і напруга живлення Д. Механічна характеристика ГЕД здобуває круто падаючий характер.

Переваги схеми з триобмотковим збудником: спрощується налаштування схеми ГЕУ; використовується головний серійний генератор; зменшується маса, габарити та вартість ГЕУ.

Недоліки схеми: зниження швидкодії, але це не суттєво в порівнянні з часом перехідних процесів судна загалом.

У реальних схемах ГЕУ для зменшення напруги генератора застосовуються спеціальні схеми. У даному випадку (рис. 3.11) напруга генератора зменшується за рахунок спадання

напруги на його внутрішньому активному опорі і реакції якоря, а струм збудження не змінюється.

Обмотка збудження гребного електродвигуна Д підключена до триобмоткового збудника З, у якого ОУЗ – обмотка управління; ОНЗ – обмотка збільшується струм головного кола і зростає струм в обмотці ОСЗ, що призводить до збільшення магнітного потоку ГЕД, зростанню його ЕРС і зниженню частоти обертання.

Рис. 3.11. Схема ГЕУ постійного струму при зміні магнітного потоку гребного двигуна

3.4. Пуск і реверсування гребного двигуна в ГЕУ постійного струму

Пуску гребного електродвигуна повинна передувати підготовка ГЕУ до дії. У процесі цієї підготовки пускають перш за все головні генератори, допоміжні механізми, що обслуговують роботу основних машин, і агрегати порушення, після чого селекторними перемикачами набирають схему для заданого режиму роботи ГЕУ й включають ланцюги збудження, керування й захисту.

Пуск гребного двигуна здійснюють поворотом рукоятки поста керування в положення, якому на швартовній характеристиці гвинта відповідають швидкість гребного електродвигуна $\omega_{п}$ і номінальний момент МН (рис. 3.12). Електродвигун розганяє протягом декількох секунд, для розгону ж судна потрібно кілька хвилин. Тому під час пуску двигуна судно практично залишається нерухомим, і гвинт працює у швартовному режимі (крапка В). У міру розгону судна електродвигун переходить зі швартовної характеристики 2 на проміжні: із крапки В у крапку Е (швидкість $\omega_{п} = \text{const}$; $M_E < M_N$). Поворотом рукоятки поста керування тепер можна перевести

двигун у крапку К с моментом МН і трохи збільшеною швидкістю. Якщо рукоятку поста керування переводити плавно, то гвинт у крапку А на основній характеристиці 1 перейде по прямій ВКА.

Пуск електродвигуна може супроводжуватися кидками струму $I_p = (1,5 \dots 1,8) I_n$. Це порозумівається великою електромагнітною інерцією обмоток збудження збудника й генератора, через яку зворотний зв'язок по струму не встигає обмежувати струм і підтримувати його на постійному заданому рівні.

Реверсування гребного електродвигуна здійснюють поворотом рукоятки поста керування з положення; "Хід уперед" у положення "Хід назад" або навпаки. На реверсивній характеристиці АБГД ділянка АБ відповідає роботі гвинта в режимі рушія, ділянка БГ – у режимі гідравлічної турбіни, а ділянка ГД – у режимі гідравлічного гальма. З реверсивної характеристики видно, що якщо швидким переключенням рукоятки поста керування швидкість електродвигуна довести до номінальної, то його момент перевищить номінальне значення в кілька разів. Тому швидкість двигуна, що обертається у зворотному напрямку, обмежується величиною $\omega_p < \omega_n$ (крапка Д).

Рис. 3.12. Пуск і реверсування гребного двигуна

1 – основна, 2 – швартовна, 3 – реверсивна, 4-6 – проміжні

У ГЕУ із трехобмотковим збудником реверсування здійснюють, змінюючи напрямок магнітного потоку генератора.

У ГЕУ, де роль збудників генераторів і гребного електродвигуна виконують ЕМУ, реверсування може бути здійснено зміною напрямку магнітного потоку: головних генераторів (подібно тому, як це робиться в системі із трьох обмотувальним збудником); гребного електродвигуна.

В обох випадках загальмовування гвинта відбувається

в режимах рекуперативного гальмування й противключення гребного двигуна.

У режимі рекуперативного гальмування потужність, передана гвинтом на вал генераторного агрегату, не повинна перевищувати механічних втрат агрегату, тому що інакше можливий розгін первинного двигуна. Для дизелів ця потужність становить 20...25% номінальної, для турбін – незначну величину. Тому в ГЕУ, оснащених турбоагрегатами, використати метод рекуперативного гальмування гвинта неприпустимо й варто прибігати до режиму противключення, при якому енергія гвинта витрачається на нагрівання ланцюга головного струму.

3.5. Моделювання перехідних процесів в ГЕУ постійного струму з трьохобмотковим збудником

Нормальні перехідні процеси розглядаються за умови:

а) використання статичних характеристик генераторів та збудників.

б) не враховуються вихрові струми;

в) не враховується зміна потоків розсіювання;

г) реакція якоря по поздовжній та поперечній осях не змінюється від інших умов, крім навантаження.

Схема ГЕУ постійного струму з трьохобмотковим збудником зображена на рис. 3.13.

Рис. 3.13. Схема ГЕУ постійного струму з три обмотковим збудником

Особливості роботи схеми наведені в розділі 3.3.

Математичний опис перехідних процесів

Для отримання системи диференціальних рівнянь розіб'ємо ГЕУ на частини: триобмотувальний збудник;

генератор; головне коло; рівняння руху (моментів) ГЕД.

Збудник:

;

;

,

де – коефіцієнт розсіювання;

струм, опір, кількість витків ОН збудника;

струм, опір, кількість витків ОС збудника;

опір обмоток КО, ДП та серієсної ГЕД;

струм головного кола;

час.

Робочий магнітний потік збудника:

,

де – константа;

Виконаємо перетворення цих рівнянь таким чином

;

;

.

Об'єднаємо та отримаємо спільне рівняння

.

Головний генератор

,

де – опір, струм, робочий магнітний потік одного полюса генератора, кількість витків на головному полюсі ОЗГ;

– кількість полюсів генератора;

= 1.1...1.4 – коефіцієнт розсіювання генератора.

;

.

Головне коло:

,

де – константа постійної ЕРС;

– кутова швидкість ГЕД;

– сумарний опір та індуктивність головного кола;

- кількість генераторів;
 - струм у головному колі.
- Рівняння руху електромагнітного приводу:

- константа сталості моменту;
- магнітний потік ГЕД;
- сумарний момент інерції ГЕД, валопроводу, гвинта та приєднаними масами води;
- момент опору.

Призначення розрахунку перехідних процесів

Перехідні процеси характеризують маневрені властивості судна. При сучасній інтенсивності морських перевезень та великому скупченні суден на деяких морських шляхах безпечне виконання маневру і пов'язані з ним перехідні процеси впливають на безпеку руху.

Деякі судна (криголам, буксири, рятувальники) часто працюють в умовах змінних моментів опору на гребному гвинті. ГЕУ таких суден тривалий час працюють у змінному режимі з великими коливаннями зовнішніх сил та керуючого впливу.

При розрахунку перехідних процесів визначаються максимальні значення змінних величин; вибір обмежувальних та форсуючі пристрої для отримання дорожнього характеру процесу; вибирається найкраще поєднання механічних та маневрених характеристик ГЕД та гідродинамічних характеристик гребного гвинта; будується оптимальна система управління ГЕУ.

Чисельні методи розв'язання системи диференціальних рівнянь

Звичайні диференціальні рівняння першого порядку у вигляді Коші

узагальнена форма запису кожного із рівнянь системи

Параметр x у нашому випадку буде відповідати часу t .
Рішення системи за заданих початкових умов зводиться до знаходження інтегральних кривих, що проходять через точки, задані початковими умовами.

Метод Ейлера-Коші

Реалізується наступною рекурентною формулою:

де h - крок інтегрування (збільшення x)

Похибка методу $Euler-Cos$ - велика має систематичне накопичення помилок.

Метод Ейлера-Коші з ітераціями

На кожному кроці обчислюється початкове значення:

потім за допомогою ітераційної формули

рішення уточнюється.

Ітерацію проводять доти, доки збігається задане число цифр результату на двох останніх кроках ітерації.

Число ітерації 3-4.

Модифікований метод Ейлера

і менший час обчислень, тому що замість кількох ітерацій проводиться обчислення лише одного значення

Метод Рунге – Кутта четвертого порядку

найменша схильність до нестійкості рішення.

Алгоритм реалізації в циклічному обчисленні на кожному кроці за формулами

Приклад

При
Х

0,3	0,1483...	0,4831...
0,4	0,1960...	0,4702...
0,5	0,2422...	0,4578...
...	...	...

Програма розрахунку по методу Рунге – Кутта буде мати наступний вигляд на мові Бейсик.

```
10 INPUT "N='N – число рівнянь
20 DIM Y(N), A(N), K(N), F(N), W(N)
30. INPUT 'H='H – крок інтегрування
40 INPUT 'X0='X0 – початкове значення (t=0)
50 FOR J=1 TO N: PRINT 'YO'J'):INPUT W(J) – почат-
кове значення
60 LET Y(J)=W(J) : NEXT J
70 GO SUB 200: FOR J=1 TO N: LET V=H*F(J)
80 LET K(J)=V: LET Y(J)=W(J) + : NEXT J
90 LET X=X+ : GO SUB 200: FOR J=1 TO N
100 LET V=H*F(J): LET K(J)=K(J)+2*V
110 LET Y(J)=W(J)+ : NEXT J
120 GO SUB 200: FOR J=1 TO N: LET V=H*F(J)
130 LET K(J)=K(J)+2*V: LET Y(J)=W(J)+V: NEXT J
140 LET X=X+ : PRINT 'X='X: GO SUB 200
150 FOR J=1 TO N: LET Y(J)=
160 PRINT 'Y('J')='Y(J)
170 LET W(J)=Y(J): NEXT J: GO TO 70
200 LET F(1)=Y(2): LET F(2)=
210 RETURN: END
```

Для рішення системи диференціальних рівнянь чисельним методом можна скористатися функцією прикладної програми MathCAD. Наприклад чотирьох крапковий метод Рунге-Кутта з фіксованим кроком інтегрування реалізується функцією `rkfixed`. Функція має п'ять параметрів: позначення змінної; початок часового інтервалу; кінець часового інтервалу; кількість точок інтегрування; позначення матриці рівнянь

Перед звертанням до функції `rkfixed` треба сформувати матрицю рівнянь, що являє собою праву частину системи диференціальних рівнянь виду Коші й задати початкові умови для змінних. Наприклад нульові початкові умови для чотирьох змінних будуть виглядати так

Приклад матриці рівнянь

де X_0, X_1, X_2, X_3 – змінні.

Інші складові матриці – параметри або функціональні залежності.

4. Гребні електричні установки подвійного струму

4.1. Особливості ГЕУ з некерованим випрямлячем

Гребними установками подвійного роду струму називаються такі установки, у яких як джерела електроенергії використовують синхронні генератори змінного струму, а як гребні електродвигуни – електродвигуни постійного струму.

Поява таких установок стала можлива завдяки розвитку напівпровідникової техніки, на базі якої були створені випрямлячі двох типів:

1. некеровані, вихідна напруга яких не регулюється;
2. керовані з регульованою вихідною напругою.

Поява потужних, на сотні кВт, випрямлячів дозволило об'єднати високі маневрені якості ГЕУ постійного струму з достоїнствами ГЕУ змінного струму (можливість застосування високооборотних первинних двигунів, малі масогабаритні показники).

Синхронний генератор СГ, що живить гребний електродвигун постійного струму незалежного збудження, обертається первинним двигуном (ПД) із постійною частотою.

Генератори змінного струму в порівнянні з машинами постійного струму мають більше високий ККД і мають більшу надійність. Наявність колектора в машинах постійного струму не дозволяє їм працювати при високих швидкостях і напрузі. Можливість використання більших швидкостей і високих напруг синхронних генераторів сприяє зменшенню маси й габаритів установки. Ці й інші переваги синхронних генераторів обумовлюють зменшення вартості ГЕУ змінного струму в порівнянні з установками постійного струму. Однак регулювання швидкості й реверсування гребних двигунів змінного струму утруднено через необхідність перемикань головного кола й впливів на первинні двигуни, у той час як двигуни постійного струму легко управляються дистанційно й регулюються перемиканнями в малопотужних колах збудження.

Сказане обумовило прагнення створити ГЕУ подвійного (перемінно-постійного) роду струму, під яким розуміють систему електричного руху, засновану на живленні гребного електродвигуна постійного струму через випрямляч від джерела змінного струму (синхронного генератора або мережі). Це стало можливим завдяки розвитку напівпровідникової техніки й впровадженню її на судах.

ГЕУ подвійного роду струму дозволяють використати як первинні двигуни генераторів високошвидкісні газові турбіни, а також парові турбіни, що працюють на парі високих параметрів, що особливо важливо для суден-атомоходів.

Надійність блоку синхронний генератор – випрямляч вище надійності генератора постійного струму. При використанні первинних двигунів генераторів із частотою обертання 3000 об/хв і вище вартість основного встаткування ГЕУ подвійного роду струму на 20...30 % менше вартості встаткування ГЕУ постійного струму, маса – нижче на 20...25 %. Разом з тим ці установки забезпечують суднам приблизно такі ж маневрені якості, як й установки постійного струму.

Залежно від виду перетворювача змінного струму в постійний можливі два типи ГЕУ подвійного роду струму: з некерованими випрямлячами; з керованими випрямлячами.

У ГЕУ з некерованими випрямлячами джерелом живлення гребного електродвигуна може бути тільки автономний синхронний генератор. Причому синхронний генератор у таких установках можна представити як генератор постійного струму з винесеним колектором. Тому дані системи багато в чому повторюють властивості ГЕУ постійного струму.

Однак між СГ – випрямляч і генератором постійного струму є й істотні розходження. Зовнішня характеристика (залежність напруги від струму навантаження) системи СГ – випрямляч значно м'якше, ніж генератора постійного струму з незалежним збудженням. Це порозумівається більшим впливом реакції якоря синхронного генератора в порівнянні з генератором постійного струму. Реакція якоря СГ (дія магнітного потоку статора на основний потік ротора) залежить від значення струму й характеру навантаження. Зовнішня ж характеристика СГ – випрямляч визначає вид електромеханічної характеристики ГЕД, що у такий спосіб буде м'якше характеристики двигуна, що працює в системі Г–Д.

В установках з некерованими випрямлячами трифазний струм СГ випрямляється й подається до ГЕД постійного струму (рис. 4.1). Регулювання швидкості ГЕД здійснюється зміною напруги СГ за рахунок зміни струму в ОЗЗ,

підключеної до МП. Напруга на обмотку, що задає, МП подається з потенціометра поста керування П.

Рис. 4.1. Схема ГЕУ подвійного роду струму з некерованим випрямлячем

Для одержання круто падаючих механічних характеристик двигуна в МП використовується негативний жорсткий зворотний зв'язок по струму, сигнал якої знімається із ДП і КО(компенсаційна) гребного двигуна. З метою одержання швидкості вище номінальної зменшують струм в ОЗ і відповідно його потік. Реверс ГЕД здійснюється зміною напрямку струму в ОЗ.

Синхронний генератор, некерований випрямляч і гребний електродвигун утворюють систему, аналогічну за структурою ГЕУ постійного струму.

Однак механічні характеристики такої схеми ГЕУ менш жорсткі, чим у ГЕУ постійного струму, завдяки більшим внутрішнім опорам СГ і НВ.

Пуск гребного електродвигуна здійснюється подачею струму одночасно в обмотки збудження СГ і ГЕД. При цьому пускові струми I менше, ніж у ГЕУ постійного струму.

Необхідна величина електромагнітного моменту ГЕД при заклинюванні гвинта забезпечується формою зовнішньої характеристики синхронного генератора, випрямляча й жорстким зворотним зв'язком по струму.

Режим сталості потужності ГЕУ в широкому діапазоні частот обертання ГЕД автоматично забезпечується двома жорсткими негативними зворотними зв'язками (по струму I і напрузі U), які вводяться в регулятори збудження.

Реверс ГЕД виконується зміною напрямку струму в обмотці збудження двигуна, що здійснюється реверсивним тиристорним збудником.

Саме ГЕУ подвійного роду струму з некерованими випрямлячами в ланцюзі якорів ГЕД постійного струму була реалізована на криголамах, що забезпечило:

1. високу маневреність (широкий діапазон регулювання частоти ГЕД і достатню швидкість її зміни) і простоту керування ГЕУ;
2. можливість створення турбогенераторних агрегатів без редукторів і зручність їхнього компонування в машинному відділенні;
3. зниження гучності й вібрації елементів ГЕУ;
4. підвищення ККД установки;
5. найбільшу простоту виконання й надійність роботи ГЕД й їхнього живлення.

4.2. ГЕУ з керованими випрямлячами

ГЕУ з керованими випрямлячами відрізняються тим, що гребний двигун таких установок підключається на вихід трифазного мостового перетворювача, зібраного на тиристорах Т. У ГЕУ з керованими випрямлячами живлення гребного двигуна може здійснюватися як від автономного синхронного генератора, так і від збірних шин електростанції.

На невеликих судах, де потужність гребної установки порівнянна з потужністю технологічного встаткування й періоди використання повної потужності суднової електростанції й головних двигунів не збігаються (рибопромислові, бурові й ін. судна), суднова електростанція може бути єдиною для ГЕУ й загальсуднових споживачів (так називана єдина суднова електростанція – ЄСЕ).

Як й у ГЕУ постійного струму, первинні двигуни обертаються з постійною швидкістю. Регулювання швидкості гребного двигуна здійснюється за рахунок зміни напруги, яка

підводиться шляхом зміни кута відкриття тиристорів випрямляча головного струму. Синхронні генератори при цьому можуть працювати з незмінною напругою, що забезпечує можливість відбору потужності в суднову мережу.

Реверсування гребного електродвигуна, як й у звичайних тиристорних електроприводах постійного струму, може здійснюватися зміною полярності на затисках якоря за допомогою двох груп тиристорних випрямлячів; за допомогою перемикача (реверса), а також зміною напрямку струму збудження двигуна.

При проектуванні ГЕУ подвійного роду струму необхідно враховувати, що випрямлячі в ланцюзі головного струму й струму збудження значно спотворюють синусоїдальний характер напруги суднової мережі.

Струми вищих гармонік не виконують корисної роботи, а збільшують реактивну складову споживаної потужності, викликають додаткові втрати енергії у всьому ланцюзі й вимагають встановлення дроселів, що згладжують. Причому щоб уникнути коротких замикань через послідовно з'єднані вентилі випрямні мости включають на різні генератори або через трансформатори із двома вторинними обмотками.

Схема ГЕУ з керованими випрямлячами наведена на рис. 4.2. Основною схемою керованого випрямляча є мостова схема. Потужні суднові керовані випрямлячі розраховані на значні струми й напруги, які можуть перевищити номінальні значення тиристорів. Для зменшення зворотної напруги на кожному тиристорі застосовують їхнє послідовне з'єднання, а для зменшення струму через тиристор – паралельне.

Рис. 4.2. Схема з керованим випрямлячем

Для одержання необхідного виду механічної

характеристики двигуна використовується негативний зворотний зв'язок по струму головного ланцюга, що визначає кут відмикання тиристорів. Збільшення моменту опору на валу двигуна приводить до росту струму й збільшенню кута відмикання тиристора. При цьому знижується напруга живлення обмотки якоря двигуна й зменшення частоти його обертання.

При різних режимах роботи двигуна напруга на виході генератора і його частота підтримуються незмінними, що дозволяє проектувати єдину електроенергетичну систему (СЕЕС).

4.3. Єдина суднова електроенергетична система з ГЕУ подвійного струму

Розвиток напівпровідникової техніки дав можливість створення СЕЕС, у яких головні ГА виробляють електроенергію як для потреб ГЕУ, так і для живлення загальсуднових приймачів.

У даних установках ГДГ виробляють електроенергію як для живлення ГЕД, так і для живлення загальсуднових приймачів електроенергії. Частота електричного струму на шинах ЩЕР залишається постійної. Частота обертання ГЕД регулюється за рахунок зміни напруги, яка підводиться до якірної обмотки й струму збудження ГЕД за допомогою КВ системи збудження.

Один з варіантів схеми єдиної електростанції наведений на рисунку 4.3.

Частота обертання ГЕД змінюється разом з напругою керованого випрямляча (КВ), а реверс здійснюється зміною напрямку струму збудження. Споживаний випрямлячем струм містить всі непарні гармоніки, що збільшує реактивну потужність.

Рис. 4.3. ГЕУ подвійного струму напругою 800 В

Підвищення напруги знижує струми генераторів і струм головного кола, що зменшує витрату міді, масу й струми автоматів. Суднові споживачі одержують живлення від трансформаторів або від окремого СГ, а для відповідальних ставлять ще й окремий перетворювач.

Однієї із проблем застосування КВ є зниження якості електроенергії на шинах головного розподільного щита (ГРЩ), пов'язане з появою гармонійних складові напруги. Одним з варіантів рішення даної проблеми є застосування електромашинних перетворювачів (ЕМП). До шин ЩЕР у цьому випадку підключаються ГЕУ, а живлення загальсуднових приймачів електроенергії здійснюється від ГРЩ, що одержує живлення від синхронних генераторів (СГ) електромашинного перетворювача.

Застосування багато обмотувальних силових трансформаторів для живлення КВ ГЕУ дозволяє підвищити якість електроенергії на шинах ЩЕР і ГРЩ і відмовитися від застосування електромашинних перетворювачів.

Структурна схема ЄЕЕС із ГЕУ подвійного роду струму на базі КВ із силовим трьох обмотувальним трансформатором наведена на рис. 4.4.

Рис. 4.4. ГЕУ подвійного роду струму на базі КВ із силовими трансформаторами: 1 – головні ДГ; 2 – ЩЕР; 3 – трьох обмотувальний трансформатор; 4 – КВ; 5 – ГЕД; 6 – ГФК; 7 – допоміжний трансформатор; 8 – суднові приймачі електроенергії

Регулювання частоти обертання ГЕД здійснюється за допомогою КВ, що дозволяє підтримувати сталість напруги й частоти в судновій мережі й створює передумови для реалізації

ЄЕЕС. Як випрямляч, як правило, застосовують дванадцяти-пульсний випрямляч із двома мостовими групами, що одержують живлення від трьох обмотувального трансформатора.

5.1. Використання гібридних енергетичних установок на судах

Розвиток систем електричного руху суден – один із ключових трендів у морській і річковій галузі, спрямований на підвищення екологічності, ефективності й надійності морського транспорту. Гібридні енергетичні установки побудовані за рахунок комбінації електродвигунів з дизельними, газовими або водневими установками. Це дозволяє знизити витрата палива й викиди, особливо при маневрах у портах і на малих швидкостях.

Що рухає переходом до гібридних суден:

- посилення норм по викидах парникових газів і забрудненню повітря, це стимулює судновласників шукати альтернативи класичним дизель-двигунам;
- розвиток батарей, накопичувачів енергії й електричних систем на судах, відзначається ріст щільності батарей, зменшення часу зарядки/стикування;
- розвиток інфраструктури в портах: порти всі частіше готують підключення для "холодного" електроживлення суден (shore power) і електропідзарядки.

Конкретні зміни по типах / сегментам:

- коротко магістральні пасажирські судна (пороми й т.п.): тут електричний рух найбільше розвинений. Наприклад, один зі звітів відзначає, що "більше 55% коротких маршрутних пасажирських суден" уже використовують електричні системи;
- середнього розміру вантажні судна, допоміжні судна (допоміжні офшори-судна, буксири), в них гібридні або

електричні системи всі частіше застосовуються.

- контейнеровози й судна великого океанського класу: тут прогрес є, але він значно повільніше. Наприклад, відзначено, що електросистеми поки не можуть впоратися з далекими океанськими маршрутами по батареях.

Числові показники й прогнози: огляд Pacific Environment відзначає, що за станом на 2024 рік було вже ~1000 суден з батареєю електричними системами, і очікується ще ~375 з побудовою в 2025-м.

Основні напрямки розвитку:

- збільшення частки нових суден, проєктованих з частковим або повним електричним приводом, або гібридного;
- перетворення існуючого флоту через ретрофіт и (доповнення батарей, електромоторів) – особливо для допоміжних/прибережних суден;
- розробка й впровадження могутніших батарей й енергоємних систем, що дозволить розширити дальність електроплавання;
- створення й модернізація портової інфраструктури для живлення електросуден (shore-power, зарядки, модульні батарейні системи);
- експлуатаційні переваги: менше шум, вібрації, час технічного обслуговування, економія палива.

Обмеження й виклики:

- обмежена дальність для повністю електричних систем на більших морських маршрутах: батарей поки недостатньо, більші акумуляторні маси "з'їдають" вантажопідйомність;
- високі первісні інвестиції: електросистеми дорожче, інфраструктура ще не повсюдна;
- необхідність модернізації портової інфраструктури й стандартизації зарядки/живлення.

Що можна чекати в найближчі роки:

- збільшення частки нових пасажирських

і короткомагістральних вантажних суден з електричним або гібридним приводом – можливо, до 30-40 % нових замовлень;

- поступове розширення застосування електроруху на середніх маршрутах і допоміжних суднах;

- для більших океанських контейнеровозів / балкарів: скоріше гібридні системи і допоміжні електромотори, чим повністю батареїні ще найближчі 5-10 років;

- прискорення впровадження електропорта – інфраструктури, зарядки й модульних батареїних систем;

- зниження витрат на батареї й збільшення їхньої енергоємності, що приведе до розширення зони застосування;

- сучасна тенденція до зниження викидів CO₂.

Зараз гібридні системи будуються як компроміс між дизельними і електричними установками.

Класифікація гібридних енергетичних установок

Ознака класифікації	Типи	Характеристика / приклади застосування
---------------------	------	--

За типом джерел енергії	Дизель-електричні, Газоелектричні, Акумуляторно-дизельні, Сонячно-дизельні, Вітро-дизельні	Поєднання традиційних (ДВЗ) і відновлюваних джерел для зменшення витрат палива
-------------------------	--	--

За принципом роботи	Послідовна схема, Паралельна схема, Комбінована схема	Визначає взаємодію енергетичних джерел у системі живлення
---------------------	---	---

За типом споживачів	Суднові, Наземні транспортні, Станіонарні (енергокомплекси)	Розрізняють за характером навантажень і режимами роботи
---------------------	---	---

За способом керування	Автоматизовані, Напівавтоматичні, Ручного керування	Від рівня автоматизації залежить ефективність та стабільність роботи системи
-----------------------	---	--

За рівнем електрифікації	Частково електрифіковані, Повністю електрифіковані	Визначає частку електричної енергії у загальному енергетичному балансі
--------------------------	--	--

За видом споживаної енергії Електричні, Теплоелектричні, Механічно-електричні Залежно від кінцевої форми енергії, яка використовується для руху чи живлення

За призначенням Суднові енергетичні установки, Берегові гібридні системи Застосовуються у різних сферах транспорту та енергетики

За екологічними показниками З низькими викидами CO₂, З відновлюваними джерелами,

З системами рекуперації Орієнтовані на зменшення шкідливого впливу на довкілля

Структурна схема гібридної енергетичної установки

Основні елементи: дизель-генератор; акумуляторна батарея; електродвигун; перетворювач частоти; система управління (Energy Management System - EMS); суднова електромережа.

Переваги гібридних суден: зменшення витрати палива до 20–40 %; зниження викидів CO₂, SO_x, NO_x; робота в "екологічному режимі" у портах; менший шум і вібрації.

Недоліки гібридних суден: вища початкова вартість; складність обслуговування систем управління; необхідність додаткового навчання екіпажу.

Приклади гібридних суден

"Color Hybrid" (Норвегія) – найбільше пасажирське гібридне судно у світі.

"Ellen Ferry" (Данія) – найбільший у світі електро-гібридний пором.

"Sea Change" (США) – воднево-гібридне судно.

Фінська технологічна група Wärtsilä підписала контракт на встановлення першої у світі суднової системи акумулювання енергії. Компанія змонтує батарейний комплекс на великотоннажному офшорному судні постачання North Sea Giant, одному з найбільших у світі кораблів у своєму класі.

North Sea Giant

Система акумулювання енергії підвищить експлуатаційну ефективність судна та суттєво знизить обсяг його викидів. Це відповідає екологічним вимогам суден, що працюють у норвезькому секторі Північного моря, повідомляє World Oil.

Справа в тому, що North Sea Giant (власник - компанія North Sea Shipping AS) має систему динамічного позиціонування, яка вимагає для свого функціонування постійної роботи, як мінімум, двох двигунів. Це призводить до значної витрати пального. Однак створення гібридної системи енергопостачання дозволить забезпечити резервне живлення, внаслідок чого навантаження основних силових установок знизиться, також установка системи акумулювання дозволить скоротити емісію CO₂ на 5,5 млн. тонн на рік, окису азоту – на 30 тонн, а окису сірки – на 1,2 тонни.

Натомість існує один важливий момент. Оскільки на офшорні судна постачання такого класу батарейні комплекси ніколи раніше не ставилися, зміни, внесені до конструкції North Sea Giant, вимагатимуть схвалення будь-якого зі світових суднових класифікаторів. У зв'язку з цим Wärtsilä вже зараз домовляється з DNV і GL про видачу судну нового сертифікату.

Український можливий напрямок розвитку повністю електричного або гібридного флоту

1. Використання потенціалу річкового транспорту: Дніпро, Південний Буг, Дунай.

2. Використання гібридів у портових буксирах та річкових катерах.

3. Можливість локалізації збірки систем у Миколаєві, Херсоні, Одесі.

Етапи впровадження

1. Пілотні судна з дизель-електричними системами.
2. Розробка стандартів і вимог безпеки.
3. Створення інфраструктури зарядки.
4. Масове впровадження у транспортних компаніях.

Для аналізу необхідності впровадження можна розглянути економічне порівняння

Показник	Дизельна установка	Гібридна установка
----------	--------------------	--------------------

Початкова вартість	1.0×	1.3–1.6×
--------------------	------	----------

Витрата палива	100 %	60–80 %
----------------	-------	---------

Обслуговування	Високі витрати	Середні
----------------	----------------	---------

Термін окупності	–	5–7 років
------------------	---	-----------

Структурований огляд типових схем гібридних енергетичних установок для суден.

I. Послідовний гібрид (Series Hybrid)

Принцип роботи: двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) працює виключно як генератор електроенергії.

Електроенергія йде на тягові електродвигуни або на зарядку батарей. ДВЗ не підключений безпосередньо до гвинтів.

Переваги: просте керування потужністю; можливість оптимізувати ДВЗ для постійного режиму роботи.

Недоліки: подвійні перетворення енергії (механічна → електрична → механічна); може бути менш ефективним при великих навантаженнях.

Структурна схема послідовного гібриду

II. Паралельний гібрид (Parallel Hybrid)

Принцип роботи: ДВЗ може безпосередньо приводити гвинт; електродвигун може допомагати або замінювати ДВЗ при низьких швидкостях; ДВЗ та електродвигун працюють разом або окремо.

Переваги: висока ефективність на всіх швидкостях; можливість повністю електричного руху на короткі відстані.

Недоліки: складніша система керування.

Основні компоненти паралельної ГЕУ на судні:

1. Дизель-генератор (ДГ). Постачає механічну або електричну енергію. Використовується для головного приводу судна та зарядки батарей.

2. Електродвигун (ЕД). Виконує функцію основного або допоміжного приводу. Може працювати як мотор або генератор (при рекуперації).

3. Батарейний блок / акумуляторна система (АКБ). Зберігає електроенергію для роботи електродвигуна. Забезпечує роботу при малих швидкостях або в порту.

4. Силова електроніка (інвертори, перетворювачі). Контролює подачу електроенергії від акумуляторів до двигуна. Забезпечує синхронізацію роботи ДГ та ЕД.

5. Головний вал та гребний гвинт. Приймає механічну енергію від ДГ або ЕД. Може працювати одночасно від двох джерел (паралельний режим).

6. Система управління (SCADA або локальний контролер). SCADA – (Supervisory Control and Data Acquisition) – означає «диспетчерське управління та збір даних» – це система диспетчерського управління та збору даних, яка використовується для моніторингу, контролю та автоматизації процесів у реальному часі. Вона збирає дані з обладнання, візуалізує їх на екрані оператора, дозволяє керувати процесом, реагувати на сигнали тривоги та зберігати інформацію.

III. Комбінований гібрид (Series-Parallel Hybrid)

Принцип роботи: поєднує переваги послідовного та паралельного гібридів. ДВЗ може працювати як генератор або підключатися безпосередньо до гвинта. Електродвигуни та батареї забезпечують додаткову потужність.

Переваги: гнучкість режимів роботи; висока ефективність у всіх діапазонах швидкостей.

Недоліки: найскладніша система керування та інтеграції.

Комбінована або послідовно-паралельна гібридна енергетична установка поєднує переваги обох типів:

Послідовної ГЕУ – коли ДВЗ приводить генератор, що живить електродвигун гребного вала.

Паралельної ГЕУ – коли ДВЗ і електродвигун можуть одночасно або окремо обертати гребний вал.

У комбінованій системі потік енергії може розподілятися як у механічному, так і в електричному контурі, що дає високу гнучкість у різних режимах (економічний хід, маневрування, резерв, рух з нульовими викидами).

Основні компоненти

1. Дизельний двигун (ДВЗ) – основне джерело механічної енергії.

2. Генератор-електромашина (ЕМ1) – працює як генератор або електродвигун залежно від режиму.

3. Гребний електродвигун (ЕМ2) – обертає гребний вал або працює як генератор під час рекуперації.

4. Акумуляторна батарея (АКБ) або суперконденсатори – накопичують надлишкову енергію.

5. DC-шина (постійного струму) – з'єднує всі джерела та споживачі.

6. Інвертор / перетворювач частоти – керує потоком енергії між АКБ, генератором і двигуном.

7. Гребний гвинт (ГГ).

Принцип роботи у послідовному режимі: ДВЗ → Генератор → Електродвигун → Гребний гвинт.

У паралельному режимі: ДВЗ і Електродвигун одночасно обертають вал (через редуктор або спільний вал).

Електричний режим: рух лише від АКБ (нульові викиди).

Рекуперація: гребний двигун працює як генератор під час гальмування або спуску швидкості.

IV. Мікро-гібриди (Mild Hybrid / Assist Hybrid)

Принцип роботи: тлектродвигун невеликої потужності допомагає ДВЗ під час пуску або при пікових навантаженнях. Батарея заряджається від ДВЗ або при рекуперації.

Переваги: невеликі витрати на модернізацію; зменшення витрат палива та викидів.

Недоліки: не забезпечує повністю електричного руху.

Мікро-гібридна (Mild Hybrid / Assist Hybrid) енергетична установка (ГЕУ) використовується у суднових енергосистемах малого класу (переважно допоміжного або маневрового типу).

Суть мікро-гібридної системи

Мікро-гібрид (Mild Hybrid / Assist Hybrid) – це найпростіший тип гібридної установки, де електрична машина лише допомагає дизельному двигуну, але не може забезпечити самостійний рух судна.

Основна мета – покращення економічності, зниження викидів і підвищення ККД дизеля за рахунок: рекуперації енергії при гальмуванні / зменшенні навантаження; електричного старту двигуна (Start-Stop); короткочасної допомоги при розгоні; стабілізації роботи допоміжних систем.

Основні компоненти

1. Дизельний двигун (ДВЗ) – основне джерело енергії.
2. Генератор-стартер (Belt Starter Generator, BSG) або ISG (Integrated Starter-Generator) – невелика електромашина, з'єднана з дизеля (через ремінь або муфту).
3. Акумуляторна батарея (АКБ) – вища ємність, ніж у звичайних системах (48 В або більше).
4. DC/DC перетворювач – для зв'язку між системою 48

В і бортовою мережею 12/24 В.

5. Контролер енергоменеджменту (EMS) – керує потоками енергії, режимами старт/стоп, рекуперацією.

Принцип роботи

V. Гібридна енергетична установка типу “Паливний елемент + Акумулятор (Fuel cell + Battery hybrid H₂ / альтернативні палива).

(H₂ / альтернативні палива) – сучасний напрямок розвитку безвуглецевих суднових систем.

Суть системи Fuel Cell + Battery Hybrid: це повністю електрична або гібридна енергетична установка, де головним джерелом енергії є паливні елементи (Fuel Cells), які перетворюють хімічну енергію водню (H₂) або альтернативних палив (метанол, аміак тощо) на електричну.

Акумуляторні батареї (АКБ) доповнюють систему, забезпечуючи пікову потужність, рекуперацію та стабілізацію енергомережі судна.

Принцип роботи системи

Особливості та переваги системи: без вуглецеве живлення – відсутність CO₂-викидів при використанні водню; високий ККД (до 60%) завдяки електрохімічному процесу без згоряння; низький рівень шуму та вібрацій – підходить для пасажирських і наукових суден; модульність – паливні елементи можна масштабувати; екологічна безпека – придатна для зон з обмеженням викидів (ECA, Arctic, Baltic).

Використовувані типи паливних елементів

VI. Повністю електричне судно з береговою зарядкою і PV/вітроінтеграцією

Повністю електричне судно (Full Electric Ship, FE) з береговою зарядкою (Shore Power Charging) і інтеграцією відновлюваних джерел – сонячних панелей (PV) та вітрових турбін.

Суть системи “Повністю електричне судно (Full Electric Ship)”

Це судно, де відсутні традиційні двигуни внутрішнього згоряння, а всі енергоспоживачі живляться від електричної системи, головним джерелом якої є акумуляторні батареї.

Заряджання відбувається: від берегової зарядної станції (Shore Connection), від власних відновлюваних джерел (сонячні панелі, вітрові турбіни).

Основні елементи системи

Принцип роботи системи

Спрощена структурна схема

Особливості та переваги: нульові викиди CO_2 та NO_x – екологічно чистий рух; “Silent operation” – мінімум шуму і вібрацій; можливість автономної роботи від PV/вітру під час стоянки; енергозбереження до 40% завдяки рекуперації та “shore-to-ship”(з берега на судно) живленню.

Підходить для портових, пасажирських, дослідницьких суден.

Види берегового підключення. Стандарти та технічна база: IEEE/IEC/ISO 80005-1 – стандарт для високовольтного підключення суден (6,6 кВ, 50/60 Гц); 80005-2 – стандарти для малих суден (низьковольтне shore connection); OPS (Onshore Power Supply) – загальний термін, що охоплює всі системи

5.2. Ядерні електроенергетичні установки

Ядерні енергетичні установки (ЯЕУ) дозволяють додати морським суднам якості, недосяжні при використанні суднових енергетичних установок, що працюють на викопному паливі. Насамперед, це необмежений район плавання при роботі на великій потужності, більш висока швидкість і тривала автономність. Застосування ЯЕУ підвищує загальну продуктивність вантажних суден всіх типів за рахунок зниження повної маси енергетичної установки, що містить у собі масу самої енергетичної установки й масу палива для неї. Паливо, що запасас на рейс, становить 15% маси перевезеного вантажу, що рівнозначно 10000 тонн для вантажного судна з потужністю на гвинтах 40-60 МВт.

На морських судах принципово можуть використатися ЯЕУ з реактором будь-якого освоєного типу з використанням паротурбінного або газотурбінного циклу.

Найбільше поширення одержали двоконтурні ЯЕУ з водно-водяними реакторами під тиском, оскільки вони найбільш відпрацьовані, компактні, прості в керуванні, характеризуються стійкістю до хитавиці й диферентам. Такими установками обладнані атомні криголами "Сибір", "50 років Перемоги" і транспортні судна "Савана" (США), "Отто Ган" (Німеччина), "Муцу" (Японія).

На кораблях військово-морського флоту високорозвинених країн миру найчастіше використовують ядерні енергетичні реактори на швидких або проміжних нейтронах (з енергією в інтервалі 1-1000 еВ), активна зона яких охолоджується рідким натрієм або рідким свинцем (або його сплавами). Ці реактори при рівній з іншими типами реакторів потужності мають найменші габарити, а висока температура рідко металевого теплоносія (~600°C) забезпечує ефективність ЯЕУ порядку 40%. За даними печатки в складі ВМФ США діють близько 130 атомних підводних човнів і понад 10 атомних надводних

кораблів.

Авіаносець "Ентерпрайз" (USS Enterprise) став першим авіанесучим крейсером у світі, оснащеним атомною силовою установкою. Єдиний представник свого класу, "Ентерпрайз" донині є найбільшим бойовим кораблем у складі ВМС США й самим довгим у світі. За піввіку своєї служби авіаносець брав участь у декількох військових конфліктах, у тому числі у В'єтнамській війні й другій іракській кампанії. Споконвічно планувалося, що "Ентерпрайз" прослужить у складі ВМС США до 2015 року, коли його замінить новітній авіаносець однойменного класу "Джеральд Форд". Однак у підсумку списання найстаршого атомного авіаносця США було перенесено.

Американський атомний авіаносець "Рональд Рейган" був спущений на воду 4 березня 2001 року й увійшов у бойовий склад флоту 12 липня 2003 року. Потужність його чотирьох вальної ядерної енергетичної установки 205,8 МВт (280000 к.с.) - два водно-водяних реактори A4W/A1G. Авіаносець має такі основні тактико-технічні характеристики: повна водотоннажність 98000 т, довжина 334 м, ширина 40,8 м, осадку 11,9 м, найбільша ширина польотної палуби 78 м, швидкість повного ходу його становить більше 54,5 км/г (30 вузлів).

Розробка високотемпературних газо-охолоджуваних реакторів (ВТГР) з температурою газу на виході з активної зони порядку 1000 °C створює перспективи використання ядерно-енергетичних установок, що працюють по замкнутому або розімкнутому газотурбінному циклі. У порівнянні з паротурбінними установками з ядерним реактором вони володіють:

- більше високим ККД перетворення теплової енергії в механічну;
- меншими масо габаритними параметрами;
- можливістю використання в одноконтурних установках як робоче тіло різних газів;
- спрощеним регулюванням потужності шляхом зміною

тиску в контурі зі збереженням високого ККД у широкому інтервалі навантажень;

- незначною потребою в охолодній воді й відсутністю спеціальної водоподготовки;

- легкістю запуску турбоустановки при будь-якій температурі й швидкістю прийняття навантаження.

Рис. 5.1. Схема енергетичної установки: 1 – активна зона реактора;

2 – теплообмінник паливо-сіль; 3 – теплообмінник сіль-повітря;

4 – електрогенератор; 5 – газова турбіна; 6 – компресор;

7 – регенеративний підігрівник; 8 – циркуляційний насос

У ходовому режимі основним споживачем електроенергії є гребна електрична установка, до складу якої входять гребні двох обмотувальні трифазні електродвигуна синхронного типу потужністю з напругою 10,5 кВ. Такі потужні ядерно-енергетичні установки з газовими турбінами знаходять застосування не тільки на криголамах і військових суднах, але й на пасажирських лайнерах.

Теплові схеми діючих і проєктованих суднових ЯЕУ підлеглі головним чином умовам забезпечення різних режимів роботи для маневрування, необхідних ходових якостей, надійності й безпеці роботи.

У якості головних суднових двигунів ЯЕУ використовуються багатоступінчасті турбіни. До суднових турбін пред'являються жорсткі вимоги по масо габаритним співвідношенням. Вони працюють у більше широкому діапазоні можливої зміни навантажень. Тому що суднові турбіни обертають електричний генератор, а привід гвинтової групи здійснюється від електродвигунів, то можлива передача обертання турбіни через редуктор безпосередньо на рушій - гребні гвинти. У першому

випадку, власне кажучи, мова йде про електростанції, і умови роботи відрізняються від стаціонарних частими й значними змінами навантаження. При механічній передачі в системі турбіна-редуктор-рушій один з елементів повинен бути реверсивним для забезпечення заднього ходу судна.

На транспортних суднах, що перебувають у тривалих рейсах, головна турбіна із гребною установкою зв'язана звичайно механічною передачею. На криголамах й атомних підводних човнах у зв'язку з більшими динамічними навантаженнями застосовується електрична передача. Наприклад, на криголамі "Арктика" змінний струм, вироблюваний шістьма генераторами, перетворюється кремнієвими випрямлячами в постійний струм, що надходить на три гребних двигуни постійного струму, кожен потужністю 16000 кВт (22000 к.с.).

На всіх побудованих надводних суднах у ЯЕУ застосовується середнє (по корпусі судна) розташування судової енергетичної установки. Це приводить до кращої стійкості судна й меншої уразливості ЯЕУ при аваріях. Кормове розташування судових енергетичних установок зустрічається в проєктах танкерів, рудовозів і т.д.

Таким чином, енергетичні установки, що працюють на ядерному паливі, перспективні для крупно тонажних суден з більшим радіусом дії.

Створення й широке використання таких суден радикально змінить всю організацію й економіку морських перевезень.

5.3. Варіант використання високотемпературних атомних реакторів і газової турбіни

Варіант досить перспективний тому що можлива утилізація тепла вихлопних газів для приводу парової турбіни, потужність якої дорівнює приблизно 30%-40% від потужності газової турбіни Існують котли - утилізатори, що дозволяють

забезпечити потужність парової турбіни до 50% газової турбіни. Одним з найважливіших переваг деяких типів високотемпературних реакторів є те, що з'являється можливість зробити завантаження палива на весь період експлуатації судна, тобто приблизно на 25 років. Установка стає високо економічною.

Ядерні енергетичні установки для криголамів і суден льодового плавання нового покоління повинні задовольняти наступним вимогам:

- гранична безпека експлуатації ЯЕУ, що гарантує на фізичному й технічному рівні запобігання виходу продуктів розподілу й шкідливих речовин за межі установки, у кількості, що перевищує припустимі норми;

- висока екологічність, що забезпечує мінімальний рівень теплового, радіаційного й хімічного забруднення навколишнього середовища;

- висока термодинамічна ефективність ЯЕУ;
- висока ефективність використання ядерного палива;
- більша кампанія реактора;
- зборка реакторного блоку на заводі-виготовлювачі;
- прийнятні питомі капітальні витрати й мінімальні строки виготовлення ЯЕУ;

- мінімальні витрати на висновок з експлуатації ЯЕУ, на обіг і поховання відпрацьованого ядерного палива;

- неможливість створення з тепловиділяючих зборок елементів ядерної зброї.

До числа ЯЕУ безпека яких може бути забезпечена за рахунок самозахищеності, ставляться установки з реакторами на основі мікротвелів і расплавно-солевим теплоносієм. Властивості самозахищеності таких реакторів багато в чому визначаються властивостями цього теплоносія й палива.

Вся сукупність фізичних і технічних передумов, отриманих на основі обраної комбінації палива, теплоносія й газотурбінної установки (ГТУ) забезпечує реальну можливість

створення безпечної високо економічної ЯЕУ для криголамів і суден льодового плавання - МАРС (мікротвельний расплавно-солевой реактор суднової).

Контур циркуляції расплавно-солевого теплоносія реактора МАРС-С включає: активну зону, верхній торцевий, бічний кільцевий і нижній торцевий відбивачі, насоси, теплообмінники сіль-повітря.

Матеріалом відбивача є циркулюючий расплавно-солевой теплоносій (LiBeF_2).

Активна зона МАРС-С набрана із графітових тепловиділяючих зборок (ТВЗ), що містять теплоносії й паливо розміром під ключ 36 см. У графітовій ТВЗ у гексагональних ґратах із кроком 3,5 см розміщено канали для палива діаметром 1,7 см (60 каналів) і діаметром 4,0 см для теплоносія (31 канал) – усього 91 канал. У каналах для палива розташовуються паливні компакти - мікротвели в графітовій матриці.

Об'ємна частка мікротвелів у паливному компакте становить 33%.

Найбільш економічні в тепловому відношенні й безумовно перспективні для використання в потужних транспортних ядерно-енергетичних установках термодинамічні цикли газотурбінних установок з регенерацією й проміжним охолодженням газу. Одним з важливих переваг деяких типів високотемпературних реакторів є можливість завантаження палива на весь період експлуатації судна, тобто приблизно на 25 років.

Ядерний реактор з теплоносієм з розплаву солей і паливних елементів на основі мікротвелів МАРС-С (табл. 5.1) у комбінації з газотурбінною установкою (ГТУ), що використовує як робоче тіло атмосферне повітря, забезпечує безпечну високо економічну експлуатацію криголамів і суден льодового плавання.

Контур циркуляції расплавно-солевого теплоносія включає активну зону реактора, бічний кільцевий і нижній

торцевий відбивачі, насоси, теплообмінники повітря. Матеріалом відбивача є циркулюючий расплавно-солевой теплоносій (LiF–BeF₂).

Таблиця 5.1. Характеристики ядерного реактора МАРС-С

Теплова потужність, МВт	150
Діаметр/висота активної зони, м	3,6/4
Середня щільність енерговиділення, МВт/м ³	6,2
Температура расплавно-солевого теплоносія, Т _{вих} /Т _{вх} , °С	750/550
Паливо	
максимальна температура, °С	1200
глибина вигоряння, ГВ доб/т	480
кампанія палива, лет	25
Теплообмінники соль-повітря:	
число постійно працюючих	6
повне число (з урахуванням резервування)	12
діаметр/висота (без обліку колекторів), м	1,42/2,64
передана на один теплообмінник потужність, МВт	25
витрата расплавно-солевого теплоносія, кг/с	46
витрата повітря, кг/с	67
ГТУ (відкритий повітряний контур)	
теплова потужність, МВт	150
ККД при вхідній температурі повітря 50°C, 0 і -50 °С, %	24,30,36
витрата повітря, кг/с	402
ступінь стиску повітря в компресорі	14
температура повітря після компресора, °С	360
температура повітря перед турбіною, °С	700
габарити, довжина/діаметр, м	~7,9/3,9
Маса, т	~100

Енергетична установка криголама (рис. 5.2) складається із двох реакторів типу МАРС, двох газотурбінних двигунів

з генераторами потужністю по 45 МВт.

Потужність двох ГТУ при температурі 50°C, 0 і -50°C становить 72,90 й 108 МВт, ККД при цьому дорівнює 24, 30 й 36%. Для підвищення ефективності застосований попередній підігрів повітря за допомогою двох регенераторів, по одному на кожному ГТУ. Атмосферне повітря надходить на вхід компресора 6 газової турбіни, потім з компресора в регенератор 7, де відбувається його попереднє нагрівання, і далі з регенератора в теплообмінник соль-повітря 3 реактори. Розплав солі температурою ~750°C циркулює за допомогою насоса 8. У теплообмінниках повітря нагрівається до ~700°C. Нагріте повітря надходить на вхід газової турбіни 5, що приводить в обертання електрогенератор 4. З виходу газової турбіни гаряче повітря температурою 550°C надходить у регенератор 7, де нагріває вступник від компресора 5 повітря, і потім з більше низькою температурою викидається в атмосферу.

Рис. 5.2. Газотурбінна енергетична установка з регенератором у повітряному контурі

5.4. Енергетична установка плавучої електростанції

До складу установки входять два мікротвельних автономних расплавно-солевих реактори МАРС-С тепловою потужністю по 150 МВт, двох газотурбінні установки приблизно по 40МВт потужністю, два котли-утилізатори продуктивністю по 75 тонн пари/година, одна (або дві) парові турбіни проти тискового типу Р25-3,4/0,1 потужністю 25МВт. Відпрацьована у турбіні пара направляється на теплофікаційні потреби. Потужність установки електрична близько 100 МВт, ККД електричний 35%.

Кількість тепла, що відпускає на теплофікацію приблизно 50 Гкал/година. Тепловий ККД більше 60%. Параметри пари

за турбіною:

- абсолютний тиск $P_{ном.}$ - 0,12 МПа,
- температура $T_{ном.}$ - 104 С,
- номінальна витрата пари 143,8 т/година.

Можливий варіант використання двох парових турбін потужністю по 12 МВт.

Рис. 2. Енергетична установка плавучої електростанції потужністю 100 МВт (Варіант 1)

Рис. 3. Енергетична установка плавучої електростанції потужністю 100 МВт (Варіант 2)

У наш час потужні газові турбіни знаходять застосування не тільки на військових судах, але й на пасажирських лайнерах. На новітньому пасажирському лайнері "Куїн Мери-2" установлені дві газо турбогенераторні установки по 25 МВт кожна, які працюють по комбінованому циклу разом з дизель-генераторами. Загальна потужність установки становить 118 МВт. На Україні створені корабельні й промислові енергетичні паро газові установки різної потужності. (від 10 МВт і вище до 325 МВт, що мають ККД від 45 до 52%). Раніше успішно експлуатувалися судна типу "Капітан Смирнов", із двома паро газовими енергетичними установками М-25 потужністю по 18400 МВт кожна. Питання застосування газо турбогенераторів, що працюють разом з високотемпературним атомним реактором по комбінованому паро газовому циклі, а також з упорскуванням пари в проточну частину газової турбіни в цей час є актуальним тому що дозволяє одержати високий ККД енергетичної установки, високу

надійність, високі екологічні характеристики.

5.5. Створення й використання надпровідникових гребних електричних двигунів для систем електричного руху

Як перспективний напрямок розвитку електричного руху великий інтерес представляє використання ефекту надпровідності, що дозволяє створити криогенні електромеханічні установки (генератори, двигуни) з недоступними в цей час агрегатними потужностями. Використання електричних машин надмалих габаритів дозволить визволити до 15...20 % корисного обсягу транспортних суден дедвейтом в 5...10 тис. т.

В останні десятиліття практично у всіх розвинених країнах активно ведуться науково-дослідні й дослідно-конструкторські роботи зі створення електроенергетичних систем з використанням надпровідникових матеріалів. Надпровідники відкривають шлях до створення електромагнітних пристроїв з такою величиною індукції й енергії магнітного поля, що традиційними способами практично досягти неможливо. Однак на шляху промислового освоєння надпровідникових електротехнічних пристроїв знаходиться досить непросте завдання забезпечення необхідної для роботи температури надпровідника в магнітній системі. Ця температура перебуває на криогенному рівні в діапазоні 4,2...12,0 К, одночасно варто забезпечити зазначений рівень температури магнітної системи при всіх режимах роботи.

Найбільші суднобудівні й електромашинобудівні компанії працюють над удосконалюванням рушійної системи суден різного класу, застосовуючи криогенні надпровідникові ГЕД і кріотурбогенератори.

У Японії в 1991 р. був проведений Міжнародний симпозіум по наукових і технічних проблемах створення судових надпровідникових ГЕД. На той момент фахівці Японії продемонстрували учасникам симпозіуму в порту м. Кобе перше

натурне судно "Ямото" зі надпровідниковим магнітогідродинамічним рушієм, що перебував на етапі ходових випробувань.

Аналіз опублікованих матеріалів дозволяє сформулювати ті фактори, які визначають доцільність застосування надпровідникових ГЕД для військових і для вантажопасажирських суден. До таких факторів варто віднести:

- економічні передумови у вантажопасажирських перевезеннях, а також тактико-технічні характеристики підводних і надводних кораблів;

- вимоги по зниженню структурного шуму й вібрації для збільшення комфортності в пасажирських суднах;

- можливість відділення первинного двигуна від лінії вала й скорочення довжини вала для підвищення вантажомісткості вантажних суден;

- зниження маси й габаритів агрегатів передачі обертаючого моменту на гребний гвинт;

- підвищення ККД електропередачі.

Німецькі фахівці провели аналіз тягових характеристик магнітогідродинамічних рушіїв на постійному й змінному струмі. Фахівці прийшли до висновку, що для досягнення необхідної ефективності й для одержання достатнього тягового зусилля у рушійної установці повинна застосовуватися надпровідникова магнітна система.

Фахівці англійської фірми "International Research and Development Ltd (IRD)" розробили комплекс надпровідникового устаткування для ГЕД різних типів суден. Ця фірма віддає перевагу уніполярним надпровідниковим гребним двигунам і генераторам, у тому числі для ГЕД суден льодового плавання.

Для пасажирських океанських суден японською фірмою "Sumitomo Heavy Industries" розроблений проект ГЕД зі надпровідниковим гребним двигуном потужністю 20 МВт. Передбачається, що це судно буде розвивати швидкість до 50

вузлів і зможе скласти конкуренцію авіаційним трансатлантичним пасажирським перевезенням. Установлено, що маса кріодвигуна в даної ГЕД не повинна перевищувати 30...40% маси двигуна традиційного виконання тієї ж потужності при частоті обертання 150 об/хв.

Для криголамних суден англійською фірмою IRD розроблена ГЕД із гребним кріодвигуном, що заміняє малооборотний дизель 29000 к.с., 100 об/хв. У цьому проекті вигреш у масі становить 150 т кріодвигуна проти 1380 т малооборотного дизеля.

На рис. 5.5 представлена схема формування ГЕД зі надпровідниковим турбогенератором і гребним кріодвигуном для транспортного вантажного судна (проект Японії) при багатоярусному компонуванні в кормовій частині транспортного судна. Таке компонування силової енергетичної установки дозволяє підвищити вантажомісткість судна й істотно поліпшити екологічні характеристики. Розроблено проекти для різного типу вантажних суден (суховантажні судна, танкери й ін.), у яких ула реалізована можливість визволити до 15% обсягу для розміщення додаткових вантажів, завдяки заміні механічної передачі на електричну із кріодвигуном. Споживана потужність для приводу гвинта на таких судах перебуває в межах 10...20 МВт залежно від водотоннажності.

Рис. 5.5. Схема розташування надпровідникової системи електричного руху

Процес створення надпровідникових магнітних систем принципово відрізняється від технології виготовлення традиційних електромагнітних пристроїв. Низькотемпературні надпровідники винятково чутливі до зміни робочої температури. Тому у надпровідникових котушках кріомашин неприпустимі відносні переміщення окремих витків під дією

пондеромоторних сил. Пондеромоторні сили – це нелінійні сили, які діють на такі об'єкти як заряджені частки, діелектрики, провідники у неоднорідних електромагнітних полях, наприклад, в електричному, звуковому або світловому полі. Вони пов'язані з механічним впливом випромінювання або поля на об'єкт, що приводить до його переміщення, прискоренню або іншим ефектам або при зміні струму в надпровідникової котушці, що приводять до дисипації енергії в холодній зоні й до зміни температурного режиму. Будь-які тепловиділення, що виникають усередині надпровідникової котушки, у тому числі під дією зовнішніх змінних магнітних полів, що викликають гістерезисні, вихрові й кооперативні втрати в надпровідниковому проводі, повинні бути евакуйовані в зону теплоснімання – у зону рідкого гелію над провідникової магнітної системи.

При розробці гребного кріодвигуна розглядаються два варіанти виконання. Одне виконання припускає створення кріодвигуна з апробованою магнітною системою індуктора, виконаної зі стандартного надпровідника на основі сплаву ніобій-титан (критична температура 4,8 К). Схема охолодження такої над провідникової магнітної системи – рідкий гелій. Другий варіант виконання кріодвигуна пропонує створення магнітної системи індуктора на базі інтерметаліда ніобій-олово з газовою системою охолодження.

За результатами наукових праць було прийнято принципове рішення про створення єдиного базового над провідникового гребного двигуна потужністю 10 МВт при частоті обертання 250 об/хв. Цей двигун повинен задовольнити потреби всіх перспективних ГЕД суден різного класу й, як універсальний модуль, повинен дозволити комплектувати різні системи приводу гребного гвинта суден.

Оскільки розробка двигуна розглядається як створення базового гребного приводу для серії ГЕД, то, неодмінно,

устало завдання максимально спростити допоміжну систему кріогенного забезпечення і умови її експлуатації. Проблема вирішується заміною рідинної системи охолодження над провідникової магнітної системи на газову систему охолодження. А це у свою чергу пов'язане з переходом на виготовлення СПМС із надпровідника, що має більше високу критичну температуру. До таких СП матеріалів ставиться інтерметалічне з'єднання ніобій-олово (Nb_3Sn), критична температура якого дорівнює 17,5 К і дозволяє працювати над провідникової магнітної системи у парах гелію.

Перехід на газове охолодження магнітної системи дозволяє спростити систему кріозабезпечення, звільнивши її від частини встаткування, зменшити масогабаритні показники СКО й підвищити її надійність.

У процесі створення магнітної системи довелося врахувати, що провід на базі інтерметаліда Nb_3Sn на відміну від надпровідника NbTi дуже чутливий до механічних деформацій і вимагає зовсім іншої технології виготовлення.

Магнітна система з газовою схемою охолодження повинна задовольняти наступним вимогам: максимальний час підготовки надпровідної обмотки збудження 200 с; максимально припустиме значення струму, обумовлене припустимим теплоприпливом по струмоуведенням, 1500А; припустимі тепловиділення у номінальному режимі роботи двигуна 6 Вт, форма котушок-полісів плоска.

Для задоволення сформульованих технічних вимог був розроблений ніобі-олов'яний провід, що являє собою однопровивну скрутку з 18 елементарних проводів діаметром 0,6 мм, що містять 14450 надпровідних жил у бронзовій матриці. Розмір проввода з ізоляцією 5,1х1,2 мм. Ізоляція проввода – скловолокно типу ВМПС (товщина 0,1 мм).

Конструкція й технологічний процес виробництва надпровідної обмотки збудження з ніобі-олов'яного провводу

передбачають виготовлення обмотки по методу "намотування-відпал", при якому проводиться намотування котушок-секцій полюсів проводом-напівфабрикатом. Потім ці секції піддаються вакуумному відпалюванню, лише в результаті якого в жилах проводу утвориться надпровідне з'єднання ніобій-олово. Після відпалу секції компаундірується й виробляється зборка полюса. У такий спосіб виключаються механічні деформації властиво надпровідникових жил.

Розрахунок тепловиділень у надпровідної обмотки збудження з ніобі-оловяного проводу показав, що рівень теплових втрат при роботі двигуна в номінальному режимі не більше 6 Вт/м³. Ці параметри й були покладені в основу технічних вимог до комплексу системи кріозабезпечення.

Конструктивна схема кріостата кріодвигуна являє собою сукупність газоохолоджуваних теплових мостів – радіаційних екранів, газоохолоджуваних і теплопровідних радіаційних екранів, охолоджуваних струмоуведень, замкнених герметичних оболонок з розміщеними в них СП обмотками. Всі елементи конструкції розташовані у вакуумної внутрішньої порожнини герметичного корпусу кріостата. Відмова від застосування "суперізоляції" порозумівається значними ускладненнями процесу контролю герметичності через виникнення газових потоків у результаті десорбції з поверхонь матеріалу ізоляції.

Застосування в індукторі двигуна надпровідної магнітної системи з ніобію-олова з робочою температурою до 10 К дозволило відмовитися від конструктивних рішень, що гарантують розташування полюсів індуктора нижче рівня рідкого гелію при виникненні диферентів і кренів, що значною мірою спростило конструкцію кріостата.

У таблиці показані технічні характеристики й масогабаритні показники базового гребного кріодвигуна потужністю 10 МВт. Тут же наведені для порівняння характеристики

гребного електродвигуна традиційного виконання.

Тип гребного двигуна	Потужність, кВт	Ч а с т о т а
обертів, об/хв	Напруга, В	ККД
Маса, т	Габарити,	
мм		

Кріодвигун
КД-10-8

Традиційна конструкція
Пг-158 10000

9300 1500

1030 220

207 0,97

0,94 70

158 5500

2500

2700

6600

4600

5300

Одночасно виконаний аналіз можливості зменшення частоти обертання гребного кріодвигуна. Це вимога з боку суднобудівників мотивоване тим, що зменшення частоти гребного

гвинта збільшує пропульсивний коефіцієнт судна й приводить до істотного скорочення витрати палива. На рис. 5.6 наведені результати аналізу зміни питомої маси гребного кріодвигуна при різних значеннях частоти обертання ротора.

Рис. 5.6. Гребний кріодвигун із ніобі-олов'яним індуктором:
а) – фрагмент конструкції; б) – залежність питомої маси кріодвигуна від потужності при різній частоті обертання, об/хв: 1 – 60; 2 – 80; 3 – 120; 4 – 150; 5 – 200

ЦКБ "Черноморсуднопроект" виконана докладна розробка розміщення системи електричного руху із кріогенним гребним двигуном потужністю 10 МВт і всім допоміжним комплексом на судні. Установлено можливість розташування в машинному відділенні цього судна замість малооборотного дизеля ГЕД із гребним кріодвигуном. Дано оцінку можливості скорочення довжини судна для варіанта з електричним рухом у порівнянні з мало оборотним дизелем. Проект виконаний для типового вантажного судна.

ДОДАТОК А

Сучасні схеми головного струму

Список символів і пояснень:

Перетворювач частоти	
(6-ти фазний)	Дизель
3 обмотувальний	
трансформатор	
Перетворювач частоти	
(12-ти фазний)	Генератор
Випрямляч (6-ти фазний)	Розподільний щит

Розподільний
 трансформатор Перемикач
 Y / □ стартер або другий
 тип стартера двигуна Перемикач
 (мотор привід)
 Азимут підрулюючий
 пристрій (фіксований
 крок) Гвинт (керований крок)
 Тунельний підрулюючий пристрій (фіксований крок)
 Siemens SSP гондола
 гвинта (фіксований
 крок)
 Гвинт (фіксований крок)

Fjellstrand Verft
 Diesel electric propulsion with SINAMICS frequency
 converters.

2 x 2500 kW Main Propulsion
 2 x 1000 kW Bow Thruster
 1 x 883 kW Azimuth Thruster
 4 x 2025 kVA Generators

Ulstein Verft 282
 2 x 4000 kW Main Propulsion
 2 x 1000 kW Tunnel Thruster
 2 x 1200 kW Tunnel Thruster
 1 x 1400 kW Azimuth Thruster
 2 x 3222 kVA Generators
 5 x 2333 kVA Generators

Fosen Mek
 2 x 2200 kW Main Propulsion
 2 x 800 kW Azimuth Thruster
 1 x 1050 kW Tunnel Thruster
 4 x 2020 kVA Generators

ДОДАТОК В
 Паспортні дані суднових синхронних генераторів
 STAMFORD FRAM

Тип	UC224C	UC224D	U C 2 7 4 E			
UC274F	UC274G	UC274H				
Параметр						
BASE RATING FOR REACTANCE						
VALUES, kVA	42,5	50	140	160	175	200
STATOR WDG. RESISTANCE,						
Ohms PER PHASE AT 22 °C						
SERIES STAR CONNECTED	0,181	0,129	0,031	0,024		
0,021	0,015					
ROTOR WDG. RESISTANCE,						
Ohms at 22 °C						
	0,59	0,64	1,40	1,60	1,76	1,92
VOLTAGE SERIES STAR (Y), V						
380	380	380		380	380	380
Xd DIR. AXIS SYNCHRONOUS						
				2,42	2,33	2,33

2,24	2,19	2,10				
X'd DIR. AXIS TRANSIENT	0,19	0,18	0,22	0,19		
0,18	0,18					
X"d DIR. AXIS SUBTRANSIENT		0,14	0,12	0,15		
0,14	0,13	0,12				
Xq QUAD. AXIS REACTANCE		1,11	1,07	1,52		
1,38	1,31	1,27				
X"q QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0,15	0,14	0,18			
0,17	0,17	0,16				
XL LEAKAGE REACTANCE	0,09	0,08	0,08	0,08		
0,08	0,08					
X2 NEGATIVE SEQUENCE	0,15	0,13	0,15	0,14		
0,14	0,13					
X0 ZERO SEQUENCE	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	
0,08						
T'd TRANSIENT TIME CONST., sec	0,025	0,027	0,032			
0,035	0,038	0,042				
T"d SUB-TRANSTIME CONST., sec	0,006	0,006	0,010			
0,011	0,012	0,012				
T'd0 O.C. FIELD TIME CONST., sec	0,65	0,70	0,750			
0,900	1,000	1,100				
Ta ARMATURE TIME CONST., sec	0,005	0,0055	0,007			
0,009	0,010	0,012				

Продовження

Тип	HC434C	HC434D	Н	С	4	3	4	F
HC534C	HC534D							
Параметр								
BASE RATING FOR REACTANCE								
VALUES, kVA	250	295	380	450	500			
STATOR WDG. RESISTANCE,								

Ohms PER PHASE AT 22 °C					
SERIES STAR CONNECTED 0,017 0,014 0 , 0 1 0					
0,0068	0,0057				
ROTOR WDG. RESISTANCE,					
Ohms at 22 °C 0,91 1,04 1,35 1,55 1,77					
VOLTAGE SERIES STAR (Y), V 380 380 380					
380	380				
Xd DIR. AXIS SYNCHRONOUS 3,16 3,11 2,59					
3,26	3,03				
X'd DIR. AXIS TRANSIENT 0,22 0,19 0,17 0,17					
1,16					
X"d DIR. AXIS SUBTRANSIENT 0,16 0,14 0,12					
0,12	0,11				
Xq QUAD. AXIS REACTANCE 2,71 2,62 2,25					
2,66	2,48				
X"q QUAD. AXIS SUBTRANSIENT 0,40 0,39 0,31					
0,27	0,27				
XL LEAKAGE REACTANCE 0,09 0,08 0,06 0,07					
0,06					
X2 NEGATIVE SEQUENCE 0,27 0,26 0,22 0,19					
0,19					
X0 ZERO SEQUENCE 0,09 0,10 0,09 0,11 0,10					
T'd TRANSIENT TIME CONST., sec 0,080 0,080 0,080					
0,080	0,080				
T"d SUB-TRANSTIME CONST., sec 0,019 0,019 0,019					
0,012	0,012				
T'd0 O.C. FIELD TIME CONST., sec 1,700 1,700 1,700					
2,000	2,200				
Ta ARMATURE TIME CONST., sec 0,018 0,018 0,018					
0,012	0,018				

INSULATION SYSTEM – CLASS H

RATED POWER FACTOR – 0,8
SHORT CIRCUIT RATIO – $1/X_d$

ЛІТЕРАТУРА

1. Айзенштадт, Е. Б. Гребные электрические установки [Текст] : справочник / Е. Б. Айзенштадт [и др.]. – Л. : Судостроение, 1985. – 304 с.
2. Кутковецький, В. Я. Гребні електричні установки [Текст] : навчальний посібник / В. Я. Кутковецький. – Миколаїв : Видавництво УДМТУ, 1998. – Ч. 1. – 60 с.
3. Слижевский, Н. Б. Расчет ходкости надводных водоизмещающих судов [Текст] : учебное пособие / Н. Б. Слижевский [и др.] ; под общ. ред. проф. Н. Б. Слижевского. – Миколаїв : Видавництво НУК, 2004. – 192 с.
4. Регістр судноплавства України. Правила класифікації та побудови морських суден. Том 4. Частина XI. Електричне обладнання. [Текст] – Київ: Видавництво РСУ, 2011. – 185 с.
5. Чекунов В. К. Проектування гребних електричних установок змінного струму [Текст] : навчальний посібник. – Миколаїв : НУК, 2012. – 110 с.
6. Чекунов В.К., Новогрецький С.М., Александровський С.Ю., Бандура С.І. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Суднове високовольтне електрообладнання, автоматизовані гребні електричні установки» та «Система електропостачання рушійних електроустановок» [Текст]. – Миколаїв: НУК, 2024. – 61 с.

Навчальне видання

ЧЕКУНОВ Володимир Костянтинович
НОВОГРЕЦЬКИЙ Сергій Миколайович
КОСТЮЧЕНКО Віталій Іванович

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ РУШІЙНИХ
УСТАНОВОК

Навчальний посібник

Навчальне видання

ЧЕКУНОВ Володимир Костянтинович
НОВОГРЕЦЬКИЙ Сергій Миколайович
КОСТЮЧЕНКО Віталій Іванович

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ
РУШІЙНИХ УСТАНОВОК**

Навчальний посібник

Комп'ютерне верстання *Н. М. Ковальчук*
Коректор *О. Є. Вакула*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 15,5. Вид. № 12. Зам. № 1206-51.
Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007
E-mail : publishing@nuos.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.