

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. К. ЧЕКУНОВ

ПРОЕКТУВАННЯ ГРЕБНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ЗМІННОГО СТРУМУ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2012

УДК 621.31(075.8)
ББК 31.26я73
Ч-37

Автор В. К. Чекунов, ст. викладач

Рецензент д-р техн. наук, проф. А. А. Ставинський

Чекунов В. К.

Ч-37 Проектування гребних електричних установок змінного струму : навчальний посібник. – Миколаїв : НУК, 2012. – 110 с.

Розглянуто питання розрахунку потужності головних електричних машин гребних електричних установок (ГЕУ), побудовання механічних характеристик гвинта та гребного двигуна. Досліджено роботу ГЕУ в статичних і динамічних режимах, що дозволяє студенту ознайомитися з принципами керування, розрахунку та налагодження ГЕУ змінного струму. Призначено для студентів Інституту автоматики і електротехніки НУК.

УДК 621.31(075.8)
ББК 31.26я73

Навчальне видання

ЧЕКУНОВ Володимир Костянтинович

ПРОЕКТУВАННЯ ГРЕБНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ЗМІННОГО СТРУМУ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Редактор *М.П. Сєвцова*

Комп'ютерне складання та верстання *В.Г. Мазанко*

Коректор *М.О. Паненко*

© Чекунов В. К., 2012

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2012

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 6,4. Об'єм даних 4972 кб.
Тираж 14. Вид. № 30. Зам. № 95.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

ВСТУП

Інтенсивний розвиток світової промисловості істотно вплинув на сучасний стан головних енергетичних установок (ГЕУ) суден. Найбільше це вплинуло на енергетичні установки з використанням електричного руху, які зазнали не тільки кількісних, але й якісних змін.

Принципова зміна, що вноситься до роботи гребних електричних установок змінного струму з використанням перетворювача частоти, полягає у незмінності частоти обертання головних генераторів при зміні швидкості обертання гвинта. Це створює можливість побудування об'єднаних енергетичних установок на базі систем електричного руху змінного струму.

У поєднанні з використанням нових типів рушіїв – гвинто-кормових колонок (ГКК) – це значно поширює область використання установок змінного струму та зумовлює у більшості випадків відмову від використання установок постійного та подвійного роду струму.

Зважаючи на світову тенденцію до переходу на нові види палива, можна з упевненістю вважати системи електричного руху одним із найперспективніших напрямків розвитку у сфері водного транспорту.

Використання систем електрорушіння у якості пропульсивних установок є перспективним рішенням для суден різноманітного призначення. Це зумовлено, у першу чергу, можливістю реалізації високих маневрових характеристик судна, широким діапазоном змінювання частоти обертання гребного гвинта і великою перевантажувальною здатністю гребного електродвигуна.

Основною перевагою систем електрорушіння є гнучкість, яка відкриває певні можливості при побудованні архітектури енергетичної установки судна:

- вибір кількості та потужності первинних двигунів і генераторів незалежно від кількості гребних валів, що забезпечує маневрову гнучкість і експлуатаційну економічність установки;

- використання швидкохідних нереверсивних первинних двигунів більш простої конструкції, меншої ваги та габаритів порівняно з тихохідними;

- живлення загальносуднової мережі від шин електрорушіння, що підвищує загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) електроенергетичної системи і дозволяє відмовитися від частини допоміжних генераторів;

- розділення гребного двигуна на два окремих, насаджених на один вал, що зменшує їх радіальні розміри та підвищує живучість судна;

- перехід від одно- до двовальної установки з метою підвищення живучості судна;

- більш зручне розташування обладнання відповідно до потреб проекту;

- підвищення рівня стандартизації та уніфікації елементів і частин установки;

- відсутність механічного зв'язку між гребним валом та первинними двигунами.

Також до переваг гребних електричних установок відносять:

- високі маневрові характеристики судна;

- зменшення вібрації корпусу при синхронному та синфазному обертанні гвинтів;

- можливість отримання максимального обертового моменту при мінімальній швидкості обертання гвинта, що зменшує потужність гребного двигуна та генераторного агрегату.

Недоліками ГЕУ можна вважати низький ККД установки у номінальному режимі – 86...92 %, проте для механічної установки він сягає 95...98 %, а також порівняно велику вартість системи. Економію слід очікувати лише від кращого використання простору для розташування енергетичної установки та зниження експлуатаційних витрат [1].

Окремо варто розглянути випадок використання ГЕУ на багато-гвинтових судах. У чисто механічній пропульсивній установці двогвин-

тового судна при малих та середніх швидкостях руху на один гребний вал працює один двигун, другий гвинт при цьому вільно обертається. На вільно обертаючийся гвинт витрачається до 12 % упору, створеного двома гвинтами. У системах електрорушіння немає режимів із вільним обертанням вала, а при зниженні швидкості зменшують кількість працюючих генераторів. У зв'язку з цим при використанні ГЕУ, не беручи до уваги нижчий ККД, можна очікувати економію палива на рівні 6...8 % [1].

На розвиток систем електрорушіння за останні роки істотно вплинуло використання силових напівпровідникових перетворювачів частоти на базі автономних інверторів та гвинтокермових колонок.

Використання перетворювачів частоти, які реалізують алгоритми векторного керування асинхронними гребними двигунами та синхронними двигунами з постійними магнітами, дозволяє досягти у ГЕУ змінного струму динамічних якостей на рівні установок постійного струму, що призвело до відмови від останніх у більшості випадків. Найбільш поширеними на сьогоднішній день стали системи векторного керування потоком розробки Siemens та прямого керування моментом розробки ABB. Обидва алгоритми можуть бути реалізовані як у замкнутих, так і в розімкнених системах.

Здебільшого застосування ГКК знайшли на маневрених малотоннажних суднах. Їх основними перевагами є компактні розміри, відсутність гребного вала, можливість відмови від кермового пристрою, високі ККД та маневрові характеристики судна.

Гранична потужність механічних азимутальних пристроїв зазвичай не перевищує 7 МВт. При зростанні потужності ГКК постає необхідність у переході до прямої передачі обертового моменту від гребного електричного двигуна (ГЕД) на гвинт. Для цього компаніями ABB Stromberg Drives та Kvaerner Masa-Yards нещодавно була створена ГКК нового типу Azipod, яка складається з синхронного двигуна, розташованого у ступиці гребного гвинта, що живиться від напівпровідникового перетворювача електроенергії. Таке рішення дозволяє суттєво підвищити діапазон потужностей ГКК. Помітно нижчим стає рівень шуму та вібрації у машинному відділенні. Використання ГКК типу Azipod дозволяє у середньому скоротити тривалість побудування судна на один-два місяці. На дві-три години скорочується час маневрування при виконанні швартовних операцій.

Нова пропульсивна система Siemens Shottel Propulsor (SSP) виробництва компаній Siemens та Schottel використовує синхронний двигун зі збудженням від сталих магнітів, встановлений у гондолі азимутальної дії з двома гребними гвинтами. Діапазон потужностей таких пристроїв складає 5...30 МВт.

Діаметр підводних частин ГКК із синхронним ГЕД традиційного виконання складає приблизно 60 % діаметра гвинта, що знижує ефективність пропульсивної системи. Використання ГЕД зі сталим збудженням зменшує відношення діаметрів ступиці та гвинта до 30...40 %, що дозволяє реалізувати оптимальну тягу привода. При цьому вага установки зменшується на 15 %, ККД двигуна зростає до 98 %.

1. ВИМОГИ РЕГІСТРУ СУДНОПЛАВСТВА УКРАЇНИ ДО ГРЕБНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

Для отримання дозволу на побудування та експлуатацію суден необхідно забезпечити виконання норм та правил, встановлених класифікаційними товариствами, чиему надзору підлягає створюване судно. Відповідність нормам таких організацій у певній мірі забезпечує належне функціонування судових систем та комплексів, приймання проектан-тами вірних технічних рішень та безпеку експлуатації судна.

Проектування та побудування суден морського та річкового флоту контролюється Регістром судноплавства України. Комплекс вимог цієї організації до суден морського флоту наведено у "Правилах класифікації та побудування морських суден".

Вимоги до обладнання гребних електричних установок викладені в окремому розділі "Гребні електричні установки", проте мають також враховуватися вимоги, наведені в інших розділах документу.

У гребних електричних установках, які містять напівпровідникові перетворювачі, відбувається внесення спотворень до мережі ГЕУ. Головні генератори та гребні двигуни мають забезпечувати задані технічні характеристики відповідно до призначень судна та підтримувати необхідну перевантажувальну здатність за умов спотворень форми напруги та струмів, які вносяться роботою перетворювачів. Потужність елементів установки необхідно обирати з урахуванням цих спотворень.

Головні генератори, напівпровідникові перетворювачі гребного електричного двигуна, а також апаратура кіл головного струму повинні витримувати перевантаження за струмом не менше ніж $250 \% I_{\text{ном}}$ протягом 2 с.

Ступінь захисту частин електричних машин ГЕУ, розташованих під настилами, має бути не нижчим за IPX6. Якщо ці частини розміщені в сухому відсіку або захищені від проникнення води водонепроникним фундаментом і передбачена сигналізація, що спрацьовує при потрапленні до відсіку води, можна обмежитись ступенем захисту IPX3.

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

Генератори гребних електричних установок і гребні електричні двигуни повинні мати обігрів для підтримки температури принаймні на третину вище за температуру навколишнього середовища.

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

Гребні електричні двигуни з повітряним охолодженням необхідно обладнувати двома вентиляторами примусової вентиляції із подачею, достатньою для забезпечення нормальних умов роботи двигуна. Електричні машинні установки мають бути обладнані фільтрами очистки охолоджуючого повітря.

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

Системи збудження електричних машин гребної електричної установки повинні живитися не менше ніж від двох перетворювачів електричної енергії. У випадку пошкодження одного з них інші мають забезпечувати повну потребу в електричній енергії для збудження навіть при збільшеному навантаженні під час маневрів.

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

Системи збудження та автоматичного керування мають виконуватися так, щоб убезпечувати гребні двигуни від надмірного підвищення частоти обертання при виході з ладу або оголенні гребного гвинта.

У колах збудження мають бути встановлені лише ті автоматичні вимикачі, які діють на зняття збудження з машин за коротких замикань та ушкоджень у ланцюгах головного струму.

За необхідності забезпечення певної послідовності комутаційних операцій необхідно передбачити блокування, що виключатиме можливість неправильних перемикачів. Блокування комутаційних апаратів також має передбачатися у разі помилкових переключень у ланцюгах головного струму апаратів, не призначених для проведення комутаційних операцій під струмом.

Силові конденсатори, що використовуються у ГЕУ, повинні мати роз'рядні пристрої.

Основний пост керування гребною установкою розташовується у машинному відділенні. Там само знаходиться перемикач постів керування за наявності декількох постів. Цей перемикач повинен мати блокуючий пристрій, який не дозволяє переходити на керування з іншого посту без зняття збудження з машин ГЕУ. На новому посту початок роботи гребного двигуна здійснюватиметься з положення "Стоп".

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

- вольтметр та амперметр у ланцюзі головного струму;
- вольтметр та амперметр у ланцюгах збудження для пристроїв із 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 бути захищеними від короткого замикання на корпус судна. При цьому струм витоку має не перевищувати 20 А.

У головних ланцюгах та ланцюгах збудження машин гребних електричних установок не дозволяється використовувати плавкі запобіжники.

Необхідно вжити заходів для обмеження або використання енергії, виконуваної 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 мають бути максимально захищені від струмів короткого замикання і перевантажень. Дія захисту повинна супроводжуватися спрацюванням звукової та світлової сигналізації.

При використанні статичних тиристорних перетворювачів передбачені додаткові види захисту:

- від зовнішніх та внутрішніх замикань та перевантажень;
- від перенапруги;
- від зникнення напруги живлення у схемі керування.

Створення об'єднаних енергетичних систем можливе за умов забезпечення належних показників якості електричної енергії, спрямованої до загальносуднових споживачів.

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

Таблиця 1. Показники якості електричної енергії

Параметр	Відхилення від номінальних значень		
	тривале, %	короткочасне	
		%	t, с
Напруга	+ 6...– 10	± 20	1,5
Частота	± 5	± 10	5

Значення коефіцієнта несинусоїдальності кривої напруги має не перевищувати 10 % і визначатися за формулою

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

де U_c – діюче значення напруги мережі; U_n – напруга гармонічної складової n -го порядку; n – порядок вищої гармоніки.

2. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ТИПИ ГЕУ

Під електрорухом суден мають на увазі їх рух у результаті використання електричної енергії гребними електричними установками. До складу гребних електричних установок входять (рис. 1): первинні двигуни (дизелі або турбіни) 1, які приводять у рух головні генератори 2; головні генератори, які живлять електроенергією гребний електродвигун 4 через щит електроруху 3; гребний електродвигун 4, з'єднаний із рушієм 5.

Генератори ГЕУ називають головними через значно більші потужності, у порівнянні з генераторами, що живлять загально суднові споживачі. Гребні електричні установки класифікують за родом струму, типом первинного двигуна, призначенням та іншими ознаками.

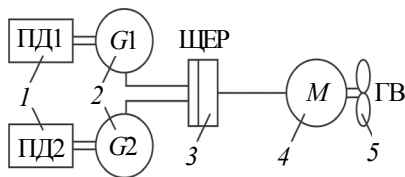


Рис. 1. Структурна схема ГЕУ

За родом струму ГЕУ постійного струму застосовують на судах із високою маневреністю і частим реверсуванням гребного двигуна (криголами, буксири тощо). Гребні електричні установки змінного струму застосовують на судах, де первинне значення має економічність установки.

За типом первинного двигуна ГЕУ підрозділяють на дизель-електричні (ДЕГУ) і турбоелектричні (ТЕГУ), причому застосовуваний тип первинного двигуна багато в чому визначає властивості ГЕУ. На судах малої та середньої водотоннажності, як правило, застосовують двигуни внутрішнього згоряння (дизелі), ККД яких вище за ККД інших теплових двигунів. Потужність дизеля та розвинену ним швидкість регулюють, змінюючи кількість палива, що подається у циліндри. Здійснюють це або вручну, або автоматичним регулятором обертання. Залежності ефективної потужності N_e та ефективного моменту обертання M_e двигу-

на від швидкості при граничній подачі палива називають зовнішніми характеристиками двигуна.

Аналогічні залежності, отримані за меншої подачі палива, називають частотними характеристиками. Як на зовнішніх, так і на частотних характеристиках момент майже не змінюється при зміні швидкості дизеля. Допустимі перевантаження зазвичай не перевищують 10...15 %. Номінальну швидкість дизель розвиває при граничній подачі палива. Подальше збільшення швидкості неприпустимо, оскільки призводить до підвищеного зношування та механічних поломок, а також через обмежену швидкість згоряння палива у циліндрах. Тому при швидкості $\omega = (1,10 \dots 1,15)\omega_H$ спрацьовує граничний регулятор, припиняючи подачу палива паливним насосом. Великі дизелі, окрім цього, забезпечені загальнорежимними регуляторами, що за допомогою спеціальної пружини можуть бути встановлені на певне значення швидкості від мінімально стійкої до номінальної. При цьому слід мати на увазі, що зменшення швидкості дизеля веде до підвищення питомої витрати палива і до зниження ККД всієї установки.

Застосовують ДЕГУ як на постійному, так і на змінному струмі. Тихохідні дизелі великої потужності досить громіздкі, швидкохідні ж мають малий моторесурс і обмежену потужність. Тому великі судна, що особливо потребують пари для технологічних потреб (наприклад, для обробки риби, промивання смостей тощо), зазвичай мають не ДЕГУ, а ТЕГУ, найчастіше з паровою турбіною в якості первинного двигуна, або газотурбінні установки. Частота обертання судових парових турбін доходить до 10000 об / хв із валом генератора вони з'єднані зубчастим редуктором. Зазвичай ТЕГУ працюють на змінному струмі, де використовується важлива властивість турбіни, що полягає у здатності змінювати швидкість у широких межах ($100 \dots 25 \% \omega_H$) шляхом простої зміни кількості (або якості) подавальної пари. ККД парових турбін зазвичай становить 0,25, але економічність парових турбін може зростати за рахунок використання низького сорту пального. На відміну від дизелів турбіни допускають перевантаження на 25...40 % P_H , оскільки номінальний режим їх роботи забезпечується при неповному відкриванні клапанів регулятора.

За призначенням ГЕУ розділяють на головні (або автономні), допоміжні та комбіновані.

У головних ГЕУ гвинт приводиться у рух тільки від гребних електродвигунів, живлення яких електроенергією є єдиним призначенням головних генераторів.

У допоміжних ГЕУ, встановлених на плавкранах, 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, які споживають вільну потужність допоміжних генераторів. Додатковий гребний електродвигун у цьому випадку використовують як у допомогу основному двигуну (для збільшення потужності на гребному валу і підвищення швидкості судна) або для самостійної роботи на гребний гвинт на малих ходах судна, неможливих при роботі головного двигуна.

ГЕУ мають власні переваги і недоліки, враховуючи які, можна в кожному конкретному випадку вибрати оптимальний вид установки і визначити найбільш економічний режим її роботи.

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

- вільний вибір на судні місця для первинних агрегатів і гребних електродвигунів, що полегшує раціональне розміщення цього обладнання;
- можливість використання швидкохідних нереверсивних первинних двигунів;
- відносно хороші маневрені якості, які забезпечуються дистанційним керуванням, а також автоматизацією управління, захистом і контролем ГЕУ;
- придатність до роботи з неповним числом первинних агрегатів при знижених швидкостях судна;
- відносно високу живучість;
- успішну роботу силових установок у важких умовах плавання судна, що забезпечується великою переважувальною здатністю електричних машин;
- можливість використання головних генераторів для живлення інших електроспоживачів судна.

Недоліками ГЕУ по відношенню до дизельних і турбінних установок є порівняно низький ККД, що пояснюється подвійним перетворенням енергії; порівняно висока питома вага і початкова вартість (на одиницю потужності); збільшена чисельність обслуговуючого персоналу.

3. 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 спрямована протилежно йому. У самохідних суден цю силу називають упором, вона створюється рушієм, який перетворює механічну енергію первинного двигуна на 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 у 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 рушії тощо.

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

Гребний гвинт складається з 2...6 крилоподібних лопатей, радіально укріплених на ступиці на рівних кутових відстанях одна від одної. У конструктивному вирішенні гвинти бувають трьох типів: з невід'ємними лопатями; з від'ємними лопатями; з регульованим кроком (ГРК).

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 радіусом R , утвореного гвинтом при його обертанні, називають площею диска гвинта. Важливою геометричною характери-

стикою гребного гвинта є дискове відношення Θ – відношення сумарної площі всіх лопатей A до площі диска гвинта:

$$\Theta = 4A / (\pi D^3).$$

Частину лопаті, безпосередньо сполучену зі ступицею, називають коренем лопаті. Поверхню лопаті, звернену при передньому ході судна у напрямку руху, називають засмоктуючою (носовою) стінкою (поверхнею) або спинкою лопаті. Поверхню лопаті, звернену до корми, називають нагнітальною (кормовою) стінкою (поверхнею). Лінію перетину засмоктуючої та нагнітальної поверхонь (стінок) називають кромкою лопаті. Кромку 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. У результаті, по-перше, виникає попутний потік, який зменшує швидкість підтікання води до гвинта, і, по-друге, з'являється сила засмоктування, збільшуючи опір води руху судна.

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

Швидкість попутного потоку Δv виражається у частках швидкості судна за допомогою так званого коефіцієнта попутного потоку ω :

$$\omega = \Delta v / v.$$

Значення ω залежить від форми корпусу судна, розмірів гвинта і зазвичай приймається рівним 0...0,2. Гвинт відносно навколишньої маси води рухається зі швидкістю v_p , яку можна представити як різницю швидкості судна і попутного потоку Δv :

$$v_p = v - \Delta v = v(1 - \omega),$$

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

$$v = v_p / (1 - \omega).$$

Експериментально встановлено, що швидкість попутного потоку на вертикальній лінії диска гвинта більше, ніж у точках горизонтального

діаметра диска. Тому кожна лопать за один обірт потраплятиме у 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, у результаті чого зменшується тиск води на кормову частину судна. Оскільки тиск у носовій частині при цьому залишається незмінним, то є додаткова сила, що діє на корпус судна у напрямку, протилежному його руху. Цю силу називають силою засмоктування (позначимо її через ΔR).

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

$$P = R + \Delta R.$$

Частину упору, що йде на подолання буксирувального опору R , називають корисною тягою P_e . Частину упору, витрачену на подолання сили засмоктування ΔR , позначимо через ΔP . Тоді упор P , створюваний гвинтом, можна представити як суму:

$$P = P_e + \Delta P.$$

Силу засмоктування виражають у частках упору як відношення

$$t = \Delta P / P.$$

Це відношення називають коефіцієнтом засмоктування, значення якого залежить від форми кормового краю судна на відстані гвинта від корпусу судна та режиму роботи і коливається у межах 0,02...0,3. Через коефіцієнт засмоктування повну силу опору можна представити у вигляді

$$P = P_e / (1 - t).$$

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):

$$\eta = N_R / N_P.$$

Оскільки

$$N_R = P_e v,$$

пропульсивний ККД

$$\eta = (P_e v) / M\omega, \quad \eta = \frac{P_{v_p}}{M_\omega} \frac{1-t}{1-\omega},$$

де $(P_{v_p}) / M_\omega = \eta_P$ – ККД ізольованого гвинта; $(1-t)(1-\omega) = \varepsilon_K$ – коефіцієнт впливу корпусу судна, рівний 0,95...1,1. Отже, пропульсивний ККД можна виразити як

$$\eta = \varepsilon_K \eta_P.$$

Нерівномірність потоку води при різних положеннях лопатей гребного гвинта по відношенню до обводів корпусу судна обчислюють, за пропозицією Фруда, вводячи у формулу пропульсивного ККД множник 0,97...1,0. Тоді остаточний вираз для пропульсивного ККД має вигляд

$$\eta = i\varepsilon_K \eta_P.$$

4. МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГВИНТА

Наряду з характеристиками електродвигунів механічні характеристики виконавчих механізмів мають важливе значення для представлення різних режимів роботи електропривода. При проектуванні ГЕУ найбільш цікавими є робочі й реверсивні характеристики гвинта. Як і всі механічні характеристики вони статичні, тобто кожна точка характеристики відповідає "власній" цілком визначеній швидкості судна і визначальній швидкості гвинта.

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

$$M = c\omega^2.$$

Проте насправді така залежність можлива лише на невеликій ділянці робочої характеристики (тобто при незначній зміні швидкості). Якщо ж кутову швидкість гвинта змінювати у 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, у рівнянні коефіцієнт c не буде величиною постійною, а це означає, що строго параболічна залежність не дотримуватиметься.

Розрахунок ГЕУ ґрунтується на використанні наступних характеристик (рис. 2): основної – тієї, що знімається при номінальному осіданні й вільному русі судна у спокійній воді (крива 1); швартовної – тієї, що знімається при нерухомому судні (крива 2). У режимі на швартовах момент опору гребного гвинта буде максимальним. Якщо гребний дви-

гун у цьому режимі розвине номінальну швидкість, то момент M на його валу значно перевищить номінальне значення.

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 – буксирувальну, отриману при ході судна з возом (крива 4). За характером роботи гвинтів у зазначених режимах дві останні характеристики є проміжними між основною і швартовною характеристиками.

Танкери, лісовози і деякі інші судна у зворотній рейс зазвичай ідуть порожніми (або з баластом). При цьому зменшується осадка судна й опір води його руху. Такому режиму відповідає крива 5 (див. рис. 2). За таких самих швидкостей моменти опору на гвинті, який працює по цій кривій, будуть порівняно невеликі, а це означає, що робоча характеристика гвинта при ході судна порожнім у спокійній воді розташована нижче за основну та інші робочі характеристики.

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

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 сплутувати реверс гребного двигуна із реверсом судна, тобто з маневром, під час якого напрям руху судна вперед змінюється на протилежний через зміну 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 вважати, що кожна реверсивна характеристика гвинта відповідає деякому незмінному ходу судна вперед. При роботі у режимі на швартових, тобто коли швидкість судна дорівнює нулю ($v = 0$), гальмівний момент гребного гвинта змінюється у залежності від кутової швидкості і напрямку обертання гвинта по кривій

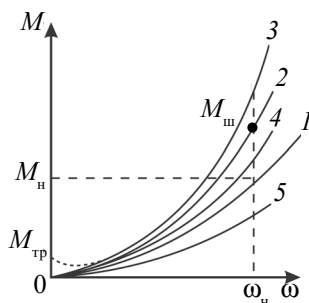


Рис. 2. Нереверсивні характеристики гребного гвинта

2, симетричній відносно початку координат (рис. 3). Вона являє собою швартовну характеристику 2 наведену на рис. 2.

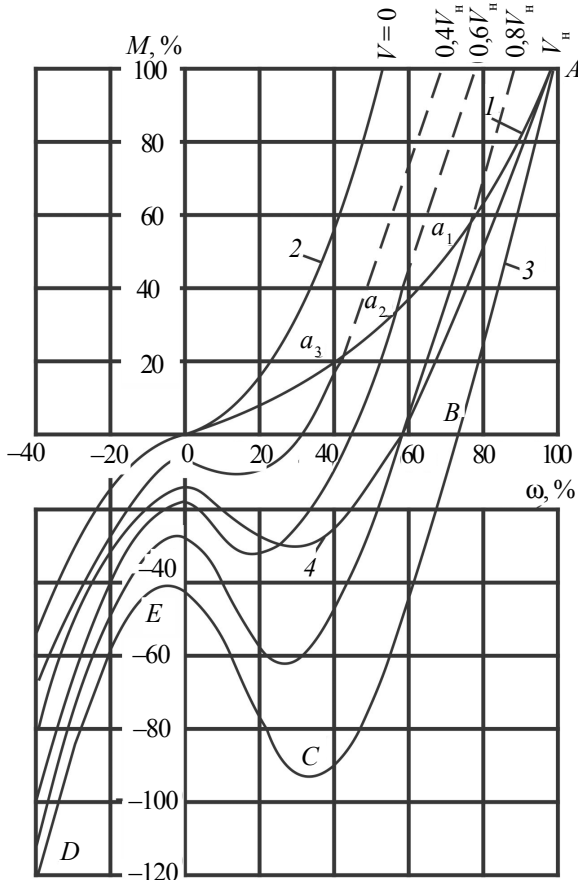


Рис. 3. Реверсивні характеристики гвинта

Крива 3 на рис. 3 відповідає процесу реверса гребного гвинта при постійному повному (v_n) ході судна вперед. Реверсивна характеристика для цього випадку розташовується у трьох квадрантах, причому ділянка AB відповідає роботі гвинта у режимі рушія, ділянка BC – у режимі гідравлічного гальмування. Ця характеристика показує, що після виключення гребного двигуна ($M = 0$) гвинт сповільнюватиметься до швидкості $\omega = 73 \% \omega_n$ (точка B). Щоб загальмувати гвинт до повної зупинки, необ-

хідно прикласти момент, відповідний 96 % M_n при швидкості $\omega_B = 35$ % ω_n (точка *B*). Щоб утримувати гвинт у нерухомому стані, потрібно прикласти момент, рівний 40 % M_n (точка *E*). При розгоні гвинта у зворотний бік (реверс) до швидкості 35 % ω_n був би потрібен момент, рівний номінальному; при розгоні до швидкості 60 % – момент, рівний подвійному значенню номінального моменту.

При швидкості судна вперед $v \leq v_n$ реверсивні характеристики розташовуються аналогічно кривій 3, але починаються вони в точках a_1, a_2, a_3 , розміщених на основній робочій характеристиці 1.

Не дивлячись на те що тривалість процесів реверсу гвинта і судна різна, в реальних умовах швидкість руху судна при реверсі не залишається постійною, до того ж швидкість реверсу гребного двигуна піддається регулюванню за бажанням оператора. У разі значного зниження швидкості судна гвинт працюватиме, поступово переходячи з кривої 3 на криві, відповідні меншим швидкостям. Цей процес на графіку відображено кривою 4.



5. ПОБУДУВАННЯ ІДЕАЛЬНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Залежність частоти обертання ГЕД від його моменту $n_{\text{д}} = f(M_{\text{д}})$ називається механічною характеристикою.

У сталих режимах ГЕД працює при рівності моменту опору гвинта $M_{\text{г}}$ і обертового моменту ГЕД $M_{\text{д}}$. Частота обертання визначається крапкою перетинання механічної характеристики $n_{\text{д}} = f(M_{\text{д}})$ з характеристикою гвинта $M_{\text{г}} = f(n_{\text{г}})$. У залежності від призначення судна й умов плавання характеристика $M_{\text{г}} = f(n_{\text{г}})$ може займати будь-яке проміжне положення від характеристики, відповідної ходу у вільній воді при водотоннажності у порожньому стані, до льодової, а в аварійних режимах (наприклад, при втраті лопатей гвинта чи його стопорінні) – у діапазоні від роботи при $M_{\text{д}} = 0$ до стоянки ГЕД під струмом при $n_{\text{г}} = 0$ (рис. 4).

Механічна характеристика ГЕД повинна виключати тривале неприпустиме перевантаження генераторів і первинних двигунів (ПД), а також обмежувати максимальні момент і частоту обертання. Зона перевантажень за потужністю ПД розташована вище за гіперболу сталості потужності $P_{\text{д,н}} = M_{\text{д}} n_{\text{д}} = \text{const}$.

ГЕД змінного струму мають жорстку природну механічну характеристику (пряма АД на рис. 4, яка обмежує частоту обертання, але не обмежує момент, що може призвести до перевантаження елементів ГЕУ (точки Д, Е). При $n_{\text{г}} = 0$ максимальний момент на гвинті необхідно обмежити значенням $1,5 \dots 3,0 M_{\text{н}}$ (точка Г), що і береться до уваги при проектуванні ГЕД, рушійного комплексу й електропривода.

З метою виключення перевантаження елементів ГЕУ застосовують регулювання параметрів ГЕД для одержання механічної характеристики

ки, наближеної до гіперболи $M_{\text{д}} n_{\text{д}} = \text{const}$. Ідеальна штучна механічна характеристика $n_{\text{д}} = f(M_{\text{д}})$ має вид кривої АБВГ на рис. 4.

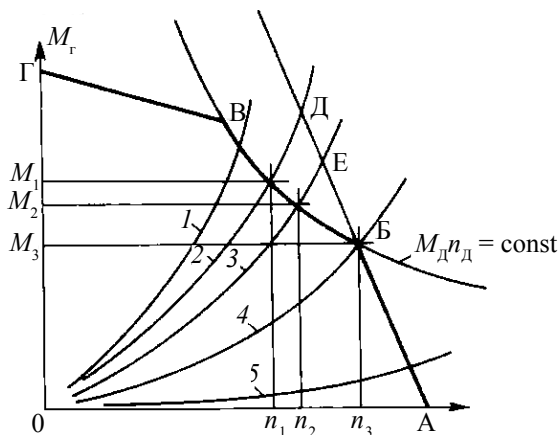


Рис. 4. Механічні характеристики ГЕД і характеристики гвинта:
1 – льодова; 2 – швартовна; 3 – буксирувальна; 4 – при ході у вільній воді;
5 – при втраті лопатей гвинта

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

Побудування ідеальної механічної характеристики ГЕД для судна треба розпочинати з побудування робочих характеристик гребного гвинта, заданих у відносних одиницях [2] і наведених у табл. 2, де $M_{\text{н}}$, $n_{\text{н}}$ – номінальні момент і частота обертання; $M_{\text{с}}$ – момент на гребному валу при ході у вільній воді; $M_{\text{ш}}$ – момент швартовної характеристики; $M_{\text{л}}$ – момент льодової характеристики при обертанні гребного гвинта у дрібнобитому льоді; $M_{\text{в}}$ – момент при "ході з возом"; M_3 – момент реверсивної характеристики при номінальній швидкості ходу судна.

Момент торкання гребного гвинта $M_{\text{тр}} = (0,15...0,25)M_{\text{н}}$.

Для великої кількості суден при побудуванні вибирають залежності моменту опору на гребному гвинті від частоти обертання й умов плавання: характеристику ходу у вільній воді 1 і швартовну характеристику 2 (рис. 5).

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

Таблиця 2. Механічні характеристики гребного гвинта

$\frac{n}{n_n}$	$\frac{M_c}{M_n}$	$\frac{M_{ш}}{M_n}$	$\frac{M_{л}}{M_n}$	$\frac{M_B}{M_n}$	$\frac{M_3}{M_n}$
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			

Розрахунки вартості експлуатації показують, що при будь-якому режимі має максимально використовуватися встановлена потужність головних машин.

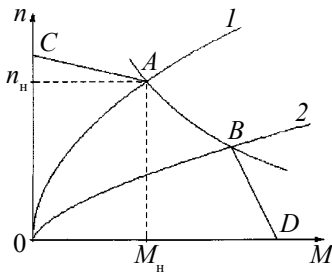


Рис. 5. Побудовання ідеальної механічної характеристики ГЕД

Тому з точки номінального режиму будемо гіперболу сталості потужності за формулою $Mn = M_n n_n$. У результаті отримуємо ділянку AB .

Точку B з'єднуємо з точкою D прямою, а точку A – з точкою C . Відрізок OC дорівнює максимальній припустимій частоті обертання ГЕД (якщо ця величина невідома, то приймають $OC = 1,2 n_n$).

Відрізок OD дорівнює $(1,4 \dots 2,5)M_n$.

Так отримуємо ідеальну механічну характеристику $CABD$.

Точне виконання вимог ідеальної механічної характеристики у ряді випадків призводить до невиправданого подорожчання схеми ГЕУ, тому для деяких електроходів реальна механічна характеристика проходить через дві обрані точки ідеальної характеристики – A і B (див. рис. 5).

Однак основною задачею при проектуванні схеми керування ГЕУ є максимальне наближення реальної механічної характеристики до ідеальної при забезпеченні достатньої надійності й мінімальної вартості використовуваних елементів.

6. 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 розуміння дозволяє пов'язати гідродинаміку пропульсивного комплексу "корпус судна – рушії" з характеристиками гребних двигунів та провести оцінку ходових якостей судна [3].

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

Повний опір руху судна складається з декількох складників:

$$R = R_{F_o} + R_A + R_{AP} + R_{хв} + R_{ф},$$

де R_{F_o} – опір тертя; R_A – опір шороховатості; R_{AP} – опір виступаючих частин; $R_{хв}$ – хвильовий опір; $R_{ф}$ – опір форми.

Опір тертя R_{F_o} між водою та корпусом виникає через в'язкість води. У значній мірі він залежить від характеру руху води у граничному шарі, під яким мається на увазі область рідини, де відносна швидкість миттєво зростає від нульового значення, безпосередньо біля змоченої поверхні судна, до швидкості оточуючого потоку де в'язкість рідини проявляється найбільш суттєво.

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

Число Рейнольда обчислюється за виразом

$$Re = \frac{vL}{\nu},$$

де ν – швидкість судна, м/с; L – довжина судна, м; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с.

Опір виступаючих частин R_{AP} зумовлений наявністю різних структурних формувань, розташованих поза межами гладкого корпусу – керна, акулкових килів, кронштейнів гребних валів тощо.

Створення хвиль під час руху судна викликає хвильовий опір $R_{хв}$.

Опір шороховатостей R_A має природу, спільну з опором тертя, і являє собою додатковий складник, який враховує нерівномірність поверхні корпусу судна.

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

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

$$R_R = R_\phi + R_{хв}.$$

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, безпосередньо пов'язане зі швидкохідністю судна:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}},$$

де v – швидкість судна, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с²; L – довжина судна, м.

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

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

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

Величина хвильового опору зростає зі збільшенням числа Фруда та починає відігравати суттєву роль у повному опорі при значеннях $F_r < 0,15$.

Опір повітря невеликий і при штилі та слабкому вітрі становить 1,5...3 % повного опору. При сильному вітрі воно може досягати 10 % і 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 середовища вода кипить біля поверхні лопатей. Внаслідок цього вода відривається від лопатей, а звільнене середовище заповнюється водяною парою та частками повітря і розчинених у воді газів.

Визначають дві стадії кавітації. Перша – 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, відбувається чисельне зниження упору, моменту і ККД гвинта.

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

Для прикладу розрахунок буксирувальної потужності проводим за методикою, викладеною у [3] на основі головних розмірів судна-прототипу, наведених у табл. 3.

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

$$\begin{aligned}\Omega_O &= LT \left(2 + 1,37 \cdot (\delta - 0,274) \frac{B}{T} \right) = \\ &= 104 \cdot 6,06 \cdot \left(2 + 1,37 \cdot (0,6 - 0,274) \frac{16,6}{6,06} \right) = 2032 \text{ м}^2.\end{aligned}$$

Площа змоченої поверхні з урахуванням площі поверхні виступаючих частин для двогвинтових суден

$$\Omega = 1,03\Omega_0 = 1,03 \cdot 2032 = 2092 \text{ м}^2.$$

Розрахунок залишкового опору проводиться методом, призначеним для серії вітчизняних швидкохідних та середньошвидкісних універсальних суховантажних, контейнерних та трейлерних суден. Характерні особливості суден серії наведено у табл. 4.

Таблиця 3. 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	7,80
5	Осадка	T	м	6,06
6	Коефіцієнт повноти	δ	—	0,60
7	Швидкість максимальна	$V_{\max}$	вуз	14,50

Таблиця 4. Характерні особливості суден серії вітчизняних суховантажів

№ з/п	Характерна особливість	Серія судна	Проектоване суховантажне судно
1	Форма носової оконечності	V, бульб	бульб
2	L/B	4,8...7,0	6,27
3	B/T	2,0...5,0	2,74
4	δ	0,5...0,65	0,6

Коефіцієнт залишкового опору судна визначається у наступній спосіб:

$$C_R = C_R(\delta)k_{L/B}k_{B/T},$$

де $C_R(\delta)$ – значення коефіцієнта залишкового опору для стандартних значень співвідношень основних розмірів судна $L/B = 5,64$ та $B/T = 3,5$, що визначається за діаграмою для суден із бульбоподібною носовою оконечністю; $k_{B/T}$ та $k_{L/B}$ – виправні коефіцієнти, що враховують невідповідність параметрів судна стандартним.

Число Фруда

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} = \frac{7,453}{\sqrt{9,81 \cdot 104}} = 0,233.$$

За діаграмою визначається:

$$C_R \left(\frac{L}{B} = 5,64, Fr \right) = 0,92 \cdot 10^{-3}.$$

Коефіцієнт $k_{L/B}$ впливу невідповідності відношення L/B судна та $L/B = 5,64$ для стандартної серії визначається за допомогою діаграми для визначеного числа Фруда як відношення розрахункового та стандартного:

$$k_{L/B} = \frac{C_R \left(\frac{L}{B}, Fr \right)}{C_R \left(\frac{L}{B} = 5,64, Fr \right)}.$$

За відповідною діаграмою обчислюється

$$C_R \left(\frac{L}{B}, Fr \right) = 0,77 \cdot 10^{-3}.$$

Коефіцієнт впливу невідповідності відношення L/B судна стандартному

$$k_{L/B} = \frac{C_R \left(\frac{L}{B}, Fr \right)}{C_R \left(\frac{L}{B} = 5,64, Fr \right)} = \frac{0,77 \cdot 10^{-3}}{0,92 \cdot 10^{-3}} = 0,837.$$

Значення коефіцієнта $k_{B/T}$, що враховує невідповідність розрахункового відношення $\frac{B}{T}$ судна та $\frac{B}{T} = 3,5$ для стандартної серії, визначається за відповідною діаграмою у залежності від числа Фруда [3]:

$$k_{B/T} = 1,03.$$

$$C_R = C_R(\delta) k_{L/B} k_{B/T} = 0,92 \cdot 10^{-3} \cdot 0,837 \cdot 1,03 = 7,931 \cdot 10^{-4}.$$

Коефіцієнт опору шороховатостей для морських суден довжиною 50...150 м становить $C_A = 0,35 \cdot 10^{-3}$.

Коефіцієнт виступаючих частин для двогвинтових суден із одним кермом у діапазоні коефіцієнтів повноти $0,55 \dots 0,60$ дорівнює $C_{AP} = 0,45 \cdot 10^{-3}$.

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\nu L}{\nu} = \frac{7,453 \cdot 104}{1,61 \cdot 10^{-6}} = 4,814 \cdot 10^8,$$

де $\nu = 1,61 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – кінематичний коефіцієнт в'язкості.

Коефіцієнт опору тертя судна (за формулою Прандля–Шліхтінга)

$$C_{F_o} = \frac{0,455}{(\lg(Re))^{2,58}} = \frac{0,455}{(\lg(4,814 \cdot 10^8))^{2,58}} = 1,726 \cdot 10^{-3}.$$

Коефіцієнт буксирувального опору

$$C = C_R + C_A + C_{AP} + C_{F_o} = 0,77 \cdot 10^{-3} + 0,35 \cdot 10^{-3} + 0,45 \cdot 10^{-3} + 1,726 \cdot 10^{-3} = 3,316 \cdot 10^{-3}.$$

Опір води руху судна

$$R = C \Omega \frac{\rho \nu^2}{2} = 3,316 \cdot 10^{-3} \cdot 2,092 \cdot 10^3 \cdot \frac{1,025 \cdot 10^3 \cdot 7,453^2}{2} = 1,975 \cdot 10^5 \text{ Н},$$

де $\rho = 1,025 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – густина морської води.

Буксирувальна потужність

$$P_E = R \nu = 1,975 \cdot 10^5 \cdot 7,453 = 1,472 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

Опір води руху судна з урахуванням експлуатаційної надбавки

$$R_E = k_E R = 1,2 \cdot 1,975 \cdot 10^5 = 2,37 \cdot 10^6 \text{ Н},$$

де $k_E = 1,2$ – експлуатаційна надбавка для суховантажних суден із $DW < 7000 \text{ т}$.

Буксирувальна потужність із урахуванням експлуатаційної надбавки

$$P_{EE} = R_E \nu = 2,37 \cdot 10^6 \cdot 7,453 = 1,767 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

У якості гребних гвинтів будуть застосовані некавітуючі гвинти серії Троста з шаблеподібною формою контуру та комбінованим профілем

перерізу лопаті, які 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 виконується за допомогою експериментальних діаграм Троста.

Граничне значення діаметра гвинта

$$D_{гр} = 0,7T = 0,7 \cdot 6,06 = 4,242 \text{ м.}$$

Коефіцієнт побіжного потоку для двовалових швидкохідних контейнерних суден ($\delta \leq 0,65$, $\frac{D}{T} = 0,6...0,65$) [3].

$$W_T = 0,09 + 0,14 \cdot (\delta - 0,50) = 0,09 + 0,14 \cdot (0,6 - 0,50) = 0,104.$$

Тяга гребного гвинта

$$T_E = \frac{R}{z_p} = \frac{1,975 \cdot 10^5}{2} = 6,585 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Коефіцієнт діаметра тяги гребного гвинта

$$k_{DE} = vD \sqrt{\frac{\rho}{T_E}} = 7,453 \cdot 4,242 \cdot \sqrt{\frac{1,025 \cdot 10^3}{6,585 \cdot 10^4}} = 3,945.$$

Коефіцієнт засмокування для двовалового контейнеровоза

$$\begin{aligned} t &= 0,15 + 0,53 \cdot (\delta - 0,50) + 0,55 \cdot (k_{DE} - 2,0) = \\ &= 0,15 + 0,53 \cdot (0,6 - 0,50) + 0,55 \cdot (3,942 - 2,0) = 0,31. \end{aligned}$$

Розрахункове значення швидкості на диску гребного гвинта

$$v_A = v(W_T - 1) = 7,453 \cdot (0,104 - 1) = 6,678 \text{ м/с.}$$

Розрахункове значення упору

$$T_B = \frac{R}{z_p(1-t)} = \frac{1,975 \cdot 10^5}{2 \cdot (1 - 0,31)} = 1,431 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

Коефіцієнт навантаження гребного гвинта за упором при сталому діаметрі

$$k_{DT} = v_A D \sqrt{\frac{\rho}{T_B}} = 6,678 \cdot 4,242 \cdot \sqrt{\frac{1,025 \cdot 10^3}{1,431 \cdot 10^5}} = 2,397.$$

Значення $k_{DT} \geq 2$ вказує на необхідність вибору трилопатевих гвинтів.

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

Мінімальне дискове відношення за умовами відсутності другої стадії кавітації

$$\begin{aligned} \left(\frac{A_E}{A_O} \right)'_{\min} &= 0,375 \cdot \left(\frac{c'z}{De_{\max}} \right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{m'T_B}{100000}} = \\ &= 0,375 \cdot \left(\frac{0,06 \cdot 3}{4,424 \cdot 0,08} \right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{1,15 \cdot 1,431 \cdot 10^5}{100000}} = 0,29. \end{aligned}$$

де $c' = 0,06$ – коефіцієнт для латунних гвинтів; $m' = 1,15$ – коефіцієнт, враховуючий зростання навантаження у залежності від умов експлуатації; $e_{\max} = 0,08$ – визначається за діаграмою.

Питоме навантаження

$$p_n = \frac{4T_B}{\pi D^3} = \frac{4 \cdot 1,431 \cdot 10^5}{\pi 4,242^3} = 1,013 \cdot 10^4 \text{ Н/м.}$$

Заглиблення вісі гребного гвинта

$$h_S = \frac{T}{2} = \frac{6,06}{2} = 3,03 \text{ м.}$$

За діаграмою для визначення мінімального дискового відношення

для забезпечення необхідної міцності гвинта $\left(\frac{A_E}{A_O} \right)''_{\min} = 0,13$; з урахуванням 60 % запасу

$$\left(\frac{A_E}{A_O} \right)'''_{\min} = 1,6 \cdot \left(\frac{A_E}{A_O} \right)''_{\min} = 1,6 \cdot 0,13 = 0,208.$$

Отже, мінімальне дискове відношення становить

$$\left(\frac{A_E}{A_O} \right)_{\min} = \max \left(\left(\frac{A_E}{A_O} \right)'_{\min} ; \left(\frac{A_E}{A_O} \right)''_{\min} \right) = \max (0,29; 0,208) = 0,29.$$

За результатами розрахунків обрано гвинт, параметри якого наведені у табл. 5.

Таблиця 5. Параметри гребного гвинта

№ з/п	Параметр	Позначення	Значення
1	Кількість лопатей	z	3
2	Дискове відношення	$\frac{A_E}{A_O}$	0,35
3	Відносна товщина лопаті	$\frac{e_o}{D}$	0,05
4	Відносний діаметр ступиці	$\frac{d_H}{D}$	0,180
5	Шагове відношення	$\frac{P}{D}$	0,5...1,4
6	Кут відхилення лопаті		15°
7	Відносне зменшення шагу гвинта на ступиці		0 %

Розрахунок потужності гребних двигунів виконується на основі гвинтової діаграми В-3-3,5 для $z = 3$, $\frac{A_E}{A_O} = 0,35$.

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

Коефіцієнт навантаження гребного гвинта за упором при сталому діаметрі

$$k_{DT} = v_A D \sqrt{\frac{\rho}{T_B}} = 6,678 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{1,025 \cdot 10^3}{1,431 \cdot 10^5}} = 1,865.$$

Швидкість обертання гвинта

$$n = \frac{v_A}{JD'} \cdot 60 = \frac{6,678}{0,71 \cdot 3} \cdot 60 = 188,11 \text{ об/хв},$$

де $J = 0,71$ – знаходиться за гвинтовою діаграмою.

Коефіцієнт взаємодії з корпусом

$$\eta_K = \frac{1 - t}{i_q (1 - W_T)} = \frac{1 - 0,31}{1 \cdot (1 - 0,104)} = 0,77.$$

ККД гвинта

$$\eta = \eta_K \eta_O = 0,77 \cdot 0,67 = 0,516,$$

де $\eta_O = 0,67$ – визначається за гвинтовою діаграмою.

Потужність на гребних валах

$$P_S = \frac{P_{EE}}{\eta \eta_B} = \frac{1,767 \cdot 10^3}{0,516 \cdot 0,97} = 3,53 \cdot 10^6 \text{ Вт},$$

де $\eta_B = 0,97$ – ККД валопроводу.

Потужність гребних двигунів

$$P_{SN} = \frac{P_S}{0,9} = \frac{3,53 \cdot 10^6}{0,9} = 3,92 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

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, в яких у кінці пуску в обмотку ротора подається постійний струм, що перетворює двигун на синхронний.

Асинхронні двигуни прості за конструкцією, надійні, мають хороші пускові характеристики, тому цілком придатні для ГЕУ. У 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 0,7 мають тихохідні асинхронні двигуни. У ГЕУ при прямому з'єднанні електродвигуна з гребним

валом швидкість обертання мала, не більше 167...200 об/хв, тому електродвигуни мають низький $\cos \phi$.

Деякі виробники використовують асинхронні двигуни на судах із 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 $\cos \phi$ (не нижче 0,83) і ККД порівняним із ККД синхронних двигунів. Іноді один гребний вал приводиться в 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 [1].

Впровадження новітніх технологій в області керування електродвигунами підвищує показники регулювання асинхронних приводів до рівня приводів постійного струму. Окрім цього за рахунок повертання енергії індуктивностей на сторону постійного струму та обміну потужністю між фазами інвертора окремі перетворювачі частоти працюють із коефіцієнтом потужності $\cos \phi = 0,95 \dots 1$, що частково компенсує основний недолік асинхронних двигунів. Це робить доцільним використання асинхронних ГЕД при потужностях до 5...7 МВт [1].

Основна перевага синхронного двигуна – його високий коефіцієнт потужності, що наближається до одиниці. Тому розміри синхронного двигуна менші за розміри синхронного за тієї ж самої активної потужності. При цьому знижуються і розміри генераторів.

Друга перевага синхронного двигуна – наявність великого повітряного зазору. В асинхронному двигуні зі збільшенням повітряного зазору зростає намагнічувальний струм, через що зростає реактивна потужність і падає $\cos \phi$. Тому повітряний зазор у асинхронних двигунах робиться як можна меншим. У синхронного двигуна повітряний зазор значно більший, оскільки на явно виражених полюсах можна укласти необхідну кількість витків для створення достатньої намагнічувальної сили.

При більшому повітряному зазорі зменшуються пульсаційні та поверхневі втрати, що дозволяє зробити на статорі більш широкі пази, збільшити кількість укладеної міді й підвищити лінійне навантаження машини. Більший повітряний зазор полегшує складання машини і допускає більшу просадку вала у підшипниках, що має велике значення для гребних установок, де зазвичай використовуються підшипники ковзання.

Можливість зношення підшипників і опускання вала, а також умови складання лінії вала на судні не дозволяють застосовувати асинхронні двигуни з малим повітряним зазором і високим коефіцієнтом потужності. У створених гребних установках із асинхронними двигунами через великий повітряний зазор коефіцієнт потужності знижено до 0,67. Це призводить до збільшення габаритної потужності самого двигуна приблизно у 1,5 разу, 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, у незначній мірі відмінний від пускового моменту асинхронного двигуна. Пускова короткозамкнена обмотка на роторі дозволяє пускати синхронні двигуни як асинхронні з вмиканням постійного струму в обмотку збудження ротора у кінці пуску. Таким чином, за величиною пускового моменту і пусковим характеристикам синхронні двигуни придатні для ГЕУ.

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

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

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

Використання водометних рушіїв і ГКК із розташуванням ГЕД у корпусі судна дозволяє застосовувати середньошвидкісні двигуни, що значно покращує масогабаритні показники СЕР. Однак, при прямій передачі моменту з ГЕД на гвинт необхідно використовувати низькошвидкісні ГЕД, недоліком яких є великі габарити та насамперед діаметр статора.

Покращити масогабаритні показники можна шляхом використання водяного охолодження ГЕД. Зростання складності системи компенсується зменшенням маси та габаритів обладнання починаючи з потужності 8...10 МВт.

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

За проведеними розрахунками можна обрати гребні синхронні двигуни потужністю 2 МВт, швидкістю обертання 187,5 об/хв.

Момент інерції гвинта за формулою В. В. Копеєцького:

$$J_{\text{ГВ}} = 8,42 \cdot 10^{-6} \gamma D^5 z \frac{b_m}{D} \left(2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{e_o}{D} \right) + 4,18 \right) + 1,475 \cdot 10^{-4} \gamma l_o D^4 =$$

$$= 8,42 \cdot 10^{-6} \cdot 8,4 \cdot 10^3 \cdot 3^5 \cdot 3 \cdot 0,23 \cdot (2 \cdot 10^3 \cdot 0,05 + 4,18) +$$

$$+ 1,475 \cdot 10^{-4} \cdot 8,4 \cdot 10^3 \cdot 1000 \cdot 3^4 = 3336 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

де $\gamma = 8,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – густина латуні; $\frac{b_m}{D} = 0,23$ – відносна ширина лопаті; $l_o = 1 \text{ м}$ – довжина ступиці.

Зовнішній діаметр валопроводу

$$d_{\text{ВП}} = 35 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,06 P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}}} = 35 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,06 \cdot 2000}{187,5}} = 300 \text{ мм.}$$

Внутрішній діаметр валопроводу

$$d'_{\text{ВП}} = 0,3 d_{\text{ВП}} = 0,3 \cdot 300 = 100 \text{ мм.}$$

Момент інерції валопроводу

$$J_{\text{ВП}} = \frac{\pi \gamma l_{\text{ВП}}}{2} \cdot \left(\left(\frac{d_{\text{ВП}}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d'_{\text{ВП}}}{2} \right)^2 \right) =$$

$$= \frac{\pi 7800 \cdot 5}{2} \cdot \left(\left(\frac{300}{2000} \right)^2 - \left(\frac{100}{2000} \right)^2 \right) = 980 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції синхронного гребного двигуна потужністю 2 МВт

$$J_{\text{д}} = 1550 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ [1].}$$

Сумарний момент інерції

$$J_{\Sigma} = J_{\text{ГВ}} + J_{\text{ВП}} + J_{\text{д}} = 3336 + 980 + 1550 = 5866 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Отримане значення моменту інерції використовується при моделюванні роботи гребної установки.

7. ВИБІР ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕУ

Проектування ГЕУ вимагає послідовного вибору: типу ГЕУ; роду струму, значення напруги і частоти; числа і потужності гребних електродвигунів; оптимальної швидкості гребних двигунів; головних генераторів; схеми й основних апаратів головного розподільного пристрою; допоміжних механізмів для особистих потреб ГЕУ.

Вибір типу ГЕУ. Тип ГЕУ вибирають шляхом порівняння статичних даних за параметрами гребних установок або приблизних розрахунків цих параметрів.

ДЕГУ мають перевагу за невеликих потужностей, оскільки в цьому випадку мають, порівняно з ТЕГУ, менші масу і вартість, більшу компактність, ККД, живучість і відрізняються швидшою готовністю до пуску. ТЕГУ напроти переважають за великих потужностей, оскільки в цьому випадку вони мають меншу масу і вартість, компактніші і довговічніші.

Вибір роду струму, значення напруги і частоти. Постійний струм переважає змінний у 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 та простота обслуговування.

Напругу визначено для ГЕУ Правилами Регістра судноплавства України: номінальна напруга головних кіл ГЕУ постійного струму не більша за 1200 В; номінальна лінійна напруга головних кіл ГЕУ змінного струму не більша за 7500 В; номінальна напруга збудників ГЕУ не більша за 230 В; напруга кіл управління, сигналізації, захисту не більша за 220 В постійного струму і 380 В змінного струму.

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

У Правилах Регістра судноплавства України рекомендується для основного режиму роботи ГЕУ обирати стандартну частоту 50 Гц.

Визначення оптимальної швидкості гребних двигунів. Одночасно з розрахунком потужності на валу гребного двигуна визначають його кутову швидкість ω , 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 стає економія палива при повному ході судна, отже оптимальну швидкість гребного двигуна для них раціонально визначати за умови здобуття максимального ККД гребної установки [3]. Найбільш просто номінальна швидкість гребного електродвигуна визначається точкою перетину характеристики гвинта $N_p = f(\omega)$ в основному режимі з прямою $P_d = \text{const}$.

Вибір головних генераторів. Конструктивне виконання корпуса головних генераторів має бути брызкозахищеним або водозахищеним із вентиляцією по замкнутому або розімкненому циклу.

Число головних генераторів буде вибрано правильно за умови забезпечення високого ККД установки та її невеликої вартості, простоти обслуговування і надійності роботи.

Потужність головних генераторів визначають за потужністю гребних електродвигунів і числом генераторів. Швидкість генераторів вибирають відповідно до швидкості первинних двигунів.

8. СТАТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ В ГЕУ

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 дозволило створювати судна з повноцінною об'єднаною електроенергетичною установкою. Але, незважаючи на це, підприємствами СНГ до недавнього часу не було збудовано жодного такого судна.

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

До останнього часу БПЧ (рис. 6) використовувалися у системах електрорушіння значно частіше, ніж СПЧ із ланкою постійного струму. Це пояснювалося більш високим ККД БПЧ. У БПЧ без використання додаткових схемних засобів можна забезпечувати найбільш економічне гальмування ГЕД. За масогабаритними показниками БПЧ, не дивлячись на більшу кількість вентилів у силовій схемі, мали перевагу над СПЧ із ланкою постійного струму на базі автономних інверторів на венти-

лях, які не зачиняються. Це пов'язано з використанням природної комутації вентилів у БПЧ, у той час, як у інверторах на незапірних вентилях необхідно використовувати пристрої для примусової комутації, суттєво знижуючи масогабаритні показники.

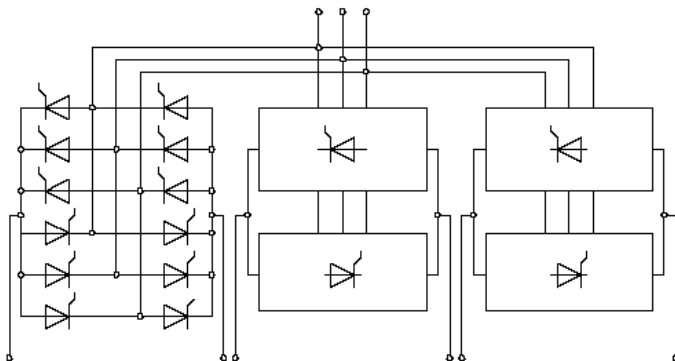


Рис. 6. БПЧ із мостовими вентильними групами

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

Через застосування природної комутації вентилів БПЧ мають низький коефіцієнт потужності, який сильно залежить від навантаження ГЕД. При регулюванні вихідної напруги вниз від номінального значення він різко знижується. Так, при номінальному значенні коефіцієнта потужності 0,7 установки з синхронним двигуном ($\cos \varphi = 1$) при потужності ГЕД нижче за 0,1 від номінальної величини він знижується до 0,2...0,3. Коефіцієнт потужності стає ще меншим, якщо в ГЕУ встановлено ГЕД асинхронного типу.

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

Слід також зазначити необхідність використання, у випадку звертання до БПЧ, синхронних ГЕД спеціального виконання з ізольованими фазами, а також розгалуженої силової схеми, через що виникає необхідність у використанні більшої кількості силових вентилів і складнішої системи керування. Окрім цього, вихідна частота БПЧ у більшості випадків обмежена $1/2...1/3$ від вхідного значення.

Придатність БПЧ для подальшого використання можна покращити шляхом підвищення числа фаз, використанням розв'язуючих мотор-генераторів та встановленням трансформаторів спектра.

Поява нового покоління напівпровідникових елементів, які мають високі швидкодію і граничне значення комутованої потужності за дуже малої потужності керування, суттєво змінює ситуацію в напівпровідниковій техніці.

Поява IGBT-транзисторів із високими характеристиками призвела до витіснення традиційних (SCR) тиристорів із пристроями потужністю до 1 МВТ. У приводах потужністю понад 1 МВТ знаходять використання запірні (GTO) тиристири з комутованою напругою, вищою за 4,5 кВ. Однак, вже у близькому майбутньому в силовому приводі можуть бути використані запірні вентиля нового покоління, до яких слід віднести польові транзистори, керовані структурою "метал-оксид-напівпровідник" (MOSFET), і запірні тиристири з польовим керуванням (MCT).

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

Переваги автономних інверторів при використанні запірних вентилів нового покоління стають очевидними. Висока швидкість перемикання дозволяє у повній мірі використовувати переваги ШІМ, отримуючи вихідну напругу з мінімальними спотвореннями. Створення комутацій на частоті 16 кГц і вище розв'язує проблему акустичних шумів. Дозволяє зменшити масу та габарити фільтрів вищих гармонік. За великої потужності частоти комутації та 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 зі 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 із 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 у тих випадках, коли є можливість спожити рекуперовану енергію. Окрім цього, як показує практика, у ряді випадків використання рекуперативного гальмування значно затягує процеси гальмування та реверсу ГЕД. Також у великій кількості випадків, коли на судах використані ГКК, реверс гвинта виконується не реверсом двигуна, а розворотом колонки.

9. ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

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

За потужностей ГЕД, більших за 1 МВт, використання тихохідних синхронних двигунів сприяє зменшенню масогабаритних показників установки у порівнянні з використанням швидкохідних асинхронних двигунів, які 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 є інвертор на з'єднаних за мостовою схемою IGBT-модулях – повністю керованих вентилях на біполярних транзисторах із ізольованим затвором. Низький вплив на судову мережу забезпечується використанням перетворювачів із некерованими випрямлячами. У якості перетворювачів можна застосовувати частотні перетворювачі морського виконання виробництва ABB серії ACS-800-07.

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

Потужність генератора визначається за формулою

$$P_{\Gamma} = \frac{m_{\text{д}} P_{\text{д}} + P_{\text{сп}}}{m_{\Gamma} \eta_{\text{д}} \eta_{\text{п}}} \text{ кВт},$$

де P_d – потужність гребного двигуна; $P_{сп}$ – потужність, яка споживається загально судновими споживачами у аварійному режимі; m_d – кількість гребних двигунів; m_g – кількість генераторів; η_d – ККД двигуна; $\eta_{п}$ – ККД перетворювача частоти.

Напруга головних машин ГЕУ може бути прийнята рівною 220 (230), 380 (400), 660 (690), 3000 (3150), 6000 (6300), 7500 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 ланцюга головного струму автономної ДЕГУ показана на рис. 7.

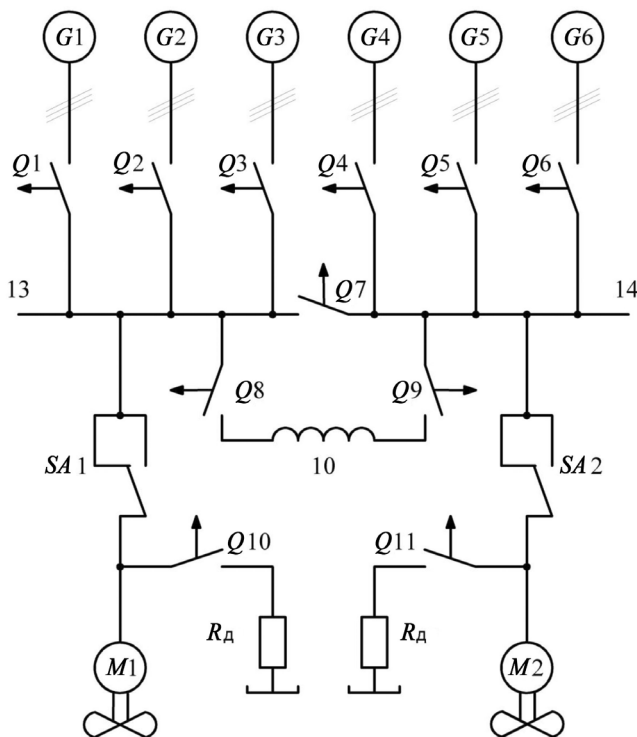


Рис. 7. Схема головного струму ДЕГУ

Сумарна потужність генераторів дорівнює потужності гребних електродвигунів з урахуванням втрат та судових споживачів.

Вимикачі $Q1 \dots Q6$ служать для включення генераторів, вимикач $Q7$ – для рівнобіжного з'єднання шин 13 і 14 та рівнобіжної роботи генераторів правого і лівого борту. При включенні генераторів правого і лівого бортів на рівнобіжну роботу під навантаженням застосовується метод грубої синхронізації через реактор 10. Для цього включаються вимикачі $Q8$ і $Q9$ реактора при розімкненому вимикачі $Q7$. Після синхронізації двох систем вимикач $Q7$ замикається. $SA1, SA2$ – реверсивні перемикачі ГЕД. $Q10, Q11$ – вимикачі опорів динамічного гальмування.

У ГЕУ змінного струму використовуються двигуни синхронні й асинхронні (короткозамкнені з фазним ротором і з переключенням числа пар полюсів). Асинхронні ГЕД, особливо з короткозамкненим ротором, конструктивно прості, надійні, мають гарні пускові характеристики і тому цілком прийнятні для ГЕУ. При прямому з'єднанні електродвигуна з гребним валом частота обертання мала, не більше за 150...200 об/хв, тому електродвигуни мають низький коефіцієнт потужності, який знижується іноді до 0,67. Це викликає збільшення повної потужності самого ГЕД приблизно у 1,5 рази у порівнянні з повною потужністю синхронних ГЕД тієї ж активної потужності. У такому ж відношенні збільшується повна потужність живильних генераторів.

Синхронні двигуни мають пускову короткозамкнену обмотку, яка створює досить великий пусковий момент, незначно відмінний від пускового моменту асинхронного двигуна. Пускова короткозамкнена обмотка на роторі дає можливість здійснювати асинхронний пуск синхронного двигуна. Наприкінці асинхронного пуску обмотка збудження ротора підключається до збудника постійного струму. Основна перевага синхронного ГЕД – високий коефіцієнт потужності рівний одиниці. Тому розміри синхронного двигуна менші за розміри асинхронного за тієї ж активної 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 кочення, з малим повітряним зазором і 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 й зручності розміщення, застосовувати швидкохідні асинхронні ГЕД із

редуктором на підшипниках гойдання. За великих потужностей – синхронні тихохідні ГЕД, які з'єднуються безпосередньо з гребним валом.

Генератори змінного струму. Частота обертання синхронних генераторів залежить від теплових двигунів: у дизель-генераторів вона дорівнює 750...1500 об/хв, а у турбогенераторів – 3000 об/хв і більше. Генератори мають захищене виконання, часто з одним підшипником (другий підшипник є загальним для генератора і теплового двигуна або вихідного вала механічної передачі), примусову вентиляцію з повітроохолоджувачами чи самовентильацію по замкнутому циклу також із повітроохолоджувачами.

Правила Регістра допускають застосування в ГЕУ змінного струму стандартних напруг, які не перевищують 7,5 кВ. Більш висока напруга в кожному окремому випадку вимагає узгодження з Регістром.

Схеми головного струму сучасних суден і параметри суднових генераторів подані у Додатку.

10. РОБОТА ГРЕБНОЇ УСТАНОВКИ З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ У ЧАСТКОВИХ РЕЖИМАХ

З економічних міркувань при використанні судна може виникнути потреба у забезпеченні тривалого періоду руху зі зниженою швидкістю. У цьому випадку зменшуються витрати палива на одиницю пройденної відстані порівняно з повним ходом, оскільки потужність, необхідна для ходу судна, приблизно пропорційна кубу швидкості. Звісно, при цьому збільшується тривалість рейсу. Іноді такий режим виявляється доцільним, адже вартість палива складе основну частину експлуатаційних витрат. Такі режими ходу називаються економічними.

Швидкість судна може бути зниженою на тривалий час через штормову погоду, несправності одного з теплових двигунів, зупинки його для профілактичного огляду та ремонту на ходу та значно рідше – через несправності електричного обладнання.

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

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

Особливістю роботи ГЕУ змінного струму з перетворювачами частоти у парціальних режимах є відсутність потреби знижувати швидкість обертання інших генераторів при відключенні частини генераторних агрегатів, а отже момент, який може бути отриманий на гребному валу при використанні m генераторів з $m_{\text{н}}$ (з розрахунку на один вал), складатиме

$$\frac{M}{M_{\text{н}}} \sim \left(\frac{m}{m_{\text{н}}} \right)^{2/3}.$$

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

$$\frac{M}{M_{\text{н}}} \sim \frac{m}{m_{\text{н}}}.$$

Як відомо, момент на гребному валу пропорційний квадрату швидкості обертання гвинта, а потужність, розвинена гребним двигуном, – її кубу. Приймавши за базис номінальні значення та скориставшись умовними одиницями, можна записати наступне:

$$M = \omega^2, \quad P_{\text{д}} = \omega^3.$$

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

$$P_{\text{г}} = \frac{m}{m_{\text{н}}} f.$$

За відомих припущень можна вважати, що

$$P_{\text{г}} = P_{\text{д}}; \quad \frac{m}{m_{\text{н}}} f = \omega^3.$$

З урахуванням рівнозначності f та ω матимемо:

$$\frac{m}{m_{\text{н}}} f = f^3; \quad f = \sqrt{\frac{m}{m_{\text{н}}}}; \quad M = \frac{m}{m_{\text{н}}}.$$

Для установок із перетворювачами частоти, де частота обертання генераторів залишається постійною, аналогічно можна записати, що

$$P_{\Gamma} = \frac{m}{m_{\text{н}}}; \quad P_{\Gamma} = P_{\text{д}}; \quad \frac{m}{m_{\text{н}}} = \omega^3;$$
$$\frac{m}{m_{\text{н}}} = f^3; \quad f = \sqrt[3]{\left(\frac{m}{m_{\text{н}}}\right)}; \quad M = \left(\frac{m}{m_{\text{н}}}\right)^{2/3}.$$

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

$$P = M \cdot \omega = \left(\frac{m}{m_{\text{н}}}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{m}{m_{\text{н}}}\right)^{1/3} = \frac{m}{m_{\text{н}}}.$$

Отримане значення повністю підтверджує виведені залежності.

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

Для остаточного визначення парціальних режимів установки треба розглянути залежність зміни напруги двигуна від кількості працюючих генераторів. У ГЕУ з перетворювачем частоти напруга на клеммах генераторів завжди номінальна, в установках без перетворювача – змінюється зі зміною режиму ходу.

Прийнявши $\cos(\varphi) = 1$, можна записати в умовних одиницях:

$$U = \frac{P}{I}.$$

Для звичайних установок

$$I = M = \frac{m}{m_{\text{н}}};$$
$$U = \frac{m}{m_{\text{н}}} f / \frac{m}{m_{\text{н}}} = f.$$

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

Для установок із перетворювачами

$$I = M = \frac{m}{m_{\text{н}}}^{2/3};$$

$$U = \frac{m}{m_{\text{н}}} / \frac{m}{m_{\text{н}}}^{2/3} = \frac{m}{m_{\text{н}}}^{1/3} = f.$$

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

Отримані результати свідчать 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 із об'єднаною енергетичною установкою слід враховувати також сталу частину споживаної потужності, спрямовану 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 стосується заміни номінальних кількостей генераторів потужністю, направленою до ГЕД у парціальному режимі,

$$\frac{f}{f_{\text{н}}} = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{дн}}}}; \quad \frac{M}{M_{\text{н}}} = \left(\frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{дн}}} \right)^{2/3}.$$

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.

11. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА (АД) ПРИ ЗМІНІ ЧАСТОТИ МЕРЕЖІ ТА КОВЗАННЯ РОТОРА

Параметри (АД) знаходимо за Т-подібною схемою заміщення, наведеною на рис. 8, де на поданому рисунку E_1 , U_1 , I_1 , r_1 , x_1 – параметри первинного кола (статора); E'_2 , I'_2 , r_2 , x_2 – параметри вторинного кола (ротора); I_m , x_m – коло намагнічування.

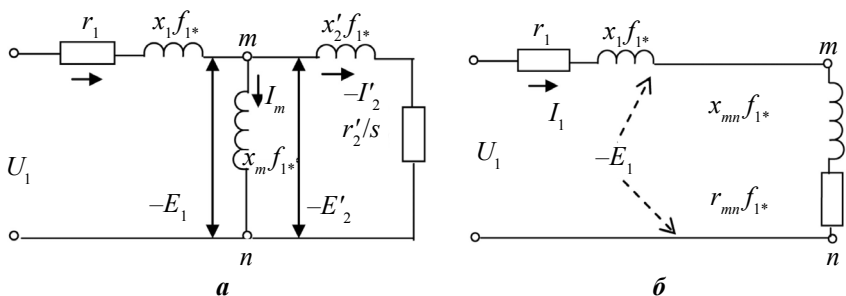


Рис. 8. Т-подібна схема заміщення АД:

a – первинна; *б* – перетворена

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

$$\begin{aligned} r'_2 &= k_e^2 r_2; & I'_2 &= I_2 / k_e; \\ x'_2 &= k_e^2 x_2; & E'_2 &= E_2 k_e; \end{aligned}$$

де k_e – коефіцієнт трансформації АД.

Усі реактивні опори пропорційні відноській частоті змінного струму джерела живлення:

$$f_1^* = f_1' / f_{1н}'$$

де f_1' – реальна частота суднової мережі; $f_{1н}'$ – номінальна частота суднової мережі.

Ковзання ротора

$$S = \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_2 f_{1н}}{f_{1н} f_1} = \frac{f_2^*}{f_1^*},$$

де f_2 – частота струму ротора.

Використання Г-подібної 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-подібною схемою заміщення опору ділянки між крапками m і n :

$$Z_{mnf} = \frac{Z_m Z_2'}{Z_m + Z_2'} = Z_{mn} f_1^* = (r_{mn} + jX_{mn}) f_1^*,$$

де $Z_m = jX_m f_1^*$; $Z_2' = r_2' f_1^* / f_2^*$;

$$r_{mn} = \frac{X_m^2 r_2'}{Z_{2m}^2 f_2^*};$$

$$X_{mn} = \frac{1}{Z_{2m}^2} \left[X_m \left(\frac{r_2'^2}{f_2^{2*}} + X_2'^2 \right) + X_2' X_m^2 \right],$$

де $Z_{2m}^2 = r_2'^2 / f_2^{2*} + (X_m + X_2')$.

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

$$P_{ем} = m_1 I_1^2 r_{mn} f_1^*.$$

Електромагнітний момент ГЕД:

$$M = \frac{P_{ем}}{\Omega_1} = \frac{m_1 I_1^2 r_{mn} f_1^*}{\Omega_1 f_1^*} = \frac{pm_1 I_1^2 r_{mn}}{2\pi f_{1н}} \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де $I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + f_1 * r_{mn})^2 + f_1^2 * (X_1 + X_{mn})^2}}$; p – число пар полюсів;

Ω_1 – частота обертання ГЕД.

Якщо m_d ГЕД одержує живлення від m_r паралельно включених генераторів, то приведені до одного генератора опори навантаження мають вигляд у відносних одиницях:

$$r_n = \frac{m_r}{m_d Z_6} (r_1 + f_1 * r_{mn});$$

$$X_n = \frac{m_r}{m_d Z_6} f_1 * (X_1 + X_{mn}),$$

де $Z_6 = U_n / I_n$ – базисний опір; U_n, I_n – номінальні значення фазних напруги і струму.

12. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИНХРОННОГО ДВИГУНА (СД) ПРИ ЗМІНІ ЧАСТОТИ І КОВЗАННЯ

Синхронний двигун у асинхронному режимі замінюється двома схемами заміщення по поздовжній d і поперечній q осях (рис. 9, **а, б**).

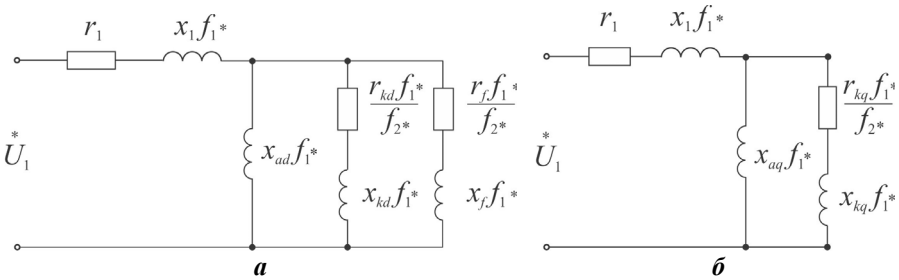


Рис. 9. Схема заміщення СД:
 a – по вісі d ; $б$ – по вісі q

На рис. 9 подано: r_1, x_1 – активні й 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 та індуктивний опори пускової (заспокійливої) обмотки по поздовжній і поперечній осях.

Момент і струм СД, що працює в асинхронному режимі, визначається за схемою заміщення (рис. 10), яка не відрізняється від перетвореної схеми заміщення АД (див. рис. 8, **б**).

На рис. 8, **б** $r_{mn} = (r_{mnd} + r_{mnq}) / 2$; $x_{mn} = (x_{mnd} + x_{mnq}) / 2$;

$$Z_{mnd} = r_{mnd} + jx_{mnd} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{aq}} + \frac{1}{\frac{r_{kq}}{f_*^2} + jx_{kq}} + \frac{1}{\frac{r_f}{f_*^2} + jx_f}},$$

де r_f, x_f – активний та індуктивний опори замкнутої обмотки збудження (з розрядним опором включно):

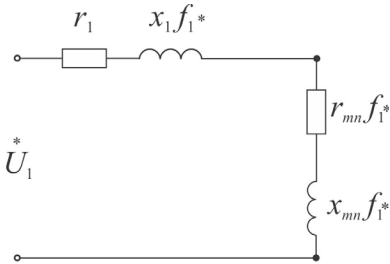


Рис. 10. Перетворена схема заміщення СД

$$Z_{mnq} = r_{mnq} + jx_{mnq} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{aq}} + \frac{1}{\frac{r_{kq}}{f_2^*} + jx_{kq}}}.$$

Визначимо електромагнітну потужність СД:

$$P_{\text{ем}} = m_1 I_1^2 r_{mn} f_{1*}.$$

Визначимо електромагнітний момент СД:

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{\Omega_1} = \frac{m_1 I_1^2 r_{mn} f_{1*}}{\Omega_1 f_{1*}} = \frac{p m_1 I_1^2 r_{mn}}{2\pi f_{1H}} \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де $I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + f_{1*} r_{mn})^2 + f_{1*}^2 (X_1 + X_{mn})^2}}$, p – число пар полюсів;

Ω_1 – частота обертання ГЕД.

Якщо m_d ГЕД отримує живлення від m_r паралельно включених генераторів, то приведені до одного генератора опори навантаження мають вигляд у відносних одиницях:

$$r_n = \frac{m_r}{m_d Z_6} (r_1 + f_{1*} r_{mn}), \quad X_n = \frac{m_r}{m_d Z_6} f_{1*} (X_1 + X_{mn}),$$

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

13. РОЗРАХУНОК СТРУМУ І НАПРУГИ СГ У СТАТИЦІ

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

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

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 x_{ad}, x_{aq} ; характеристика холостого ходу (СГ).

Характеристику холостого ходу креслимо у два рази: перший раз її виконуємо в абсолютних одиницях; другий раз – у відносних (базова напруга – номінальна, а базовий струм збудження знаходимо на рис. 11 за характеристикою холостого ходу без урахування насичення (спрямлена характеристика).

Коефіцієнт насичення магнітної системи по поздовжній осі

$$C_0 = ab / al < 1.$$

Розрахунок виконуємо у відносних одиницях.

Розглянемо основні відношення для синхронного генератора, які впливають із векторної діаграми Блонделя (рис. 12).

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

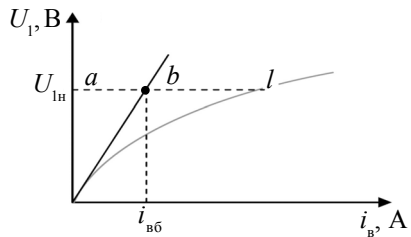
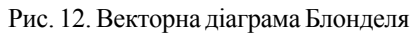


Рис. 11. Характеристика холостого ходу в абсолютних одиницях


$$E_{aq} = I_1 x_{aq} f_1^* = I_1 q x_{aq} f_1^* \cos \psi.$$
$$a\vartheta \equiv I_1 q x_{aq} f_1^* = E_{aq} / \cos \psi.$$
$$\begin{aligned}\sin \psi &= \frac{f_1^*(x_n + x_q)}{\sqrt{(r_n + r_1)^2 + f_1^{2*}(x_n + x_q)^2}}; \\ \cos \psi &= \frac{r_n + r_1}{\sqrt{(r_n + r_1)^2 + f_1^{2*}(x_n + x_q)^2}}.\end{aligned}$$
$$E_{id} \equiv om = on + nm.$$

Відрізок on отримуємо із трикутника Δonc :

$$On \equiv I_1(r_1 + r_n) \cos \psi,$$

а відрізок nm – з Δakc :

$$nm = ak \equiv I_1(x_n + x_1) f_1^* \sin \psi.$$

У результаті маємо:

$$E_{id} = I_1 [(r_1 + r_n) \cos \psi + (x_n + x_1) f_1^* \sin \psi].$$

Припустимо, що на характеристиці холостого ходу СГ струм намагнічування заданий відрізком OA (рис. 13), а ЕРС холостого ходу – відрізком AP . СГ навантажений активно-індуктивним струмом і тому розмагнічується.

Величина сили розмагнічуючого якоря по повздовжній осі

$$F_{ad} \equiv AB = C_0 I_1 f_1^* x_{ad} \sin \psi$$

на характеристиці холостого ходу зображена відрізком $AB = CD$.

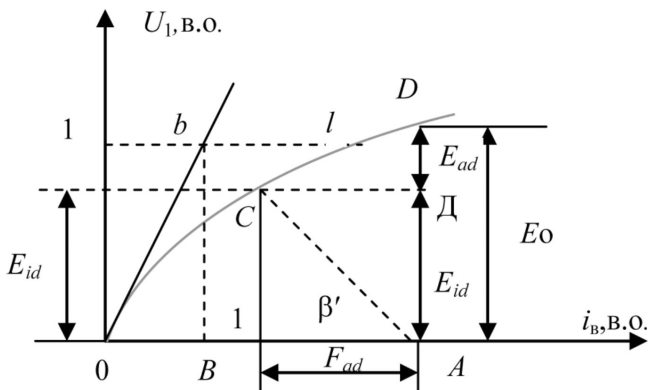


Рис. 13. Характеристика холостого ходу у відносних одиницях

Відзначимо, що

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{m_F E_{id}}{m_E F_{ad}} = \frac{m_F [(r_n + r_1) \cos \psi + (x_n + x_1) f_1^* \sin \psi]}{m_E \omega f_1^* x_{ad} \sin \psi}.$$

Кут β' визначається через параметри генератора і навантаження з урахуванням масштабів ЕРС (m_E) і намагнічуючої сили (m_F).

При проектуванні ГЕУ змінного струму розглядаються два завдання:

1. Розрахунок напруги СГ при заданому струмі збудження.
2. Розрахунок струму збудження за заданою напругою або за заданим струмом навантаження СГ.

Для отримання напруги СГ на характеристиці холостого ходу відмічаємо намагнічуючу силу збудження відрізком OA , у точці A проводимо під кутом β' пряму AC до перетину з характеристикою холостого ходу. Відрізок BA дорівнює розмагнічуючій силі реакції якоря по повдовжній осі d , і тому фазний струм СГ дорівнює:

$$I_1 = F_{ad} / (C_0 f_1^* x_{ad} \sin \psi).$$

Напруга СГ

$$U_1 = I_1 \sqrt{r_n^2 + x_n^2 f_1^{*2}},$$

де r_n, x_n – активний та індуктивний опори навантаження.

Якщо задано фазну напругу СГ, то можна розрахувати фазний струм I_1 , отримуємо НС реакції якоря по повдовжній осі F_{ad} і внутрішню ЕРС по повдовжній осі E_{id} .

Позначаємо відрізком BP ЕРС E_{id} і від отриманої крапки B вправо відкладаємо намагнічуючу силу реакції якоря. Відрізок OA дорівнює струму збудження СГ, який треба було знайти.

14. РОЗРАХУНОК РОЗМАГНІЧУЮЧОЇ СИЛИ, НЕОБХІДНОЇ ДЛЯ ФОРСУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ

Розрахунок намагнічуючої сили (НС) ведеться для трьох випадків: входження у синхронізм, для пуску ГЕД і при перевищенні максимального моменту M_m на реверсивній характеристиці. Частота живлення ГЕД при цьому складає 10...15 Гц.

Для надійного входження у синхронізм підсинхронний момент при ковзанні ротора синхронного ГЕД $S = f_2 / f_1 = 0,05$ повинен у 1,25 разу перевищувати момент опору M_0 при тому ж ковзанні, тобто

$$1,25M_0 = \frac{pm_1 I_1^2 r_{mn}}{2\pi f_n}.$$

Величина фазного струму ГЕД при $S = 0,05$

$$I_1 = \sqrt{\frac{2,5\pi f_{1n} M_0}{pm_1 r_{mn}}}.$$

За струмом розраховуємо значення НС генератора $F1$.

Для надійного пуску ГЕД необхідно, щоб пусковий момент у 1,25 разу перевищував момент опору (достатньо $0,25 M_n$). Тоді величина струму ГЕД при $S = 1$:

$$I_1 = \sqrt{\frac{0,5\pi f_{1n} M_n}{pm_1 r_{mn}}}.$$

За цим струмом визначаємо необхідну НС генератора $F2$.

Для надійного реверса необхідно, щоб електромагнітний момент ГЕД у 1,2 разу перевищував момент опору $M_{\max}$ на ділянці "горба" реверсивної характеристики (точка C на рис. 3). Сила струму у цьому випадку

$$I_1 = \sqrt{\frac{2,4\pi f_{1H} M_{\max}}{p m_1 r_{mn}}}.$$

За цим струмом визначаємо НС генератора $F3$.

Із трьох отриманих значень НС – $F1$, $F2$ і $F3$ – візьмемо найбільше значення і використаємо його в ГЕУ без зміни для всіх трьох розглянутих випадків.



15. ДИНАМІЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ СИНХРОННОГО ГЕД

При динамічному гальмуванні ГЕД відключається від суднової мережі, статорна обмотка включається на опір динамічного гальмування, значення якого із практики наступне:

$$r_T = 0,15 \frac{U_{1H}}{I_{1H}}.$$

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

$$M = \frac{m_1 I_1^2 (r_T + r_1)}{2\pi n},$$

де n – частота обертання ГЕД, об/с; r_1 – активний опір фази ГЕД; m_1 – кількість фаз ГЕД; I_1 – струм фази ГЕД (визначається за методом В. Т. Касьянова за заданим значенням струму збудження).



16. ПУСК ГЕД ЗМІННОГО СТРУМУ

Синхронні ГЕД пускаються при незбуджених генераторах замиканням вимикачів ланцюга 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 за величину, обумовлену залежністю $U = U_{н} f_1^*$. Внаслідок цього асинхронний момент може виявитися меншим за момент опору при пуску з місця. Для збільшення пускового моменту в період усього пуску форсирується збудження генератора. У ГЕУ допускається збільшення струму збудження генераторів у 3...5 разів відносно струму холостого ходу.

На рис. 14 крива 1 – механічна асинхронна характеристика ГЕД при номінальному струмі збудження, крива 2 – при форсируванні збудження, крива 3 – швартовна характеристика.

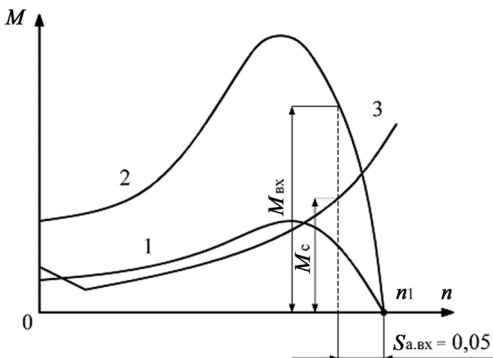


Рис. 14. Пуск ГЕД змінного струму

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

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

Підсинхронним (вхідним моментом) називається асинхронний момент наприкінці асинхронного пуску при абсолютному ковзанні 5 %. Абсолютне ковзання при входженні у синхронізм

$$S_{a.bx} = \frac{n_1 - n}{n_{1H}} = 0,05,$$

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

А відносне ковзання, відповідне підсинхронній швидкості, наступне:

$$S_{bx} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

або

$$S_{bx} = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot \frac{n_{1H}}{n_{1H}} = \frac{n_1 - n}{n_{1H}} \cdot \frac{1}{n_1/n_{1H}} = \frac{S_{a.bx}}{n_1/n_{1H}} = \frac{S_{a.bx}}{f_{1*}}.$$

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

$$S_{bx} = \frac{0,05}{25/50} = \frac{0,05}{0,5} = 0,1.$$

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

У більшості випадків виявляється, що не тільки при номінальній частоті, але і при частоті, відповідній швидкості обертання $n_{ш}$ на швартовній характеристиці (рис. 14), необхідний вхідний момент значно менший за момент обертання, який електродвигун може розвинути при найбільшому перезбудженні генератора. Тому пуск виконується при зниженій частоті, обумовленій найменшою стійкою швидкістю теплового двигуна (15 Гц).

При частоті пуску f_n , після синхронізації ГЕД обертається зі швидкістю n_n , і гребний гвинт працює у точці C . Подальше збільшення швидкості виконується підвищенням частоти. Швидко збільшують швидкість обертання теплових двигунів і доводять частоту до $f_{ш}$. Гвинт працює у крапці B . Далі при розгоні судна, поступово підвищуючи частоту, збільшують швидкість ГЕД. Частоти повинні збільшуватися плавно, щоб машини не перевантажувалися 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 ланцюга головного струму.
3. Включається обмотка збудження або генератора, або збудника генератора з необхідним форсируванням.
4. Після досягнення ГЕД підсинхронної швидкості подається живлення на його обмотку збудження.
5. Після входження ГЕД у синхронізм знижується збудження генератора.

Струм збудження генератора і ГЕД встановлюється за величиною навантаження машин для зниженої частоти $U \sim f_1$ і $\cos \varphi = 1$.

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 виконується їх синхронізація при зниженій частоті і вирівнювання ЕРС таким чином, щоб між генераторами були відсутні зрівняльні струми.

Після синхронізації виключається збудження генераторів і за напруги, рівної нулю, включається ГЕД. Потім виконуються операції, зазначені у п. 2...5.



17. РЕВЕРС ГЕД ЗМІННОГО СТРУМУ

При реверсі, як і при пуску, ГЕД працює в асинхронному режимі за великих струмів у головному ланцюзі, внаслідок чого напруга генератора сильно знижується, а разом із нею зменшується і момент, розвинутий ГЕД в асинхронному режимі.

Існують два способи реверса ГЕД:

1. ГЕД включається у режим противключення як звичайний асинхронний двигун.

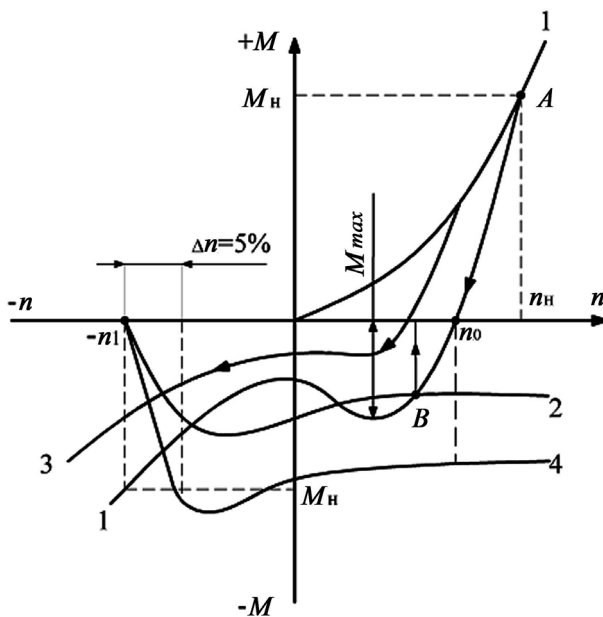
2. ГЕД включається попередньо у режим динамічного гальмування за допомогою опорів, підключених до затисків статора; потім ГЕД зупиняється механічним гальмом і пускається у протилежному напрямку; при цьому відбувається гальмування судна і знижується швидкість.

Реверс ГЕД за першим способом

На рис. 15 наведено характеристики гребного гвинта 1 і ГЕД 2 при реверсі переключенням у режим противключення ГЕД.

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

За час знімання збудження генераторів гвинт знижує частоту обертання до n_0 і працює у режимі гідравлічної турбіни. Поле статора ГЕД обертається в інший бік з частотою n_1 , а ротор ГЕД обертається разом із гребним гвинтом з частотою n_0 . Ковзання ГЕД дорівнює приблизно двом. Момент, розвинутий ГЕД, протилежний і більший за момент обертання гвинта. Завдяки цьому гвинт гальмується, і його частота обертання знижується до частоти, обумовленої крапкою В. Подальше гальмування



Для швидкого реверсування необхідно, щоб гальмовий момент ГЕД перевищував максимальний обертовий момент гребного гвинта $M_{\Gamma \max}$ у режимі гідравлічної турбіни. З цією метою струм збудження генератора збільшують у більшому ступені, ніж при пуску. Механічна характеристика ГЕД при форсируванні збудження генераторів зображується кривою 4 на рис. 15.

Для здійснення швидкого і надійного реверса застосовують динамічне гальмування ГЕД. У цьому випадку після знімання збудження ГЕД

відключається від шин генераторів і включається на трифазний опір, з'єднаний зіркою, який дорівнює $0,15z_n$ (z_n – номінальні опори двигуна), після чого знову включається збудження ГЕД. Останній працює як синхронний генератор зі змінною частотою обертання. Гребний гвинт у режимі гідравлічної турбіни в інтервалі від n_0 до $n = 0$ обертає ротор ГЕД. Поле ротора перетинає стрижні обмотки статора і наводить у них ЕРС, що створює струм у гальмовому опорі, який 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. 16.

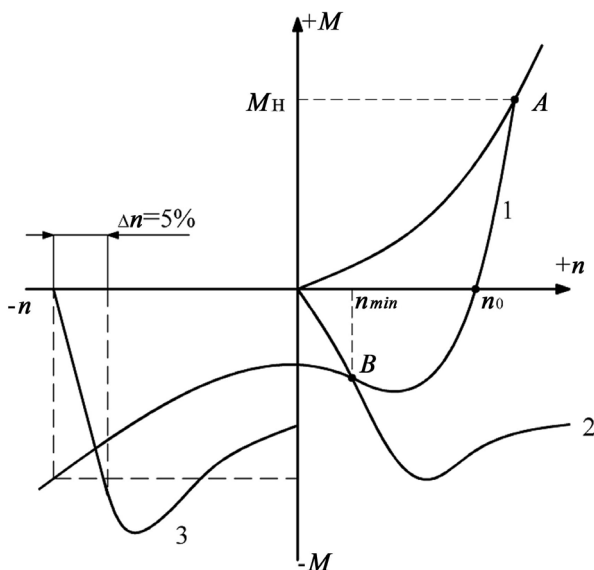


Рис. 16. Реверс ГЕД змінного струму з динамічним гальмуванням

Під дією цього гальмового моменту гребний гвинт знижує частоту обертання до мінімальної (крапка B), за якої обертовий 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, опір динамічного гальмування, змінюється порядок проходження фаз реверсивним перемикачем і включається ГЕД. При цьому одночасно звільняється механічне гальмо. Здійснюється пуск ГЕД у зворотний бік при форсованому збудженні генераторів за асинхронною характеристикою (крива 3).

Досвід доводить, що швидкий реверс ГЕД призводить до вібрації кормової частини судна і появи 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 із необхідним форсируванням.

3. Після зміни напрямку обертання ГЕД і розгону його до підсинхронної швидкості у зворотному напрямку включається його збудження.

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

5. Подальший розгін ГЕД, за потреби, здійснюється 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 мінімальної 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 у 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.

18. ФІЗИЧНА СУТНІСТЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У МАШИНАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Можна визначити наступні перехідні процеси:

1) механічні перехідні процеси, які обчислюються за статичними електричними характеристиками, тобто вільні струми в електроколах відсутні, а є тільки примусові;

2) електромагнітні перехідні процеси протікають за незмінної частоти обертання електричних машин, при цьому розглядаються вільні й примусові струми;

3) електромеханічні перехідні процеси – при зміні частоти обертання електромашин із обліком вільних і примусових складових (скидання й наброс навантаження тощо);

Вільна складова статорної обмотки створює нерухомий у просторі магнітний потік, поступово зменшуючий 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 через те, що струм дорівнює нулю.

2. При ковзанні до критичного, момент різко міняється через те, 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 й ковзанні, рівному нулю, струм не дорівнює нулю, і тому електромагнітний момент не дорівнює нулю.

5. При згасанні струмів поступово встановлюється рівне нулю ковзання.

СГ у процесі пуску й реверса працює як асинхронний.



19. ОСНОВНІ ПРИПУЩЕННЯ ТЕОРІЇ ПАРКА–ГОРСВА

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, ротора та інших причин, не враховуються.

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

4. Заспокійлива обмотка синхронної машини виглядає, як дві відокремлені обмотки, розташовані по двох осях d і 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 із одним.

Існує поняття зображуючого вектора для намагнічуючих сил струмів, потоків, напруг.

Розглянемо статорну обмотку, струми у якій змінюються за будь-яким довільним законом, але за умови, що сума дорівнює нулю. У цьому випадку існує зображуючий вектор, проекція якого на вісі фаз дає миттєве значення струмів. При цьому вважаємо, що фази однакові та симетрично розташовані.

Зображуючий вектор дорівнює:

$$i_n = (2 / m) i_p,$$

де m – число фаз; i_p – результуючий вектор.

Для трифазної системи

$$i_n = (2 / 3) i_p.$$

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

$$\sum_{j=1}^n i_j = 3i_0.$$

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_p вектор i_n вони не входять.

Щоб врахувати струм i_0 вирішують окрему систему рівнянь для нульової складової, отриманий розв'язок потім додають до рішень за рівняннями Парка–Горєва.

20. ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ ПАРКА–ГОРЄВА СМ В АБСОЛЮТНИХ ОДИНИЦЯХ

Не перетворена за П–Г система рівнянь СМ подана нижче:

Статорні рівняння:

$$U_A = i_A r_1 + \frac{d\psi_A}{dt};$$

$$U_B = i_B r_1 + \frac{d\psi_B}{dt};$$

$$U_C = i_C r_1 + \frac{d\psi_C}{dt}.$$

Рівняння для обмотки ротора:

$$U_f = i_f r_1 + \frac{d\psi_f}{dt};$$

$$0 = i_{rd} r_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt};$$

$$0 = i_{rq} r_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt};$$

$$M_{\text{диз}} - M_{\text{ем}} = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt};$$

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

де $U_A, U_B, U_C; i_A, i_B, i_C; \Psi_A, \Psi_B, \Psi_C$ – фазні напруги, струми і потокозчеплення статорних обмоток; r_1 – активний опір фази обмотки статора; U_f, i_f, r_f, Ψ_f – напруга, струм, опір, і потокозчеплення обмотки збудження; $i_{rd}, r_{rd}, \Psi_{rd}$ – струм, опір і потокозчеплення заспокійливої обмотки по повздовжній осі; $i_{rq}, r_{rq}, \Psi_{rq}$ – струм, опір і потокозчеплення заспокійливої обмотки по поперечній осі; $M_{ем}$ – електромагнітний момент; $M_{диз}$ – 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 неповною. Вона повинна бути доповнена рівняннями залежності потокозчеплень від потоків через коефіцієнти само- і взаємоіндукцій із 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 ($\sin \varphi$, $\cos \varphi$, ...) із рівнянь й одночасне скорочення їх числа.

Існує дуже велика кількість систем рівнянь П–Г для однієї і тієї ж машини ($2^{10} = 1024$). Найчастіше використовуються $2^7 = 128$.

Рівняння відрізняються обраним напрямком осей і системою базисних величин.

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

Позитивний напрямок осей СМ показано на рис. 17.

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 із

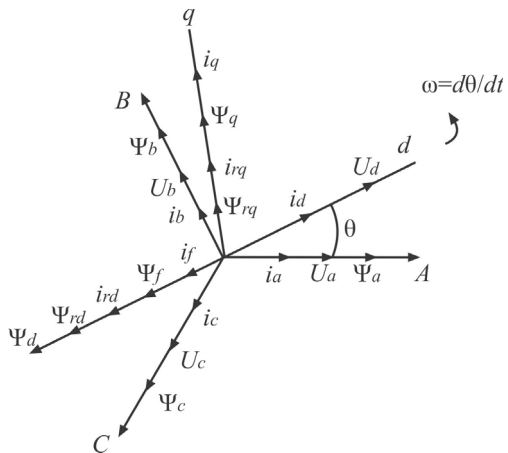


Рис. 17. Векторна діаграма СМ

ним. Осі A, B, C нерухомі. Струми i_{rd} та 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 A, B, C . При цьому керуємося тим, що існує і результуючий вектор, що зображує ці величини, і тим, що проекція зображуючого вектора на дану вісь дорівнює сумі проекцій його складових векторів на ту ж вісь.

Перейдемо до отримання рівнянь П–Г.

Рівняння зв'язку:

$$\begin{cases} i_d = \frac{2}{3} \left[i_A \cos \theta + i_B \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) + i_C \cos \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) \right]; \\ i_q = \frac{2}{3} \left[i_A \sin \theta + i_B \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) + i_C \sin \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) \right]; \\ i_0 = \frac{1}{3} (i_A + i_B + i_C). \end{cases}$$

Коефіцієнт $\frac{2}{3}$, оскільки користуємося властивістю зображуючого проекції вектора.

Аналогічні рівняння отримуємо для напруг:

$$U_d = \frac{2}{3} \left[U_A \cos \theta + U_B \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) + U_C \cos \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) \right];$$

$$U_q = \frac{2}{3} \left[U_A \sin \theta + U_B \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) + U_C \sin \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) \right];$$

$$U_0 = \frac{1}{3} (U_A + U_B + U_C).$$

І потокозчеплень:

$$\Psi_d = -\frac{2}{3} \left[\Psi_A \cos \theta + \Psi_B \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) + \Psi_C \cos \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) \right];$$

$$\psi_q = -\frac{2}{3} \left[\psi_A \sin \theta + \psi_B \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) + \psi_C \sin \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) \right];$$

$$\psi_0 = \frac{1}{3} (\psi_A + \psi_B + \psi_C).$$

Розглянемо зворотні перетворення (фазні величини). Коефіцієнт $\frac{2}{3}$ відсутній, оскільки маємо справу із проекціями зображуючого вектора:

$$\begin{cases} i_A = i_0 + i_d \cos \theta - i_q \sin \theta; \\ i_B = i_0 + i_d \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) - i_q \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right); \\ i_C = i_0 + i_d \cos \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) - i_q \sin \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right); \\ i_0 = \frac{1}{3} (i_A + i_B + i_C). \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_A = U_0 + U_d \cos \theta - U_q \sin \theta; \\ U_B = U_0 + U_d \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) - U_q \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right); \\ U_C = U_0 + U_d \cos \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) - U_q \sin \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right); \\ U_0 = \frac{1}{3} (U_A + U_B + U_C). \end{cases}$$

І для потоків зчеплення:

$$\begin{cases} \psi_A = \psi_0 + \psi_d \cos \theta - \psi_q \sin \theta; \\ \psi_B = \psi_0 + \psi_d \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) - \psi_q \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right); \\ \psi_C = \psi_0 + \psi_d \cos \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) - \psi_q \sin \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right); \\ \psi_0 = \frac{1}{3} (\psi_A + \psi_B + \psi_C). \end{cases}$$

Перейдемо безпосередньо до рівнянь П-Г.
Розглянемо вихідне рівняння для фази А:

$$U_A = r_1 i_A + \frac{d\psi}{dt}.$$

Підставимо у це рівняння отримані раніше співвідношення:

$$U_0 + U_d \cos \theta - U_q \sin \theta = r_1 (i_0 + i_d \cos \theta - i_q \sin \theta) + \\ + \frac{d}{dt} (\psi_0 - \psi_d \cos \theta - \psi_q \sin \theta).$$

Перетворимо це рівняння:

$$U_0 + U_d \cos \theta - U_q \sin \theta = r_1 i_0 + r_1 i_d \cos \theta - r_1 i_q \sin \theta + \frac{d\psi_0}{dt} - \\ - \cos \theta \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d \frac{d\theta}{dt} \sin \theta - \sin \theta \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_q \frac{d\theta}{dt} \cos \theta.$$

Згрупуємо:

$$\left(U_0 - r_1 i_0 - \frac{d\psi_0}{dt} \right) + \left(U_d - r_1 i_d + \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \omega \right) \cos \theta + \\ + \left(-U_q + r_1 i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \omega \right) \sin \theta = 0.$$

Одержимо рівняння виду:

$$X_0 + X_d \cos \theta + X_q \sin \theta = 0.$$

Це рівняння має бути справедливим для кожного θ у будь-який момент часу. Це можливо тільки за умови, що кожні складові у круглих дужках дорівнюють нулю. У результаті отримуємо рівняння Парка-Горєва для статорних обмоток СМ. Рівняння обмоток ротора не перетворюються, тому що вони жорстко пов'язані з осями d і q .

Рівняння для статорних обмоток:

$$\begin{cases} U_d = r_1 i_d - \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega; \\ U_q = r_1 i_q - \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \omega; \\ U_0 = r_1 i_0 + \frac{d\psi_0}{dt}. \end{cases}$$

Рівняння для роторних обмоток:

$$\begin{cases} U_f = r_f i_f - \frac{d\psi_f}{dt}; \\ 0 = r_{rd} i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ 0 = r_{rq} i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}, \end{cases}$$

де

$$\psi_d = -L_d i_d + M_{1f} i_f + M_{1rd} i_{rd};$$

$$\psi_q = L_q i_q + M_{1rq} i_{rq} + M_{1rd} i_{rd};$$

$$\psi_{rd} = L_{rd} i_{rd} - M_{rd} \frac{3}{2} i_d + M_{frd} i_f;$$

$$\psi_f = L_f i_f + M_{frd} i_{rd} - M_{1f} \frac{3}{2} i_d;$$

$$\psi_{rq} = L_{rq} i_{rq} + M_{1rq} \frac{3}{2} i_q;$$

$$L_d = \frac{x_d}{\omega_0} = \frac{x_{ad} + x_1}{\omega_0} = L_{ad} + L_1;$$

$$L_q = \frac{x_q}{\omega_0} = \frac{x_{aq} + x_1}{\omega_0} = L_{aq} + L_1.$$

Доповнимо рівняннями (не виділеними нами):

$$P_1 = \frac{3}{2}(U_d i_d + U_q i_q);$$

$$M_{\text{ем}} = -\frac{3}{2}p(\Psi_d i_q + \Psi_q i_d);$$

$$M_{\text{диз}} - M_{\text{ем}} = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt},$$

де

Ψ_d, Ψ_q – потокозчеплення перетворених обмоток статора по осях d і q ;

L_d, L_q – індуктивність перетвореної обмотки статора (враховують коефіцієнт $\frac{2}{3}$ у неявній формі).

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

$M_{f1} = M_{1f}, M_{1rd} = M_{rd1}, M_{1rq} = M_{rq1}$ – коефіцієнти взаємної індукції між обмотками збудження і заспокоїливої по подовжній вісі. При отримванні рівняння для потокозчеплення нас цікавить реальне потокозчеплення машини.

Струми i_d та i_q – це проекції зображуючого вектора, менш результуючого на $\frac{1}{3}$, тому в рівняннях $\frac{3}{2}i_d, \frac{3}{2}i_q$.

Однак, у поданих рівняннях складових $L_q i_q, L_d i_d$ коефіцієнт $\frac{2}{3}$ відсутній, це пояснюється тим, що величини x_d, x_q, x_{ad}, x_{aq} визначаються за результуючими вектора експериментально або розрахунковим шляхом.

Якщо зважати на обмотувальні коефіцієнти фаз і величину зміни повітряного зазору під полюсом ротора, то розглянуті коефіцієнти можна записати у наступній формі:

$$L_{ad} = \frac{3}{2}W_1^2 \lambda_d; \quad M_{1f} = W_1 W_f \lambda_d,$$

де W – число витків обмотки; λ_d, λ_q – магнітна провідність по поперечній і подовжній осях:

$$L_{aq} = \frac{3}{2} W_1^2 \lambda_q; \quad M_{1rd} = W_1 W_{rd} \lambda_d; \quad M_{1rq} = W_1 W_{rq} \lambda_q.$$

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 неперетвореної обмотки. Сама фаза теж не змінювалась.

У розглянутій машині витримується пропорційність між струмом намагнічуючої сили, магнітним потоком і потокозчепленням на підставі прийнятих раніше припущень (не враховуючи насичення). Отже, якщо струми у неперетвореній системі координат помножити на коефіцієнт пропорційності K_{π} , то одержимо намагнічуючі сили F_A, F_B, F_C . Тоді можна записати, що:

$$\begin{aligned} F_d &= \frac{2}{3} \left[F_A \cos \theta + F_B \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + F_C \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \right] = \\ &= \frac{2}{3} K_{\pi} \left[i_A \cos \theta + i_B \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \right] = K_{\pi} i_d. \end{aligned}$$

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

21. ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ ПАРКА–ГОРЄВА СМ У ВІДНОСНИХ ОДИНИЦЯХ

Найчастіше рівняння П–Г використовуються у відносних одиницях. При такому підході можна порівнювати перехідні процеси у різних машинах, менше складностей виникає при визначенні параметрів. Для переходу до відносних одиниць необхідно вибрати систему базисних змінних. Однією з розповсюджених систем є "система *Xad*".

Базисні величини СМ у системі *Xad*

Аналіз роботи СМ виконується за рівняннями у відносних одиницях. За базисні можуть прийматися різні значення, однак намагаються вибрати їх таким чином, щоб спростити розрахунок і отримати параметри, які легко визначити у СМ, або вони представлені у каталожних даних.

Характерною рисою для керування П–Г є застосування відразу декількох систем базисних одиниць для кожного контуру окремо.

В опублікованих матеріалах найменше відрізняються один від одного базиси первинної обмотки. Найбільше розповсюджена система *Xad*.

Для статорних обмоток:

- 1) $I_{16} = I_{1m}$ – амплітуда номінального струму обмотки статора;
- 2) $U_{16} = U_{1m}$ – амплітуда номінальної фазної напруги обмотки статора;
- 3) $P_{16} = U_{16} \cdot I_{16} \frac{3}{2}$ – базисна потужність;
- 4) $M_{16} = p \cdot P_{16} / \omega_6$ – базисний момент;
- 5) $\omega_6 = 2 \cdot \pi \cdot f_{1н}$ – базисна циклічна частота обертання;
- 6) $Z_6 = U_{16} / I_{16}$ – базисний опір;
- 7) $\Psi_6 = U_{16} / \omega_6$ – базисне потокозчеплення;
- 8) $t_6 = 1 / \omega_6$ – базисний час.

Розглянемо рівняння ротора:

Обмотка збудження (ОЗ)	Обмотка демпфірна (ОД) по вісі d	Обмотка демпфірна (ОД) по вісі q
$I_{f\delta} = I_{16} L_{ad} / M_{f1};$	$I_{rd\delta} = I_{16} L_{ad} / M_{rd1};$	$I_{rq\delta} = I_{16} L_{ad} / M_{rq1};$
$P_{f\delta} = U_{f\delta} I_{f\delta} = U_{16} I_{16} \frac{3}{2};$	$P_{rd\delta} = U_{rd\delta} I_{rd\delta} = U_{1616} \frac{3}{2};$	$P_{f\delta} = U_{rq\delta} I_{rq\delta} = U_{1616} \frac{3}{2};$
$U_{f\delta} = U_{16} M_{f1} \frac{3}{2};$	$U_{rd\delta} = U_{16} M_{rd1} \frac{3}{2};$	$U_{f\delta} = U_{16} M_{rq1} \frac{3}{2};$
$Z_{f\delta} = U_{f\delta} / I_{f\delta};$	$Z_{rd\delta} = U_{rd\delta} / I_{rd\delta};$	$Z_{f\delta} = U_{rq\delta} / I_{rq\delta};$
$\Psi_{f\delta} = U_{f\delta} / \omega_{\delta}.$	$\Psi_{rd\delta} = U_{rd\delta} / \omega_{\delta}.$	$\Psi_{\delta} = U_{rq\delta} / \omega_{\delta}.$

Розглянемо рівняння статорної обмотки по вісі d :

$$U_d = r_1 i_d - \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega.$$

Ліву і праву частини цього рівняння ділимо на базисну напругу у відносних одиницях:

$$\frac{U_d}{U_{16}} = \frac{r_1 i_d}{U_{16}} \frac{I_{16}}{I_{16}} - \frac{d\Psi_d}{dt} \frac{1}{U_{16}} \frac{\omega_{\delta}}{\omega_{\delta}} - \frac{\Psi_q \omega}{U_{16}} \frac{\omega_{\delta}}{\omega_{\delta}}$$

$$\overline{U_d} = \overline{r_1 i_d} - \frac{d\overline{\Psi_d}}{dt} - \overline{\Psi_q \omega}.$$

У результаті отримуємо систему диференціальних рівнянь, яка описує роботу СМ у відносних одиницях.

22. ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ГРЕБНОЇ УСТАНОВКИ

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

Складні моделі елементів та висока частота виконання операцій обладнанням 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 під час моделювання призводить до погіршення форм сигналів та змушує збільшувати ємність компенсуючого конденсатору. У моделі використовувалася частота комутації вентилів 4000 Гц, тому вже при частоті дискретизації 10^{-5} с стають помітні відхилення від коректних результатів. Для наданої моделі ГЕУ використовувалося дискретне моделювання з фіксованим шагом $2 \cdot 10^{-6}$ с.

Бібліотеки Simulink містять певну кількість блоків, які застосовують до прийнятого сигналу операції, що описуються в 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, вимірюваних "амперметром", він визначався з величин складових за повздожньою та попереочною осями.

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 $r_{\text{гр}}$ та $x_{\text{гр}}$.

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 становить система "статичний перетворювач – гребний двигун". Використання некерованого випрямляча зумовлює сталість напруги у 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 щиті електричного руху (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. 18 наведена структура джерела синусоїдальних сигналів, що дає змогу керувати двигуном за законом:

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

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

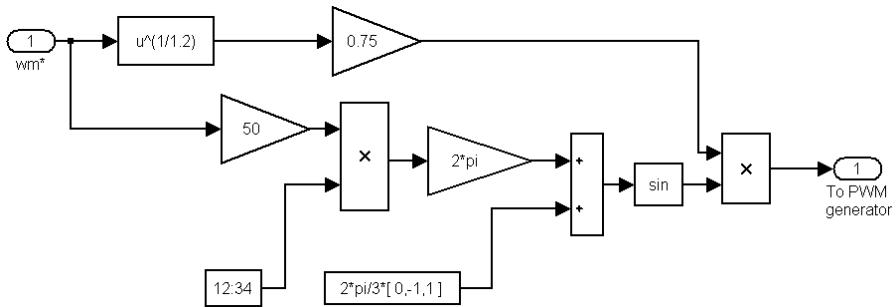


Рис. 18. Внутрішня структура блоку скалярного керування

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 значень m ними можна знехатувати для підвищення швидкості моделювання.

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

$$P_m = -\omega^3.$$

Знак "мінус" вказує на те, що потужність відбирається у ГЕД. Структура моделі гребної установки наведена на рис. 19.

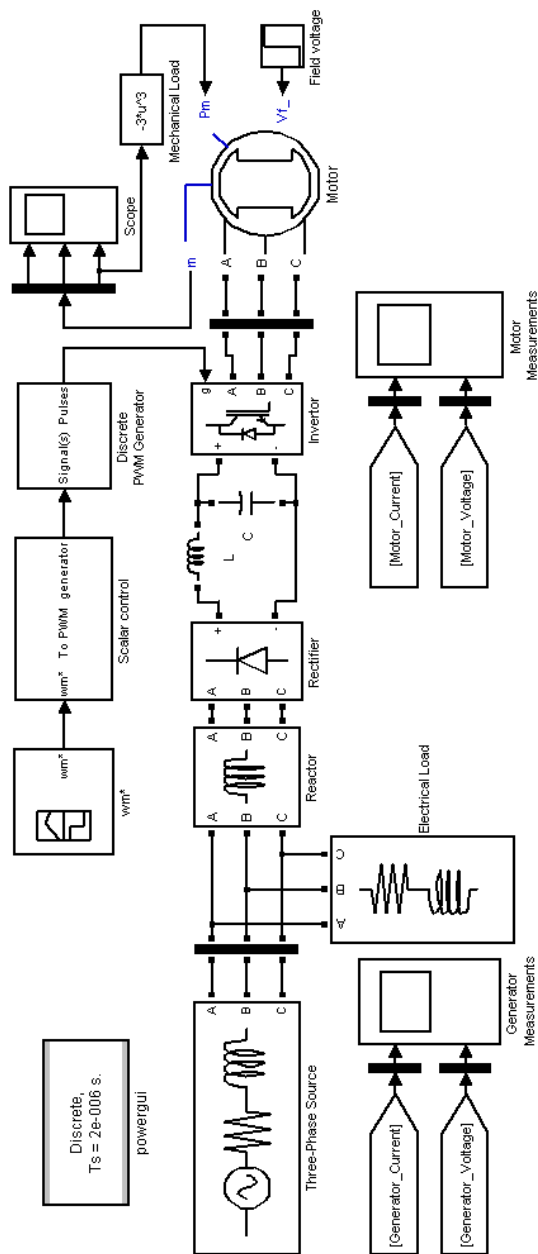


Рис. 19. Модель гребної електричної установки в програмному модулі Simulink

22.1. Визначення параметрів моделі

При створенні моделей на основі готових функціональних блоків достатньо оперувати лише невеликою кількістю основних "зовнішніх" параметрів моделі, більшість із яких відома заздалегідь. Внутрішні параметри моделей елементів визначаються автоматично.

Для проведення моделювання необхідно визначити основні параметри гребного двигуна: $P_n, U_n, f_n, r_1, x_d, x'_d, x''_d, x_q, x'_q, x''_q, T'_d, T''_d, T'''_q$. Не усі зі вказаних параметрів наводяться у переліку номінальних параметрів ГЕД, отже виникає необхідність у розрахунку їх значень.

Індуктивний опір обмотки статора за повздожньою віссю

$$x_d = x_1 + x_{ad}.$$

Індуктивний опір обмотки статора за поперечною віссю

$$x_q = x_1 + x_{aq}.$$

Індуктивний опір демпферної обмотки за повздожньою віссю

$$x_{rd} = x_{ad} + x_{rds}.$$

Індуктивний опір демпферної обмотки за поперечною віссю

$$x_{rq} = x_{aq} + x_{rqs}.$$

Індуктивний опір обмотки збудження

$$x_f = x_{fs} + x_{ad}.$$

Перехідний індуктивний опір обмотки статора за повздожньою віссю

$$x'_d = x_1 + \frac{x_{ad}x_{fs}}{x_{ad} + x_{fs}}.$$

Надперехідний індуктивний опір обмотки статора за повздожньою віссю

$$x''_d = x_1 + \frac{x_{ad}(x'_d - x_1)}{x_{rd} + x'_d - x_1} / 2.$$

Перехідний індуктивний опір обмотки статора за поперечною віссю

$$x'_q \approx x_q.$$

Надперехідний індуктивний опір обмотки статора за поперечною віссю

$$x_q'' = x_1 + \frac{x_{aq} x_{fs}}{x_{aq} + x_{fs}}.$$

Стала часу обмотки збудження при розімкнених обмотці статора та демпферній обмотці

$$T_{do} = \frac{x_f}{\omega r_f} \text{ с},$$

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

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

$$T_d' = T_{do} \frac{x_d'}{x_d} \text{ с}.$$

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

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

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

$$T_d'' = T_{d0}'' \frac{x_d''}{x_d'} \text{ с}.$$

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

$$T_{rq0} = \frac{x_{rq}}{\omega r_{rq}} \text{ с}.$$

Стала часу демпферної обмотки за поперечною віссю при короткозамкненій обмотці статора

$$T_q'' = T_{rq0} \frac{x_q''}{x_q} \text{ с}.$$

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

Активний внутрішній опір джерела напруги

$$r_{дж} = \frac{r_{1фГ}}{m_{Г}} z_{бГ} \text{ Ом.}$$

Активний внутрішній опір джерела напруги

$$x_{дж} = \frac{x_{фГ}}{m_{Г}} \text{ Ом.}$$

Внутрішня індуктивність джерела напруги

$$L_{дж} = \frac{x_{дж}}{2\pi f_1} \text{ Гн.}$$

Активна потужність загальносуднових споживачів

$$P_{сп} = \frac{P_{ход}}{m_{Г}} \text{ кВт.}$$

Реактивна потужність загальносуднових споживачів

$$Q_{сп} = \frac{Q_{ход}}{m_{Г}} \text{ кВАр.}$$

де $P_{ход}$, $Q_{ход}$ – потужності у ходовому режимі.

Коефіцієнт інерції

$$H_s = \frac{J\omega^2}{P_d},$$

де $\omega = \frac{\pi n_d}{30} = \text{рад/с.}$

22.2. 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 за швартовною характеристикою до підсинхронної частоти на восьмій секунді на нього подається збудження.

Осцилограми, зафіксовані під час проведення пуску ГЕД, наведені на рис. 20.

Тривалість перехідного процесу відповідає результатам осцилограм, зафіксованих для реальних суден під час ходових випробувань, наведених у [1].

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

Також під час пуску фіксувалися миттєві значення струмів та напруги. За цими показниками можна провести аналіз форми кривих.

Результати гармонічного аналізу форм кривих наведені на рис. 21 та рис. 22.

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

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

Вміст основних гармонік у струмі генератора становить:

п'ятої – 5,09 %;

сьомої – 1,56 %;

одинадцятої – 1,08 %;

тринадцятої – 0,54 %.

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

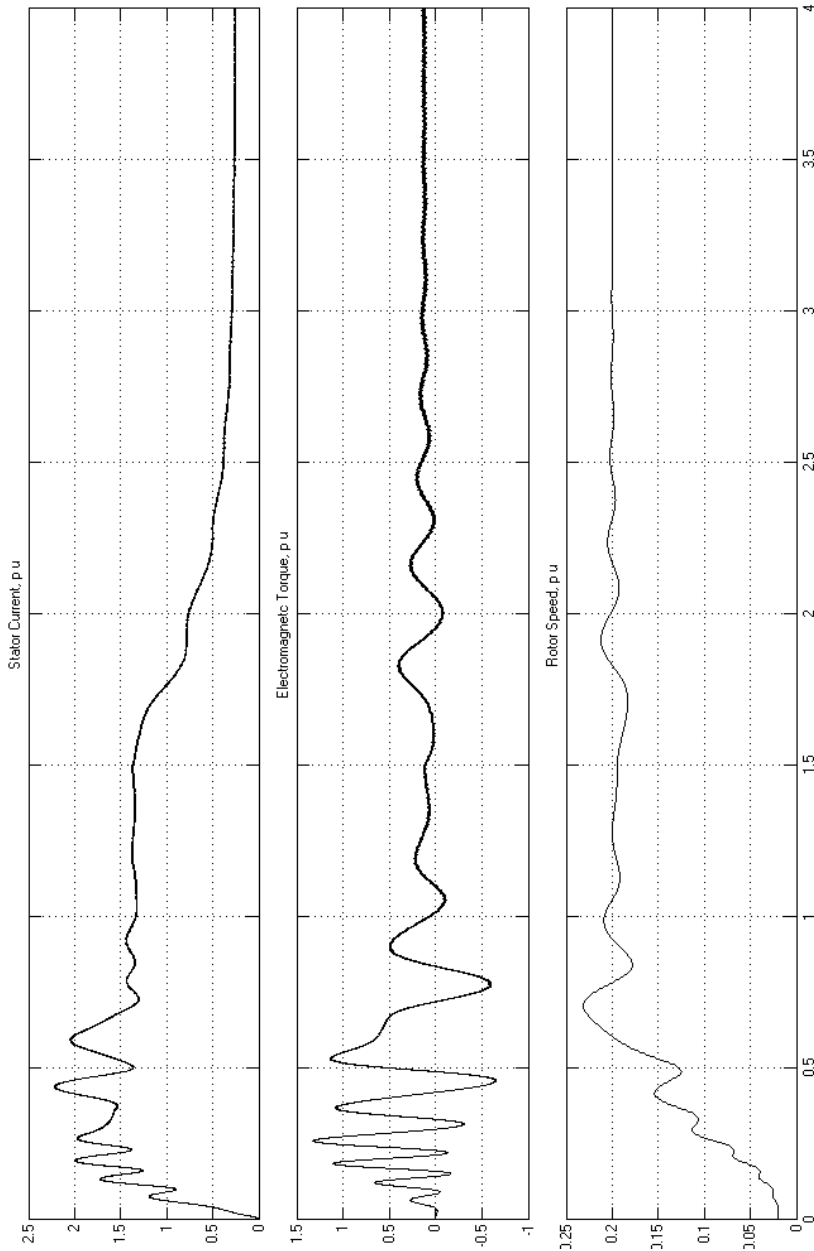


Рис. 20. Осцилограми струму ГЕД, електромагнітного моменту та швидкості при пуску на частоті 10 Гц

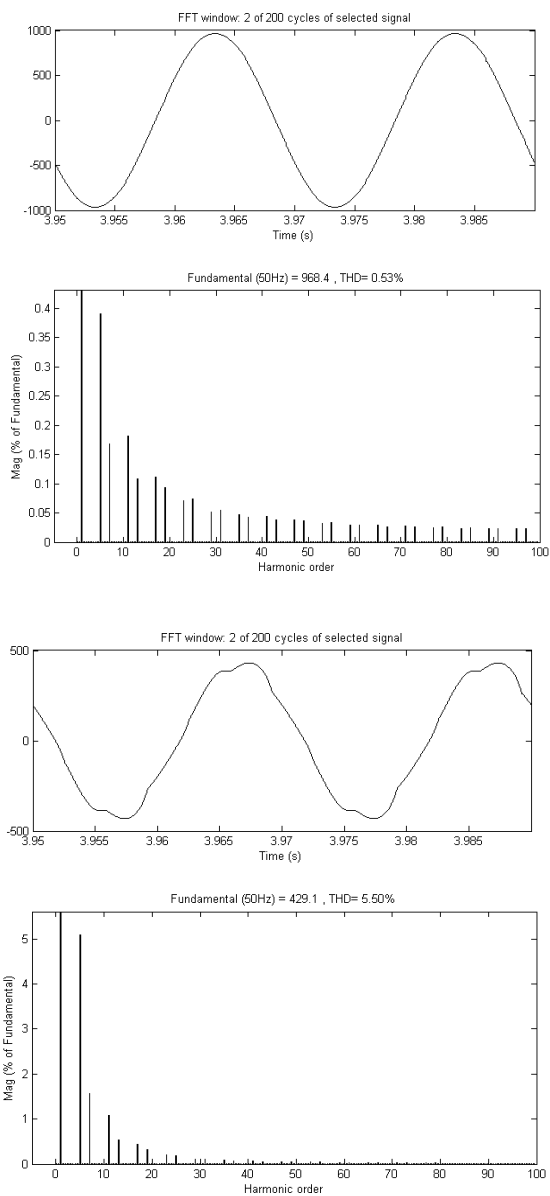


Рис. 21. Результати гармонічного аналізу напруги та струму генератора

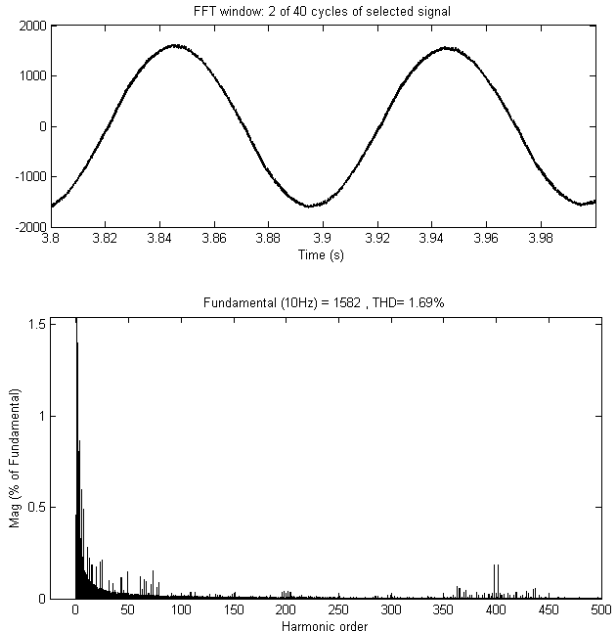


Рис. 22. Результати гармонічного аналізу струму ГЕД при частоті 10 Гц

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

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. **Чекунов, В. К.** Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Гребні електричні установки" та "Електричні системи і комплекси руху суден" [Текст] / В. К. Чекунов, С. М. Новогорецький. – Миколаїв : Видавництво НУК, 2009. – 48 с.
 5. **Черняев, В. А.** Краткий курс автоматизированных гребных электрических установок рыбопромышленных судов [Текст] / В. А. Черняев. – Астрахань : Издательство АГТУ, 1999. – 240 с.
-

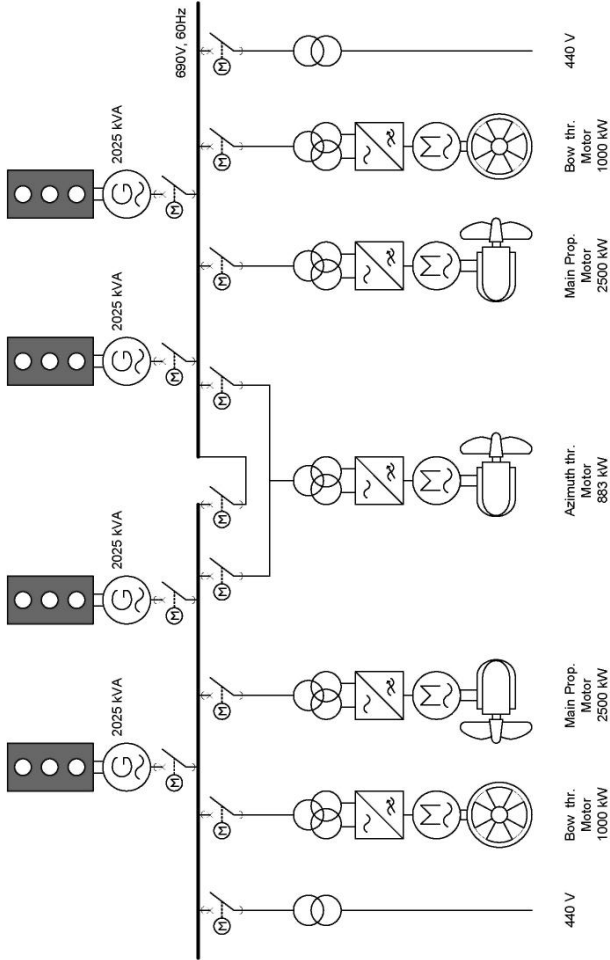
ДОДАТОК 1

Сучасні схеми головного струму

Список символів і пояснень:

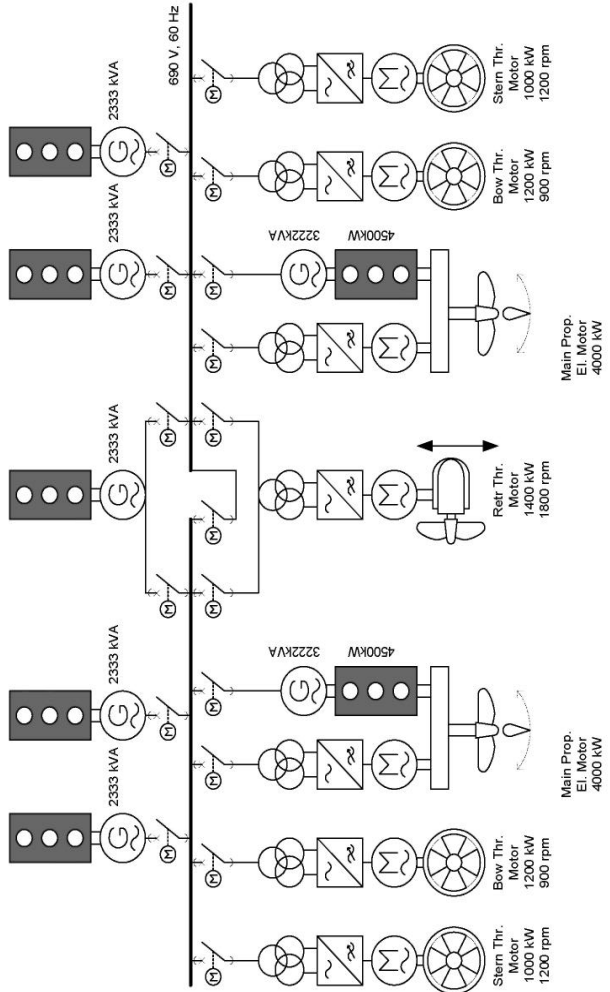
	Перетворювач частоти (6-ти фазний)		Дизель
	3 обмотувальний трансформатор Перетворювач частоти (12-ти фазний)		Генератор
	Перетворювач частоти з гальмовним резистором		Розподільний щит
	Випрямляч (6-ти фазний)		Автоматичний вимикач (мотор привід)
	Y / Δ стартер або другий тип стартера двигуна		Перемикач
	Розподільний трансформатор		Перемикач (мотор привід)
	Автотрансформатор		Перемикач вибору
	Азимут підрулюючий пристрій (фіксований крок)		Гвинт (керований крок)
	Тунельний підрулюючий пристрій (фіксований крок)		Siemens SSP гондола гвинта (фіксований крок)
	Гвинт (фіксований крок)		

Fjellstrand Verft (2008)
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

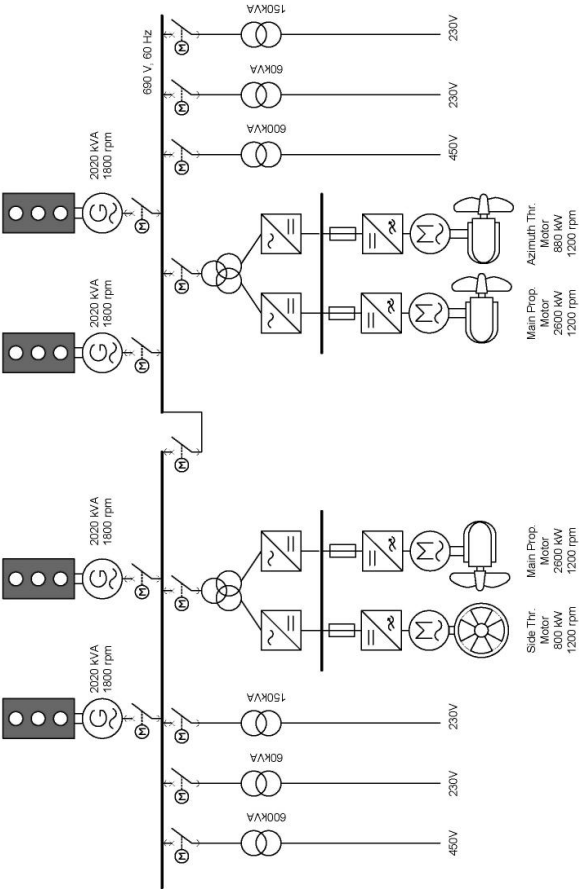


Ulstein Verft 282 (2009)

- 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

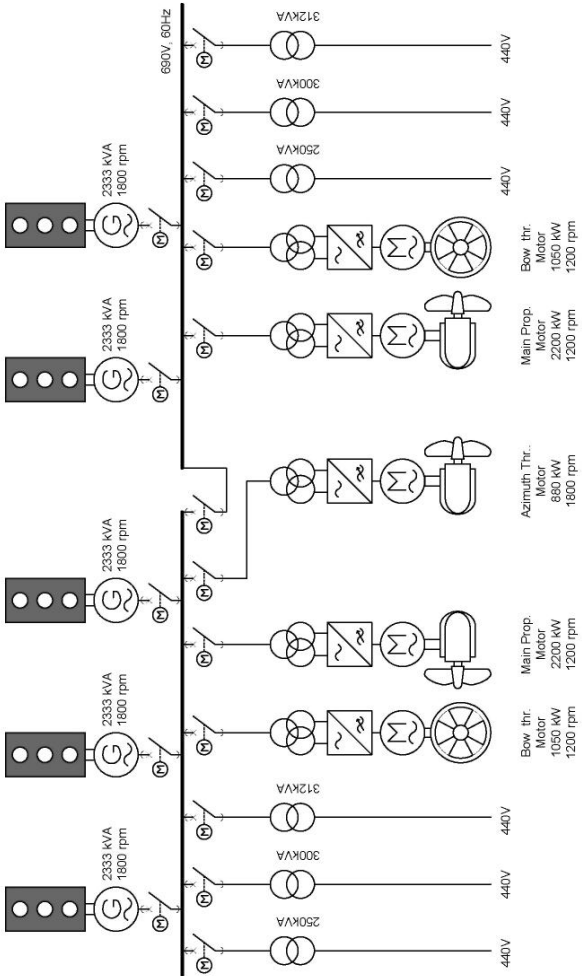


Fosen Mek (2008)
2 x 2200 kW Main Propulsion
2 x 800 kW Azimuth Thruster
1 x 1050 kW Tunnel Thruster
4 x 2020 kVA Generators



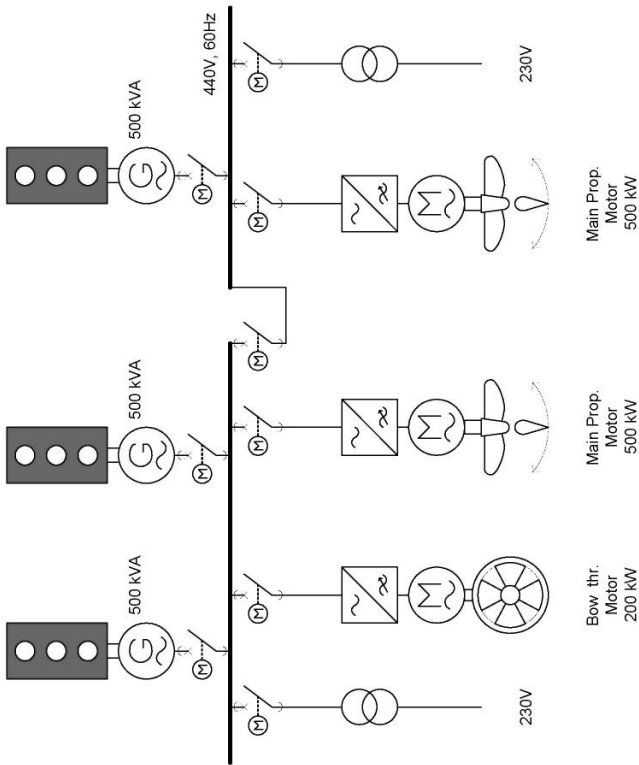
Bergen Yards Halsnøy AS 123 (2009)

- 2 x 2200 kW Main Propulsion
- 1 x 800 kW Azimuth Thruster
- 2 x 1050 kW Tunnel Thruster
- 5 x 2333 kVA Generators



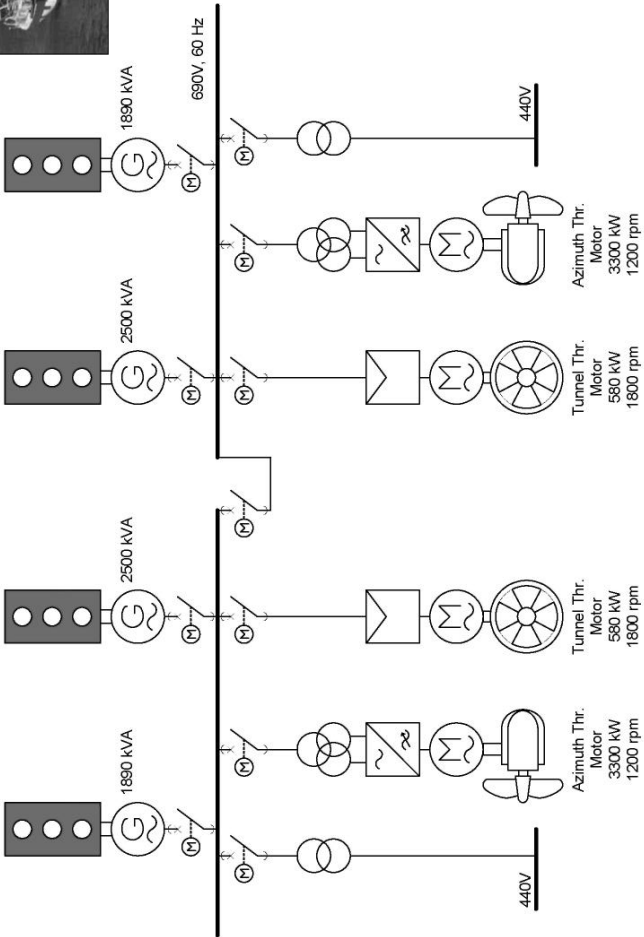
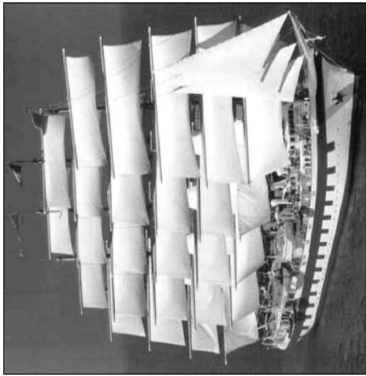
Larsnes Mek. Verksted 41 (2006)

- 2 x 500 kW Main Propulsion
- 1 x 200 kW Bow Thruster
- 3 x 500 kVA Generators



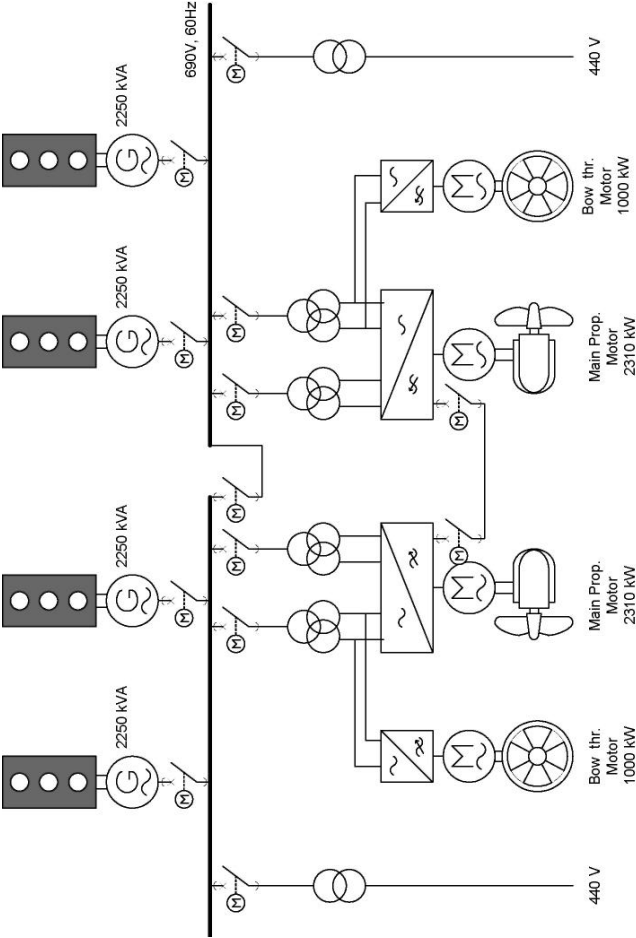
Yard TBN (2009)

- 2 x 3300 kW Main Propulsion
- 2 x 580 kW Tunnel Thruster
- 2 x 2500 kVA Generators
- 2 x 1890 kVA Generators



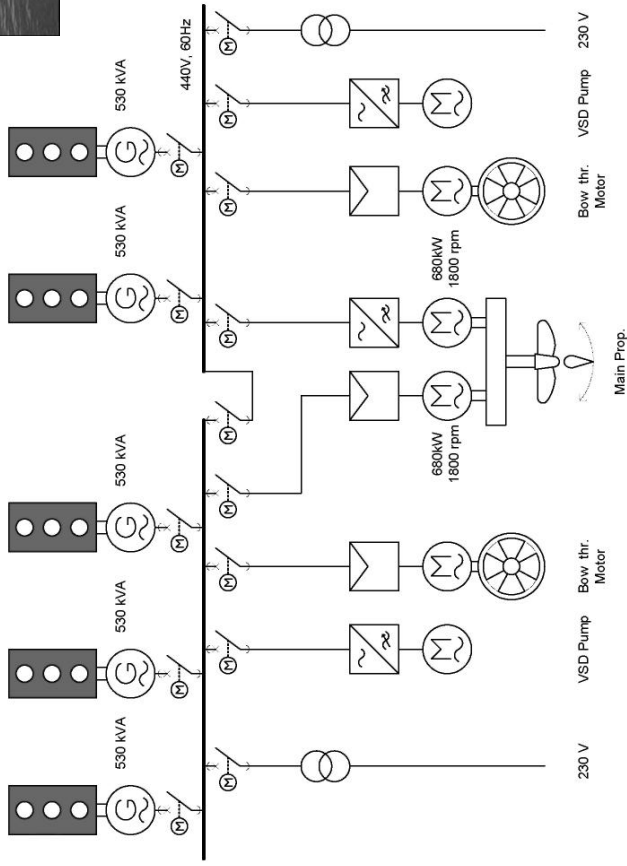
Fincantieri (2007)

- 2 x 2310 kW Main Propulsion
- 2 x 1000 kW Bow Thruster
- 4 x 2250 kVA Generators



Aas Mekaniske AS 177 (2007)

- 1 x 680 kW Main Propulsion
- 1 x 680 kW Main Propulsion



ДОДАТОК 2

Паспортні дані суднових синхронних генераторів STAMFORD FRAME

Тип	UC224C	UC224D	UC274E	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
X_d 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
X_q 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
X_L LEAKAGE REACTANCE	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
X_2 NEGATIVE SEQUENCE	0,15	0,13	0,15	0,14	0,14	0,13
X_0 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
T_a ARMATURE TIME CONST., sec	0,005	0,0055	0,007	0,009	0,010	0,012

В. К. ЧЕКУНОВ

Продовження

Тип	HC434C	HC434D	HC434F	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	0,010	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
X_d 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
X_q 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
X_l LEAKAGE REACTANCE	0,09	0,08	0,06	0,07	0,06
X_2 NEGATIVE SEQUENCE	0,27	0,26	0,22	0,19	0,19
X_0 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
T_a 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 – $1/X_d$

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Вимоги Регістру судноплавства України до гребних електричних установок	7
2. Призначення та типи ГЕУ	11
3. Суднові рушії	14
4. Механічні характеристики гвинта	18
5. Побудування ідеальної механічної характеристики	22
6. Розрахунок буксирувальної потужності судна та визначення потужності головних двигунів	25
7. Вибір основних параметрів ГЕУ	38
8. Статичні перетворювачі частоти в ГЕУ	40
9. Формування структури головної енергетичної установки	44
10. Робота гребної установки з перетворювачем частоти у часткових режимах	48
11. Розрахунок параметрів асинхронного двигуна (АД) при зміні частоти мережі та ковзання ротора	52
12. Розрахунок параметрів синхронного двигуна (СД) при зміні частоти і ковзання	55
13. Розрахунок струму і напруги СГ у статиці	57
14. Розрахунок розмагнічуючої сили, необхідної для форсування збудження	61
15. Динамічне гальмування синхронного ГЕД	63
16. Пуск ГЕД змінного струму	64
17. Реверс ГЕД змінного струму	67
18. Фізична сутність електромагнітних перехідних процесів у машинах змінного струму	72
	109

19. Основні припущення теорії Парка–Горєва	74
20. Диференціальні рівняння Парка–Горєва СМ в абсолютних одиницях	76
21. Диференціальні рівняння Парка–Горєва СМ у відносних одиницях	84
22. Формування моделі гребної установки	86
22.1. Визначення параметрів моделі	90
22.2. Результати моделювання роботи установки	92
Література	97
Додаток 1	98
Додаток 2	107
