

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ

На правах рукопису

БУДАШКО ВІТАЛІЙ ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 621.436+621.31:625.5.035

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ В
СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСАХ**

Спеціальність 05.08.05 – суднові енергетичні установки

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник

Радченко Анатолій Петрович

Доктор технічних наук, професор

Одеса – 2006

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В СУДНОВИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСАХ	13
1.1. Режими роботи дизелів пропульсивних комплексів.....	13
1.2. Сучасні суднові пропульсивні комплекси з використанням дизель-електричної передачі потужності на гвинт	20
1.3. Системи управління передачею потужностей в пропульсивних комплексах.....	25
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСАХ	35
2.1. Методи рішення задач досліджень процесів в суднових дизель-електричних пропульсивних комплексах.....	35
2.2. Методика дослідження параметрів і характеристик суднових дизель-електричних пропульсивних комплексів	42
2.3. Загальна методика оптимізації взаємодії компонентів в пропульсивних комплексах.....	45
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ У ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПРОПУЛЬСИВНОМУ КОМПЛЕКСІ	48
3.1. Оцінка ефективності передачі потужності в суднових дизель-електричних комплексах	48
3.2. Прогнозуюче математичне моделювання процесів в суднових пропульсивних комплексах	51
3.3. Розробка структурної схеми дизель-електричного пропульсивного комплексу.....	57
3.4. Моделювання енергетичних процесів в судновому дизель-електричному пропульсивному комплексу.....	61

РОЗДІЛ 4 МОНІТОРИНГ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СУДНОВОМУ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПРОПУЛЬСИВНОМУ КОМПЛЕКСІ 89

4.1. Оптимізація параметрів математичної моделі регуляторів середньо-
обертових дизель-генераторів і уточнення структурної схеми дизель-
електричного пропульсивного комплексу 89

4.2. Загальна модель передачі потужності в дизель-електричному
пропульсивному комплексі в комп'ютерній лабораторії 94

4.3. Моделі окремих компонентів дизель-електричного комплексу..... 95

4.4. Генерація помилок і відхилень (“шумів”)..... 98

РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ В ПРОПУЛЬСИВНОМУ КОМПЛЕКСІ З ДОПОМІЖНИМ АД..... 100

5.1. Перевірка адекватності математичних моделей..... 100

5.1 Перевірка критерію ефективності передачі потужності в дизель-
електричному пропульсивному комплексі 103

5.2 Характеристики експериментальних досліджень дизель-електричного
пропульсивного комплексу..... 107

ВИСНОВКИ 112

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 114

ДОДАТОК А ВЕБ-СТОРІНКИ ФІРМ-ВИРОБНИКІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ 125

ДОДАТОК Б ПОСИЛАННЯ НА ФІРМИ ВИРОБНИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИБОРІВ І СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ..... 127

ДОДАТОК В МОДЕЛІ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ З МОД І АД НА ЛІНІЇ ВАЛУ ПРИ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ДО РУШІЯ..... 129

В.1 Оптимізація моделі частотно-керованого допоміжного АД з коротко
замкнутим ротором..... 129

В.2 Загальна модель передачі потужності в дизель-електричному
пропульсивному комплексі..... 131

ДОДАТОК Д ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ..... 132

Рис. Д.1 Лабораторна установка для дослідження асинхронного електродвигуна..... 132

Комп'ютерна модель лабораторної установки 134

ДОДАТОК Ж СТРУКТУРИ ФАЙЛІВ МОДЕЛІ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ..... 135

Ж.1 Файл сценарію *dmi_tow.m* для *DMI* моделі при двох умовах завантаження судна 135

Ж.2 Файл функції *crr.m* для розрахунку параметрів гребного гвинта 138

Ж.3 Файл функції *ru_func.m* для розрахунку параметрів судна, яке рухається в залежності від заданої швидкості..... 140

Ж.4 Файл початкових даних *compdata.m* 140

Ж.5 Файл функції *limit_u.m* розрахунку обмеження паливного індексу 147

Ж.6 Файл функції *overld.m* обмеження перевантаження МОД..... 148

Ж.7 Файл сценарію *comb.m* завдання режимів роботи судна 150

Ж.8 Файл сценарію *gen_nois.m* генерації “шумів” в системі 152

ДОДАТОК З ДОКУМЕНТИ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ 155

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

<i>ULCVs</i>	– <i>Ultra Large Container Vessels</i> (надвеликі контейнеровози)
АД	– асинхронний двигун
АІН	– автономний інвертор напруги
АІС	– автономний інвертор струму
АРН	– автоматичне регулювання напруги
ВЕГРК	– винесений електричний гвинто-рульовий комплекс
ГРК	– гвинт регульованого кроку
ГФК	– гвинт фіксованого кроку
ГРЩ	– головний розподільний щит
ДПУ	– допоміжна енергетична установка
ЕД	– електродвигун
ІСУПП	– інтегрована система управління передачею потужності
ККД	– коефіцієнт корисної дії
МКВ	– машинно-котельне відділення
МОД	– мало-обертовий дизель
МП СУ	– мікропроцесорна (комп'ютерна) система управління
ПН	– показник навантаження
ПНВТ	– паливний насос високого тиску
ПТЕ	– правила технічної експлуатації
ПЧ	– перетворювач частоти
САРЧ	– система автоматичного регулювання частоти обертання
СД	– синхронний двигун
СДЕПК	– судновий дизель-електричний пропульсивний комплекс
СОДГ	– середньо обертовий дизель-генератор
СТЗ	– суднові технічні засоби
ЦПГ	– циліндрово-поршнева група
ШІМ	– широтно-імпульсна модуляція
ШНМ	– штучна нейронна мережа

ВСТУП

Процес підготовки дисертаційної роботи і її оформлення відповідає вимогам “Вищої атестаційної комісії України”, які було надруковано у її бюлетенях [1, 2].

Для сучасних суднових дизелів характерний високий рівень напруженості теплоенергетичного процесу. Елементи конструкції, і в першу чергу деталі циліндрово-поршневої групи (ЦПГ), іспитують великі теплові і механічні навантаження [3, 4]. Дизелебудівні заводи і фірми, призначаючи номінальну потужність, як правило, залишають дуже невеликі резерви на випадок можливого її перевищення в експлуатації, або зміни технічного стану двигуна і параметрів навколишнього середовища, що зумовлює наявність незначного розриву між робочими рівнями теплової і механічної напруженості двигунів на номінальному режимі і їх граничними значеннями. Про це свідчать випадки виходу, що почастишали останніми роками, з ладу головок поршнів, втулок і кришок робочих циліндрів, поява інтенсивного зносу циліндрів, виникнення тріщин і відкрихтлення антифрикційного сплаву підшипників і ін. [5, 6, 7, 8, 9, 10].

У разі надмірного обростання корпусу, пошкодження гребного гвинта, при роботі в кризі, зняття з мілини, слід зменшити число оборотів, підтримуючи середній індикаторний або середній ефективний тиск на рівні, відповідному режиму експлуатаційної тривалої потужності.

Режим роботи головного дизеля при плаванні судна в кризі відрізняється наступними особливостями:

- можливість порівняно повільної зміни характеристики гребного гвинта, унаслідок зміни льодового опору руху судна. Крайніми випадками є швартова характеристика гвинта (нульова швидкість судна) і характеристика гвинта, відповідна ходу на чистій воді;

- вірогідність швидкого короткочасного збільшення моменту на гвинті, унаслідок взаємодії гребного гвинта з льодом.

Все це призвело до використання гібридних концепцій суднових пропульсивних комплексів з мало-обертовими дизелями (МОД) і електричними двигунами на лінії валу, а будівництво суден з великою пропускною спроможністю до використання концепцій гібридних рушіїв, що інтегрують ефективність пропульсивних комплексів з МОД і гвинтом фіксованого кроку (ГФК) із гнучкістю дизель-електричного приводу.

Суднобудівельні заводи випускають судна льодового плавання з енергетичними установками, які komponують МОД і бустерний електродвигун, який отримує живлення через перетворювач частоти (ПЧ) і середньо-обертового дизель-генератора (СОДГ). У випадку виходу з ладу МОД судно може рухатися за допомогою бустеру. Недоліками всіх концепцій є відсутність необхідних гідродинамічних характеристик і практичного досвіду використання подібних систем.

За останні роки спостерігаються труднощі з забезпеченням енергетичної сумісності перетворювачів як нелінійного навантаження з живлячою енергосистемою. ПЧ володіють низьким коефіцієнтом потужності, викликають кидки реактивної потужності в енергосистемі, погіршення якісних характеристик напруги живлення споживачів і додаткові втрати в енергосистемі.

Для забезпечення управління частотою обертання допоміжного асинхронного електродвигуна (АД) суднового пропульсивного комплексу з МОД у широкому діапазоні із забезпеченням стабільності напруги на шинах СОДГ, уникнення найвищих гармонійних складових у споживаному струмі, зменшення коливань частоти обертання і моменту на валу ГФК у перехідних режимах, можливо за умови оптимізації управління ПЧ, яке б враховувало всі особливості передачі потужності у судновому дизель-електричному пропульсивному комплексі з МОД і частотно-керованим АД.

Тема дисертаційної роботи зв'язана з виконанням держбюджетної науково-дослідницької роботи, виконуваний Одеською національною морською академією “Теоретичні основи створення автоматичних систем проти аварійного управління об'єктами з не детермінованими збуреннями” (ГР № 0102U002184), виконавцем деяких етапів якої був автор дисертації.

Метою дослідження є стабілізація моменту обертання валу рушія в судовому дизельному пропульсивному комплексі (СДПК) в експлуатаційних умовах.

У якості головної задачі дослідження, що проводиться сформульовано: оптимізація режимів роботи СДПК з МОД і частотно-керованим АД на лінії валу при передачі потужності до рушія за рахунок зменшення споживання палива і амплітуди крутильних коливань.

Для пошуку рішення головної задачі дисертаційного дослідження була зроблена її декомпозиція на декілька складових частин (допоміжних) задач, сукупність розв'язок рішень котрих дозволяє знайти загальне рішення.

У результаті проведеного аналізу головна задача дисертаційного дослідження представлена у вигляді п'яти допоміжних задач:

- аналіз режимів передачі потужності і процесів в судових пропульсивних комплексах із МОД;
- визначення критеріїв оцінки ефективності передачі потужності у судовому дизель-електричному пропульсивному комплексі (СДЕПК);
- математичне моделювання енергетичних станів в СДЕПК із МОД і частотно-керованим асинхронним двигуном (АД) на лінії валу ГФК;
- моніторинг енергетичних процесів в комп'ютерній лабораторії для СДЕПК;
- експериментальні дослідження передачі потужності в СДЕПК.

У якості об'єкта дослідження у дисертаційній роботі обрано процеси передачі енергії в судових пропульсивних комплексах. Предмет дослідження – параметри процесу обертання рушія для підвищення ефективності передачі потужності в судових дизельних пропульсивних комплексах.

Розв'язання поставлених задач здійснено експериментальними і теоретичними методами з розробкою функціональних схем пропульсивних комплексів і методик оптимізації процесів в пропульсивних комплексах з електродвигунами, заснованими на: класифікації систем управління; порівняльній оцінці енергетичних показників в різноманітних технологічних процесах виробництва і передачі потужності на судні; оптимізації СУ; складанні математичних моделей всіх елементів процесу передачі потужності до рушія, розробці методики чисельного розрахунку і моделювання на ЕОМ перехідних процесів; перевірці отриманих результатів шляхом проведення експериментальних досліджень в лабораторних і судових умовах.

Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів забезпечується:

- перевіркою адекватності математичних моделей;
- перевіркою критерію ефективності передачі потужності в дизель-електричному пропульсивному комплексі;
- виконанням кількісної оцінки критерію ефективності при застосуванні допоміжного АД на лінії валу МОД СДЕПК;
- порівняльним аналізом характеристик експериментальних досліджень дизель-електричного пропульсивного комплексу;
- перевіркою методів підвищення ефективності передачі потужності в СДЕПК у судових умовах.

На підставі дисертаційних досліджень було сформульовано наукове положення:

- стабілізація моменту обертання рушія в СДЕПК з МОД і АД на лінії валу забезпечується: в номінальному режимі – зменшенням, а в маневровому – збільшенням прискорення додаткового моменту частотно-керованого АД відносно моменту обертання МОД в залежності від швидкості збільшення знакозмінного моменту опору на валу рушія.

Наукове положення було підтверджене наступними науковими результатами. Вперше встановлено, що:

- стабілізація моменту обертання рушія при будь-яких

навантаженнях забезпечується додатковим керованим моментом шляхом застосування частотно-керованого АД на лінії валу СДЕПК;

- синхронізуючий момент, що виникає на лінії валу рушія забезпечує стійкість гідропропульсивного комплексу в номінальному режимі в межах $\pm 5\%$ номінальної частоти обертання валу;

- швидкість збільшення додаткового знакозмінного моменту допоміжного АД прямо-пропорційно залежить від швидкості збільшення різниці заданого і дійсного моментів на валу рушія при переході СДЕПК з номінального до маневрового режиму роботи;

- інтенсивність завдання регулятору МОД зворотно-пропорційно залежить від швидкості збільшення додаткового знакозмінного моменту допоміжного АД;

- параметри процесу обертання рушія при передачі енергії в пропульсивному комплексі із МОД та допоміжним керованим АД на лінії валу можливо отримати на основі даних опору води корпусу при двох умовах завантаження: повному проектному завантаженні і завантаженні баластом в комп'ютерній лабораторії з використанням відомих *DMI*-моделей судна.

Отримало подальший розвиток дослідження енергетичних процесів в дизельних пропульсивних комплексах в частині використання моніторингу процесів і елементів штучного інтелекту.

Отримані результати підтвердили коректність наукової гіпотези о можливості за рахунок оптимізації процесів взаємодії частотно-керованого АД і МОД пропульсивних комплексів з ГФК обмежити механічні напруженості МОД на рівні номінального або експлуатаційного режиму в результаті зменшення середнього ефективного або середнього індикаторного тиску робочого циклу у всьому діапазоні регулювання частоти обертання валу ГФК при передачі потужності до нього, зменшити коливання валу і, як наслідок, збільшити маневреність судна.

Практична значимість проведеного дисертаційного дослідження зумовлюється тим, що при впровадженні результатів дисертаційних

досліджень відбувалося підвищення ефективності передачі потужності в суднових пропульсивних комплексах в експлуатаційних умовах, що підтверджується відповідними актами впровадження на судах Рінійського морського торговельного флоту (акт від 10.06.2005р.), спеціалізованого флоту Чорноморсько-Азовського басейнів аварійно-рятувальних, суднопідіймальних і підводно-технічних робіт (АСПТР) ЧМП (акт від 21.05.1993р.), судноплавних компаній “Дуглас” (Росія) та “*Sherwood Shipping Inc*” (Італія) (акт від 16.06.2005р.).

Розроблено і впроваджено модель в комп’ютерній лабораторії для СДЕПК, яка використовується в навчальному процесі і дозволяє розв’язувати головні задачі проектування та експлуатації суднових пропульсивних комплексів (акт від 23.03.2006р.), а саме: при налагодженні суднових систем управління різного рівня складності; при проектуванні нових моделей пропульсивних комплексів; при розробці систем, які забезпечують аналіз процесів у судновій електроенергетиці; при створенні навчальних програм і тренажерів суднових пропульсивних комплексів і єдиних електроенергетичних систем.

Розроблено і впроваджено в навчальний процес інженерну методику “Мікропроцесорна система управління асинхронним електродвигуном”, методичні рекомендації до лабораторних робіт з курсів “Суднові електричні машини” та “Суднові автоматизовані електроприводи”, надруковано затверджений Вченою радою Одеської національної морської академії навчальний посібник “Силовые полупроводниковые приборы и преобразовательная техника”, що підтверджується відповідними актами (акти від 16.05.1994р. та від 23.03.2006р.).

Особистий внесок здобувача в отриманих наукових результатах, наведених у дисертації, полягає в удосконаленні математичної моделі передачі потужності у СДЕПК, а також її окремих елементів, створенні досліджувальної моделі у *MatLab/Simulink*, перевірці її адекватності реальним

фізичним процесам, отримання нових залежностей. Постановка задачі досліджень проведених в роботі належить науковому керівнику.

Основні результати доповідалися на щорічних конференціях професорсько-викладацького складу ОНМА (1993-2005); на VII всес. науково-технічній конференції “Проблемы комплексной автоматизации судовых технических средств”, 24-25 мая 1989 г. у НПО “Аврора”; на VIII науково-технічній конференції “Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями”, 21-24 марта 1989 г у м. Свердловск, УПИ; на VII міжнародній конференції “Контроль і управління в складних системах (КУСС-2003)” 8-11 жовтня 2003 р. у м.Вінниця, ВПУ; на науково-технічній конференції з міжнародною участю “Проблемы автоматизации та электрообладания транспортных средств (ПАЕТЗ-2005)” 19-21 травня 2005 р. у м. Миколаїв, НКУ; на міжнародній науковій конференції “Интеллектуальные системы принятия решений и прикладные аспекты информационных технологий (ISDMIT’2005) 19-21 травня 2005 року у м. Євпаторія, ХМУ.

За результатами дисертаційної роботи опубліковано 6 статей (у тому числі 2 – без співавторів) у наукових журналах і збірниках наукових праць, що входять до Переліку ВАК, 1 навчальний посібник, 1 депонована рукопис, 1 інженерна методика; отримано 2 авторських посвідчення.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В СУДНОВИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСАХ

1.1. Режими роботи дизелів пропульсивних комплексів

Для дизелів властива обмежувальна характеристика, під якою розуміється аналітична або графічна залежність енергетичних показників двигуна, що визначає верхню межу області допустимих в експлуатації режимів, від числа його обертів [11, 12, 13]. Ця характеристика може захищати двигун від надмірних перевантажень, неприпустимих навіть при короткочасній роботі (загороджувальна характеристика по паливоподачі), або від перевантажень, неприпустимих лише при тривалій роботі (обмежувальна характеристика по тепловій і механічній напруженості, рис.1.1).

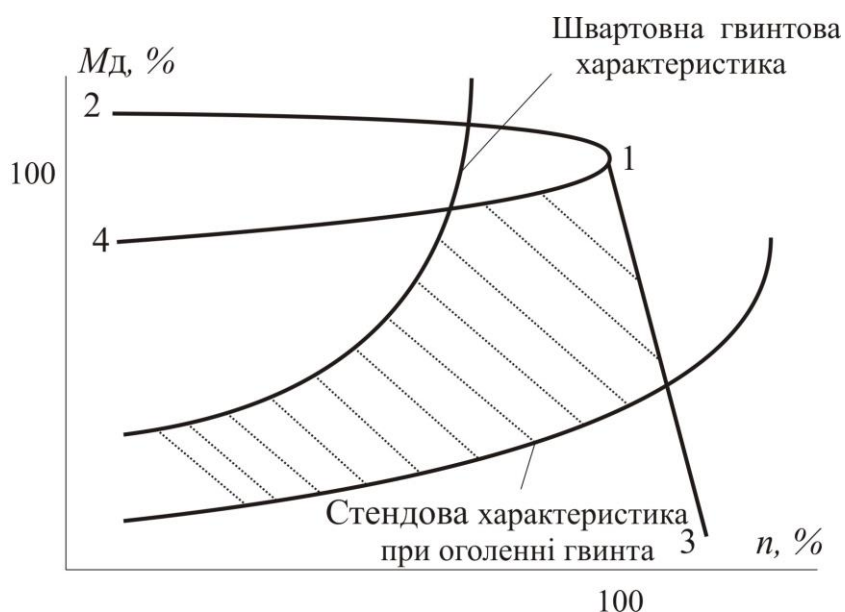


Рис. 1.1 Область режимів спільної роботи МОД і ГФК: M_d – момент дизеля; n – частота обертання валу ГФК; лінія 1-2 – часткова зовнішня характеристика; лінія 1-3 – регуляторна характеристика; лінія 1-4 – швидкісна обмежувальна характеристика

Загороджувальна характеристика по паливоподачі відповідає роботі двигуна з максимально допустимими подачами палива, величина яких визначається положенням рейки паливного насоса біля упора. В процесі експлуатації двигун може виходити на цю характеристику лише в точці перевантажувального режиму, якій відповідають $N_e = 1,1 N_{\text{ном}}$ і $n = 1,03 n_{\text{ном}}$. Тривалість роботи на цьому режимі не повинна перевищувати 1 годину.

Обмежувальна характеристика по тепловій і механічній напруженості відповідає роботі двигуна з такими навантаженнями, які забезпечують збереження його теплової і механічної напруженості на рівні номінального або експлуатаційного режиму. Необхідно стежити за тим, щоб режим роботи двигуна знаходився в межах цієї характеристики. Всі режими, що лежать вище обмежувальної характеристики по тепловій і механічній напруженості, є перевантажувальними, і експлуатувати двигуни на цих режимах не рекомендується. Як виняток, допускається лише короткочасна робота при виконанні судном маневрів [14, 15, 16].

Обмежувальна характеристика є чисто умовною і перехід двигуна за її межі на зовнішню номінальну характеристику або загороджувальну характеристику по паливному насосу конструктивно нічим не обмежений.

Для всіх дизелів без наддування, виключаючи мало-обертові (МОД), обмежувальною характеристикою може служити характеристика $M_{\text{кр}} = \text{const}$ або $P_e = \text{const}$ (лінія 2 рис.1.1). В цьому випадку при будь-якій частоті обертання середній ефективний або середній індикаторний тиск робочого циклу не повинен виходити за межі значень, встановлених для номінального режиму. Про рівень теплової і механічної напруженості в першому наближенні, за відсутності індикаторного приводу, можна судити по температурах випускних газів і максимальному тиску згоряння P_z . Останні також повинні укладатися в межі номінального режиму.

Часткова зовнішня характеристика визначає момент M_d , який дизель може розвивати при постійному положенні паливо регулюючого органу (індекс ПНВТ), залежно від частоти обертання валу.

Регуляторна характеристика визначає зміну моменту дизеля залежно від частоти обертання, коли в дію вступає регулятор швидкості, що впливає на рейки паливних насосів. Нахил цієї характеристики залежить від властивості регулятора частоти обертання дизеля.

Швидкісна обмежувальна характеристика визначає верхню межу допустимих в експлуатації режимів роботи дизеля. Необхідно мати на увазі, що обмежувальна характеристика не властива органічно самому дизелю, а є лише інструментом для контролю навантаження. У разі виходу навантаження за межі обмежувальної характеристики слід робити дії, направлені на зміну циклової подачі палива або характеристики споживача енергії (тобто ГФК), щоб увійти в область допустимих режимів роботи.

Обмежувальна характеристика виходить з точки номінального режиму (точка 1) і при зниженні обертів до $0,9 n_{\text{ном}}$ допускається короткочасна робота при $P_e = \text{const}$, а при більш низьких оборотах значення P_e обмежується лінією 2-3. Номінальний режим, або відповідний йому по прийнятій фірмою градації режим максимальної тривалої потужності не рекомендується для тривалої роботи, як і вся зона, лежача за межами стендової гвинтової характеристики.

Дизелебудівні фірми (додаток А) для сучасних форсованих двигунів з газотурбінним наддуванням на характеристиці $P_e = \text{const}$, особливо при оборотах, менших $0,9 n_{\text{ном}}$, не гарантують роботу двигуна без перевантажень, і тому при зниженні швидкісного режиму вимагають зменшувати подачу палива і переходити на режими більш низьких P_e (лінія 3 рис.1.1). При призначенні режимів роботи потужних МОД з газотурбінним наддуванням, наприклад моделей *RD* і *RND* фірми "Зульцер" рекомендує користуватися графіком обмежувальної характеристики, наданим на рис. 1.2 [17, 18].

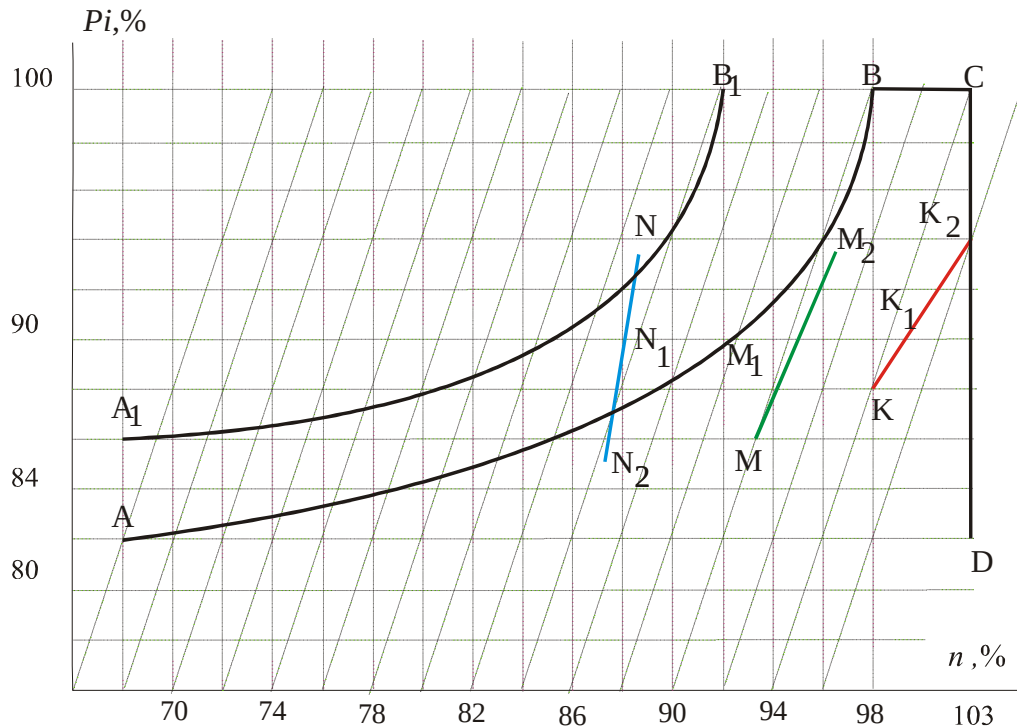


Рис. 1.2 Графік вибору експлуатаційних режимів роботи дизелів фірми “Зульцер”: P_i – індикаторний тиск; n – частота обертання валу; ABC – швидкісна обмежувальна характеристика для тривалої роботи; A_1B_1BC – швидкісна обмежувальна характеристика для короткочасної роботи; CD – лінія, що обмежує найбільшу частоту обертання, допустиму при тривалій експлуатації дизеля; MM_1M_2 , NN_1N_2 , KK_1K_2 – лінії вибору режиму роботи (після виходу з порту і введення в передбачуваний тривалий режим з попереднім індиціюванням, після тривалої стоянки в тропічному порту і при плаванні в баласті відповідно)

На графік (рис. 1.2) нанесена сітка гвинтових характеристик $P_i = cn^2$.

Поле, обмежене лінією $ABCD$, графічно відображає всі можливі режими, на яких двигун може працювати в експлуатації без перевантаження. Якщо температура повітря на вході в дизель не перевищує стандартну. Поле, обмежене лініями ABB_1A_1 графічно відображає режими, допустимі для короткочасної роботи.

Щоб мати достатній запас потужності і цим забезпечити роботу двигуна в реальних умовах експлуатації без теплових і механічних перевантажень, більшість фірм пропонують проектувати гребні гвинти так, щоб при повному осіданні і номінальному числі оборотів двигун завантажувався на 85-90 % від номінальної потужності. Тоді експлуатаційний режим повного ходу, залежно

від стану корпусу (ступінь його обростання), погодних умов і завантаження судна, буде автоматично укладатися в зону *A* (рис. 1.3) [19, 20, 21, 22].

Якщо максимальну тривалу потужність, що призначається, наприклад фірмою “Бурмейстер і Вайн” (B&W) (рис. 1.3), прийняти за номінальну, то при чистому корпусі і повному осіданні, при номінальному числі оборотів двигун повинен завантажуватися орієнтовно на $0,93 P_{\text{еном}}$. Область експлуатаційних режимів повного ходу, що при цьому рекомендується розташовується нижче за стендову гвинтову характеристику і характеристику $P_{\text{еном}} = \text{const}$ [23, 24, 25].

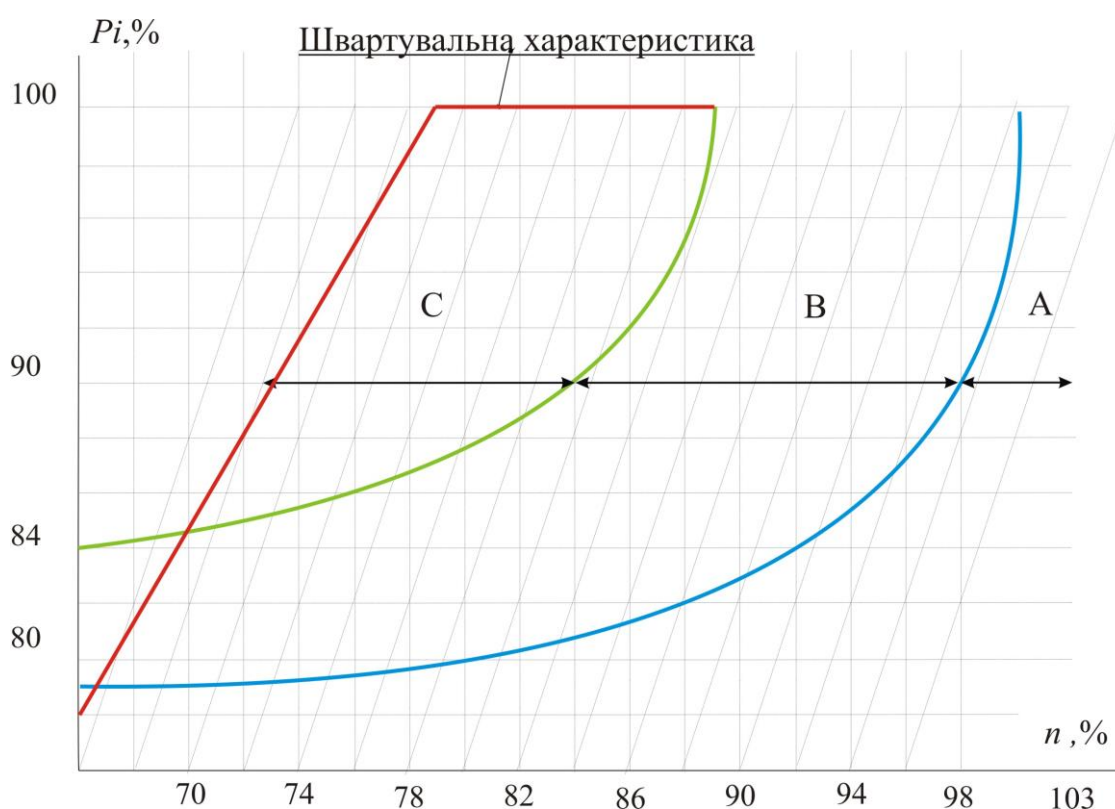


Рис. 1.3 Зони режимів МОД B&W в льодових умовах плавання:

A – тривала робота; *B* – не більше 1 години; *C* – не більше 5 хвилин

При проходженні прямим курсом в каналі за криголамом, або, при самотійному плаванні в рівній кризі, режим роботи дизеля повинен розташовуватися усередині поля режимів, допустимих для тривалої роботи (зона *A*).

При проходженні поворотів каналу, при стисненні кригою, при форсуванні льодових перемичок допускається короткочасна робота дизеля в

зоні *B*. Тривалість безперервної роботи в цій зоні не повинна перевищувати 1 годину.

Робота дизеля за межами зони *B* (зона *C*) допускається не більше 5 хвилин у разі загрози заклинювання судна. Якщо протягом вказаного часу, навантаження дизеля не увійде до зони *B* або *A*, необхідно зменшити циклову подачу палива до введення режиму двигуна в одну з цих зон. У всіх випадках циклова подача палива не повинна перевищувати номінального значення.

Таким чином, узагальнюючі, можна зробити наступні підсумки:

- режим роботи дизеля визначається моментом, який він розвиває, частотою обертання валу і умовами експлуатації. Можливість роботи дизеля на тому або іншому режимі залежить від його характеристик і характеристики споживача потужності ГФК;

- характеристика ГФК, під якою розуміється залежність споживаного гвинтом моменту M_d від частоти обертання, визначається конструктивними елементами гвинта і експлуатаційними чинниками: осіданням судна, глибиною під кілем, ступенем обростання судна і гвинта, метеорологічними умовами тощо. На рис. 1.1 показаний можливий діапазон зміни характеристики гвинта в експлуатації: ліва крива відповідає нульовій швидкості судна (на швартових), права крива - плаванню судна в баласті з чистим корпусом і при попутному вітрі;

- область режимів роботи дизеля в експлуатації обкреслюється характеристиками дизеля і діапазоном зміни характеристик ГФК. З урахуванням обмежень, що накладаються, на навантаження дизеля область допустимих режимів роботи відповідає заштрихованій на рис. 1.1;

- сучасні форсовані дизелі з наддуванням мають ту властивість, що робота на зниженій частоті обертання часткової зовнішньої характеристики супроводжується зменшенням тиску наддування. Це приводить до зниження вагового заряду повітря в циліндрі, зменшенню коефіцієнта надлишку повітря, що згоряє і, отже, до збільшення середньої температури газів під час робочого ходу і вільного випуску. В результаті збільшується теплове

навантаження на газо-випускні органи, а в деяких випадках спостерігається підвищення температури поршня [26, 27];

- при низькому ступені наддування робота дизеля на зниженій частоті обертання часткової зовнішньої характеристики супроводжується зростанням максимального тиску газів в циліндрі унаслідок збільшення часу для підготовки палива і його згоряння на ділянці до верхньої мертвої точки. Це приводить до збільшення механічних навантажень на деталі дизеля. Тому, хоча дизель і здатний сприйняти навантаження, відповідне будь-якій точці зовнішньої характеристики, швидкісні обмежувальні характеристики встановлюються завжди нижче за зовнішню характеристику;

- в практиці експлуатації мають місце випадки, коли характеристика гребного гвинта змінюється в часі (плавання в каналі за криголамом або вільне плавання в льодах, вхід в циркуляцію і вихід з неї, плавання на хвилюванні і ін.). При виборі способу управління дизелем в таких умовах слід урахувати, що не стаціонарність режиму у меншій мірі впливає на теплову і механічну напруженість двигуна, якщо зміна режиму відбувається за рахунок зміни частоти обертання при постійній або мало змінній цикловій подачі палива. Обумовлено це тим, що циклова подача палива найбільшою мірою визначає температурний стан деталей ЦПГ, і швидка її зміна приводить до помітного спотворення температурного поля деталей і до появи додаткових термічних напружень;

- вибір швидкості руху судна визначається умовами плавання. Проте, за наявності альтернативних рішень слід приймати до уваги, що найбільш важкими режимами роботи дизеля є режими поблизу швартової характеристики гребного гвинта, тобто при майже максимальній паливоподачі і вельми малій (майже нульовій) швидкості судна. Тому, за інших рівних умов переважно слідувати з підвищеною швидкістю ходу, долаючи тимчасове збільшення опору за рахунок інерції судна, а не за рахунок виходу дизеля на режими зон *B* і *C*;

- з перехідних режимів для двигуна найбільш несприятливим є швидке, тобто протягом 1-2 хвилини повне накидання навантаження після зупинки і охолодження протягом 5-10 хвилин. Слід уникати таких накидань навантаження. При заклиненому судні переважно працювати на режимі швартової характеристики в зоні *A* (рис. 1.3), чим зупиняти двигун. Якщо двигун був зупинений на час більше 10 хвилин, рекомендується до початку маневрування запустити двигун і пропрацювати на зниженому навантаженні 5-10 хвилин.

Все перераховане дозволяє зробити головний висновок, що застосування на лінії валу МОД - ГФК додаткового пристрою потужності (бустера), електричного двигуна, що одержує живлення, наприклад, від середньо-оборотного дизель-генератора (СОДГ) через перетворювач частоти (ПЧ), і призначеного для підтримки оборотів МОД в перехідних і маневрених режимах в необхідному діапазоні, дозволить уникнути всіх тих негативних явищ за рахунок використання регулювальних властивостей частотно-керованого електродвигуна.

1.2. Сучасні суднові пропульсивні комплекси з використанням дизель-електричної передачі потужності на гвинт

Останні 20-30 років судноплавство розвивається за рахунок зменшення вартості морських перевезень, утворення комерційних співтовариств або злиття компаній шляхом придбання пакета акцій, або за рахунок збільшення тоннажності суден і дальності перевезень. Наприклад, контейнеровоз «*Nedlloyd Dejima*» надійшов в експлуатацію в 1973 році з пропускнуою спроможністю 2952 контейнера, що зробило його одним із найбільших суден такого класу. Сьогодні сучасний контейнеровоз типу P&O «*Nedlloyd*

Southampton» може перевозити 6690 контейнерів [28].

Отже, будівництво суден з великою пропускною спроможністю, типу *Ultra Large Container Vessels (ULCVs)*, рано чи пізно призведуть до використання концепції гібридних рушіїв, що інтегрують ефективність МОД з ГФК із гнучкістю дизель-електричного приводу [29], що дозволить підвищити ефективність передачі потужності в пропульсивному комплексі за рахунок зменшення впливу збільшення моменту обертання ГФК на параметри МОД.

Крім того, хоча основна концепція, у котрій одиночний МОД безпосередньо обертає одиночний ГФК, має головні переваги - простота установки і достатньо високий коефіцієнт корисної дії (ККД), проте висока ефективність двигуна потребує застосування гребних гвинтів оптимального діаметра, використання яких буде утруднено на судах типу *ULCVs*, через великі посідання останніх. Обмеження діаметра й одночасне збільшення потужності МОД призведе до великих перевантажень гребних гвинтів, які буде важко збудувати внаслідок зростання їхньої маси й ускладнення форми, що призведе до їх резонансних коливань [30, 31].

Пов'язані з гребними гвинтами труднощі – не останні при застосуванні традиційної концепції МОД до *ULCVs*. Будівництво МОД великих потужностей йде по шляху збільшення числа циліндрів у комбінації з існуючими діаметрами поршнів, або ж із застосуванням винятково великих діаметрів у комбінації з класичною кількістю циліндрів. Це, в остаточному підсумку могло б призвести до бажаного результату - одержанню необхідної вихідної потужності МОД, проте не виправдало б себе з погляду ефективності капіталовкладень для судноплавних компаній, верфей або будівельних фірм, що будують двигуни (додаток А). Одна гвинтова установка з ГФК і МОД типу *Sulzer 12RTA96C* може забезпечити всі режими роботи суден із пропускною спроможністю до 7500 контейнерів, з урахуванням правильності завантаження і вибору оптимальної швидкості.

Друга концепція (рис. 1.4) є різновидом першої, розділяє переваги і недоліки першої, хоча поточний рівень розвитку в технології, проте, не

дозволить застосовувати електродвигуни дуже великих потужностей. Обмеження по потужності для цієї концепції визначається наявністю одного ГФК із електродвигуном відповідного розміру на лінії валу. Розумна межа для судна із установленою потужністю приблизно 76 МВт: 66 МВт приділяється МОД типу *Sulzer 12RTA96C* і 10 МВт синхронному або асинхронному (СД або АД) двигуну, що одержує живлення від середньо обертового дизель генератора (СОДГ) із дизелем, наприклад, типу 12V46.

Саме цій концепції буде приділено увагу при дослідженні питання підвищення ефективності передачі потужності в пропульсивних комплексах з МОД і трифазним частотно-керованим АД з короткозамкненою обмоткою ротора, розташованого на лінії валу ГФК.

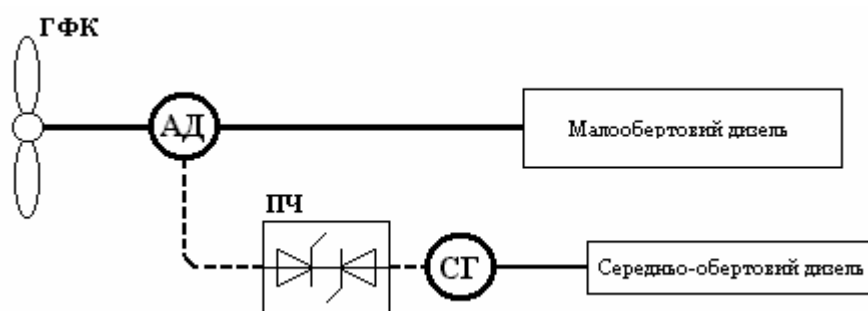


Рис. 1.4 Пропульсивна установка з одним МОД і електроприводом, що «підживлює» і отримує живлення від середньо-обертового дизель-генератора: ГФК – гвинт фіксованого кроку; АД – асинхронний двигун; СГ – синхронний генератор; ПЧ – перетворювач частоти.

Балтійський суднобудівельний завод [32] до 2005 року повинен випустити 5 танкерів льодового плавання *DW 74600* тон з енергетичною установкою, яка komponує МОД для руху на чистій воді і бустерний електродвигун, що на ходу в кригах задовольняє вимогам Регістра по додатковій потужності. Електростанція, що забезпечує енергією бустер на ходу, на стоянці постачає електроенергію інших споживачів. Гнучка схема “МОД - бустер” дозволяє танкеру йти на чистій воді зі швидкістю 14,5 вузла (МОД) і при необхідності підняти швидкість до 17,3 вузла (МОД + бустер). У випадку виходу з ладу МОД танкер може рухатися зі швидкістю біля 10 вузлів

Друге значне технічне рішення було досягнуто з пропозицією нового пропульсивного комплексу, призначеного для великотоннажних танкерів. В проекті 2001 року була передбачена установка ВЕГРК потужністю 16000 кВт на двох танкерах замовлених в Японії для *Fortun Oil & Gas*. Проект забезпечує вихід КМУ на обширний танкерний сектор суднобудування з її новою технологією "Double Acting". ВЕГРК є ключовою ланкою цієї технології. Суть її полягає в тому, що судно будується і обладнується з таким розрахунком, що воно може рухатися вперед кормою (для чого спроектовані льодохідні обводи кормової частини), а на чистій воді - носом вперед (використовуються гідродинамічні оптимізовані обводи носової частини).

Найбільшим досвідом використання нових пропульсивних комплексів володіє *Fortum* через його спільне з КМУ підприємство *Nemarc Shipping*. Два арктичні танкери *DW 16400* тон *Uikku* і *Lunni* були переобладнані з установкою 11400 кіловатних приводів *Azipod* в 1993 і 1995 роках. Танкери побудовані по вищому льодовому класу 1А з корпусними конструкціями розрахованими на 40 літню експлуатацію.

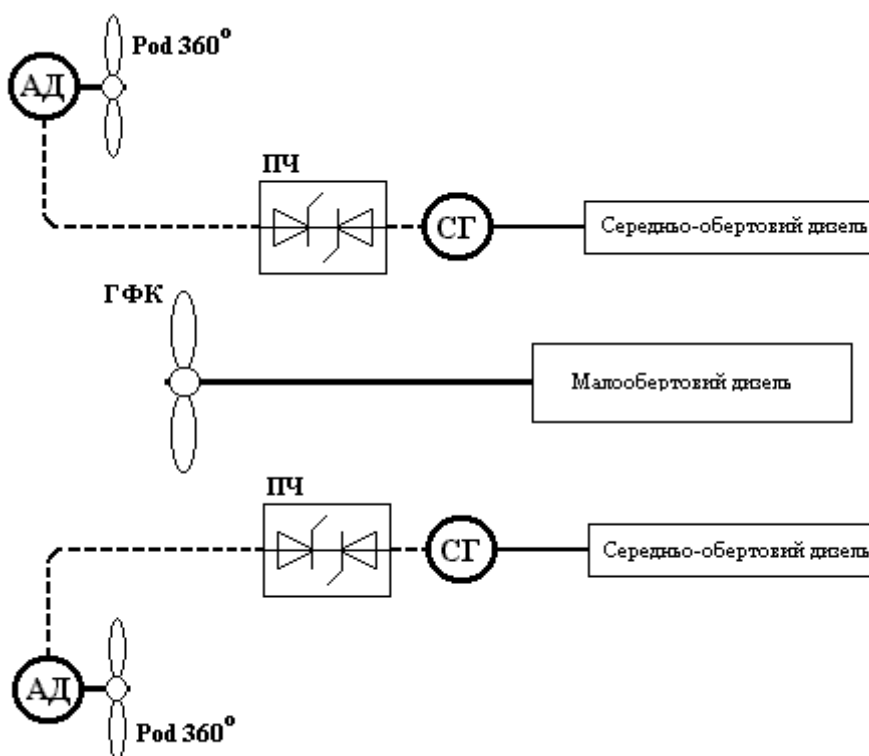


Рис. 1.6 Гібридна установка з двома дизель-електричними приводами типу AZIPOD

Розвиваючи виготовлення несерійних, індивідуальних проектів *ABB* збільшив свій вплив на ринку технологій ВЕГРК. Система *Compact Azipod* була розроблена фінськими фахівцями для приводів в діапазоні потужностей від 500 до 5000 кіловатів. За успішними замовленнями для нафтовидобувної індустрії послідувало замовлення для дослідницького судна Англійського Міністерства Оборони. Одночасно з використанням переваг оригінальної концепції, останні розробки включають відмітні особливості, продиктовані впливом і специфічними вимогами флоту невеликих судів, поромів, судів внутрішнього і прибережного плавання. Поліпшення маневреності і економічності стали основними вимогами, наріжним каменем в розвитку проекту *Compact Azipod*. Можна припустити, що незабаром ринок компактних охолоджуваних водою ВЕГРК може досягти декількох сотень установок в рік.

Усі вищерозглянуті концепції будуються з застосування АД або СД, що одержують живлення від СОДГ. Електродвигун (ЕД) призначений для підведення додаткової потужності, живиться від СОДГ через ПЧ. Електричний генератор є синхронним, а дизель – середньо-обертовим. ЕД приділяється 10÷15% від загальної потужності силової установки.

Головний МОД сумісно з ЕД повинні забезпечити ефективні зміни частоти обертання ГФК у всьому діапазоні, з точки зору зменшення споживання палива і амплітуди крутильних коливань. Однак, на сьогоднішній день, недостатньо даних про підвищення ефективності передачі потужності до рушія для розглянутих концепцій.

1.3. Системи управління передачею потужностей в пропульсивних комплексах

Пропульсивний комплекс сучасного судна, для якого необхідно забезпечити зміну частот обертання у широких межах, забезпечення

необхідної маневреності з одночасною економією палива, а також дотримання високої надійності всієї енергетичної установки, показано, як приклад, на рис. 1.7 [36, 37, 38].

Головний МОД сумісно з ЕД повинен забезпечувати ефективні зміни частоти обертання ГФК від нульових значень до номінальних. Для забезпечення ефективного та надійного регулювання діапазон зміни частоти обертання ЕД повинен бути не менше 20:1 [39, 40]. Для цього доцільно застосовувати ПЧ виконаний за схемою з автономним інвертором струму (АІС) на цілком керованих тиристорах із симетричною оптимальною широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Це необхідно для максимального використання АД по напрузі та регулювання обертів або моменту за принципом відношення напруги до частоти у потрібних межах.

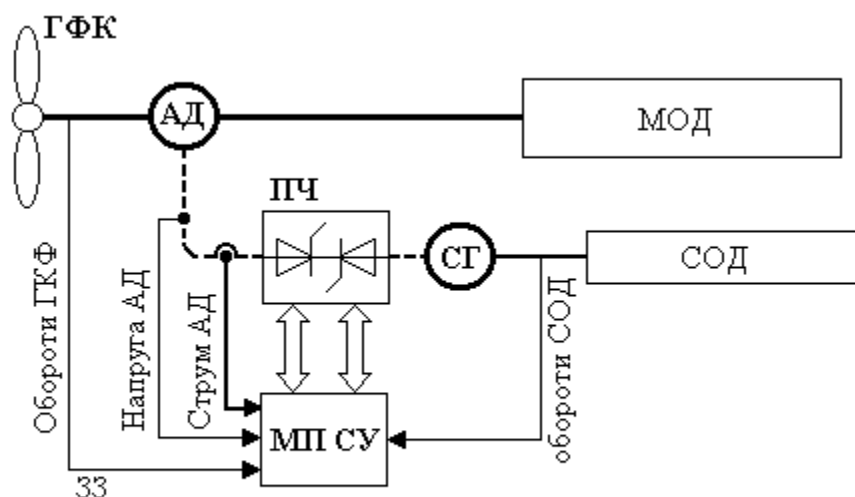


Рис. 1.7 Судновий дизель-електричний пропульсивний комплекс: ГФК – гвинт фіксованого кроку; АД – асинхронний електродвигун; СГ – синхронний генератор; ПЧ – перетворювач частоти; СОД – середньоборотний дизель; МОД – малооборотний дизель; МПСУ – мікропроцесорна система управління; ЗЗ – зворотний зв'язок

Для постійних умов на малих швидкостях судна «жорсткість» механічної характеристики ЕД досягається за допомогою застосування методу непрямої компенсації ковзання. Досягнення необхідної характеристики двигуна залежить від точності добутку ковзання при номінальному струмі АД на частоту електричної напруги ПЧ.

Компенсація ковзання АД для забезпечення потрібної механічної характеристики і збільшення діапазону регулювання його частоти обертання повинні забезпечуватися побічно з електричного струму статора ЕД чи прямо через зовнішні тахогенератори, імпульсні давачі швидкості тощо. Використання давачів електричного струму на ефекті Холу дає можливість застосувати частотно-струмове управління АД, що забезпечує більшу точність регулювання обертів ГФК для непостійних експлуатаційних умов.

Стосовно до ЕД, що працює при різко змінному навантаженні, найчастіше ударного характеру, меншій момент інерції двигуна і відсутність комутаційних обмежень дозволяють реалізувати більш ефективне обмеження динамічних навантажень, що діють на механічне устаткування, підвищити надійність роботи механічного та електричного устаткування, знизити витрати енергії в процесах і т.д.

Електрична схема ПЧ має ланку постійного струму з підключеним до нього інвертором на тиристорах, що повністю керуються. Проблема рекуперації енергії при генераторному гальмуванні ЕД вирішується за допомогою інвертора, підключеного паралельно загальному некерованому випрямлячу. Можливість рекуперації забезпечує мінімізацію споживання енергії при збереженні задовільної сумісної з мережею роботи при зміні напруги від +10 до -30% номінального значення, коефіцієнт потужності більше 0,9, незначний рівень вищих гармонік у споживаному струмі [41, 42].

Коли навантаження на валу АД нижче номінального, напругу на його статорі слід знизити, щоб зменшити споживані з мережі струм, реактивну потужність і мінімізувати втрати енергії. Таким чином, регулювання напруги, що підводиться до статора АД, залежно від навантаження на його валу, дозволяє реалізувати економічні режими роботи АД і живлячих його генераторів [43, 44].

На підставі прогнозованої перспективи, можна узагальнити таким чином:

- традиційні системи електроприводів пропульсивних комплексів зберігаються в тому вигляді, якими вони склалися до кінця минулого століття. Їх вдосконалення буде йти в основному по шляху підвищення надійності, зниження витрат на профілактичне обслуговування, мінімізації енергетичних витрат;

- у зв'язку з більш інтенсивним будівництвом суден з єдиними електроенергетичними системами, механізми забезпечення руху судна будуть обладнуватися індивідуальними управляючими пристроями з широким застосуванням енергетичної напівпровідникової і мікропроцесорної техніки (Додаток Б). При цьому будуть широко застосовуватися управління основними параметрами (напругою, струмом, потужністю, швидкістю тощо);

- для суден з горизонтальним способом завантажування, ліхтеровозів, пасажирських, танкерів льодового плавання, суден, що забезпечують освоєння континентального шельфу, рибпромислових суден і ін. потрібно буде велике число складних дизель-електричних пропульсивних комплексів потужністю від декількох до десятків мегават. Ці системи будуть базуватися з застосуванням електродвигунів змінного струму, що одержують живлення від ПЧ з управлінням за допомогою ЕОМ.

Надійність, ресурс, продуктивність, витрати енергії електродвигунів гребних гвинтів в експлуатації істотно залежать від якості споживаної ними електроенергії: напруги живлення, частоти живлячого струму, величини і складу вищих гармонійних [45, 46].

Дизель-електричні пропульсивні комплекси з АД, де відбувається регулювання частоти обертання АД і працюючі за принципом перетворення змінної напруги суднової мережі в змінну напругу регульованої частоти, відрізняються високою надійністю, мають ККД до 90%, різні способи гальмування і закони частотного управління. Проте рівномірність і стабільність при управлінні частотою обертання не однакова у всьому діапазоні регулювання і залежить від навантаження. Дані ПЧ випускаються як вітчизняними підприємствами, так і зарубіжними фірмами. [47, 48, 49, 50, 51,

52, 53, 54], характерними особливостями яких є: різноманіття схемних рішень як силових блоків, так і систем управління; різноманітна елементна база та структура самих пристроїв. Перехід на нове покоління ПЧ характеризувалися появою нових поколінь енергетичної напівпровідникової техніки і мікропроцесорної техніки. Використовування вказаних елементів дозволило істотно поліпшити техніко-економічні показники ПЧ: збільшити ККД і агрегатну потужність; розширити діапазон управління і підвищити його точність за рахунок можливості реалізації різних законів управління тощо.

За даними патентної і кон'юктурно-економічної інформації встановлено, що провідне положення на вітчизняному ринку ПЧ для живлення АД займають наступні вітчизняні організації: ПО "ХЕМЗ" (Україна), Дніпропетровський гірський інститут (Україна) і Харківський політехнічний інститут (Україна).

На зарубіжному ринку провідне положення займають наступні фірми: *AEG, Siemens AG, ABB* (Німеччина), *ASEA* (Швеція), *Antonic* (Англія), *Fuji Elektrik* (Японія), *Elin-Union, General Electric* (США), *Telemecanique* (ЮАР) і ін. Вказані організації і фірми серійно випускають сучасні комплексні ПЧ і електроприводи, а також проводять науково-дослідні і дослідно-конструкторські роботи по їх вдосконаленню.

Визначення тенденцій розвитку ПЧ для живлення електродвигунів дизель-електричних пропульсивних комплексів було виконано шляхом аналізу активності винахідництва і напрямів технічних пошуків організацій (фірм) промислово розвинутих країн. Асинхронні електродвигуни з частотним управлінням виконуються на базі транзисторних або тиристорних ПЧ з проміжною ланкою постійного струму на базі автономних інверторів, які забезпечують регулювання частоти обертання валу вниз від номінальної.

Типова схема асинхронного електроприводу на базі автономного інвертування включає: шість діодів некерованого випрямляча, тиристорний міст інвертору з комутуючими елементами і ланку постійного струму. Система регулювання двоконтурна і забезпечує режим роботи АД за рахунок

регулювання кута навантаження. Нові серії ПЧ на основі інверторів з розділовими діодами випустили фірми *Rebicon* (США) і *ABB* (Німеччина) [55, 56] типу *ACS800* і *ACS1000* відповідно. Перетворювачі розраховані на потужність від 45 до 12000 кВт, напруга 660 - 11000 В і мають вихідну частоту, що змінюється від 1 до 50 (60) Гц. Серії мають системи мікропроцесорного управління, захисту і діагностики.

Труднощі застосування АІС пов'язані з наступними особливостями:

- високими рівнями між фазних комутаційних перенапружень на статорі АД. При навантаженні двигуна по моменту, рівному 0,85 – 0,9 номінального значення, амплітуда перенапружень, що прикладаються до ізоляції двигуна і вентильного устаткування, може досягати 1,65 – 1,85 амплітуди номінальної лінійної напруги;
- збільшеними втратами у вентильному устаткуванні, оскільки електричний струм протікає не тільки в тиристорах, але і в розділових діодах;
- значною сумарною встановленою ємністю конденсаторів фільтру.

За кордоном частотно - регульовані асинхронні електроприводи з ПЧ на базі автономних інверторів напруги (АІН) виготовляються потужністю від 1.5 кВт до 30 МВт. Провідні фірми - *Siemens AG*, *ABB Stromberg*, *Structmeter GmbH* (Німеччина), *Fuji Electric*, *Danki* (Японія), *Leroy Somer* (Франція), *Eurotherm Drives Ltd* (Великобританія) і ін. - випускають ПЧ на базі інверторів напруги, чітко розмежовувавши область застосування кожного, і залежно від конкретних вимог поставляють приводи різного ступеня складності (нереверсивні і реверсивні, без електричного гальмування, з рекуперацією енергії в мережу або гасінням її на опорі). Системи управління залежно від призначення також мають різний ступінь складності - від найпростіших з пропорційним регулюванням ($U/f = \text{Const}$), до складних систем векторного управління.

За принципом побудови силових систем електроприводів з ПЧ на базі АІН можна розділити на наступні групи:

- з інвертуваннями на тиристорах з амплітудною модуляцією, в яких вихідна напруга регулюється керованим випрямлячем;
- з інвертуваннями на тиристорах з амплітудною модуляцією, з некерованим випрямлячем на вході, в яких вихідна напруга регулюється проміжним імпульсним регулятором постійної напруги (переривником);
- з інвертуваннями на тиристорах з некерованим випрямлячем з ШІМ;
- з інвертуваннями на силових транзисторах з ШІМ, з некерованим випрямлячем;
- з інвертуваннями на нових напівпровідникових приладах: тиристорах, що замикаються, тиристорах із зворотною провідністю, з некерованим випрямлячем.

Тиристорні електроприводи з керованим випрямлячем і з АІН з амплітудною модуляцією достатньо складні і багатoelementні, містять по 15 - 20 тиристорів. Вони не забезпечують режим рекуперативного гальмування. Коефіцієнт потужності ПЧ з тиристорним випрямлячем на вході при зниженні частоти вихідної напруги зменшується. Живлення двигуна здійснюється прямокутною напругою, що обмежує нижню межу діапазону регулювання частоти.

Останнім часом в машинах і механізмах малої і середньої потужності тиристорні і транзисторні електроприводи з ШІМ замінюють приводи інших типів. Такий висновок можна зробити з аналізу публікацій зарубіжної періодики останніх років, з якої очевидно, що зарубіжні фірми узяли курс на застосування частотно - регульованих приводів з інвертуванням напруги на тиристорах або транзисторах з некерованим випрямлячем на вході і регулюванням напруги в подальших ланках методами ШІМ. Використовування простого і економічного діодного (некерованого) випрямляча на вході зменшує погіршення напруги мережі і підвищує коефіцієнт потужності, знижує габаритні розміри фільтра, підвищує надійність системи. Ця тенденція ілюструється продукцією фірм *Siemens AG*, *Abus KG* (Німеччина), *Scorch Danki* (Японія), *Saia* (Швейцарія) і ін.

Втрати в АД через вищі гармоніки електричної напруги при ШІМ менше, ККД АІН дещо знижується через збільшення числа комутацій за половину періоду. В добре спроектованому електроприводі з ШІМ частота комутацій повинна збільшуватися до значення, допустимого для силових напівпровідникових приладів, що використовуються, так, щоб збільшення втрат в АІН не перевищувала зниження втрат в АД. Малий зміст гармонік напруги і малі пульсації моменту в області низьких частот дозволяють розширити діапазон управління частотою обертання практично до нульового значення. В основу силових схем електроприводів з ШІМ встановлені АІН з пофазною комутацією, а також АІН, в яких кожна фаза статора підключається до нульової точки, позитивному і негативному полюсам некерованого випрямляча, що забезпечує кращі можливості інвертування при різкому зниженні частоти (електроприводи серії *FM7 1103* фірми *Leroy Somer*, серії *SNT* фірми *Abus KG*, потужністю до 12000 кВт, діапазоном регулювання частоти 1:50 з точністю регулювання 1%), виконаного по схемі з нульовою точкою, що дозволяє ефективно формувати трьохрівневу напругу ланки постійної напруги [57]. Завдяки цьому при ШІМ істотно поліпшується форма струму і напруги в АД. Система управління забезпечує задовільну динаміку електроприводу, реалізуючи принцип “векторного” управління АД.

Системи управління електроприводів з ШІМ ускладнені в порівнянні з системами управління розглянутих раніше електроприводів з АІН. В системах без зворотного зв'язку по швидкості точність підтримки частоти обертання АД, керованого по частоті, залежить від ковзання. Оскільки, при постійному потоці, ковзання пропорційно моменту, обчислюючи момент, можна вводити в систему регулювання зворотний зв'язок, компенсуючий ковзання. Метод підвищення точності шляхом компенсації ковзання в АІН на базі ШІМ використані фірмами: *ABB Stromberg* в АІН типа *Invertron BMI* і *Invertron GMI*, *Klockner - Moeller* в АІН типа *AMPACT* (0.75 - 11000 кВт, точність регулювання в межах 1 об/хв при частоті обертання 3000 об/хв аж до повної зупинки з підтримкою повного моменту).

Фірмою *Hitachi Ltd* (Японія) розроблений багатоканальний ПЧ, що містить по два 3-фазні випрямлячі і інвертори на тиристорах, що замикаються (ЗТ), включених паралельно через зрівняльні реактори на стороні змінного струму. Частота перемикає ЗТ в такому ПЧ може бути зменшена в 4 рази в порівнянні із звичайним одиночним ПЧ. Система забезпечує: $\cos\varphi = 1$, зменшення гармонік, 2-стороннє протікання електроенергії [58].

Питання формування динамічних процесів в АД мають особливий інтерес, оскільки обертаючий момент АД при його включенні в мережу є коливальною функцією часу. Аналіз способів формування моменту АД в перехідних процесах дозволяє виділити найбільш поширені [59, 60, 61, 62]:

- створення початкового магнітного потоку при детермінованому підключенні фаз двигуна до мережі;
- зміна величини і швидкості наростання напруги, прикладеної до двигуна в перехідних режимах.

В першому випадку пропонується певна черговість підключення обмоток статора двигуна до мережі або синхронізоване з мережею перемикає тиристорних груп під час переходу двигуна з режиму в режим, що дозволяє компенсувати вільну складову потокощеплень і зменшувати амплітуду коливань моменту на валі в перехідних процесах.

Другий спосіб заснований на програмній зміні в процесі пуску кута відмикання тиристорів від деякого великого значення ($\alpha = 120^\circ$) до величини $\alpha = 0$; причому закон формування кута α в часі практично не впливає на характер перехідного режиму. Визначальним при цьому є час формування, яке вибирається виходячи або з часу загасання електромагнітних перехідних процесів в ЕД, або з періоду вільних коливань багатомасової електромеханічної системи, або з вимог плавності наростання швидкості. Закон управління дозволяє забезпечити пуск АД одночасно з регулюванням споживання енергії, що робить всю систему більш економічною.

На відміну від режимів пуску режими проти-включення, динамічного або рекуперативного гальмування є більш важкими, і процеси, що протікають

при магнітному полі, що не затухнуло, викликають ще більші кидки моментів, чим при пуску. Відомо, що в цьому випадку процес є нестабільним і залежить від кута зсуву між електрорушійною силою, індукованій струмами ротора в обмотці статора, і напругою живлення. При цьому існують як сприятливі, так і несприятливі кути зсуву. Поєднання детермінованого перемикання двигуна в гальмівний режим роботи з формуванням кута відкриття тиристорів у функції часу дозволяє отримати стабільні і наперед задані процеси в електричному двигуні.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСАХ

2.1. Методи рішення задач досліджень процесів в суднових дизель-електричних пропульсивних комплексах

В цьому розділі зробимо вибір тематики дисертаційної роботи, виходячи із результатів першого розділу.

Основні результати аналізу розділу формують загальні вимоги до розв'язування задачі підвищення ефективності передачі потужності в суднових пропульсивних комплексах з МОД і трифазними частотно-керованими АД з коротко-замкненою обмоткою ротора, розташованого на лінії валу рушія.

Спочатку необхідно конкретизувати питання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої основної задачі, які будуть складовими часткових задач, і які, на сьогоднішній день, є не розв'язаними, або знаходяться в межах окремих наукових досліджень і не можуть рахуватися такими, що є без суперечливими.

На пропульсивний комплекс судна в умовах різноманітних навантажень впливають як зовнішні умови, що постійно змінюються, так і режими суднового устаткування. З цієї причини і стійкість динамічних режимів головного двигуна буде залежати від навантаження на головний двигун і судову електроенергетичну мережу.

Стандартним способом забезпечення стійкості пропульсивного комплексу за умов експлуатації СЕУ, що змінюються є корекція параметрів системи “МОД - регулятор – СОДГ – ПЧ – АД – ГФК. Ураховуючи, що

навантаження на СОДГ і упор гвинта визначаються вимогами технологічного процесу і не можуть бути змінені в необхідну сторону, єдиним способом забезпечення необхідної якості регулювання є оптимальна настройка параметрів регулятора частоти обертання МОД і СОДГ, що максимально задовольняє всім основним експлуатаційним режимам СЕУ.

Наукова ідея дисертаційного дослідження – кожний судновий дизель-електричний пропульсивний комплекс, через свої інерційні характеристики має зону оптимальної настройки системи регулювання, незалежно від конкретного експлуатаційного режиму. Задача дослідження – на підставі розрахунку динамічних характеристик СЕУ суден типу *ULCVs* підтвердити або спростувати початкову передумову.

Для визначення оптимальних параметрів настройки необхідно провести аналіз всієї системи з погляду оптимуму настройки. Перш за все, необхідно провести розрахунок сумарного моменту інерції всіх мас системи, що рухаються, оскільки від нього в основному залежить постійна часу системи.

При визначенні сумарного моменту інерції залежно від режиму роботи судна ураховується те, що, наприклад, СОДГ при будь-якому навантаженні (у тому числі і нульовому) мають обертальний рух. Кількість приєднаних до гвинта мас води визначається кутом розвороту лопатей, який у свою чергу залежить від режиму роботи судна.

Далі необхідно провести аналіз динамічних характеристик МОД на предмет визначення стійкості його роботи і визначити оптимальні параметри (постійній часу залежно від ступеня нерівномірності регулятора). Кінцевою метою проведення досліджень в даному напрямі є розробка методики розрахунку оптимальних параметрів настройки системи автоматичного управління, що впливає на паливну рейку МОД, механізм зміни кроку гвинта (у разі використання гвинта регульованого кроку), регулятор частоти обертання, частоту і напругу СОДГ.

Специфіка визначення параметрів настройки регуляторів полягає в постановки задачі необхідності забезпечення оптимального регулювання по

вибраному критерію якості кожного режиму суднового дизель-електричного пропульсивного комплексу. В загальному випадку повне забезпечення одного критерію робить неможливим якісне регулювання по іншому критерію (наприклад, критерій “економічність” в більшості випадків суперечить критерію “експлуатаційна надійність”), тому звичайно при обліку декількох критеріїв вибирається основний (первинний), по якому проводиться розрахунок, а вторинні критерії використовуються для накладення меж на значення регульованого параметра.

Отже, для вирішення задачі створення адекватної математичної моделі енергетичних процесів суднового пропульсивного комплексу, необхідно визначити найбільш важливі параметри всіх регуляторів, а також їх вплив на якість перехідних процесів, які протікають в залежності від експлуатаційних умов. Наприклад, як впливає коефіцієнт передачі регулятора оборотів МОД на якість напруги на шинах СОДГ при підключенні до його шин АД, який вже обертається, і, навпаки, чи впливає на частоту обертання валу (і як що впливає, то як) коефіцієнт передачі регулятору оборотів АД при зростанні або зменшенні напруги на його шинах і т.д. Це дасть можливість виявити найбільш вагомні чинники у системі передачі потужності пропульсивного комплексу для подальшої їх оптимізації і створення нейронних мереж управління.

Різні підходи до аналізу і моделювання ДПУ описані і постійно обговорюються [63, 64]. Головною метою моделювання ДПУ є перевірка на продуктивність і стабільність енергетичних систем, поліпшення показників систем управління енергетичними комплексами, заснованих на досконаліших теоріях, з погляду економії палива і збільшення експлуатаційної надійності.

В добре відомих моделях [65, 66] суднових дизель-електричних пропульсивних комплексах (СДЕПК), з нестабільною напругою на шинах, малими відстанями між споживачами, що означає зневаження імпедансом мережі, сумірними потужностями генераторів станції і споживаною потужністю, акцент ставиться на створення динамічних моделей енергетичних

систем, інтелектуальних систем управління електродвигунами, самоналагоджувальних (нейронних) ПД-регуляторів різних параметрів. Однією з головних задач при симуляції подібних систем, є створення таких моделей, які враховували б поведінку всіх об'єктів при передачі потужності від дизель-генераторів на гребний гвинт, у тому числі і самого судна у взаємодії з дизелем, що дає можливість враховувати його гідродинамічні властивості та їх вплив на енергетичні процеси.

При рішенні дослідницьких задач пов'язаних з пошуком раціонального поєднання відразу декількох параметрів МОД, таких як ступінь стиснення, частота обертання валу, характеристика моменту опору, інтенсивність навантажень, параметри судна тощо, часто буває важко спланувати і обробити чисельний експеримент з великою кількістю чинників, що змінюються. В цьому випадку дуже ефективним засобом є багато-параметрична оптимізація, коли пошук раціонального поєднання чинників, що змінюються покладається на формальну процедуру нелінійного програмування, а досліднику залишається тільки грамотно сформулювати задачу оптимального пошуку і проаналізувати отримане рішення.

Узагальнюючі, можна зробити висновок, що для удосконалення оптимальної за структурою, що нею виконуються, системи управління ПЧ із ланкою постійного струму для живлення АД, необхідно враховувати стабільність і якість вихідної напруги СОДГ, а також напруги на самому АД, для чого система розподілу імпульсів управління АІС повинна забезпечувати усунення вищих гармонійних складових у напрузі у будь-якому режимі роботи судна (економічному або маневровому). Разом з тим, якість управління повинно бути на високому сучасному рівні, то б то вимоги до силових ключів АІС і діодів випрямлячів повинні бути у межах характеристик приборів, які на сьогоднішній день випускаються промисловістю. Також потрібно враховувати необхідність “відведення” потужності від обертового АД в режимах енергетичного гальмування, то б то забезпечити надійне і оптимальне управління устроями зворотної потужності.

Для математичного моделювання енергетичних процесів в СДЕПК, необхідно, як можна більше застосовувати інформаційні технології і нейронні мережі, які дозволили б зменшити порядок рівнянь математичних моделей окремих елементів пропульсивного комплексу.

Оскільки, перевірка математичної моделі енергетичних процесів в СДЕПК доцільно виконати у *MathLab/Simulink*, то єдиним припущенням яке необхідно зробити буде таке: всі елементи *Simulink*, які ми будемо застосовувати адекватні реальним, за винятком тих, параметри яких будуть змінюватися в процесі моделювання (наприклад: параметри схеми заміщення АД, постійні часу СОД тощо). Для перевірки адекватності цих елементів, необхідно провести порівняльний аналіз перехідних процесів, наприклад, при пуску АД на окремий СОДГ з моментом опору на валу, пропорційним частоті обертання.

Отже, у якості об'єкта дослідження у дисертаційній роботі обрано процеси при передачі механічної енергії до рушія в суднових пропульсивних комплексах, а предметом досліджень є підвищення ефективності передачі потужності в суднових дизельних пропульсивних комплексах.

Вище перелічені питання складають зміст дисертаційної роботи.

Таким чином, для забезпечення експлуатаційної надійності суднового МОД в умовах зростання інтенсивності мореплавання, економії енергоносіїв, поліпшення експлуатаційних показників дизеля в процесі експлуатації суднових пропульсивних комплексів, а також в наслідок відсутності адекватних математичних моделей останніх, темою досліджень вибрано підвищення ефективності передачі потужності в суднових дизельних пропульсивних комплексах.

Реалізація системного підходу при рішенні зазначеної задачі, виражається структурою методологічного забезпечення дисертаційних досліджень, яка приведена на технологічній карті (рис. 2.1).

Необхідність проведення даних наукових досліджень продиктовані потребами виробництва, які зумовили актуальність тематики дисертаційної

роботи, а саме, такими потребами з'явилися необхідність забезпечення надійності роботи суднового МОД в умовах зростання інтенсивності мореплавання, поліпшення експлуатаційних показників дизеля в процесі експлуатації суднових пропульсивних комплексів (і зокрема дизель-електричних), зростання економії енергоносіїв за рахунок підвищення ефективності їх використання в процесі експлуатації, а також оптимізацію процесів взаємодії компонентів суднових дизельних і дизель-електричних установок.

У роботі була сформульована тема дисертаційного дослідження і поставлена його мета, якою стало стабілізація моменту обертання валу рушія в судновому дизельному пропульсивному комплексі (СДПК) в експлуатаційних умовах.

Для реалізації мети дисертаційного дослідження необхідно було запропонувати наукову гіпотезу, яка після досконалого аналізу була сформульована наступним чином. При передачі потужності в СДПК за рахунок створення на лінії валу рушія додаткового керованого знакозмінного моменту обертання можливо обмежити механічні напруженості в гідропропульсивному комплексі управлінням його інерційністю.

Формування головної задачі, яка повинна забезпечити досягнення поставленої мети і коректний доказ наукової гіпотези, стало послідуочим етапом методологічного забезпечення. У якості головної задачі дослідження, що проводиться вибрано оптимізація режимів роботи СДПК з МОД і частотно-керованим АД на лінії валу при передачі потужності до рушія за рахунок зменшення споживання палива і амплітуди крутильних коливань.

Для пошуку рішення головної задачі дисертаційного дослідження була зроблена її декомпозиція на декілька складових частин (допоміжних) задач, сукупність розв'язок рішень котрих дозволяє знайти загальне рішення.

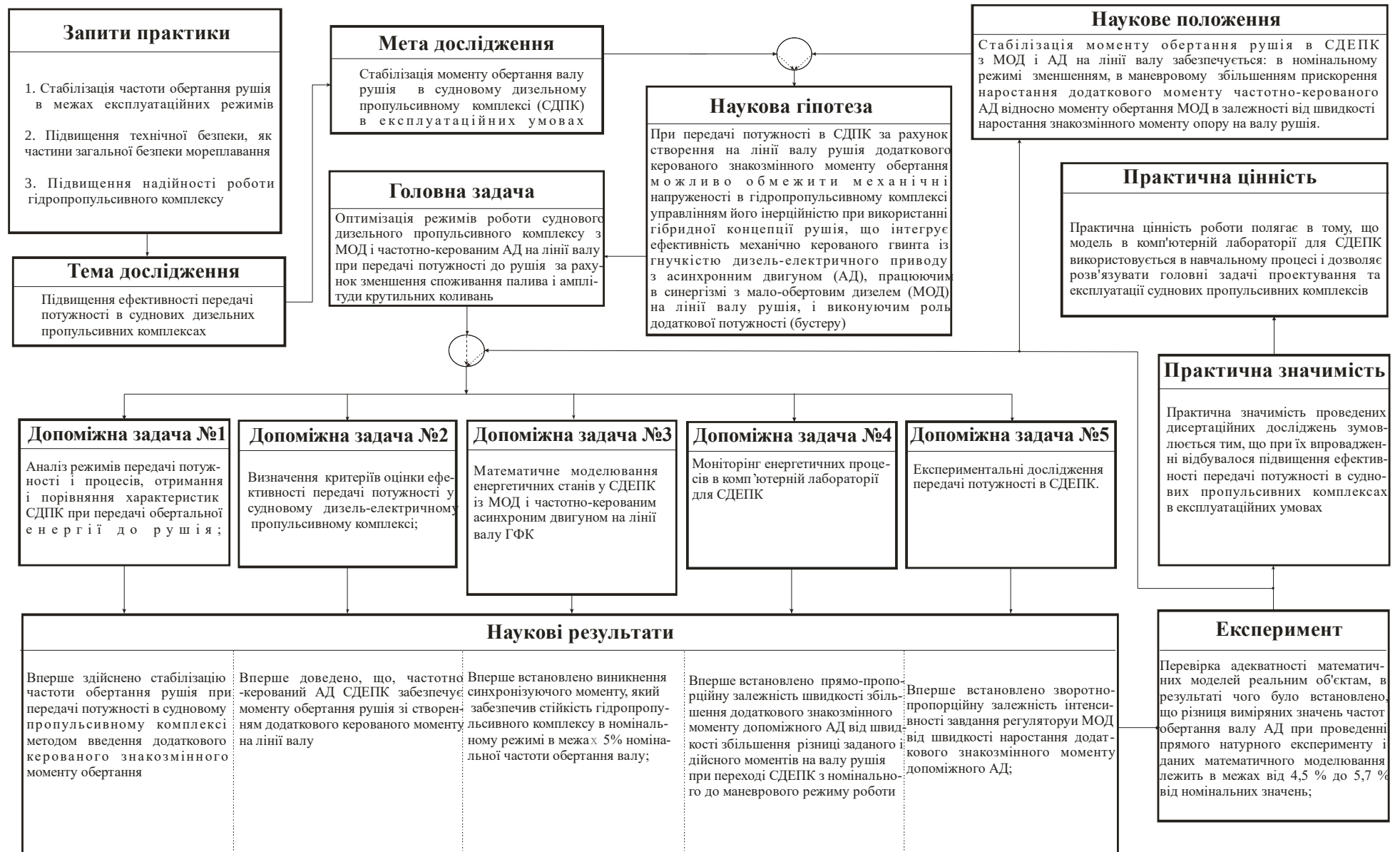


Рис. 2.1 Технологічна карта досліджень на тему : “Підвищення ефективності передачі потужності в суднових пропульсивних комплексах”

У результаті проведеного аналізу головна задача дисертаційного дослідження представлена у вигляді п'яти допоміжних задач:

- аналіз режимів передачі потужності і процесів в судових пропульсивних комплексах із МОД;
- визначення критеріїв оцінки ефективності передачі потужності у судовому дизель-електричному пропульсивному комплексі (СДЕПК);
- математичне моделювання енергетичних станів в СДЕПК із МОД і частотно-керованим асинхронним двигуном (АД) на лінії валу ГФК;
- моніторинг енергетичних процесів в комп'ютерній лабораторії для СДЕПК;
- експериментальні дослідження передачі потужності в СДЕПК.

З метою перевірки коректності отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи було проведено ряд експериментів, які являли собою моделювання процесів у пропульсивному комплексі при передачі потужності при різних експлуатаційних умовах.

Отримані результати підтвердили коректність наукової гіпотези о можливості за рахунок оптимізації процесів взаємодії частотно-керованого АД і МОД пропульсивних комплексів з ГФК обмежити теплові і механічні напруженості МОД на рівні номінального або експлуатаційного режиму в результаті зменшення середнього ефективного або середнього індикаторного тиску робочого циклу у всьому діапазоні регулювання частоти обертання валу ГФК при передачі потужності до нього, зменшити коливання валу і, як наслідок, збільшити маневреність судна.

2.2. Методика дослідження параметрів і характеристик суднових дизель-електричних пропульсивних комплексів

Основний принцип, закладений в методику, - забезпечення механічних і теплових навантажень МОД на рівні, не перевищуючому навантажень за стандартних умов заводських випробувань. Встановлення режиму роботи дизеля відповідно до методики не виключає необхідності контролю робочих параметрів, граничні значення яких обумовлені в заводській інструкції з експлуатації двигуна.

Методика ґрунтується на аналізі швидкісних обмежувальних характеристик з урахуванням температури повітря на вході в двигун. Швидкісні обмежувальні характеристики встановлюються для тривалої (необмеженої в часі) і для короткочасної роботи (не більше однієї години з обумовленою в заводській інструкції періодичністю) [67, 68, 69].

Для визначення режиму роботи головного дизеля використовується графік, побудований у відносних координатах “потужність дизеля - частота обертання”. Для практичного застосування графік може бути побудований з використанням як координат абсолютних величин.

Збільшення температури повітря на вході в двигун веде до зменшення масового заряду повітря в циліндрі і безпосередньо пов'язане із збільшенням температури випускних газів. Тому як обмежуючий параметр в тропічних умовах плавання приймається температура випускних газів.

Для суднових дизелів як параметри навантаження застосовуються:

- середній індикаторний тиск, який прямо пропорціональний внутрішньому моменту, що крутить і розвивається двигуном. Він найбільшою мірою характеризує механічні і теплові навантаження в правильно відрегульованому дизелі, оскільки безпосередньо пов'язаний з робочим процесом в циліндрах;

- циклова подача палива $b_{\text{ц}}$ або пропорційне їй відношення витрати палива до частоти обертання дизеля G/n . Зв'язок цих параметрів з середнім індикаторним тиском визначається співвідношенням:

$$b_{\text{ц}} = c \cdot G / n = c_1 \cdot P_i \cdot g_i / Q_f, \quad (1.2)$$

де c, c_1 – постійні коефіцієнти;

g_i – питома індикаторна витрата палива;

Q_f – кількість теплоти згоряння палива;

P_i – індикаторний тиск;

n – частота обертання валу дизеля.

Отже, якщо побудувати швидкісну обмежувальну характеристику в координатах $P_i - n$, то для переходу до обмежувальної характеристики в координатах $b_{\text{ц}} - n$ достатньо врахувати зміну g_i за наслідками стендових випробувань, а також можливу в умовах експлуатації зміну теплоти згоряння палива. Звичайно при перестроюванні характеристики у вказані координати зміною g_i нехтують.

Для забезпечення своєчасного контролю за режимом двигуна в ускладнених умовах плавання як параметр навантаження доцільно вибрати положення рейки ПНВТ. При використовуванні протягом одного рейса одного сорту палива між середнім індикаторним тиском і положенням рейок паливних насосів (індекс ПНВТ) або показчика навантаження (ПН) підтримується достатньо точний і стійкий практично прямолінійний зв'язок. Проте в процесі тривалої експлуатації цей зв'язок може порушуватися при зміні сорту або партії вживаного палива, при заміні або перерегулюванню паливних насосів, а також унаслідок зносу прецизійних пар насосів і форсунок. Тому, при використовуванні як параметра навантаження ПН або індекс ПНВТ, слід періодично перевіряти їх співвідношення з середнім

індикаторним тиском, або цикловою подачею палива. Перевірка повинна виконуватися при індиціюванні дизеля, передбаченими ПТЕ.

На параметри робочого процесу і теплову напруженість дизеля, крім циклової подачі палива і частоти обертання, впливають параметри палива і зовнішнього середовища. Підвищення температури, зниження атмосферного тиску і підвищення відносної вогкості, приводить до зміни характеристик палива, зменшення масового заряду повітря в циліндрі і до зростання температур робочого циклу [70, 71].

Стандартними атмосферними умовами для суднових дизелів є [72]:

- температура навколишнього середовища, К (°C) 300 (27);
- барометричний тиск, кПа (мм рт. ст.) 100 (750);
- відносна вогкість повітря, % 60.

Порівняння отриманих характеристик з характеристиками для конкретного дизеля проводиться по наступних ознаках:

- тип системи наддування (система з імпульсним або постійним наддуванням);
- тиск наддування на номінальному режимі, отриманий при стендових випробуваннях дизеля (надмірне);
- тривалість роботи на режимі (тривала без обмеження часу або короткочасна робота).

Всі швидкісні характеристики дизеля будуємо з дотриманням наступних принципів:

- для всіх двигунів допускається робота по частковій зовнішній характеристиці, відповідній номінальному середньому індикаторному тиску (номінальній цикловій подачі палива), в діапазонах частот обертання: 0,97 – 1,03) n_n – для тривалої роботи; (0,90- 0,97) n_n – для короткочасної роботи, тут n_n – номінальна частота обертання;
- допускається тривала робота дизеля з частотою обертання, на 3% перевищуючій номінальну ($n_{max} = 1,03 n_n$);

- при зниженій частоті обертання навантаження, що допускається, знижується, починаючи від $0,97 n_n$ – для тривалої роботи і від $0,9 n_n$ – для короткочасної. Нахил характеристики в цьому діапазоні визначається типом системи наддування і тиском наддування на номінальному режимі;

- значення середнього індикаторного тиску і частоти обертання на осях координат графіків і у формулах даються у відсотках від номінальних значень. Значення, що приводяться, тиск наддування відноситься до надмірного тиску.

Вид характеристики для проміжних значень тиску наддування знаходиться шляхом інтерполяції. Похилі ділянки характеристик, апроксимовані лінійними рівняннями вигляду

$$P_i = a + bn.$$

2.3. Загальна методика оптимізації взаємодії компонентів в пропульсивних комплексах

Розробка функціональних схем суднових систем управління АД ДПУ пропульсивних комплексів і методик оптимізації процесів в пропульсивних комплексах з електродвигунами і дизелями заснована на: класифікації систем управління; порівняльній оцінці енергетичних показників в різноманітних технологічних процесах виробництва і передачі потужності на судні; оптимізації СУ; складанні математичних моделей всіх елементів процесу передачі потужності до рушія, розробці методики чисельного розрахунку і моделювання на ЕОМ перехідних процесів; перевірці отриманих результатів шляхом проведення експериментальних досліджень в лабораторних і суднових умовах.

Процес дослідження зручно проілюструвати граф-схемою алгоритму (ГСА) оптимізації процесу взаємодії СУ (рис. 2.2), яка дозволяє виділити

основні результати і сформулювати теоретичні залежності по законах і положеннях, обґрунтованих в дисертації і дозволяє підвищити їх ефективність.



Рис. 2.2 Граф-схема алгоритму оптимізації процесів взаємодії компонентів

Запропоновані принципи оптимізації процесів взаємодії компонентів дизель-електричного комплексу з МОД і АД в різноманітних режимах роботи судна формалізовані у вигляді логічних і графічних схем передачі потужності до рушія, дозволили перейти до їх реалізації засобами із застосуванням сучасних принципів побудови систем виготовлення і передачі потужностей. Удосконалені математичні моделі дозволили оптимізувати взаємодію ПЧ АД з компонентами пропульсивного комплексу для підвищення ефективності передачі потужності. Розроблені алгоритми і програми пройшли стендові, лабораторні і судові випробування.

Узагальнюючи вищесказане, можна зробити висновки, що у результаті аналізу сучасних методів розв'язування задач підвищення ефективності передачі потужності в судовому пропульсивному комплексі, які враховують всі найбільш важливі чинники:

- сформульовані вимоги і припущення до математичних моделей;
- при розділенні головної задачі на п'ять часткових зроблено вибір методів їх розв'язування, при чому структура методологічного забезпечення за тематикою дисертаційних досліджень представлена технологічною картою і ГСА;
- розглянуто загальну методику проведення досліджень за темою дисертації, за допомогою якої визначені основні етапи наукових досліджень и використані для них методи.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ У ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПРОПУЛЬСИВНОМУ КОМПЛЕКСІ

3.1. Оцінка ефективності передачі потужності в суднових дизель-електричних комплексах

Критерій ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії розглянутий у [73] дозволяє зробити подальший розвиток оцінки передавання потужностей у пропульсивному комплексі з трифазним асинхронним електродвигуном з короткозамкненою обмоткою, розташованому на лінії валу МОД - ГФК.

Модель енергетичних процесів побудована у відповідності зі схемою розподілу потоків активної потужності (рис. 3.1) для механізмів головного приводу, енергетичних ланцюгів і перетворювачів інтегрується у модель енергетичних потоків дизель-електричного комплексу (рис. 3.3).

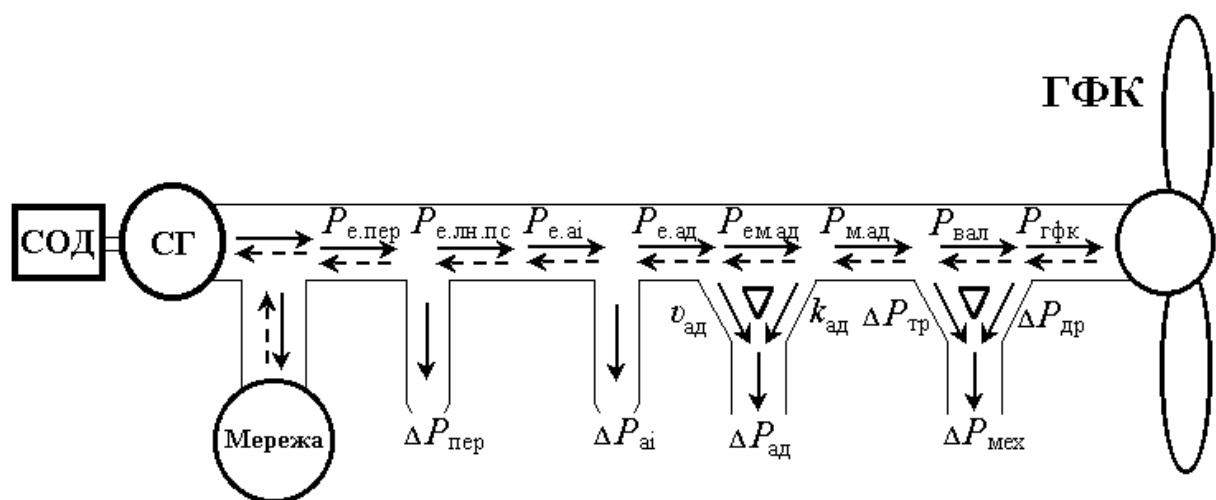


Рис. 3.1 Схема розподілу потоків активної потужності: СОД – середньо обертовий дизель; СГ – синхронний генератор; ГФК – гвинт фіксованого кроку; $P_{e.пер}$ – потужність електрична вентильного перетворювача, що складається з нерегульованого випрямляча (діодного) і інвертора (тиристорного); $P_{e.лн.пс}$ – електрична ланки постійного струму; $P_{e.аі}$ – електрична автономних інверторів; $P_{e.ад}$ – електрична АД; $P_{ем.ад}$ – електромагнітна АД; $P_{м.ад}$

– потужність механічна на валі АД; $P_{\text{вал}}$ – потужність механічна на валопроводі; $P_{\text{ГФК}}$ – корисна, прикладена до ГФК; $\Delta P_{\text{пер}}$ – потужність втрат у перетворювачі; $\Delta P_{\text{аі}}$ – в автономному інверторі; $\Delta P_{\text{ад}}$ – у АД; $\Delta P_{\text{мех}}$ – у передавальних механізмах ($\Delta P_{\text{тр}} = P_{\text{В}} - P_{\text{С}}$ – у трансмісії (див. рис. 3.3), $\Delta P_{\text{др}}$ – у другорядних з'єднаннях)

Сумарні втрати розбиті на змінні v і умовно постійні k втрати, як це прийнято в теорії електроприводу. У моделі енергетичних процесів облічено не тільки активні, але і повні потужності, що дозволяє досліджувати потоки реактивної потужності, розраховувати втрати, виходячи з повної потужності [74, 75, 76].

Оцінка зміни якості електромеханічної системи в цілому в залежності від характеристик електропривода при незмінних основних параметрах проводиться за критерієм ефективності перетворення енергії $H_{\text{пр}}$:

$$H_{\text{пр}} = \frac{\int_0^T |P_{\text{вих}}(t)| dt}{\int_0^T |P_{\text{вих}}(t)| dt + \sum_{j=1}^n \int_0^T \Delta P_j(t) dt}, \quad (3.1)$$

де $|P_{\text{вих}}(t)|$ – модуль миттєвої потужності, переданої через перетин енергетичного каналу на його виході, тобто потужність, необхідна для обертання ГФК; ΔP_j – потужність втрат у j -м елементі силового каналу; n – число елементів силового каналу, у яких враховуються втрати.

Кількісні значення критерію визначається на комплексній математичній моделі комплексу, що включає всі перераховані математичні моделі, при відпрацьовуванні розгону АД до заданого значення частоти обертання. У циклі є присутнім зміна частоти обертання від одного значення до іншого з заданим часом розгону або гальмування, кінцевими напругою і частотою, реверс АД з визначеним засобом гальмування і власне процес регулювання заданого параметра (моменту, потоку або частоти обертання АД). Зміна частоти обертання здійснюється з гранично можливою для даних параметрів системи швидкістю. Управління виконується на статистичній моделі, що відбиває основні властивості заданого засобу регулювання і генерує зусилля повороту ротора АД у виді випадкової функції частоти обертання з малими

дисперсіями по тривалості повороту, частоті обертання або моменту ГФК і роботі з подолання моменту інерції приводу [77, 78, 79, 80].

Критерій дозволяє прийняти рішення при варіюванні будь-яких істотних параметрів об'єкта (системи автоматизованого електропривода, комплексу МОД – вал – ГФК тощо), що забезпечували б підвищення енергетичної економічності [81, 82]. У цьому зв'язку, якщо адекватність математичних моделей забезпечена, критерій можна вважати об'єктивним і застосовувати його для оцінки підвищення ефективності передачі потужності у запропонованому пропульсивному комплексі із допоміжним трифазним частотно-керованим АД з короткозамкненою роторною.

Але, треба зауважити: по перше – вищевказаний критерій не можна застосовувати для оцінки споживаної електроенергії при підключенні вже обертового АД до енергетичної мережі, по скільки немає таких математичних моделей, які б підходили до цього процесу; по друге – де які параметри, що входять до формули (3.1) залежать не тільки від часу, а, наприклад, від сили і напрямку вітру, коливання осі валу, відхилень заданих і вимірних параметрів тощо; по третє – критерій повинен враховувати також неточність вимірювання самих значень миттєвих потужностей на виході кожного елементу моделі, при чому, способи вимірювання в кожному окремому випадку різні.

Узагальнюючі, можна зробити висновок, що для оцінки ефективності передачі потужності у судновому пропульсивному комплексі з МОД і трифазним частотно-керованим АД з коротко-замкненою обмоткою, необхідно сформулювати критерій, або критерії такої оцінки. Рівняння (3.1) можна застосовувати для такої оцінки, за умовою врахування всіх вищевказаних обмежень, а також, що значення $P_{\text{вал}}$ і $P_{\text{гфк}}$ у деяких режимах роботи судна залежать від потужності МОД і можуть приймати від'ємні значення відносно потужності АД.

3.2. Прогнозуюче математичне моделювання процесів в суднових пропульсивних комплексах

При створенні моделей процесів в пропульсивному комплексі необхідно користуватися такими методами моделювання, які б були адекватними що до процесу передачі потужності до рушія від джерела електричної енергії, з урахуванням не тільки динамічних властивостей СОД і МОД, а також гідродинамічних характеристик судна і самого ГФК. Окремі моделі мають в літературі [83, 84, 85, 86, 87], але ж вони, по перше: розглядаються дуже спеціалізовано, відірвано одна від одної, по друге: в цих моделях немає елементів самоорганізації, які дозволяють їм самостійно налагоджуватися на об'єкт управління, використовуючи відповідні засоби і методи.

Кожен з компонентів суднового пропульсивного комплексу має свої властивості і характер поведінки залежно від власного стану і зовнішніх умов. Якщо всі можливі прояви зводяться до суми виявів її компонентів, то така система є простою, не дивлячись на те, що число її компонент може бути велике. Для опису простих систем традиційно застосовуються методи аналізу, що полягають в послідовному розчленовуванні системи на компоненти і побудові моделей все більш простих елементів. Таким в своїй основі є метод математичного моделювання [88, 89], в якому моделі описуються у формі рівнянь, а прогноз поведінки системи ґрунтується на їх рішеннях.

Сучасні технічні системи наближаються до такого рівня складності, коли їх спостережувана поведінка і властивості не зводяться до простої суми властивостей окремих компонент. При об'єднанні компонентів в систему виникають якісно нові властивості, які не можуть бути встановлені за допомогою аналізу властивостей компонентів.

Можливим шляхом є побудова моделі на основі синтезу компонентів. Синтезовані моделі є практично єдиною альтернативою в енергетиці. Останнім часом синтезовані інформаційні моделі широко використовуються і

при вивченні технічних систем. Основним принципом інформаційного моделювання є принцип “чорного ящика”. В протилежність аналітичному підходу, при якому моделюється внутрішня структура системи, в синтезованому методі “чорного ящика” моделюється зовнішнє функціонування системи. З погляду користувача моделі структура системи захована в “чорному ящику”, який імітує поведінкові особливості системи.

Кібернетичний принцип “чорного ящика” був запропонований [90] в рамках теорії ідентифікації систем, в якій для побудови моделі системи пропонується широкий параметричний клас базисних функцій або рівнянь, а сама модель синтезується шляхом вибору параметрів з умови якнайкращої, при заданій функції цінності, відповідності рішень рівнянь поведінці системи. При цьому структура системи ніяк не відображається в структурі рівнянь моделі.

Функціонування системи в рамках синтезованої моделі описується чисто інформаційно, на основі даних експериментів або спостережень над реальною системою. Як правило, інформаційні моделі програють формальним математичним моделям по ступеню “з'ясовності” виданих результатів, проте відсутність обмежень на складність модельованих систем визначає їх важливу практичну значущість.

Можна виділити декілька типів інформаційних моделей, відмінних по характеру вимог до них [91]. Перерахуємо лише деякі з них:

- моделювання відгуку системи на зовнішню дію;
- класифікація внутрішніх станів системи;
- прогноз динаміки зміни системи;
- оцінка повноти опису системи і порівняльна інформаційна значущість параметрів системи;
- оптимізація параметрів системи по відношенню до заданої функції цінності;
- адаптивне управління системою.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) є зручним і природним базисом для представлення інформаційних моделей. Нейро-мережа може бути достатньо формально визначена, як сукупність простих процесорних елементів (часто званих нейронами), що володіють повністю локальним функціонуванням, і з'єднаних одне-направленими зв'язками (званими синапсами). Мережа приймає деякий вхідний сигнал, і пропускає його крізь себе з перетвореннями в кожному процесорному елементі. Таким чином, при проходженні сигналу по зв'язках мережі відбувається його обробка, результатом якої є певний вихідний сигнал. В укрупнюючому вигляді ШНМ виконує функціональну відповідність між входом і виходом.

Визначувана нейрон-мережею функція може бути довільною при легко здійснимих вимогах до структурної складності мережі і наявності нелінійності в перехідних функціях нейронів [92]. Можливість представлення будь-якої системної функції з наперед заданою точністю визначає нейро-мережа, як комп'ютер загального призначення.

Інформаційні моделі можуть будуватися на основі традиційних методів непараметричної статистики. Дана наука дозволяє будувати обґрунтовані моделі систем у разі великого набору експериментальних даних, достатнього для доказу статистичних гіпотез про характер і рівномірність розподілу в просторі параметрів.

Особливість нейро-мережних моделей ґрунтується на більш загальному принципі - адаптивної кластеризації даних. Однією з перших мереж, що володіють властивостями адаптивної кластеризації була карта самоорганізації Т. Кохонена [93, 94]. Задачею нейро-мережі Кохонена є автоматизована побудова відображення набору вхідних векторів високої розмірності в карту кластерів меншої розмірності, причому, таким чином що близьким кластерам на карті відповідають близькі один до одного вхідні вектори в початковому просторі.

Карти Кохонена застосовуються в основному, для двох цілей. Перша з них - наочне впорядкування багато-параметричної інформації для

виявлення відмінностей в режимах поведінки системи, при цьому можуть виявлятися аномальні режими, можуть бути знайдені несподівані скупчення близьких даних, подальша інтерпретація яких користувачем може привести до отримання нового знання про досліджувану систему.

Друга група технічних застосувань пов'язана з попередньою обробкою даних. Карта Кохонена групує близькі вхідні сигнали X , а необхідна функція $Y=G(X)$ будується на основі застосування звичайної нейро-мережі прямого розповсюдження до виходів нейронів Кохонена. Така гібридна архітектура була запропонована Р. Хехт-Нільсеном [95, 96], вона отримала назву мережі стрічного розповсюдження. Нейрони шару Кохонена навчаються без вчителя, на основі самоорганізації, а нейрони шарів, що розпізнають, пристосовуються з вчителем ітераційними методами.

Мережа стрічного розповсюдження дає шматково-постійне уявлення моделі $Y = G(X)$, оскільки при варіації вектора X в межах одного кластера на шарі нейронів Кохонена, що змагаються, збуджується один і той же нейрон-переможець [97].

Специфічність інформаційних моделей виявляється не тільки в способах їх синтезу, але і характері наближень, що робляться (і пов'язаних з ними помилок). Відмінності в поведінці системи і її інформаційної моделі виникають внаслідок властивостей експериментальних даних.

Такі особливості в даних і в постановці задач вимагають особливого відношення до помилок інформаційних моделей.

Отже, при інформаційному підході необхідна модель G системи F не може бути повністю заснована на явних правилах і формальних законах. Процес отримання G з наявних уривчатих експериментальних відомостей про систему F може розглядатися, як навчання моделі G поведінці F відповідно до заданого критерію, настільки близько, наскільки можливо. Алгоритмічно, навчання означає підстроювання внутрішніх параметрів моделі з метою мінімізації помилки моделі.

Основною ціллю при побудові інформаційної моделі є зменшення саме помилки узагальнення, оскільки мала помилка навчання гарантує адекватність моделі лише в наперед вибраних точках. Важливо відзначити, що крихта помилки навчання не гарантує крихту помилки узагальнення. Оскільки істинне значення помилки узагальнення не доступне, в практиці використовується її оцінка. Для її отримання аналізується частина прикладів з наявної бази даних, для яких відомі відгуки системи, але які не використовувалися при навчанні. Ця вибірка прикладів називається тестовою вибіркою. Помилка узагальнення оцінюється, як норма ухилення моделі на безлічі прикладів з тестової вибірки.

При формулюванні постановки інформаційної задачі прогнозу реакції досліджуваної системи при її відомому стані на задані зовнішні дії, тобто отримання величин Y при заданих X ми маємо пряму задачу, яка є типовою при моделюванні поведінки системи, якщо запити до інформаційної моделі носять характер “що-як що”.

Ціллю зворотної задачі виступає отримання вхідних величин X , відповідних спостережуваним значенням виходів Y . При моделюванні складних систем відповідний запит до моделі формулюється, як пошук зовнішніх умов, які привели до відгуку системи, що реалізувався.

Відмітна особливість зворотних і комбінованих задач полягає в тому, що вони звичайно є некоректно поставленими, і тому вимагають спеціалізованих методів пошуку наближених рішень, таких як метод регуляризації А.Н. Тіхонова [98].

Є обширна наукова бібліографія, присвячена обґрунтуванню оптимального вибору нейро-архітектури і перехідних функцій нейронів виходячи з різних видів функціоналів [99, 100, 101].

Судновий дизель-електричний пропульсивний комплекс при дії зовнішніх чинників може демонструвати різноманітну нелінійну поведінку. З погляду експлуатації таких систем відгук може відповідати нормальному режиму, а також аномальним і аварійним режимам. В останньому випадку

потрібне вживання спеціальних заходів для зниження ризику наслідків інциденту. Задача інформаційного моделювання при оцінці ризику для об'єкту при зовнішньому навантаженні полягає в необхідності прогнозу його поведінки в звичайних і аномальних умовах.

Для оцінки ефективності передачі потужності в пропульсивному дизель-електричному комплексі, що досліджується, доцільно створити модель, основу на нейронних мережах. Якщо розглядати систему, що складається з деякого числа компонентів, то кінцевою метою буде побудова моделі системи, що описує її поведінку, і володіє передбачаючими властивостями. Модель повинна бути здатна в багатьох випадках замінити собою досліджувану систему.

Узагальнюючі наведені дані у Розділі 1, можна підсумувати:

- в судновій енергетиці намітилися тенденції застосування АД або СД, призначених для підведення додаткової потужності до МОД в судновому дизель-електричному пропульсивному комплексі, з метою усунення зміни параметрів дизеля під час зниження його частоти обертання, поліпшення його експлуатаційних показників при зміні умов навантаження;
- сформульовані задачі створення адекватних законів управління судновими пропульсивними комплексами з МОД і допоміжним електричним двигуном, розташованими на лінії валу ГФК;
- при управління частотою обертання МОД пропульсивного комплексу з АД необхідно забезпечувати стабільність напруги на шині СОДГ, уникнення найвищих гармонійних складових у споживаному струмі, зменшення коливань частоти обертання і моменту на валу ГФК у перехідних режимах;
- виникає необхідність оптимізації алгоритмів управління ПЧ АД і пропульсивним комплексом в цілому, що враховувало б усі складові суднового дизель-електричного комплексу з МОД і частотно-керованим АД;

- для оцінки ефективності передачі потужності у судновому пропульсивному комплексі з МОД і трифазним частотно-керованим АД з коротко-замкненою обмоткою, необхідно сформулювати критерій, або критерії такої оцінки;
- виникає потреба створювання моделей, оснований на нейронних мережах, кінцевою метою чого буде побудова моделі системи, що описує її поведінку, і володіє передбачаючими властивостями, здатними в багатьох випадках замінити собою досліджувану систему.

3.3. Розробка структурної схеми дизель-електричного пропульсивного комплексу

Головною метою моделювання є перевірка параметрів СДЕПК з точки зору його ефективності при передачі потужності до рушія.

Судновий дизель-електричний пропульсивний комплекс має зону оптимальної настройки систем управління в залежності від конкретних експлуатаційних умов. Різні підходи аналізу і моделювання ДПУ наведено в [102].

Стандартним способом забезпечення стійкості перехідних процесів комбінованого пропульсивного комплексу за умов експлуатації судна і суднової енергетичної установки, є корекція параметрів системи “судно – гвинт – МОД – АД – середньо-обертовий дизель-генератор”. Ураховуючи, що упор гвинта визначається режимом роботи і не може бути змінено в необхідну сторону, єдиним способом забезпечення необхідної якості регулювання є оптимальна настройка параметрів регуляторів частоти обертання МОД і АД, що максимально задовольняє всім основним експлуатаційним режимам. В відомих моделях [103] морських енергетичних установок, з нестабільною напругою на шинах, малими відстанями між споживачами, що означає

зневаження імпедансом мережі, сумірними потужностями генераторів станції і споживаною потужністю, акцент ставиться на створення динамічних моделей енергетичних систем, інтелектуальних систем управління електродвигунами, самоналагоджувальних (нейронних) ПД-регуляторів різних параметрів. Однією з головних задач при симуляції подібних систем, є створення таких моделей, які враховували б поведінку всіх об'єктів при передачі потужності від дизель-генераторів на гребний гвинт, у тому числі і самого судна у взаємодії з дизелем, що дає можливість враховувати його гідродинамічні властивості та їх вплив на енергетичні процеси [104, 105].

На рис. 3.2 показана однолінійна схема дизель-електричного пропульсивного комплексу з допоміжним АД на лінії валу. ДГ з синхронними генераторами звичайно використовуються для виробництва електроенергії. Генератори живлять головний розподільний щит високої напруги №№ 1, 2, який ділиться на дві або більш секцій, щоб гарантувати живучість судна. Рівень напруги буде варіювати від 6,6 до 11 кВ для встановленої потужності вище 20 МВт.

Головними енергетичними споживачами, є звичайно ЕД підрулюючих пристроїв, баластних і перевантажувальних насосів тощо, які можуть бути різної потужності, але порівняно високої, щоб враховувати їх поведінку під час моделювання. Гвинти можуть бути, як фіксованого (ГФК) так і регульованого кроків (ГРК). Що стосується гвинта, який використовується для забезпечення руху судна, будемо застосовувати ГФК, а ГРК – використовуються для електроприводів підрулюючих пристроїв з синхронними або асинхронними двигунами. Звичайно для суден подібних поромам або круїзним з *Azipod*, які мають пару головних ГФК і окремий менший за потужністю підрулюючий пристрій, СД використовуються для забезпечення руху судна, а АД використовується для підрулів. Інші концепції виробничих суден з окремими сортованими по величині потужності АД пропульсивних комплексів можуть мати частотно-керовані

асинхронні електроприводи різноманітного призначення (рис. 3.2, М1-М7), і зокрема для підведення додаткової потужності до МОД і ГФК.

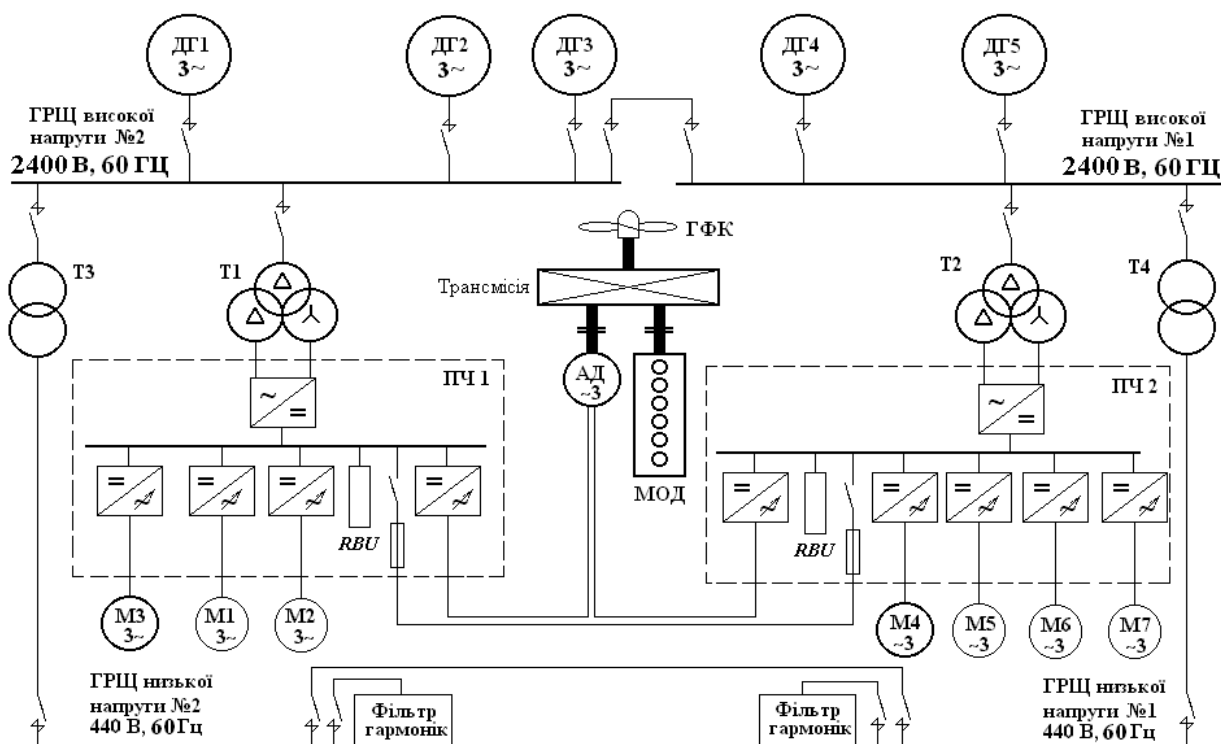


Рис. 3.2 Однолінійна схема дизель-електричного пропульсивного комплексу: ДГ1 - ДГ5 – дизель-генератори, Т1 – Т2 – трансформатори живлення ПЧ; ПЧ1 – ПЧ2 – перетворювачі частоти з ланкою постійного струму і резисторами скидання зворотної потужності (*RBU*, *resistor backup unit*), Т3 – Т4 – трансформатори живлення ГРЩ низької напруги; М1 – М7 – ЕД суднових електроприводів високої напруги

Конвертори перетворювачів частоти (ПЧ1, ПЧ2) із ШІМ побудовані на АІС, використовуються для регулювання частоти обертання допоміжного АД у всіх експлуатаційних режимах роботи судна, а також для частотного пуску потужних ЕД окремих ЕП. Теоретично всі комбінації живлення зазначених електроприводів можуть використовуватися, але змінна швидкість руху судна на практиці зумовлює застосування регулювання саме допоміжним АД з ШІМ конвертором на АІС.

Інші споживачі - ЕД вантажних насосів, бурових приводів тощо, здебільшого з регульованою швидкістю, впливають на напругу мережі з точки зору погіршення її гармонійного складу.

Розробка однолінійної схеми дизель-електричного пропульсивного комплексу виконано із рахуванням:

- зменшення споживання пального для суден з великими варіаційними змінами швидкості руху і пересування в оперативних умовах, як наприклад, маневрування, динамічне визначення місцеположення тощо, а також повільним просуванням вперед з одночасною зміною споживаної потужності від дуже малих значень до приблизно цілком встановленої потужності. За допомогою запуску конкретного числа ДГ для кожних експлуатаційних умов, повне споживання пального буде зменшено порівняно з обумовленим рухом судна вперед, зокрема за рахунок зменшення втрат завдяки додатковому АД;
- поліпшення придатності у застосуванні дизель-електричних пропульсивних комплексів з додатковим АД на лінії валу МОД – ГФК за рахунок більшої надійності останніх у порівнянні з традиційними дизельними;
- збільшення маневреності судна у експлуатаційних умовах, тобто більш оперативне регулювання швидкості обертання та моменту на валу ГФК;
- зростання гнучкості в умовах підвищення потужності пропульсивного комплексу і зменшення габаритів МКВ, за рахунок того, що потужність ДПУ зумовлює розміри МОД, ГФК і валу. Зростання додаткової часткової потужності АД, який отримує живлення від мережі високої напруги, дозволяє знизити габаритні розміри як самого ЕД, так і ДГ енергетичної системи, які можуть бути розміщені у будь-якому місці судна. Це, також, дозволяє знизити шум і підвищити ергономічні чинники. Електричний двигун є набагато більше безшумним, чим МОД з тією ж оціненою потужністю;
- зменшення вартості технічного обслуговування за рахунок можливості виконання профілактичних робіт стосовно окремого ДГ чи МОД з одночасним забезпеченням руху судна, що призведе до зниження експлуатаційних витрат і збільшення прибутків.

Кінцевою метою математичного моделювання буде оптимізація процесів взаємодії компонентів дизель-електричного пропульсивного комплексу та інтегрованої системи управління передачею потужністю (ІСУПП) при її передачі до рушія.

Інтегрована система управління передачею потужністю в комплексі МОД – ГФК – АД – ПЧ – СОДГ, вибирає кількість працюючих ДГ в залежності від експлуатаційного режиму. Наприклад, на початку руху судна необхідно вирішити про доцільність запуску додаткового ДГ, що залежить від завантаження енергетичної системи. У разі часткового режиму роботи, коли є певний резерв потужності, ІСУПП контролює величину енергетичного резерву відповідно лімітам безпеки.

3.4. Моделювання енергетичних процесів в судновому дизель-електричному пропульсивного комплексу

При математичному моделюванні використовуємо відомі моделі для таких компонентів як дизелі, генератори і електроприводи з пусковими характеристиками. Інші споживачі можуть бути представлені по сукупному навантаженню. При цьому модель представляємо у вигляді “вхід-вихід” для характеристики судна, рушія, дизелів, генераторів і електроприводів з пусковими характеристиками.

Контрольні функції ІСУПП фокусуємо на виробництві потужності, тому достатньо складні динамічні моделі використовуємо для судна, рушія, дизелів, генераторів, і задовільно спрощені статичні моделі використовуємо для стартових приводів і інших споживачів. Кінцева модель повинна бути у формі просторового вектора, відповідного функції контролюючого пристрою.

Представляємо моделювання потужності для дизелів, синхронних генераторів, модуля навантаження, який враховує взаємозв'язок генераторів, регуляторів частоти обертання, автоматичних регуляторів напруги, перетворювачів частоти і регулятору частоти обертання АД. Для кожного компоненту були використані відомі моделі, але особлива увага була надана взаємодії МОД і АД.

При споживанні потужності при моделюванні старту АД разом з іншим навантаженням, показано необхідність врахування активної і реактивної потужності для використання в модулі навантаження. Дизель-електрична пропульсивна установка складається з МОД, середньо-обертових синхронних дизель-генераторів (СОДГ), що забезпечують живленням основне навантаження, перетворювачів частоти (ПЧ) для живлення АД, *PID* регуляторів напруги і частоти обертання АД. Швидкість ротора одного генератора вибираємо як еталон, і кути інших генераторів вибираються відносно цього еталону. Кут потужності еталонного генератора і напруга на шині визначається модулем навантаження як функції струмів генератора.

Модель 7-го порядку використовується для кожного СОДГ, а взаємозв'язок здійснюється через модуль навантаження, представляючи загальне навантаження як загальний опір, який змінюється. Модуль навантаження векторно складає струми на виході генераторів і повертає напругу на шині залежно від характеристик навантаження (постійний опір, постійна потужність тощо). Електричні величини моделюються в дво осевій *dq*-формі. Модулі першого порядку використовуються для дизельних двигунів, а *PID*-регулятори представляють регулятори частоти обертання і автоматичного регулювання напруги (АРН). Характеристика включити/виключити для кожного дизель-генератора включена в модель для моделювання роботи при підключенні/відключенні генераторних установок. Схема загальної структури моделі з підключенням і відключенням, а також з урахуванням характеристик судна і рушія представлена на рис. 3.3 (також рис. 3.1), де: R_u – опір морської води руху судна, H ; v_s – абсолютна розрахована або

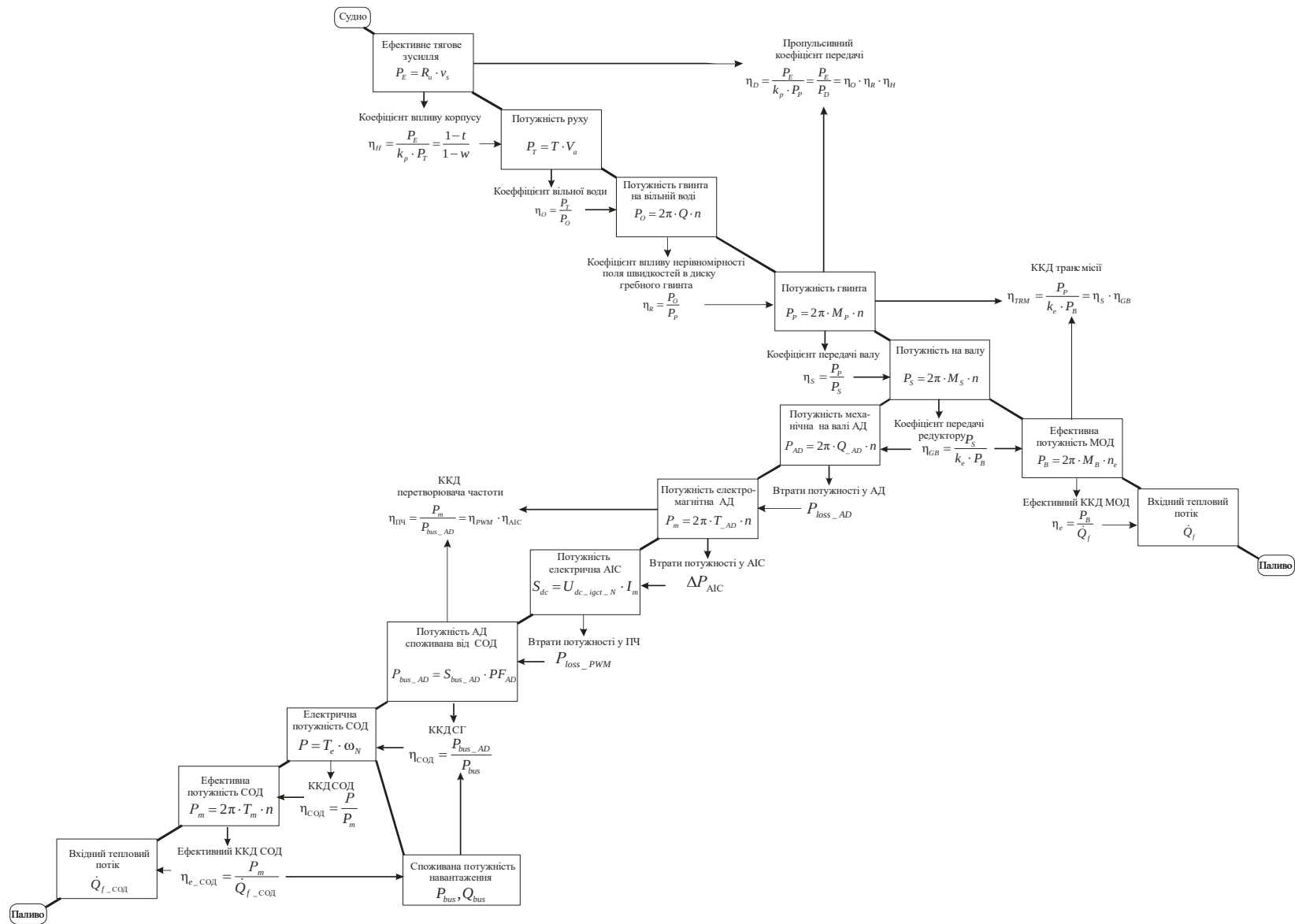


Рис. 3.3 Пропорційності входів/виходів енергетичних потоків дизель-електричного комплексу

визначена швидкість судна, м/с; k_p – кількість гвинтів; t – коефіцієнт горизонтального утримання судна (*thrust deduction factor*); w – коефіцієнт попутного потоку (*wake factor*); V_a – швидкість руху гвинта відносно води, м/с; T_p – упор гвинта, Н; Q – момент гвинта на вільній воді, Н·м; n – частота обертання гвинта, с⁻¹; M_p – ефективний момент гвинта, Н·м; P_D ($P_{\text{гфк}}$, рис. 3.1) – загальна постачальна пропульсивна потужність всіх гвинтів, Вт; k_e – кількість машин, які забезпечують необхідну потужність (наприклад – дизелів); P_S ($P_{\text{вал}}$, рис. 3.1) – потужність механічна на валопроводі, Вт; M_S – момент на валопроводі, Н·м; M_B – ефективний момент МОД, Н·м; $\dot{Q}_f$ – вхідний тепловий потік МОД, зумовлений згорянням палива, Дж/с; Q_{AD} – момент на валі АД, зумовлений різницею моментів на валопроводі і моментом МОД, Н·м; $P_{\text{loss_AD}}$ ($\Delta P_{\text{ад}}$, рис. 3.1) – потужність втрат у АД, Вт; S_{dc} ($P_{\text{e.ai}}$, рис. 3.1) – електрична потужність автономних інверторів струму (АІС), ВА; $U_{dc_igct_N}$ – напруга постійного струму на “ключач” АІС відносно нейтралі (див. рис. 3.5); I_m – струм фази АД, А; $P_{\text{loss_PWM}}$ ($\Delta P_{\text{пер}}$, рис. 3.1) – потужність втрат у перетворювачі частоти з ланкою постійного струму, Вт; $P_{\text{bus_AD}}$ ($P_{\text{e.ад}}$, рис. 3.1), – електрична потужність АД, Вт; PF_{AD} – коефіцієнт потужності АД ($\cos\phi$); P – електрична потужність синхронних дизель-генераторів, Вт; T_e – електромагнітний момент СГ, Н·м; PF_{bus} – коефіцієнт потужності навантаження; T_m – момент на валу СОД, Н·м; P_{bus} , Q_{bus} – активна і реактивна потужності загального навантаження, Вт і ВАр відповідно.

Моделювання проводиться у відносних одиницях (в.о.) з оціненими значеннями найпотужнішого СОДГ. Це є, якщо різні величини потужностей генераторів і ЕД мають бути перерахованим до базисної. Довідкові дані є такими, як вказано нижче.

Циклова подача палива, г·с: $b_{\text{ц}}$ – витрата палива на один оборот валу дизеля (1.2); кількість теплоти згоряння палива, °С: Q_f – температура вихлопних газів; індикаторний тиск, МПа: $P_i = a + bn$, де n – частота обертання валу дизеля, хв.⁻¹, a і b – коефіцієнти, які зумовлюють характер швидкісної характеристики; фазна напруга, В: $U_{\text{ref}} = \sqrt{2/3} U_N$, де U_N –

номінальна напруга на шинах ГРЩ високої напруги, В; фазний струм, А $I_{ref} = \sqrt{2} I_N$, де I_N – номінальний струм, А; повна споживана потужність від джерел електричної енергії, ВА: $S_{ref} = 3/2 U_{ref} I_{ref}$; електрична кутова швидкість, рад/с: $\omega_N = 2\pi f_a$, де f_a – номінальна частота напруги на шинах ГРЩ, 1/с; механічна кутова частота обертання, рад/с: $n_{ref} = \omega_N/(p/2)$, де p кількість полюсів генератора; момент, Н·м: $T_{ref} = S_{ref}/n_{ref}$.

При моделюванні пропульсивного комплексу, задача якого в забезпеченні просування вперед - необхідна швидкість судна залежно від експлуатаційних умов. Щоб встановити необхідну потужність дизель-електричного пропульсивного комплексу, необхідно врахувати опір судна і змінні, які грають роль в процесі просування вперед [106].

Повний опір корпусу судна залежить від таких чинників, як: опір тертя - рівнодіюча тангенціальних сил, діючих на корпус в результаті руху прикордонного шару води уздовж корпусу; опір сили стиснення - рівнодіюча нормальних сил на корпус, яка залежить від різниці в тиску перед і за судном при його переміщенні, які стають істотними при відділенні прикордонного шару від корпусу в кормі судна; опір хвиль, що генеруються судном при переміщенні, а також повітряний опір частини корабля вище рівня моря.

Режими роботи МОД у складі суднового гідропропульсивного комплексу аналітично можливо виразити диференціальним рівнянням його руху у горизонтальній площині:

$$m_s(1 + \mu) \frac{dv_s}{d\tau} = T_p - R_u \quad (3.2)$$

де m_s – маса судна, т; μ – коефіцієнт приєднаної маси води; v_s – швидкість руху судна; м/с; T_p – упор гвинта, Н, R_u – сила опору руху судна, Н;

Припускаємо, що опір руху судна R_u є пропорційним квадрату швидкості судна v_s для відносно низьких швидкостей (3.2)

$$R_u = c_1 \cdot v_s^2,$$

де c_1 – коефіцієнт пропорційності.

В першому наближенні ефективна потужність, необхідна для забезпечення заданої швидкості судна і подолання опору корпусу пропорційна кубу швидкості

$$P_E = c_1 \cdot v_s^3. \quad (3.3)$$

Коефіцієнт пропорційності c_1 не постійний, оскільки є функцією коефіцієнта c_0 , залежним від швидкості судна і багатофункціонального коефіцієнта y , який ураховує такі чинники, як ступінь обростання корпусу, водотоннажність, стан моря і глибину під кілем:

$$c_1 = y \cdot c_0(v_s), \quad (3.4)$$

де $y = f(\text{обростання корпусу, водомісткість, стан моря, глибина під кілем})$.

Повний опір корпусу судна запишемо в безрозмірній формі

$$C_E = \frac{P_E}{\rho^{1/3} \cdot \Delta^{2/3} \cdot v_s^3}, \quad (3.5)$$

де ρ – густина води, кг/м^3 ;

$\Delta = \rho \cdot \nabla$, де ∇ – водомісткість корпусу, м^3 .

У таблиці Ж.4.1 додатку Ж наведено порядок величин коефіцієнту C_E для деяких типів суден, де

$$C_E = \eta_D \cdot C_D, \quad C_{adm} = \frac{\Delta^{2/3} \cdot v_s^3}{P_D}, \quad \eta_D = \frac{P_E}{P_D}.$$

Отже, враховуючі (3.3) і (3.4), маємо

$$P_E = \overbrace{C_E \cdot \rho^{1/3} \cdot \Delta^{2/3}}^{c_1} \cdot v_s^3 \quad (3.6)$$

де $C_E = f(v_s, \Delta, \text{обростання корпусу, тип судна, стан моря, глибина під кілем})$.

Ступінь обростання корпусу характеризується коефіцієнтом

$$R_0 = k/L,$$

де k – коефіцієнт шорсткості поверхні, який градується в залежності від довжини судна, L – довжина судна, м.

Тип судна характеризуємо геометричними параметрами (довжина, ширина) і коефіцієнтом призматичності корпусу c_p , які остаються практично постійними доки не змінюється водомісткість судна.

Кубічна залежність необхідної ефективної потужності від швидкості є дійсною тільки для невеликих значень числа Фруда ($Fr = 0.1 - 0.2$)

$$Fr = \frac{v_s}{\sqrt{g \cdot L}},$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Для ГФК взаємовідношення між силою поштовху, упором і потужністю створюються на підставі діаграми вільної води і наступних рівнянь динаміки відносно частоти обертання валу і діаметра гвинта [106]:

$$\begin{aligned} T_p &= \rho \cdot D^4 \cdot K_T \cdot n \cdot |n|; \\ Q_p &= \rho \cdot D^5 \cdot K_Q \cdot n \cdot |n|; \\ P_p &= \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot Q_p, \end{aligned} \quad (3.7)$$

де T_p – упор гвинта, Н, n – частота обертання валу гвинта, рад/хв., Q_p – момент на валу ГФК, Н·м і P_p – потужність гвинта, Вт, ρ – густина води кг/м^3 , D – діаметр гвинта, м, K_T – коефіцієнт упору гвинта, K_Q – коефіцієнт моменту.

Із (3.7) отримаємо:

$$\begin{aligned}
 n &= \operatorname{sign}\left(\frac{T_p}{\rho \cdot D^4 \cdot K_T}\right) \sqrt{\left|\frac{T_p}{\rho \cdot D^4 \cdot K_T}\right|}; \\
 Q_p &= \frac{D \cdot K_Q}{K_T} \cdot T_p; \\
 P_p &= \frac{\pi D \cdot K_Q \cdot T_p}{30 K_T} \operatorname{sign}\left(\frac{T_p}{\rho \cdot D^4 \cdot K_T}\right) \sqrt{\left|\frac{T_p}{\rho \cdot D^4 \cdot K_T}\right|}.
 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Коефіцієнти K_T і K_Q залежать від конкретного типу гвинта і можуть змінюватися в залежності від цього.

Інститутом морських досліджень Нідерландів (MARIN) [106] було запропоновано характеристики зміни коефіцієнтів C_T і C_Q у чотирьох квадрантах в залежності від гідродинамічного кроку кута β , який розраховується для номінального кроку гвинта, тобто $0,7D$ (рис. Ж.4.1 додаток Ж).

$$\beta = \arctg\left(\frac{V_a}{0.7\pi \cdot n \cdot D}\right),$$

$$C_T = \frac{T_p}{\frac{1}{2}\rho \cdot (V_a^2 + (0.7\pi \cdot n \cdot D)^2) \frac{\pi}{4} \cdot D^2}, \quad (3.9)$$

$$C_Q = \frac{Q_p}{\frac{1}{2}\rho \cdot (V_a^2 + (0.7\pi \cdot n \cdot D)^2) \frac{\pi}{4} \cdot D^3}. \quad (3.10)$$

Відносна залежність загального упору всіх гвинтів і опором руху судна характеризується коефіцієнтом горизонтального утримання t

$$k_p \cdot T_p = \frac{R_u}{(1-t)}, \quad (3.11)$$

де k_p – кількість гвинтів.

Відносна залежність швидкості руху гвинта і абсолютної швидкості руху судна характеризується коефіцієнтом попутного потоку w

$$V_a = (1 - w)v_s. \quad (3.12)$$

Коефіцієнти t і w враховуються у *DMI* моделях судна, в залежності від водомісткості, опору руху судна, завантаження, швидкості руху і частоти обертання валу гвинта (п. В.1 додаток В).

Як наближення модель дизеля представляємо рівнянням динаміки швидкості валу першого порядку [106]

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{T_{DE}}(-T_m + z), \quad (3.13)$$

де T_m – механічний момент на валу, в.о.; T_{DE} – динамічна константа часу дизеля, в.о.; z – індекс подачі пального (ПНВТ), в.о.. Рівняння (3.13) записано так, що індекс ПНВТ може варіювати між 0 і 1, тобто від 0 до 100% місткості пального-насоса.

Крім того спрощена нелінійна функція, що описує специфічне споживання ($k = f(z)$, г/кВт·годину) пального, застосовується для оцінювання споживання горючого, при чому значення функції передбачається в діапазоні $z \in [0, 1]$ для мінімуму номінальної потужності дизелю, звичайно близької до 90% максимальної потужності.

Модель дизеля відносно частоти обертання дозволяє оцінити потужність МОД на валу ГФК, СОД на валу синхронного генератору, а також на електричній стороні (частотно-керованому АД), за умови, що повітряне споживання і температура вихлопу не може бути отримані від цієї спрощеної моделі напряму. Значення характеристик МОД і СОД у моделі мають відповідні індекси – *mod* і *sod*.

Для моделювання електроенергетичних процесів в синхронних генераторах застосовуємо двохосну dq -модель [107, 108, 109]. Диференціальні рівняння динаміки електричних процесів у обмотці статора, ротору і демпферних обмотках включені до механічних диференціальних рівнянь для швидкості обертання валу і кута потужності. Магнітним насиченням, гистерезисом і вихровими потоками нехтуємо.

Для кожного генератора модель дана нижче з наступним змінними і параметрами.

Механічні параметри: $\Delta\delta$ – зміна кутового коефіцієнту потужності, який дорівнює куту між q -віссю конкретного генератора і q -віссю довідкового генератора; n – частота обертання валу, в.о..

Електричні параметри: ψ_d, ψ_q – значення подовжньої і поперечної складових потоко-щеплення магнітного поля обмотки статора, в.о.; ψ_D, ψ_Q – значення подовжньої і поперечної складових потоко-щеплення магнітного поля демпферної обмотки, в.о.; ψ_f – значення потоко-щеплення магнітного поля ротору, в.о..

Вхідні параметри моделі: u_d, u_q – значення подовжньої і поперечної складової напруги на обмотці статора, в.о.; n_1 – частота обертання валу даного генератора, в.о.; T_{m_sod} – момент опору на валу СОД, в.о.; u_f – значення збудження, в.о..

Вихідні параметри моделі: i_d, i_q – значення подовжньої і поперечної (d, q) складової струму у обмотці статора, в.о.; n – частота обертання валу, в.о.; $\Delta\delta$ – значення кутового коефіцієнту потужності, рад; P – активна потужність, в.о.; Q – реактивна потужність, в.о..

Загальні розрахункові параметри: ω_N – номінальна електрична кутова швидкість, рад/с; T_a – механічна константа часу, с, яка

еквівалентна $n_{ref} = \frac{J}{T_{ref}}$, де J – повний момент інерції; r_{ss} – опір обмотки

статору, в.о.; x_d , x_q – подовжня і поперечна складові значення реактивного опору обмотки статору, в.о.; T_D , T_Q – подовжня і поперечна складові значення постійної часу демпферної обмотки, с; T_f – постійна часу обмотки збудження, с; σ_D , σ_Q – подовжня і поперечна складові значення коефіцієнту насичення (“*Leakage factor*”) демпферної та статорної обмоток; σ_f – “*Leakage factor*” обмотки збудження; μ_D – коефіцієнт взаємоіндукції (“*Coupling factor*”) між обмоткою статора і демпферною; μ_f – коефіцієнт взаємоіндукції між обмоткою збудження і демпферною.

Електричну рівновагу (баланс напруг у обмотках синхронного генератора виражаємо системою рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_d}{dt} &= \omega_N (n\psi_q + i_d r_{ss} + u_d); \\ \frac{d\psi_q}{dt} &= \omega_N (-n\psi_d + i_q r_{ss} + u_q); \\ \frac{d\psi_Q}{dt} &= -\frac{1}{T_D} i_D; \\ \frac{d\psi_Q}{dt} &= -\frac{1}{T_Q} i_Q; \\ \frac{d\psi_f}{dt} &= \frac{1}{T_f} (-i_f + u_f),\end{aligned}\tag{3.14}$$

де співвідношення для потокощеплень мають вигляд:

$$\begin{aligned}\psi_d &= -x_d i_d + i_D + i_f; \\ \psi_q &= -x_q i_q + i_Q; \\ \psi_D &= -(1 - \sigma_D) x_d i_d + i_D + \mu_D i_f; \\ \psi_Q &= -(1 - \sigma_Q) x_q i_q + i_Q; \\ \psi_f &= -(1 - \sigma_f) x_d i_d + \mu_f i_D + i_f.\end{aligned}\tag{3.15}$$

Механічна рівновага в системі настає при встановленні співвідношень між частотою обертання валу ротора синхронного генератора і кутом потужності, який зумовлюється величиною навантаження:

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= \frac{1}{T_a}(T_{m_sod} - T_e); \\ \Delta \frac{d\delta}{dt} &= \omega_N(n - n_1),\end{aligned}\tag{3.16}$$

де електромагнітний момент T_e розраховуємо по формулі

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d.\tag{3.17}$$

Для даного конкретного генератора, який представлено в системі як генератор 1, $n = n_1$, тобто $\Delta\dot{\delta} = 0$. Враховуючі цю обставину, вихідні рівняння додані до поточних вихідних (i_d, i_q) і механічних характеристик генератору мають вид:

$$\begin{aligned}P &= u_d i_d + u_q i_q; \\ Q &= u_q i_d + u_d i_q.\end{aligned}\tag{3.18}$$

Системи рівнянь (3.14, 3.15) можуть бути записані в компактній формі просторового стану. Визначивши вектори $\psi = [\psi_d, \psi_q, \psi_D, \psi_Q, \psi_f]^T$, $i = [i_d, i_q, i_D, i_Q, i_f]^T$, $u_g = [u_d, u_q]^T$ маємо:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi}{dt} &= K(n)\psi + R_i + Eu_g + gu_f; \\ \psi &= X_i \Rightarrow i = X^{-1}\psi,\end{aligned}\tag{3.18}$$

$$\text{де } K(n) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_N n & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_N n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} \omega_N r_{ss} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_N r_{ss} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/T_Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_f \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

$$E = \begin{bmatrix} \omega_N & 0 \\ 0 & \omega_N \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1-\sigma_D)x_d & 0 & 1 & 0 & \mu_D \\ 0 & -(1-\sigma_D)x_d & 0 & 1 & 0 \\ -(1-\sigma_f)x_d & 0 & \mu_f & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

$$g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_f} \end{bmatrix}^T. \quad (3.22)$$

В результаті отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= (K(n) + RX^{-1})\psi + Eu_g + gu_f; \\ \frac{dn}{dt} &= \frac{1}{T_a}(T_{m_sod} - h(\psi)); \\ \Delta \frac{d\delta}{dt} &= \omega_N(n - n_1), \end{aligned} \quad (3.23)$$

де $h(\psi)$ отримано з (3.16). Далі зазначивши $\psi = [\psi_d, \psi_q]$ і $i_s = [i_d, i_q]$, які зумовлюють зниження насичення потоку і отриманий вектор характеризує величини обмотки статора (з індексом s). Тоді

$$h(\psi) = \psi_s^T H i_s = \psi^T (G^T H G) X^{-1} \psi, \quad (3.24)$$

де

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.25)$$

$$G^T H G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

і $c = x_d(\mu_f \mu_D - \mu_f + \mu_f \sigma_D - \mu_D + 1 - \sigma_D + \sigma_f \mu_D - \sigma_f)$. Тоді вихідні величини i_s , P і Q моделі будуть представлені так:

$$\begin{aligned} i_s &= G X^{-1} \psi; \\ P &= u_g^T i_s = u_g^T G X^{-1} \psi; \\ Q &= -u_g^T H i_s = -u_g^T H G X^{-1} \psi. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Підсумовуючі результати, можна довести рівняння моделі одного дизель-генераторного агрегату (ДГ) у просторовому стані:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= (K(n) + R X^{-1}) \psi + E u_g + g u_f; \\ \frac{dn}{dt} &= \frac{1}{T} (T_{m_sod} - \psi^T (G^T H G) X^{-1} \psi); \\ \Delta \frac{d\delta}{dt} &= \omega_N (n - n_1). \end{aligned} \quad (3.28)$$

Регулятори швидкості дизелів (МОД і СОД) і автоматичні регулятори напруги (АРН) є *PID*-регуляторами, які описуємо стандартним рівнянням

$$u = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (3.29)$$

звідси

$$\frac{du}{dt} = K_p \left(T_d \frac{d^2 e}{dt^2} + \frac{de}{dt} + \frac{1}{T_i} e \right), \quad (3.30)$$

де u – контрольований параметр (індекс палива для МОД і СОД або напруга збудження для СОДГ); e – відхилення від встановлених величин (швидкість частоти обертання валу дизеля або напруга генератора); K_p , T_i , T_d – коефіцієнт передачі регулятора, постійна часу інтеграції і диференціювання відповідно. Залежно від типу вибраного регулятора (PID , PI або PD) значення T_i і T_d приймаються рівними 0 або ∞ .

При паралельному контролі за частотою на шинах і напругою СОДГ, особливу увагу потрібно надати включенню інтегральної складової на всіх ділянках. Це приведе до довільного розподілу навантаження через варіювання параметрів між блоками. Потрібно врахувати декілька стратегій контролю:

- PID -регулятори мають падаючу характеристику, тобто при вмиканні режиму стабілізації контрольованих змінних параметрів активується і досягається бажаний розподіл навантаження між СОДГ;

- при паралельній роботі СОДГ PID -регулятори налагоджуються так, що один контролює частоту і напругу, а інший контролює активну і реактивну потужність, що поставляється, з уставками, узятими щодо потужності першого генератора, що поставляється. Це забезпечить рівний розподіл навантаження;

- один генератор з інтегральною дією, а інший з відповідним контролем. Це означає, що лише один генератор автоматично візьме всю зміну навантаження, в той час, як другий буде поставляти постійну потужність залежно від запиту збільшення потужності. Це може спричинити несподівані розбіжності навантаження генераторів, коли загальне навантаження сильно коливається;

- попередній випадок, але блок розподілу навантаження впливає пропорційно на контрольовані генератори подвійним сигналом (по оборотах і напрузі) унаслідок розбіжності між потужністю генератора і інтегральною дією, і залежно від струму навантаження. Це приведе до рівного розподілу навантаження.

Для моделювання паралельної роботи СОДГ застосовуємо описану вище стратегію контролю, коли потрібний рівний розподіл навантаження.

Для врахування впливу навантаження на ДГ, використовуємо функцію u_g з рівняння (3.28).

Модель навантаження на ДГ зображає взаємний зв'язок генераторів (ГРЩ) за допомогою обчислення номінальної напруги на шинах ГРЩ як функції характеру навантаження. В [110] окремі види моделювання навантаження обговорюються. У нашому випадку, можливі дві нерухокої моделі навантаження: з постійним опором, та з опором, який залежить від енергетичного режиму роботи самого навантаження.

Постійне значення опору характерно для пасивних елементів, які отримують живлення від ГРЩ. Для електроприводів з регулюванням частоти обертання валу, опір залежить від величини моменту на валу, та може змінюватися у діапазоні зміни величини потужності. Коефіцієнт потужності характерний для кожного конкретного типу. Відхиленнями частоти і величини потужності нехтуємо. Це засновано на припущеннях, що частота буде близькою до номінального значення.

Модель складається з алгебраїчних рівнянь, вхідними величинами яких є повний струм, повна та активна потужності генераторів (ДГ), а вихідними – номінальна напруга на шинах ГРЩ, яка розраховується як значення повного струму помноженого на значення еквівалентного опору.

Вхідними величинами для моделі навантаження є (рис. 3.4): i_{di} , i_{qi} : значення подовжньої і поперечної складової фазного струму генератору, в.о.; $\Delta\delta_i$: значення кутового коефіцієнту потужності, стосовно генератора 1, рад; P_z , Q_z : значення активної і реактивної потужностей навантаження з постійним опором, в.о.; P_s , Q_s : значення активної і реактивної потужностей навантаження з постійною потужністю, в.о..

Вихідні дані моделі навантаження: u_{di} , u_{qi} : значення подовжньої і поперечної складової напруги на шинах ГРЩ, в.о..

$$\underline{Z}_s = \left(\frac{[u_{di} + ju_{qi}]^2}{P_s + jQ_s} \right). \quad (3.32)$$

Рівняння (3.32) розв'язуємо методом послідовних ітерацій з урахуванням того, що напруга на шинах ГРЩ є функцією імпедансу навантаження. Окрім того напруга на ГРЩ повинна спочатку зрости для позитивного кроку при зростанні споживаної потужності. Це не є характерним для ЕП з АД і ГФК, де напруга зменшується в залежності від величини навантаження, а потім підтримується за допомогою збільшення струму для зменшеного значення напруги. Шляхом послідовного наближення значення напруги від попереднього кроку моделювання використовується в (3.32), з постійним шагом моделювання через невелику постійну часу (0.01 с), для уникнення труднощів розрахунків із змінним кроком в імпедансі для кожного кроку моделювання. Еквівалентне значення імпедансу навантаження обчислюється як паралельне з'єднання двох імпедансів

$$\underline{Z}_{eq} = (r_{eq} + jx_{eq}) = \frac{\underline{Z}_z \underline{Z}_s}{\underline{Z}_z + \underline{Z}_s}. \quad (3.33)$$

Струми отримані у dq складових для кожного генератору, і після моделювання вони перетворюються у dq -складові заданого генератору, як показано на рис. 3.4.

$$\begin{aligned} I_{Gi} &= (i_{di} + ji_{qi})e^{j(\Delta\delta)}; \\ I_{tot} &= (i_{dtot} + ji_{qtot}) = I_{G1} + I_{G2} + \dots + I_{Gn}, \end{aligned} \quad (3.34)$$

де n – кількість ДГ підключених до ГРЩ, від якого отримує живлення допоміжного АД. Напруга на ГРЩ для окремого генератору може бути отримана з (3.35).

$$\begin{aligned}
u_{d1} &= r_{eq} i_{dtot} - x_{eq} i_{qtot}; \\
u_{q1} &= r_{eq} i_{qtot} - x_{eq} i_{dtot}; \\
(u_{d1} + j u_{q1}) &= (u_{d1} + j u_{q1}) e^{-j(\Delta\delta)}.
\end{aligned}
\tag{3.35}$$

Записуємо (3.35) у компактній векторній формі для реальних даних та перетворюємо вектори ортогональної системи координат з кутом різниці φ :

$$\begin{aligned}
\Phi(\varphi) &= \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix}; \\
\Phi(-\varphi) &= \Phi^{-1}(\varphi) = \Phi^T(\varphi).
\end{aligned}
\tag{3.36}$$

Задаючись вектором $i_{tot} = [i_{dtot}, i_{qtot}]^T$ у координатах dq для заданого генератору, отримаємо

$$i_{tot} = i_{s1} + \Phi(\Delta\delta_2) i_{s2} + \dots + \Phi(\Delta\delta_n) i_{sn}.$$

$$\tag{3.37}$$

Напруга на шинах ГРЩ визначається

$$\begin{aligned}
u_{g1} &= Z i_{tot}; \\
u_{g2} &= \Phi^T(\Delta\delta_2) Z i_{tot}; \\
&\vdots \\
u_{gn} &= \Phi^T(\Delta\delta_n) Z i_{tot},
\end{aligned}
\tag{3.38}$$

де

$$Z = \begin{bmatrix} r_{eq} & -x_{eq} \\ x_{eq} & r_{eq} \end{bmatrix}.$$

Сучасні ПЧ будуються на гібридній технології тиристорів *IGCT* (*Integrated Gate Commutated Thyristors*) і транзисторів *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) [111]. При застосуванні допоміжного АД (бустеру) використовуємо перетворювачі з зафіксованою нейтральною точкою (*Neutral Point Clamped, NPC*) [112].

Цей інвертор чотири рази в період переключасться із діодними ключами, пов'язаними із середньою точкою ланки постійного струму (*DC link*) [113, 114]. Замикаючи два з чотирьох перемикачів, навантаження може бути зв'язане з верхньою, середньою або нижньою частиною *DC link* (рис. 3.5), таким чином, вихідна напруга в кожному періоді має трьохрівневу форму хвилі. Конденсатори ланки постійного струму заряджаються подвійним мостовим випрямлячем, включеним паралельно-послідовно. З'єднання обмоток трансформатора ($\Delta/Y/\Delta$), що живить, зумовлює дванадцяти-імпульсну форму хвилі випрямленої напруги. Вихід *NPC* інвертора прямо пов'язаний із мережею 6600 В через *LCL* фільтр.

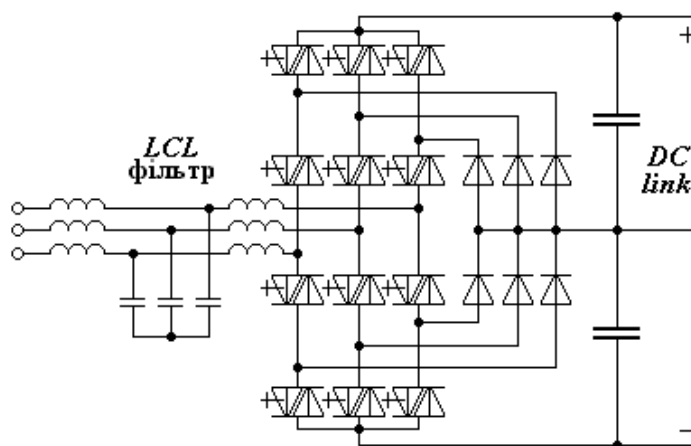


Рис. 3.5 Схема трьохрівневого інвертору ПЧ з ланкою постійного струму (*DC Link*) та пасивним *LCL* фільтром

При моделюванні враховуємо усунення нижчих гармонік вихідної напруги за допомогою оптимізації імпульсної системи управління, а гармонік старшого розряду, що залишаються, за допомогою пасивного фільтра з урахуванням 10% зниження, або підвищення напруги.

Оптимізація моделі устрою генерації імпульсів управління з точки зору отримання синусоїдальної форми напруги на АД, що підвищить ефективність передачі потужності до ГФК, почнемо із основної форми хвилі вихідної напруги ПЧ, яка подана у такий спосіб:

$$U(\varphi, t) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin(n \cdot \frac{\pi}{2}) \cdot [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi)) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi))], \quad (3.39)$$

де φ – фаза вихідної напруги;

U_d – напруга на ланці постійного струму (*DC link*) NPC інвертора;

n – номер гармоніки вихідної напруги.

Основне рівняння, що базується на (3.38), для форми хвилі напруги з багатократними рівнями може бути визначено. Кути управління для моделі з вісьма рівнями за напівперіод, обумовлені довільно обраними дев'ятьма гармонійними складовими:

$$U(\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{21}, \varphi_{22}, \varphi_{31}, \varphi_{32}, \varphi_{41}, \varphi_{42}, \varphi_{51}, t) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin(n \cdot \frac{\pi}{2}) \cdot \left\{ \begin{aligned} & [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi_{11})) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi_{11}))] - \\ & - [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi_{12})) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi_{12}))] + \\ & + [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi_{21})) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi_{21}))] - \\ & - [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi_{22})) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi_{22}))] + \\ & \cdot + [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi_{31})) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi_{31}))] - \\ & - [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi_{32})) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi_{32}))] + \\ & + [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi_{41})) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi_{41}))] - \\ & - [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi_{42})) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi_{42}))] + \\ & + [\cos(n \cdot (\omega t + \varphi_{51})) + \cos(n \cdot (\omega t - \varphi_{51}))] \end{aligned} \right\}, \quad (3.40)$$

де φ_{11} - φ_{51} – фази напруг відповідних гармонік.

Отримані рівняння можуть бути перетворені у вид, де кожна гармоніка показується окремо. Рівняння кожної гармоніки, які базуються на цьому, включаючи основну можуть бути описані одним рівнянням. Амплітуда n -ої гармоніки може бути подана в загальній формі (після тригонометричних перетворень):

$$U(\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{21}, \varphi_{22}, \varphi_{31}, \varphi_{32}, \varphi_{41}, \varphi_{42}, \varphi_{51}, t) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin(n \cdot \frac{\pi}{2}) \cdot$$

$$\cdot \left\{ \begin{aligned} &[2 \cos(n \cdot \varphi_{11}) \cdot \cos(n \cdot \omega t)] - \\ &- [2 \cos(n \cdot \varphi_{12}) \cdot \cos(n \cdot \omega t)] + \\ &+ [2 \cos(n \cdot \varphi_{21}) \cdot \cos(n \cdot \omega t)] - \\ &- [2 \cos(n \cdot \varphi_{22}) \cdot \cos(n \cdot \omega t)] + \\ &+ [2 \cos(n \cdot \varphi_{31}) \cdot \cos(n \cdot \omega t)] - \\ &- [2 \cos(n \cdot \varphi_{32}) \cdot \cos(n \cdot \omega t)] + \\ &+ [2 \cos(n \cdot \varphi_{41}) \cdot \cos(n \cdot \omega t)] - \\ &- [2 \cos(n \cdot \varphi_{42}) \cdot \cos(n \cdot \omega t)] + \\ &+ [2 \cos(n \cdot \varphi_{51}) \cdot \cos(n \cdot \omega t)] \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

Похідна функції n -ої гармоніки:

$$\hat{U}_n = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sin(n \cdot \frac{\pi}{2}) \cdot \left\{ \begin{aligned} &2 \cos(n \cdot \varphi_{11}) - \\ &- 2 \cos(n \cdot \varphi_{12}) + \\ &+ 2 \cos(n \cdot \varphi_{21}) - \\ &- 2 \cos(n \cdot \varphi_{22}) + \\ &+ 2 \cos(n \cdot \varphi_{31}) - \\ &- 2 \cos(n \cdot \varphi_{32}) + \\ &+ 2 \cos(n \cdot \varphi_{41}) - \\ &- 2 \cos(n \cdot \varphi_{42}) + \\ &+ 2 \cos(n \cdot \varphi_{51}) \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$

Ці основні рівняння, що описують гармоніки напруги, використовуємо для обчислення оптимальної моделі імпульсів управління, із метою управління основною гармонікою напруги й усунення 5-ої, 7-ої, 11-ої, 13-ої, 17-ої, 19-ої, 23-ї і 25-ої.

У результаті половина рівня напруги постійного струму *DC link* для 6600В (рис. 3.5) вихідної напруги дорівнює:

$$U_{dc_igct_N} = \frac{1}{\text{modind}_N} \cdot \frac{6600 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 5389 \text{ В}, \quad (3.43)$$

де $\text{modind}_N = 1,01$ – значення випадкової величини оптимальних кутів переключення як функції індексу модуляції для усунення 5-ої, 7-ої, 11-ої, 13-ої, 17-ої, 19-ої, 23-ї і 25-ої гармонік із основної.

Втрата потужності у конверторі з ШІМ складається з втрат у напівпровідникових ключах, втрат на переключення і охолодження енергетичних комутаторів, а також у втрат у ланцюгах управління.

Загальна модель втрат, відповідна характеристикам ШІМ-інвертера описується рівнянням (3.44)

$$P_{\text{loss_PWM}} = P_0 + k_1 I_m + k_2 I_m^2 + k_3 P_m + k_4 P_m^2, \quad (3.44)$$

де I_m – сила струму АД (з 3.48), P_0 – додаткова потужність втрат і втрати охолодження, P_m – потужність навантаження. Втрати перемикачів в АІС включені в k_1 , втрати провідності інвертування включені в k_1 і k_2 , втрати провідності випрямляча включені в k_3 і k_4 . Коефіцієнт потужності PF може мінятися лінійно залежно від потужності навантаження, від 1,0 при холостому ходу до 0,95 при повній потужності:

$$\begin{aligned} P_{\text{bus}} &= P_m + P_{\text{loss_PWM}}; \\ Q_{\text{bus}} &= \sqrt{\left(\frac{P_{\text{bus}}}{PF}\right)^2 - P_{\text{bus}}^2}. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Втрати асинхронного двигуна спрощені до 4-х видів: втрати в статорі і роторі, втрати в сердечнику і механічні втрати тертя

$$P_{\text{loss_AD}} = r_r i_r^2 + r_{ss} i_s^2 + \frac{e_{ag}^2}{r_{ma}} + k_{f1} n_{AD} \quad (54), \quad (3.46)$$

де r_r – опір ротора, r_{ss} – опір статора, r_{ma} – магнітний опір, k_{f1} – коефіцієнт тертя.

Для асинхронного двигуна зроблені наступні допущення:

- стратегія контролю припускає утримувати потік повітряного зазору постійним, звідси $I_m = I_{mN}$;
- частота ковзання невелика в порівнянні з синхронною частотою;
- частота ковзання пропорційна моменту навантаження;
- гістерезисом і насиченням можна знехтувати.

Звідси:

$$\begin{aligned}
 e_{ag} &= k_5 n_s \Rightarrow k_5 = \frac{e_{aN}}{n_{sN}}; \\
 n_s &= n_{sl} + n; \\
 n_{sl} &= k_6 Q_p \Rightarrow k_6 = \frac{n_{slN}}{Q_{pN}}; \\
 i_r &= k_7 Q_p \Rightarrow k_7 = \frac{i_{rN}}{Q_{pN}}; \\
 i_s^2 &= i_r^2 + i_m^2; \\
 i_m &= i_{mN} = k_8.
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

Індексом N відзначені номінальні значення величин. В результаті отримаємо

$$\begin{aligned}
 P_{loss_AD} &= k_9 Q_p^2 + k_{10} + (k_{11} Q_p + k_{12} n_{AD})^2 + k_{f2} n_{AD}; \\
 P_m &= P_{bus_AD} + P_{loss_AD}; \\
 I_m &= (k_5 Q_{bus_AD})^2 + k_8,
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

$$\text{де } k_9 = (r_r + r_{ss})k_7^2; k_{10} = r_{ss}k_8^2; k_{11} = k_5 k_6 / \sqrt{r_{ma}} \text{ і } k_{12} = k_5 / \sqrt{r_{ma}}.$$

Інші навантаження СОДГ можуть бути різними навантаженнями рухового характеру для насосів, компресорів тощо, розподільної мережі низької напруги для житлових приміщень і інших споживачів низької

напруги. Складове навантаження розглядається з урахуванням запиту активного і реактивного навантаження.

Споживана потужність від СОДГ допоміжним АД і іншими споживачами описана у формі компактного вектора як нелінійна модель. Частина виробленої потужності складається тільки з рівнянь алгебри і тому діє як збуджуюча дія на генератори, від яких споживається активна і реактивна потужності.

Далі просторова модель описана як незамкнута система управління, без регуляторів швидкості і напруги. Ціль опису моделі таким чином в тому, щоб вивести оптимальну функцію управління системи “СОДГ – ПЧ – АД – ГФК” для дизель-електричного пропульсивного комплексу з МОД і АД на лінії валу з метою підвищення ефективності передачі потужності в СДЕПК. Використовуючи ту ж систему позначень і векторів, що і в підрозділі 3.3, одержуємо рівняння стану для всієї системи з n числом СОДГ.

$$\begin{aligned}
\frac{d\psi_1}{dt} &= (K(\Omega_1) + R_1 X_1^{-1})\psi_1 + Eu_{g1} + bu_{f1}; \\
\frac{d\psi_2}{dt} &= (K(\Omega_2) + R_2 X_2^{-1})\psi_2 + Eu_{g2} + bu_{f2}; \\
&\cdot \\
\frac{d\psi_n}{dt} &= (K(\Omega_n) + R_n X_n^{-1})\psi_n + Eu_{gn} + bu_{fn}; \\
\frac{dn_1}{dt} &= \frac{1}{T_{a1}}(T_{m1} - (G\psi_1)^T H G X_1^{-1} \psi_1); \\
\frac{dn_2}{dt} &= \frac{1}{T_{a2}}(T_{m2} - (G\psi_2)^T H G X_2^{-1} \psi_2); \\
&\cdot \\
\frac{dn_n}{dt} &= \frac{1}{T_{an}}(T_{mn} - (G\psi_n)^T H G X_n^{-1} \psi_n); \\
\Delta \frac{d\delta_2}{dt} &= \omega_N(n_2 - n_1); \\
&\cdot \\
\Delta \frac{d\delta_n}{dt} &= \omega_N(n_n - n_1); \\
\frac{dT_{m1}}{dt} &= \frac{1}{T_{DE1}}(-T_{m1} + z_1); \\
\frac{dT_{m2}}{dt} &= \frac{1}{T_{DE2}}(-T_{m2} + z_2); \\
&\cdot \\
\frac{dT_{mn}}{dt} &= \frac{1}{T_{DEn}}(-T_{mn} + z_n);
\end{aligned} \tag{3.49}$$

де вектор u_{gi} – є функцією $u_{gi}(\psi_1, \dots, \psi_n, \Delta\delta_2, \dots, \Delta\delta_n)$.

Після цього отримаємо:

$$\begin{aligned}
u_{g1} &= Z(w)(GX_1^{-1}\psi_1 + \Phi(\Delta\delta_2)GX_2^{-1}\psi_2 + \dots + \Phi(\Delta\delta_n)GX_n^{-1}\psi_n); \\
u_{g2} &= \Phi^T(\Delta\delta_2)u_{g1}; \\
&\cdot \\
u_{gn} &= \Phi^T(\Delta\delta_2)u_{gn},
\end{aligned} \tag{3.50}$$

де $w = [P_Z, Q_Z, P_S, Q_S]$ – це вектор з чотирма входами, який зумовлює відхилення споживаної потужності АД і ПЧ, отриманий в рівняннях попереднього підрозділу, залежно від навантаження на валу ГФК. Виходи, що використовуються *PID*-контролерами – це частоти обертання СОДГ і напруга на шині u_{g1} першого дизель-генератора.

Визначаємо наступні вектори:

$$u = [u_{f1}, \dots, u_{fn}, z_1, \dots, z_n]^T$$

з $2n$ впливаючими входами і

$$x = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n, \Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n, \Delta\delta_2, \dots, \Delta\delta_n, T_{m1}, \dots, T_{mi}],$$

з $(8n - 1)$ станами.

Тоді

$$\frac{dx}{dt} = Ax + f(x) + g(x, w) + Bu, \quad (3.51)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} R_1 X_1^{-1} & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & R_2 X_2^{-1} & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & R_n X_n^{-1} & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 1/T_{a1} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 1/T_{a2} & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & 1/T_{an} & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & -\omega_N & \omega_N & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & -\omega_N & 0 & \cdot & \omega_N & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & -1/T_{DE1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 1/T_{DE2} & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & -1/T_{DEn} & 0 \end{bmatrix}$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} K(\Omega_1) \\ K(\Omega_2) \\ \cdot \\ K(\Omega_n) \\ (G\psi_1)^T H G X_1^{-1} \psi_1 \\ (G\psi_2)^T H G X_2^{-1} \psi_2 \\ \cdot \\ (G\psi_n)^T H G X_n^{-1} \psi_n \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$g(x, w) = [u_{g1}, u_{g2}, \dots, u_{gn}, 0, 0, \dots, 0, 0, \dots, 0, 0, 0, \dots, 0]^T.$$

Отриманий просторовий вектор, який описує стан системи “СОДГ – ПЧ – АД – ГФК” буде використано в *MatLab-Simulink* для моделювання різноманітних перехідних процесів у дизель-електричному пропульсивному комплексі з МОД і АД на лінії валу, з точки зору отримання результатів, які підтверджували підвищення ефективності передачі потужності до рушія (ГФК).

РОЗДІЛ 4

МОНІТОРИНГ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СУДНОВОМУ
ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПРОПУЛЬСИВНОМУ КОМПЛЕКСІ4.1. Оптимізація параметрів математичної моделі регуляторів середньо-
обертових дизель-генераторів і уточнення структурної схеми дизель-
електричного пропульсивного комплексу

Оптимізуємо параметри регуляторів частоти обертання ДГ і регуляторів струму збудження СГ, для забезпечення стабілізації напруги на шинах під час підключення допоміжного АД.

Для цього у *MatLab/Simulink* збираємо модель (рис. В.1.1 додатку В), у якій застосуємо блок *Continuous* для визначення початкових параметрів. Параметри схеми заміщення СГ залишаємо без зміни, згідно даних бібліотеки *Simulink* для синхронного явно-полюсного генератора загальною потужністю 3.125 МВт, лінійною напругою 2400 В, частотою мережі 60 Гц та частотою обертання ротору 1800 об/хв. Параметри схеми заміщення АД з потужністю на валу 1.679 МВт, напругою на статорі 2400 В, 60 Гц і кількістю пар полюсів 12 ($n_n = 291$ об/хв.) розраховуємо згідно методики приведеній [113].

Отримали такі дані: опір статору 0.075 Ом; опір ротору 0.043 Ом; індуктивність статору і ротору 0.00046 Гн; взаємоіндукції 0.0181 Гн.

Для утворення квадратичної залежності моменту опору T_m на валу АД пропорційного швидкості обертання ротору, у моделі між виходом виміру оборотів АД ω_m і входом T_m необхідно включити блоки *Maht Function (Function)* і *Gain (Mechanical Torque)*, коефіцієнт передачі якого розраховується по формулі

$$K^* = \frac{M_n}{n_n^2} = \frac{9,55 \times P_n}{n_n \times n_n^2} = \frac{9,55 \times 1679000}{291 \times 291^2} = 0,651.$$

Блок *Signal Constraint* (рис. В.1.1 додатку В) підключаємо для виміру оборотів дизелів та задаємося наступними параметрами у відносних одиницях (в.о.): $K_x = 0$ – нижчий рівень моменту на валу дизель-генератора (*Torque Limits*); $K_y = 1.1$ – вищий рівень моменту; $K_z = 40$ – коефіцієнт передачі регулятора (*Regulator Gain*).

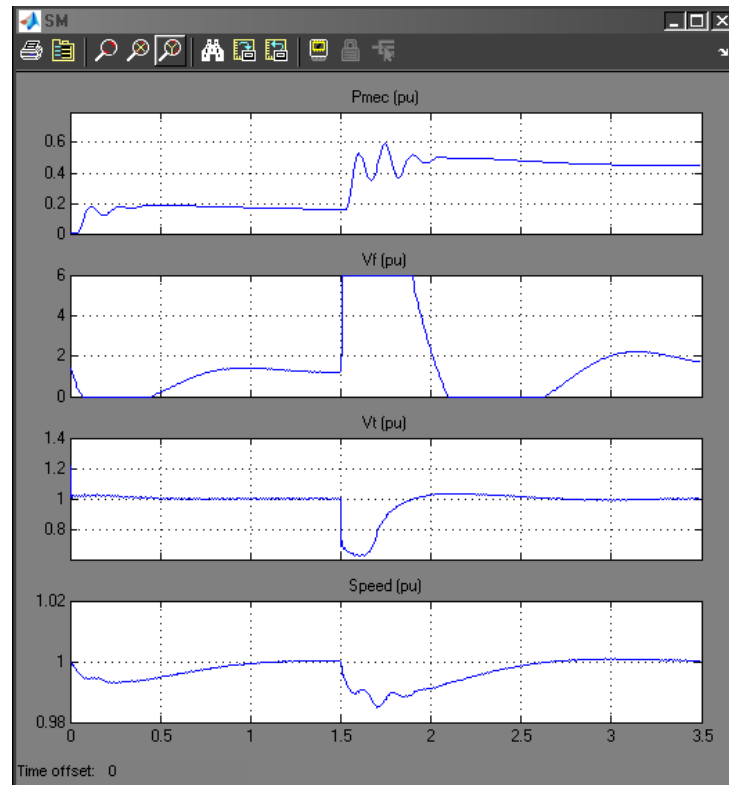
Після проведення оптимізації отримали оптимальні значення параметрів: $K_x = 8,78e^{-17}$; $K_y = 2,0232$; $K_z = 14,0373$. На рис. В.1.2 показано графіки зміни струму АД, оборотів ротору та електромагнітного моменту, а на рис. В.1.3 – напруги на шинах СОДГ.

Ці результати моделювання показують, що оптимізація параметрів регуляторів дизель-генераторів суттєво вплинула на якість перехідних процесів, зокрема: тривалість кидку струму зменшилась з 1,8 с до 0,75 с при тому же значенні амплітуди; зменшилися провал напруги на шинах СГ і час розгону АД до номінальних оборотів, що особливо важливо з точки зору регулювання частоти обертання валу гребного гвинта у СДЕПК. На рис. 4.1 а, б показані характеристики дизель генераторів під час перехідного процесу до і після оптимізації. Треба зауважити, що динаміка процесів значно поліпшилася, що свідчить про підвищення ефективності передачі потужності від СОДГ до допоміжного АД і далі до рушія при зміні експлуатаційних умов.

При налагодженні контролерів регулювання частоти обертання і моменту АД необхідно добитися відповідності вихідних величин оборотів і моменту завданням, які поступають з поста управління.

На валу АД присутній момент опору, зумовленого рухом судна. Регулювання оборотів АД здійснюється за допомогою завдання частоти напруги на виході ПЧ, який виконано по схемі з ланкою постійного струму і автономним інвертором напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), у якому вихідна напруга на АД регулюється в залежності від моменту опору на його валу для утримання частоти обертання АД у потрібних межах.

а)



б)

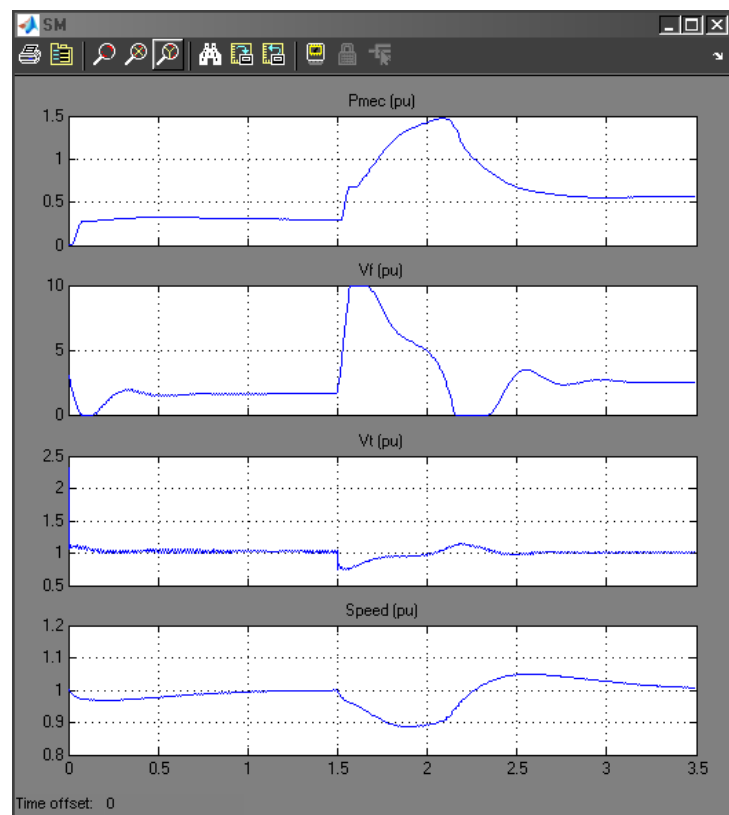


Рис. 4.1 Характеристики СОДГ: а) до оптимізації; б) після оптимізації; $P_{mec}(pu)$ – механічна потужність на валу дизелю, в.о.; $V_t(pu)$ – завдання подачі палива, в.о.; $V_f(pu)$ – завдання частоти обертання, в.о.; $Speed(pu)$ – обороти дизелю, в.о.

В результаті аналізу енергетичних процесів у СДЕПК було встановлено, що між МОД і АД відбувається передача потужності. Це зумовлено тим, що момент обертання МОД має пікові значення продовж одного обороту валу, які перевищують, або навпаки, менш ніж момент опору гребного гвинта (рис. 4.2).

З рис. 4.2 видно, що при будь-якому співвідношенні кількості циліндрів i до кількості лопатей гвинта z , на лінії валу присутні гармонійні коливання крутильного моменту, частота яких кратна кількості лопатей гвинта. При застосуванні гвинтів з парною кількістю лопатей (наприклад $z = 4$), яким властива менша амплітуда додаткових коливань, згинаючих гребний вал (в порівнянні з гвинтами з непарними значеннями z) і МОД з парною кількістю циліндрів (наприклад $i = 6$), резонансні коливання, які утворюються внаслідок збігу вільних гармонійних частот гвинта з додатковими гармонійними частотами, які виникають при роботі МОД, вдається усунути за допомогою застосування допоміжного АД на лінії валу, за рахунок їх компенсації додатковим обертальним моментом, величина і частота якого залежить від параметрів ПЧ частотно-керованого АД. В свою чергу, параметри ПЧ можуть змінюватися в залежності від режиму роботи пропульсивного комплексу.

При цьому передавальне число редуктору на стороні АД можна розрахувати по формулі:

$$i_{p(AD)} = \frac{60 \cdot f_{AD} (1 - s_{AD}) \cdot i_p}{p \cdot n_{MOD}}, \quad (4.1)$$

де: f_{AD} – частота напруги на статорі АД, Гц; s_{AD} – номінальне ковзання АД; p – число пар полюсів обмотки статора АД; i_p – передавальне число редуктора на стороні МОД, яке залежить від співвідношення i/z ; n_{MOD} – номінальна частота обертання МОД.

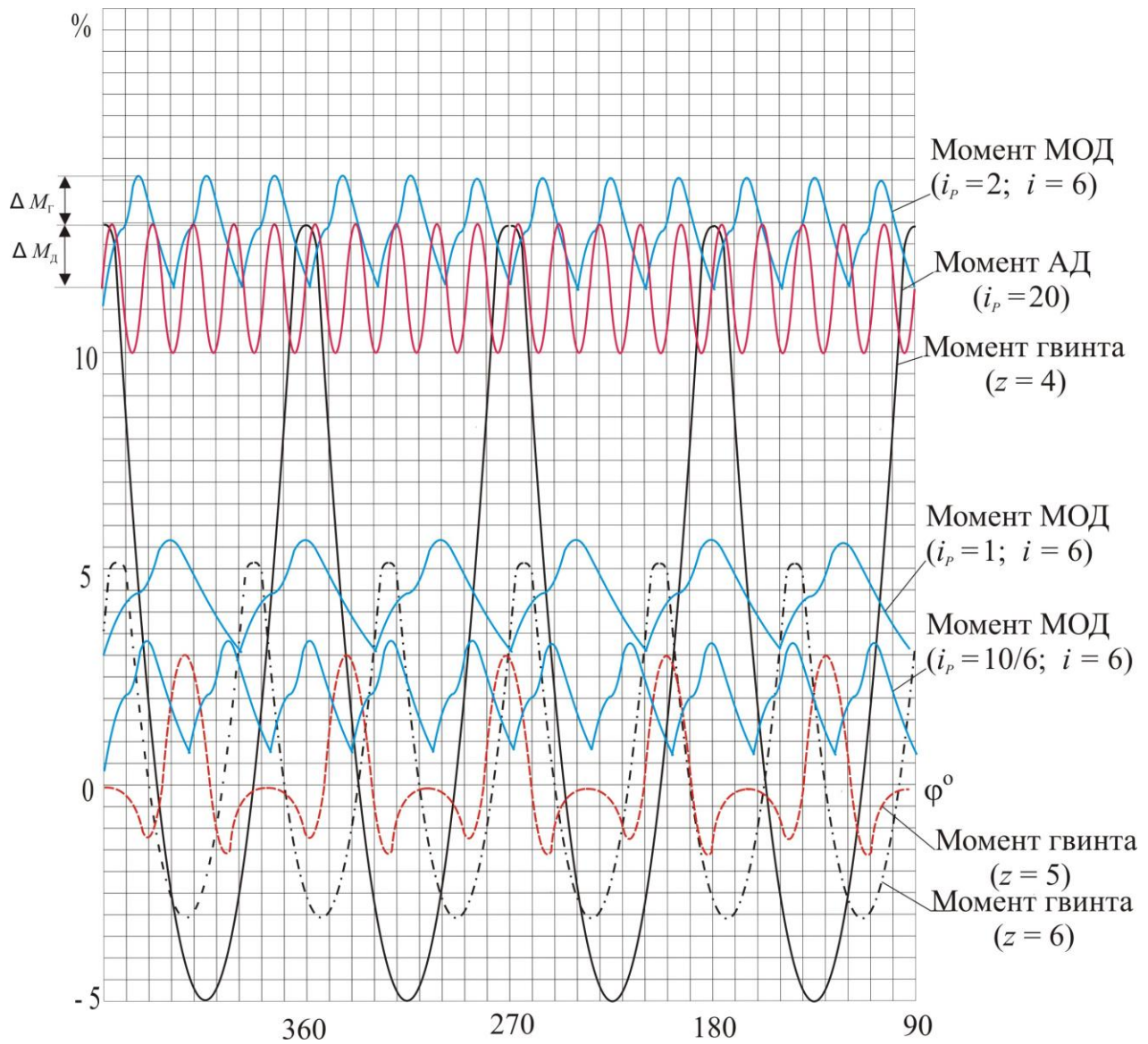


Рис. 4.2 Зміни крутильного моменту МОД, АД і гребного гвинта, працюючого за корпусом судна, в процентах від середнього крутильного моменту: $\Delta M_{\Gamma} = M_B - M_P$ і $\Delta M_{\Delta} = M_P - M_B$ – різниця між максимальними моментами МОД і гребного гвинта, яка зумовлює роботу АД у генераторному режимі і режимі двигуна відповідно; z – кількість лопатей гвинта, i – кількість циліндрів МОД; i_p – передавальне число редуктору

При прямому з'єднанні АД з валом гребного гвинта ($i_{p(АД)} = 1$), з рівняння (4.1) отримаємо формулу для розрахунку частоти напруги на обмотці статора АД:

$$f_{\text{АД}} = \frac{p \cdot n}{60(1 - s_{\text{АД}})}.$$

4.2. Загальна модель передачі потужності в дизель-електричному пропульсивному комплексі в комп'ютерній лабораторії

На рис. В.2 додатку В приведено в *MatLab/Simulink* модель передачі потужності в пропульсивному комплексі із головним МОД і допоміжним частотно-керованим трифазним АД. На валу АД присутній момент опору обертанню, який залежить від моменту МОД і моменту опору, зумовленого рухом судна. Регулювання оборотів АД здійснюється за допомогою завдання частоти напруги на виході перетворювача частоти, який виконано по схемі з ланкою постійного струму і автономним інвертором напруги з широтно-імпульсною модуляцією, у якому вихідна напруга на АД регулюється в залежності від моменту опору на його валу, з точки зору утримання частоти обертання АД у потрібних межах.

Середньо-обертовий дизель-генератор модульовано як два паралельно включених ДГ, які працюють на одну шину напругою 2400 В.

В залежності від поставленої задачі, у моделі застосовується блок розрахунку початкових даних (*Continuous*), який дозволяє визначити параметри електричних машин у сталому стані, які необхідні, наприклад, для моделювання підключення обертового АД до СОДГ, тобто подачі напруги живлення на обмотки допоміжного електродвигуна, яких вже знаходиться на лінії вала МОД, і частота обертання якого не є нульовою.

На рис. В.2 додатку В трифазний допоміжний асинхронний електродвигун дизель-електричного пропульсивного комплексу (*ASM*) отримує живлення від перетворювача частоти з ланкою постійного струму (*Rectifier - Breaking Chopper – Inverter*), який, в свою чергу, через трансформатор *TR* живиться від двох, паралельно працюючих середньо-обертових ДГ (СОДГ).

4.3. Моделі окремих компонентів дизель-електричного комплексу

У *MatLab/Simulink* судно змодульовано на основі даних опору води корпусу, наприклад при двох умовах завантаження: повному проектному завантаженні і завантаженні баластом. Можливо створювання набору кривих, які можуть використовуватися для інтерполяції. Для отримання значень опору корпусу використовуються виміряні дані при русі реального судна, а також співвідношення (3.2 – 3.12).

Крива опору судну для фактичного завантаження будується методом *Bi*-лінійної інтерполяція з квадратичним наближенням до значення меншого, ніж виміряне:

$$R(u) = X_{uu} \times u^2 + polyval(pR_u, \max(u_ship - up_start, 0)), \quad (4.2)$$

де $R(u)$ – опір корпусу судна у функції швидкості;

X_{uu} – опір руху судна, кПа;

u – швидкість судна, м/с;

R_u – фактичний опір руху реального судна, кПа;

u_ship – реальна швидкість судна в залежності від завантаження, м/с;

up_start – початкова швидкість судна, м/с.

Таблиці початкових даних потрібні для кожного конкретного судна. Дані одержують шляхом реальних вимірювань і вони задаються застосовуючи засоби обробки даних, що розробляються на базі підходу *Data Mining* (дослівно: “здобич даних”), так називані *DMI* моделі (додаток Ж.1).

На рис. Ж.1 додатку Ж показана модель динаміки швидкості судна (*Ship speed dynamics*), вихідним параметром якої є швидкість гребного гвинта відносно води (V_a), яке є вхідною величиною моделі гребного гвинта (*Propeller characteristics*) (рис. Ж.2), яка використовує функцію файлу *cpr.m* (додаток Ж.2).

У додатку Ж.3 наведено файл *ru_func.m*, який пояснює порядок розрахунку опору морської води корпусу при його русі згідно (4.2) в залежності від швидкості і зовнішніх умов, таких як швидкість і напрямок вітру, які задаються у файлі початкових даних *t_extern.mat* як випадкові величини. Також у цьому файлі інтегруються відхилення “шум” швидкості судна і зовнішня сила опору корпусу судна.

Структура файлу початкових даних *comdata.m* приведено у додатку Ж.4, де приведено порядок розрахунку коефіцієнтів CT і CQ , які задаються у табличному вигляді і враховують коливання осі гребного валу.

Значення T_{prop} і Q_{prop} (рис. Ж.2) розраховуються в залежності від кута атаки та коефіцієнтів CT і CQ . У свою чергу значення Q_{prop} є вхідною величиною математичної моделі мало-обертового дизелю (*Diesel Engine*) (рис. Ж.6.1).

В залежності від характеру необхідних перехідних процесів, задається початкова частота обертання гребного валу. Для дослідження пускових режимів МОД $n_0 = 0.01$. Оптимальні параметри настройки залежать від сумарного моменту інерції всіх мас системи, що рухаються, оскільки від нього в основному залежить постійна часу комплексу. При визначенні сумарного моменту інерції залежно від режиму роботи судна ураховується те, що, наприклад, СОДГ при будь-якому завантаженні (у тому числі і нульовому) мають обертальний рух. Кількість приєднаних до гвинта мас води визначається кроком гвинта, який у свою чергу залежить від режиму роботи судна, а також зовнішніх атмосферних умов.

Величина паливного індексу зумовлюється параметрами регулятора оборотів МОД (*Governor*) (рис. Ж.6.2), кінцевою метою при його настроюванні є забезпечення оптимальних параметрів системи автоматичного управління, що впливає як на паливну рейку головного двигуна, механізм зміни кроку гвинта, так і на завдання частоти обертання допоміжного АД. Визначення параметрів настройки регулятора полягає в необхідності забезпечення оптимального регулювання по вибраному критерію якості

кожного режиму роботи пропульсивного комплексу. В загальному випадку повне забезпечення одного критерію робить неможливим якісне регулювання по іншому критерію (наприклад, критерій “економічність” в більшості випадків суперечить критерію “експлуатаційна надійність”, або “підвищена маневреність”), тому звичайно при обліку декількох критеріїв вибирається основній (первинний), по якому проводиться настроювання, а вторинні критерії використовуються для визначення меж регулювання і накладення меж на значення регульованого параметра.

В маневровому режимі роботи судна на допоміжний АД полягає більше значення, з точки зору його більшої швидкодії в порівнянні з МОД. Тому, при пускових і реверсивних режимах, завдання частоти обертання АД є більш інтенсивним, і, навпаки, у економічному режимі роботи судна, коли основне навантаження приходить на МОД, АД виконує роль додатковою потужності на валу, призначення якої у згладжуванні коливань оборотів гребного валу, тобто зменшенні вібрацій і динамічних навантажень на вал.

Обмеження подачі палива (*Limit on Y by n*) виконується за допомогою функції $Y = \text{limit_y}(u)$ (див. додаток Ж.5): якщо $u > n_max$, де $n_max = 1.1 * n_nom$ (номінальна частота обертання валу), то $u = n_max$; а якщо $u < 0$, то $u = 0$; якщо $u > (0.8 * n_nom)$, то $y = 1$; при $u < (0.4 * n_nom)$, $y = 0.4$; в інших випадках $y = (1.5/n_nom) * u - 0.2$.

Виміряне значення частоти обертання валу дизеля поступає з блоку *Shaft speed Measured*, у якому враховується відхилення (“шум”) оборотів (n_noise), яке є також вхідною величиною для контролера перевантаження (*Overload controller*), призначення якого у обмеженні перевантаження дизеля залежно від встановленого кута атаки гвинта (рис. Ж.6.3).

Вхідними параметрами функції *Overload* (додаток Ж.6) є фактична величина паливного коефіцієнту (fuel_index) і виміряне значення оборотів дизеля ($\text{measured } n$), а вихідними: e_y – розрахована різниця між фактичним (виміряним) індексом пального і обмеженнями і $OL_on = (e_y - 0.05)$, де 0.05 – уставка. Розрахунки робляться наступним чином: $out = \text{overload}(u)$; $n_max =$

$1.1 \cdot n_{nom}$; якщо $u > n_{max}$, то $u = n_{max}$; а якщо $u < 0$, то $u = 0$; при $u > (0.8 \cdot n_{nom})$ $y_{lim} = 0.75$; при $u < (0.4 \cdot n_{nom})$ $y_{lim} = 0.4$; у інших випадках $y_{lim} = (1.375/n_{nom}) \cdot u - 0.15$; $e_y = Y_m - (y_{lim})$; $OL_{on} = (e_y - \epsilon_{ol}) > 0$; $e_y = e_y \cdot OL_{on}$.

Величина кута атаки поступає на блок регулювання і вимірювання ($\theta_{measured}$) кроку гвинта (*Pitch angle dynamics and Control*) (рис. Ж.6.4), у якому враховується відхилення (“шум”) завдання (θ_{noise}) і остаточне значення (θ) поступає на вхід моделі гребного гвинта (*Propeller characteristics*) (додаток Ж.2, рис. Ж.2).

У разі використання гвинта фіксованого кроку (ГФК), необхідно завдання (θ_{com}) встановити постійним, тобто незалежним від швидкості обертання валу. Це робиться за допомогою налаштування селектору режимів роботи комплексу (*Mode selector*), у якому обробляється функція $comb_n_ref$, яка в залежності від того, маневрує судно чи рухається економічним ходом, встановлює залежність кута атаки від оборотів (додаток Ж.7). Також необхідно у контролері перевантаження дизеля (рис. Ж.6.3) встановити $OL_{on} < 0$, таким чином виключити функцію обмеження кута атаки.

4.4. Генерація помилок і відхилень (“шумів”)

Генерація відхилень (“шумів”) виміряних та початкових значень виконується за допомогою попереднього їх розрахунку в залежності від кроку та часу моделювання за допомогою окремої програми, результатом роботи якої є файли *noise_e.mat* і *t_extern.mat*, у яких задаються відхилення виміряних значень та величини збуджень наступних параметрів (рис. В.2): оборотів валу (n_{noise}); паливного коефіцієнту (Y_{noise}); кута атаки гвинта (θ_{noise}); швидкості судна (U_{noise}); моменту опору обертанню вала (Q_f); зовнішньої

сили опору руху судна (T_{ext}); швидкості вітру ($Wind_speed$); напрямку вітру ($Wind_direction$).

На рис. Ж.8 додатку Ж показана модель генерації значень сили і напрямку вітру. У додатку Ж.8 наведено структуру файлу *gen_nois.m*, за допомогою якого проводяться всі необхідні розрахунки у відповідності до початкових даних, і результатом роботи якого стають файли *noise_e.mat* і *t_extern.mat*, які записуються у робочий каталог *MatLab/Simulink*.

Так як, момент опору на валу АД визначається як різниця між моментом, який залежить від частоти обертання МОД, і моментом опору, який залежить від швидкості руху судна відповідно до режиму, то всі розраховані “шуми” так, чи іншим шляхом зумовлюють відхилення всіх величин стосовно допоміжного АД. Наприклад, якщо від’ємне значення відхилення моменту опору обертання вала (Q_f) накладається на таке ж значення “шуму” паливного коефіцієнту (Y_{noise}), це призведе до надмірного зниження частоти обертання вала МОД, що, в свою чергу, зумовить збільшенню завдання частоти контролера швидкості допоміжного АД, збільшення струму збудження СГ і паливного коефіцієнту ДГ. І, навпаки, у разі накладення позитивних значень зовнішньої сили опору руху судна (T_{ext}), швидкості вітру ($Wind_speed$) і напрямку вітру ($Wind_direction$), які співпадають за напрямком руху судна, це призведе до зростання оборотів, що стане причиною розвороту лопастей гвинта, а у разі використання ГФК, - до зменшення завдання частоти обертання АД, струму збудження і паливного коефіцієнту СОДГ.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ В ПРОПУЛЬСИВНОМУ КОМПЛЕКСІ З ДОПОМІЖНИМ АД

5.1. Перевірка адекватності математичних моделей

Оскільки моделювання проводилося у *MatLab/Simulink*, то спочатку необхідно було перевірити, що програмні віртуальні блоки *Simulink* віще згаданого пакету (наприклад: дизелі, асинхронні електродвигуни, синхронні генератори тощо) адекватні процесам у реальних об'єктах.

Для цього було створено лабораторну установку (рис. Д.1 додатку Д), де за допомогою ПЕОМ типу *IBM PC* було знято пускові характеристики АД типу МАД 622 на холостому ході, технічні дані якого приведено у таблиці Д.1 додатку Д, а також величини напруги на АД і споживаного струму, які заводилися у ПЕОМ за допомогою плати аналого-цифрового перетворювача (АЦП) типу РСД-812G (ГОСТ 26.003-80).

Під час проведення експерименту проводилися пуски, переключення АД зі швидкості на швидкість, гальмування, а також зміна напрямку обертання. Всі дані за допомогою вищевказаної плати вводилися у ПЕОМ і зберігалися у окремих файлах за допомогою програми *osc.exe*, яка дозволяє, в залежності від довжини перехідного процесу і часу інтегрування вхідної величини (струм, напруга, частота обертання ротору АД тощо), отримувати залежності вибраного параметру, виводити їх екран ПЕОМ, зберігати на носіях інформації, аналізувати і роздруковувати.

Наприклад на рис. 5.1 наведено графік залежності частоти обертання ротору АД у в.о. від часу при його розгоні, гальмуванні і зміні напрямку обертання в спливанні 10 с, а на рис. 5.2 показано ці ж перехідні процеси, отримані в *MatLab-Simulink* продовж того часу моделювання, для чого було

створено віртуальну модель лабораторної установки, яку представлено на рис. Д.3 додатку Д.

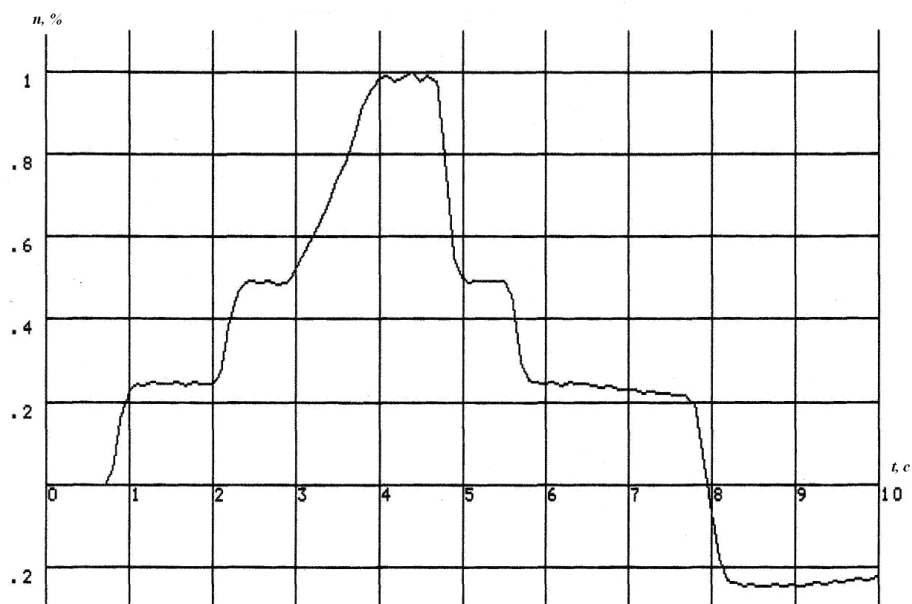


Рис. 5.1 Залежність частоти обертання ротору при розгоні, гальмуванні і реверсі АД МАП 622 в функції часу, отримані з реального двигуна

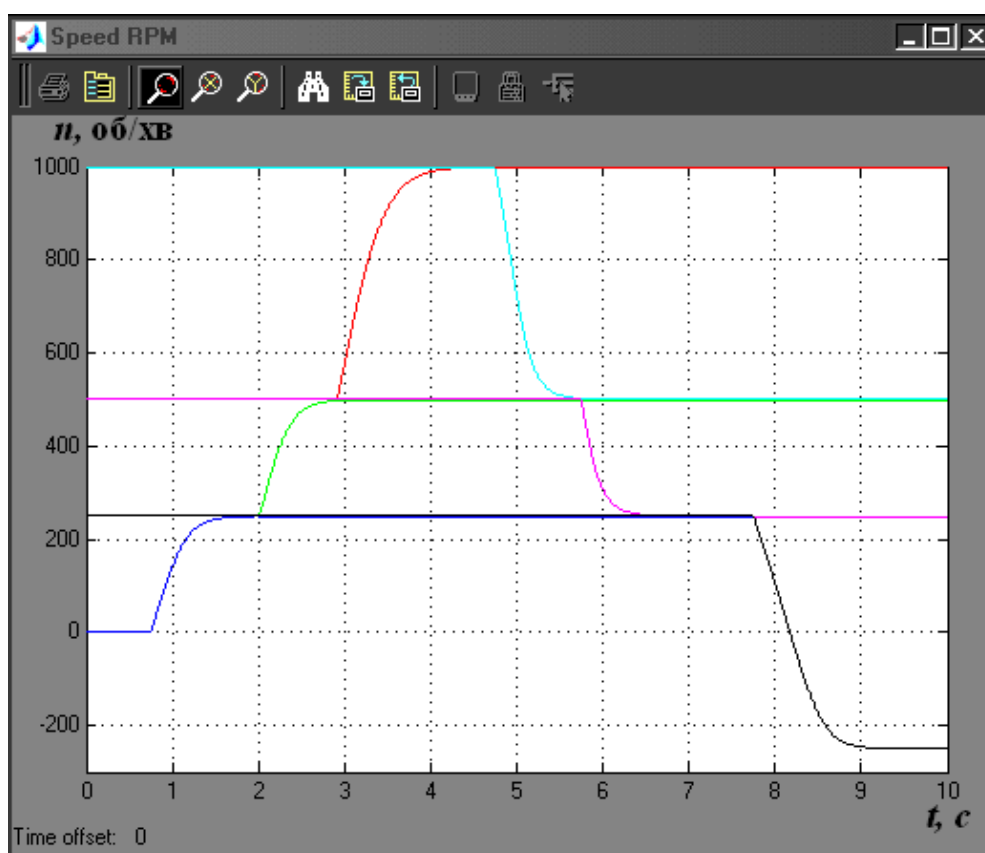


Рис. 5.2 Залежність частоти обертання ротору АД МАП 622 в *MatLab/Simulink*

Під час моделювання було зроблено такі припущення: кожна окрема обмотка АД МАП 622 представляє собою модель асинхронного електродвигуна з короткозамкненою обмоткою, параметри якого відповідають технічним характеристикам, наведеним у таблиці Д.1 додатку Д; активні опори статорних обмоток вимірювались за допомогою мостів, реактивні – при проведенні опиту холостого ходу методом амперметра і вольтметра, інші параметри розраховувались по методиці, приведеній у [113]; при підключенні обмотки першої швидкості при розгоні (*Speed 0_1*), значення ковзання s приймалося рівним 1, а другої – 0,5, тобто враховувалося, що ротор обертається з частотою 250 об/хв, близькою до оборотів холостого ходу на першій швидкості з кількістю пар полюсів $p = 12$.

Аналогічно підключалися інші обмотки; при гальмуванні, наприклад з третьої швидкості на другу (*Speed 3_2*), значення ковзання для обмотки другої швидкості $s = -1$, а при гальмуванні проти вмиканням (*Speed -1_1*) – $s = 2$ для обмотки першої швидкості, а значення оборотів, які вимірюються блоком *Speed RPM* інвертуються на протилежні.

Аналізуючи графіки на рис. 5.1 і 5.2 можна зробити висновки, що модель адекватна і відповідає реальному об'єкту, за винятком деяких розбіжностей. Наприклад: час переходу віртуального АД зі швидкості на швидкість відбувається декілька повільніше, ніж реального, що свідчить про те, що реальні параметри МАП 622 відрізняються від розрахованих і потребують уточнення у зв'язку з тим, по-перше – вони могли змінитися продовж експлуатації двигуна, по-друге – модель не враховує такі параметри, як температура обмоток, що приводить до збільшення значення опору обмоток і зменшення струмів, неточність виміру самих параметрів (“шуми” вимірів), по-третє – момент підключення обмоток АД до мережі, який задавався блоками *Timer*, визначався з графіку на рис. 5.1 з відповідною погрішністю.

Всі ці моменти враховувались при моделюванні передачі потужності до рушія в пропульсивному дизель-електричному комплексі з МОД і допоміжним АД на лінії валу ГФК.

На рис. Д.2 додатку Д показана залежність напруги на обмотках МАП 622 продовж 5 с при його гальмуванні і розгоні.

5.1 Перевірка критерію ефективності передачі потужності в дизель-електричному пропульсивному комплексі

На рис. 5.3 наведені результати комп'ютерного моделювання комплексу СОДГ – ПЧ – АД – ГФК, де записані графіки зміни деяких перемінних, що відбивають основні енергетичні процеси. З графіків випливає можливість якісного управління допоміжним АД – забезпечення необхідних для даної системи робочих швидкостей при повному й ослабленому магнітному потоку АД, прискорень, максимальних моментів тощо.

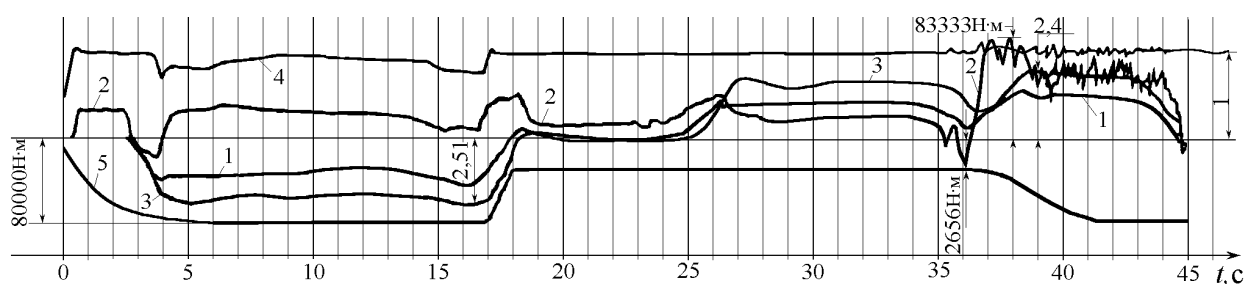


Рис. 5.3 “Осцилограми” комп'ютерного моделювання: крива 1 – завдання швидкості АД; 2 – електромагнітний момент АД (Н·м); 3 – частота струму статора АД відносно номінального значення; 4 – потокосцеплення ротора АД відносно номінального значення; 5 – момент опору на валі АД (Н·м).

На рис. 5.4 приведені графіки споживаної $W_{\text{спож}}$ від СОДГ енергії і енергії $W_{\text{вирт}}$ що витрачається на розгін АД у електроприводі з ПЧ та ШІМ-АД,

а також графік зміни струму у ланці постійного струму системи ПЧ із ШІМ-АД.

Результати досліджень дають кількісні значення ефектів що досягають економії електроенергії, зниження динамічних навантажень, що свідчать про доцільність як для виробників, так і для споживачів переходу на систему електропривода АІС із ШІМ-АД для СДЕПК з МОД і частотно-керованим АД на лінії валу рушія (ГФК), що працюють в комплексі СОДГ-ЧП-АД-ГФК.

При цьому критерій ефективності (3.1) задовольняє поставленій задачі, за винятком того, що під час дослідження ефективності передачі потужності від МОД до рушія при використанні допоміжного АД на лінії валу, необхідно буде доповнити критерій складовими, які б свідчили про економію пального, зменшення коливань потужності, а звідси і динамічних механічних навантажень на лінії валу до рушія.

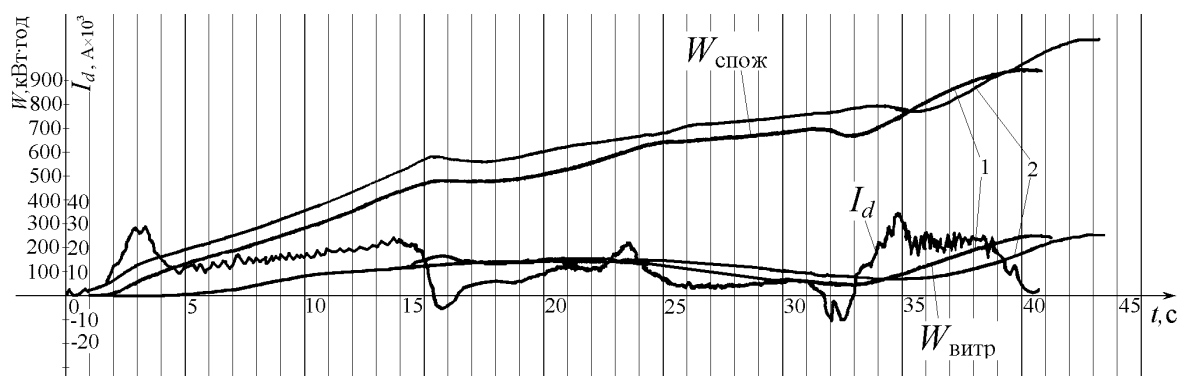


Рис. 5.4 Графіки енергії $W_{\text{спож}}$ споживаної з мережі (кВт·годину); $W_{\text{витр}}$ — що витрачається на подолання моменту опору (кВт·годину): струму в ланці постійного струму I_d (А) із системою електроприводів СОДГ-ЧП-АД із ШІМ (1) і СГ-АД (2).

При виконанні кількісної оцінки критерію ефективності при застосуванні допоміжного АД на лінії валу МОД СДЕПК, враховувалося те, що МОД, працюючий при зниженні навантаження до 0,8 номінального значення має коефіцієнт ефективності, який лежить у межах 0,7 – 0,8 від номінального.

Потужність передана МОД безпосередньо до гвинта розраховували по формулі (дивись рис. 3.3):

$$P_B = \eta_{TRM} \cdot 2\pi \cdot M_B \cdot n_e. \quad (5.1)$$

Таким же чином розраховуємо потужність АД, безпосередньо передану до гвинта:

$$P_{AD} = \eta_{TRM} \cdot 2\pi \cdot Q_{AD} \cdot n. \quad (5.2)$$

Потужність, необхідна для руху судна:

$$P_E = \eta_D \cdot \eta_{TRM} \cdot 2\pi \cdot n(M_B + Q_{AD}). \quad (5.3)$$

Отже, виходячи з (5.1) – (5.3), і враховуючи, що $P_E = R_u \cdot v_s$ (рис. 3.3), отримаємо вираз для розрахунку ефективності СДЕПК:

$$H_{пр} = \eta_{TRM} \cdot \eta_D = \frac{R_u \cdot v_s}{2\pi \cdot n(M_B + Q_{AD})}. \quad (5.4)$$

Оцінка проводилася при різних умовах завантаження судна, частоті обертання валу, а також з урахуванням регулювання розвору лопатій.

Враховуючи рівняння (5.1) – (5.4), (3.2), (3.11) і (3.12), а також рис. В.2 додатку В і Ж.2 додатку Ж витрату палива оцінюємо, виходячи з залежності (1.2), та враховуючі (5.4):

$$G = \frac{c_1 \cdot c_2 \cdot g_i \cdot R_u \cdot v_s}{2\pi \cdot c \cdot Q_f \cdot H_{пр}}, \quad (5.5)$$

де $g_i = 170$ г/кВт·год. – питома індикаторна витрата палива для МОД, працюючих на важкому паливі; $Q_f = 40,5$ кДж/кг – номінальна кількість

теплоти згоряння палива для МОД з $H_{пр} = 0,52$; c_2 – коефіцієнт пропорційності між середнім індикаторним тиском і моментом МОД.

Для розрахунку залежності ефективності пропульсивного комплексу від експлуатаційних умов і застосування допоміжного АД, у модель СДЕПК (рис. В.2) вводимо блок функцій, який реалізує рівняння (5.5) (рис. В.3 додатку В).

На рис. 5.5 і 5.6 наведено графіки зміни ефективності СДНПК з використанням регулювання кроку гвинта і без, із застосуванням допоміжного АД на лінії вала і без нього.

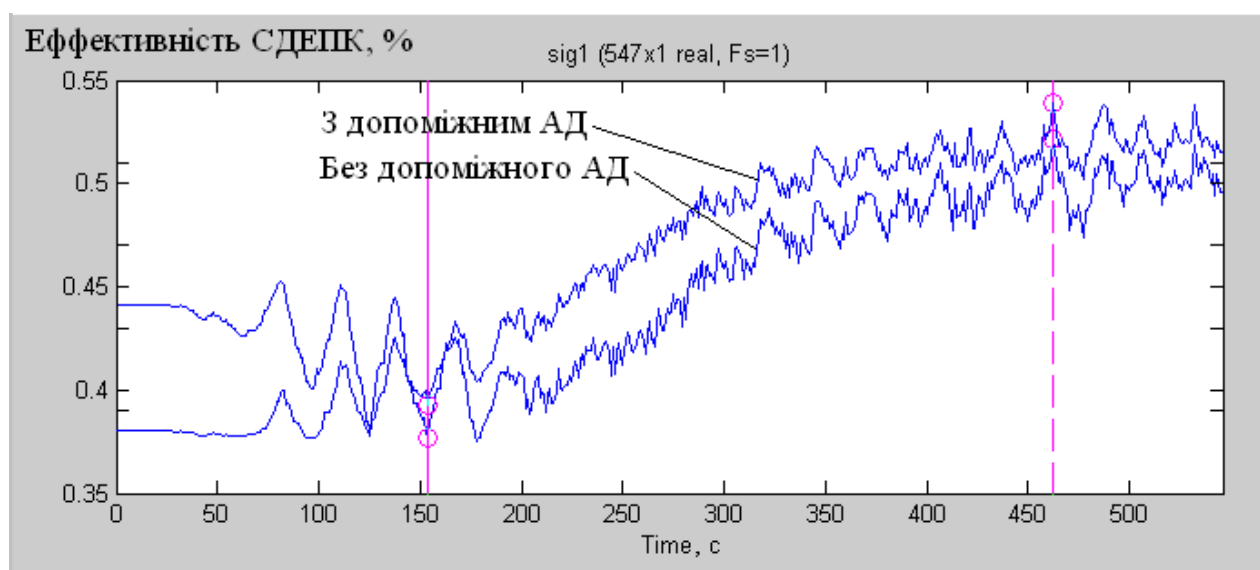


Рис. 5.5 Залежність ефективності СДЕПК продовж часу 500 с з регулюванням кроку гвинта

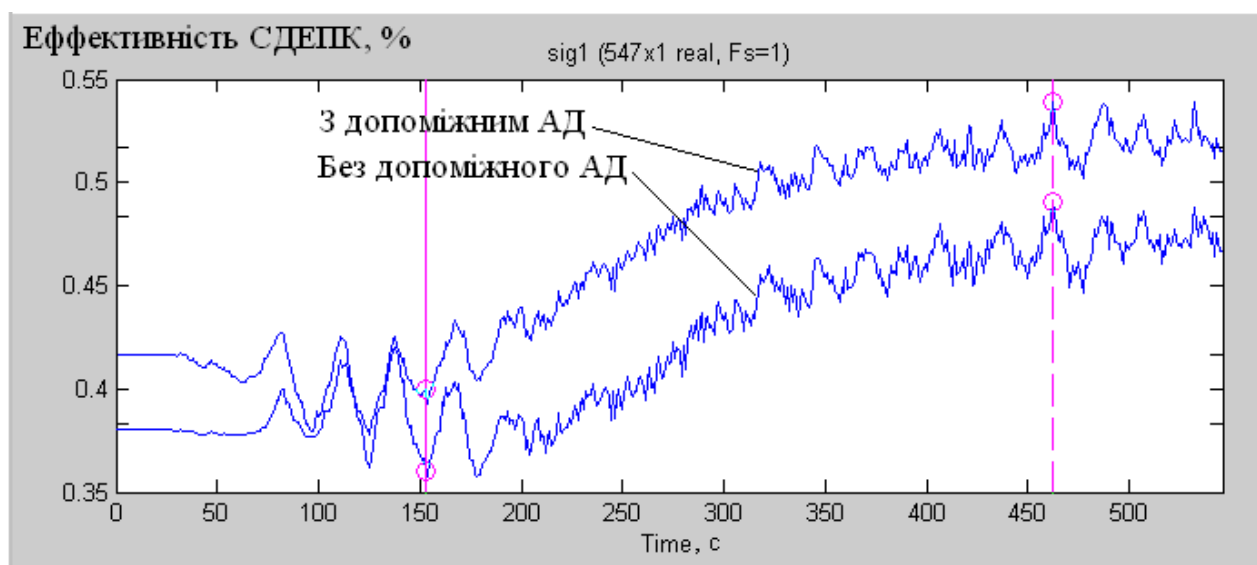


Рис. 5.6 Залежність ефективності СДЕПК продовж часу 500 с без регулювання кроку гвинта

Результати розрахунків зводимо у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1.

Кількісні показники ефективності СДЕПК

Параметри СДЕПК	$H_{\text{пр}}$			
	з ГРК		з ГФК	
Частота обертання, об/хв.	з АД	без АД		з АД
86	0,5422	0,4154	0,5287	0,4241
103	0,5077	0,3835	0,4996	0,3959
Економія палива, г/кВт·год.	5,87 ÷ 5,5		4,79 ÷ 4,9	

Робимо висновок, що застосування допоміжного АД на лінії валу МОД СДЕПК призвело до економії палива у всьому діапазоні регулювання частоти обертання валу.

5.2 Характеристики експериментальних досліджень дизель-електричного пропульсивного комплексу

На рис. 5.7 приведені характеристики судна при його русі (такі як: швидкість, напрямок і сила вітру, частота обертання валу гвинта і момент на валу допоміжного АД) при моделюванні процесів продовж 3500 с.

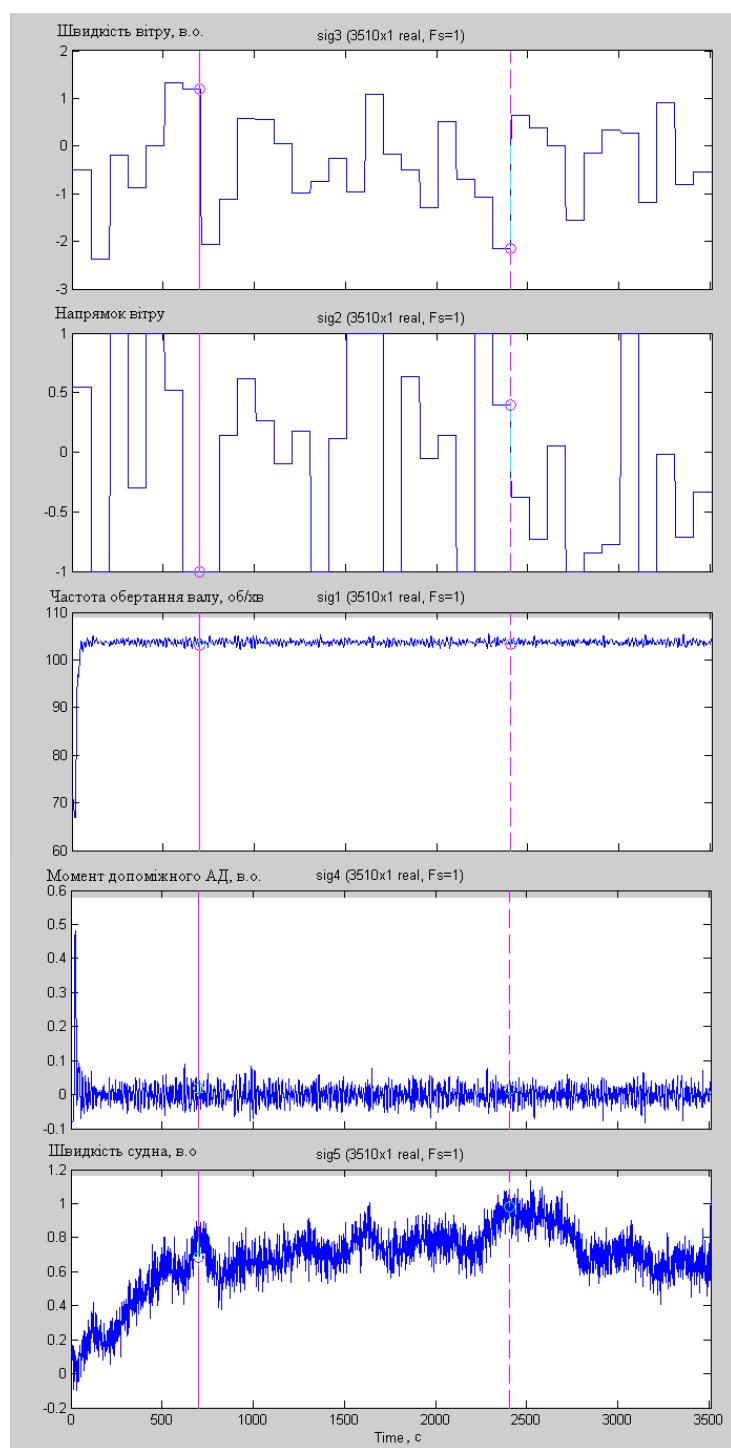


Рис. 5.7 Характеристики пропульсивного комплексу і судна

Криві на рис. 5.7 отримані за допомогою інтерактивної оболонки *SPTool* (*Signal Processing Toolbox*) *MatLab/Simulink*, яка обробляє всі величини, включені у робочий простір моделі за допомогою блоків *To Workspace*. З рисунка видно, що уздовж всього часу моделювання, при зміні зовнішніх

факторів, які діють на судно і призводять до зміни швидкості руху, обороти валу остаються практично постійними і коливаються в межах одиниць об/хв.

Також із графіків видно, що під час набирання оборотів МОД, допоміжний АД розвиває найбільший обертаючий момент, таким чином прискорюючи перехідний процес, одночасно стабілізуючи момент обертання МОД на валу рушія.

На рис. 5.8 приведено ще декілька залежностей в спливанні перехідного процесу, які показують на ефективність передачі потужності до рушія.

Якщо зробити порівняльний аналіз графіків перехідних процесів, що приведено на рис. 5.9, на яких показані залежності частоти обертання гребного валу під час маневрів судна без допоміжного електричного двигуна і з урахуванням його, то можна зробити узагальнення результатів моделювання. А саме, що в пропульсивних комплексах із головним МОД і допоміжним частотно-керованим трифазним АД зменшуються коливання частоти обертання гребного гвинта навколо заданих значень при оптимальному настроюванні параметрів регуляторів частоти обертання. Важливим є те, що у багатьох випадках навантажень на гребний гвинт зменшується час переходу від одних станів до інших. Ці результати дають підстави стверджувати про підвищення ефективності передачі потужності в подібних пропульсивних комплексах.

Також треба зауважити, що застосування допоміжного електродвигуна на лінії валу МОД дає такий самий результат при регулюванні частоти обертання валу, що і у разі використання гвинта регульованого кроку (ГРК), що видно з рис. 5.9.

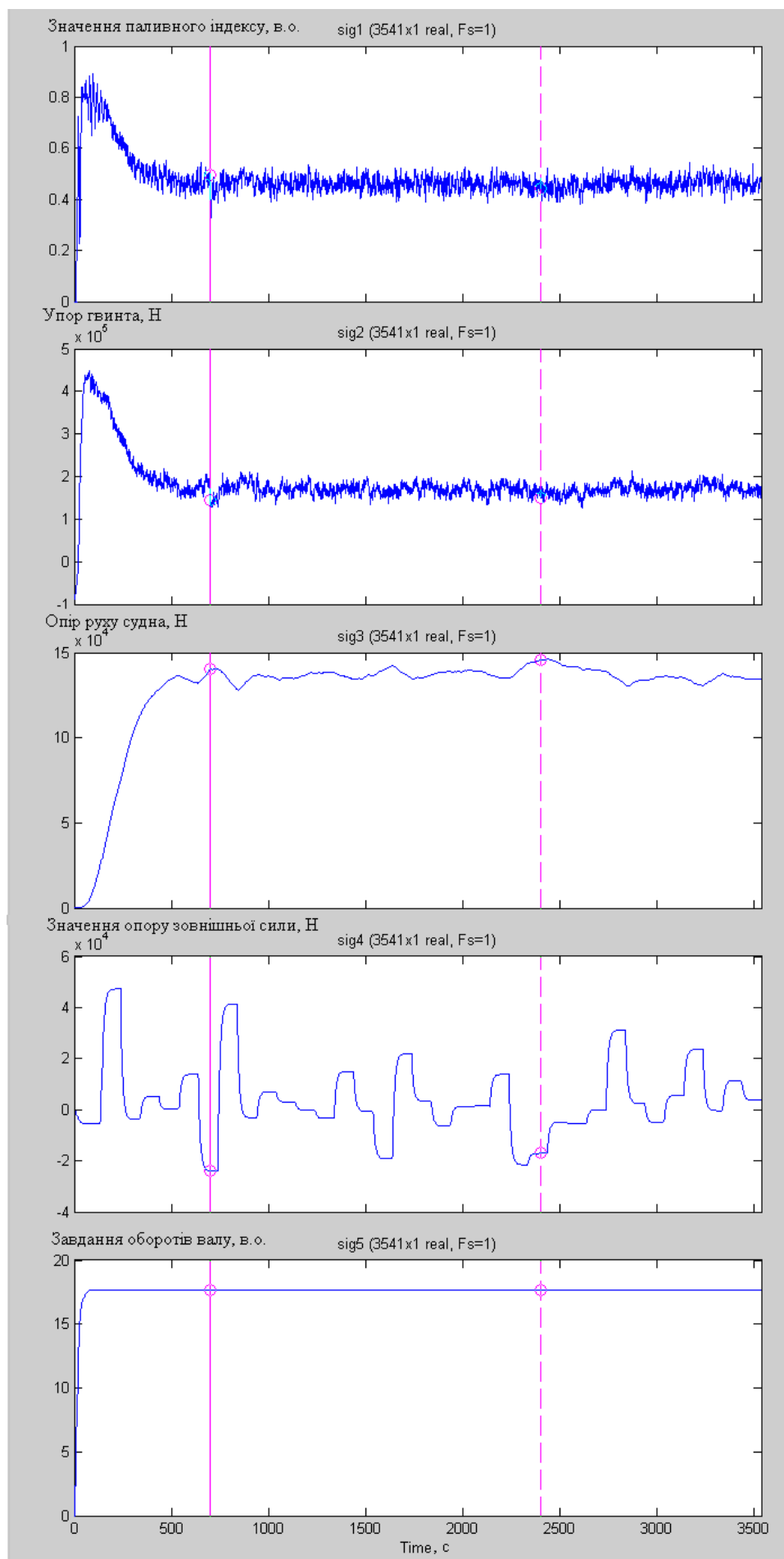


Рис. 5.8 Графіки перехідних процесів при русі судна

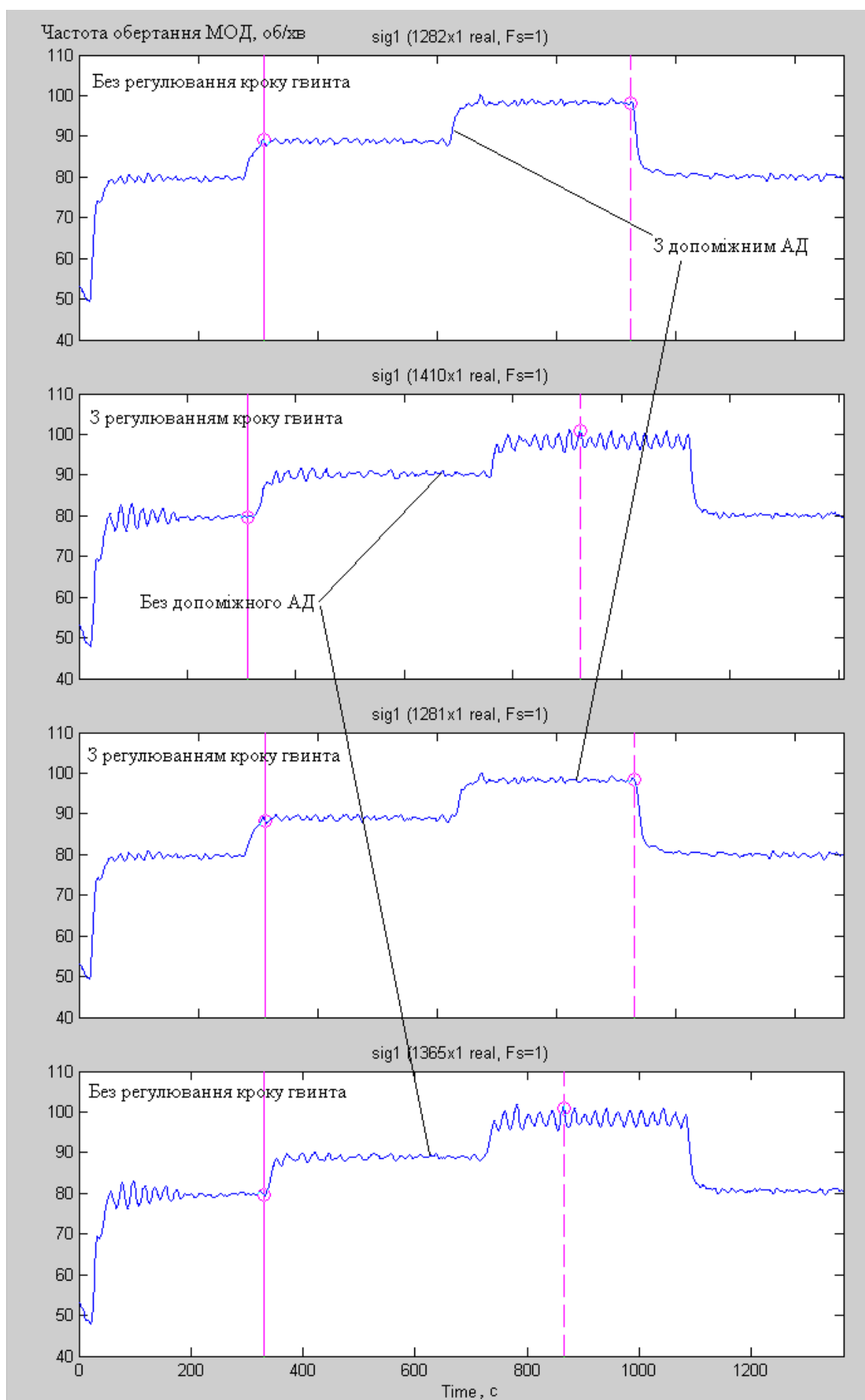


Рис. 5.9 Частота обертання валу гвинта без і з допоміжним АД

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлене нове розв'язання проблеми коливання моменту обертання рушія в суднових дизельних пропульсивних комплексах за допомогою застосування на лінії валу додаткового керованого моменту обертання, що дозволило обмежити коливальні процеси при обертанні рушія з одночасним збільшення упору гвинта, підвищити економічні і ергономічні показники суднового дизельного пропульсивного комплексу.

1. Стійкість і точність регулювання моменту обертання при передачі потужності до рушія в СДЕПК забезпечується застосуванням на лінії валу МОД частотно-керованого АД, як гнучкого зворотного зв'язку, який забезпечив ефективний комбінований принцип регулювання частотою обертання валу рушія.

2. Проведені експериментальні дослідження вперше дозволили підвищити точність регулювання частоти обертання валу рушія у СДЕПК з МОД і частотно-керуваним АД на лінії валу за рахунок оптимізації параметрів регуляторів частоти обертання і напруги СОДГ суднової електроенергетичної системи і параметрів регуляторів частоти обертання АД.

3. При дослідженні залежності частоти обертання рушія в експлуатаційних умовах доведено, що застосування частотно-керованого АД на лінії валу МОД забезпечує стабілізацію частоти обертання рушія зі зменшенням коливання частоти обертання гребного гвинта навколо заданих значень у межах від $1,52 \div 4,23\%$ від номінального значення при оптимальному налаштуванні параметрів регуляторів частоти обертання рушія. Важливим є те, що у разі необхідності, можливо зменшити час переходу від одних станів до інших.

4. Кількісна оцінка ефективності передачі потужності в СДЕПК показала економію палива у всьому діапазоні регулювання частоти обертання

валу рушія у межах від 4,79 до 5,87 г/кВт·год.

5. При передачі енергії від СОДГ до АД у СДЕПК з МОД на лінії валу виникає синхронізуючий момент, що забезпечує стійкість об'єкту з саморегулюванням в межах $\pm 5\%$ номінальної частоти обертання валу.

6. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при налагодженні суднових систем управління різного рівня складності з точки зору підвищення їхньої ефективності, проектуванні нових моделей пропульсивних комплексів, розробці експертних систем, які забезпечують аналіз процесів у судновій електроенергетиці, а також у навчальному процесі і при створенні навчальних програм і тренажерів суднових пропульсивних комплексів і єдиних електроенергетичних систем.

На цей час результати роботи захищені двома авторськими свідоцтвами, впроваджені на судах Одеського і Ренійського морських торговельних портів, в Українському науково-дослідницькому інституті, у судноплавних компаніях “Дуглас” (Росія) та “*Sherwood Shipping Inc*” (Італія), а також у Одеській національній морській академії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Довідник здобувача наукового ступеня: Зб. нормат. док. та інформ. матеріалів з питань атестації наук. кадрів вищої кваліфікації / Упоряд. Ю.І. Цеков; передмова до 3-го, 2-го і з переднього сл. до 1-го вид. Р.В. Бойка. – 3-тє вид., випр. і допов. – К.: Ред. «Бюл. Вищої атестац. коміс. України»: Вид-во «Толока», 2004. – 69 с.
2. Як підготувати і захистити дисертацію на здобуття наукового ступеня. Методичні поради. 3-тє видання, виправлене і доповнене / Автор-упорядник Л.А. Пономаренко, доктор технічних наук, професор. – К.: редакція «Бюлетеня Вищої атестаційної комісії України», Видавництво «Толока», 2005. – 80 с. – Бібліогр. с.80.
3. Суворов П.С. Управление режимами работы главных судовых дизелей. – Одесса: ЛАТСТАР, 2000. – 238 с.
4. Самсонов В.И., Худов Н.И. Двигатели внутреннего сгорания морских судов. – М.: Транспорт, 1990. – 368 с.
5. *New ratings for the marine engines // Marine news*. Wärtsilä, 2003. № 4. p. 28-32.
6. Журнал “Судоходство” – Одесса. Международное издание, освещающее деятельность водного и смежных видов транспорта.
http://www.sudohodstvo.com/4-5_2002/index.php3.
7. “Морской журнал”. <http://www.setcorp.ru/mjournal/index.html>.
8. *Taylor D. A., David A. N. Marine engineering. Licensing Agency Ltd.* – London. – 1990. – 600 p.
9. Журнал “Транспорт Юга”. http://ts.siteburg.com/14/m_19.shtml.
10. Журнал “Ocean Voice”. <http://www.theoceanvoice.com>. Information Publishing Group, London.
11. Ивановский В.Г., Черемисин В.И., Штабов В.О. Совершенствование процесса судовых средне-оборотных дизелей на среднеоборотных

- режимах малых нагрузок // 36. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2000. - №2 (368). – С. 55-62.
12. Суворов П.С. Эксплуатационные режимы нагружения главных судовых среднеоборотных дизелей. – Одесса: Моряк, 1995. – 223 с.
 13. ГОСТ 10511-83. Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных дизелей. Общие технические требования. - Взамен 10511-72; Введ. 6.12.1983, срок дейст. с 01.01.85 до 01.01.90, действует по настоящее время. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 12 с.
 14. Миюсов М.В. Режимы работы и автоматизация пропульсивного комплекса теплохода с ветродвижителями. – Одесса: ОГМА; ОКФА, 1996. – 256 с.
 15. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического регулирования. – Одесса: ОГМА. – 2000. – 140 с.
 16. Підвищення ефективності роботи комплексу середньообертовий дизель-гвинт регульованого кроку: Автореф. дис. канд. техн. наук /Штабов В.О. – О., 2004. – 17с.
 17. Sulzer RTA-T // *Technology Review*, RTA48T-B, RTA58T-B and RTA68T-B types. – Wärtsilä NCD Corporation. – April, 2002. – 49 p.
 18. Wartsila Corporation. <http://www.wartsila.com> – Сайт фірми «Зульцер».
 19. Журнал Судостроение. <http://www.setcorp.ru/sudostroenie/catalog.html>.
 20. Maritime Reporter. <http://www.maritimereporterinfo.com/> – издание США, обзорные статьи по судостроению.
 21. Журнал Marine News. <http://www.marinelink.com>.
 22. Журнал MARINE LOG. <http://www.marinelog.com>.
 23. MAN B&W Diesel AG. <http://www.manbw.de>.
 24. MAN B&W Diesel Ltd. <http://www.manbw ltd.de>.
 25. MAN Nutzfahrzeuge AG. <http://www.man-nutzfahrzeuge.de>.
 26. Газотурбинные технологии – информационно-аналитический журнал. <http://www.gtt.ru/news/archiv03.htm>.

27. Ханмамедов С.А., Ермошкин Г.И. Анализ нагрузок на топливо-проводы высокого давления, возникающие в процессе эксплуатации дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2003. - №8. - Одесса: ОНМА. – с. 5-19.
28. *Barend Thijssen. The propulsion of ultra large container vessels // Marine news. Wärtsilä, 2000. № 2. p. 20-23.*
29. Радченко А.П., Будашко В.В. Комбінована енергетична установка сучасного контейнеровоза // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2001.- № 6. – Одесса: ОГМА. – С. 90 – 96.
30. Особенности развития судостроения в Украине / Миронов В.И. // 36. наук. пр. Укр. держ. морськ. ун-ту. – Миколаїв, 2003. – С.12-19.
31. Проблемы ремонта гребных винтов в современных условиях и возможные пути их решения / Король Ю.М., Петров В.Н. // 36. наук. пр. Укр. держ. морськ. техн. ун-ту. – Миколаїв, 2003. – №3(389). – С.19-23.
32. Балтийский судостроительный завод. <http://www.bz.ru>.
33. *Anders Backlund, Jukka Kuuskoski. The Contra Rotating Propeller (CRP) Concept with a Podded Drive // Motor Ship Conference. - The Netherlands: Amsterdam. - March 28-29, 2000. 12 с.*
34. Томи Вейконхеймо, Матти Туртайнен. Гребной винт противоположного вращения *Azipod®* увеличивает КПД морской силовой установки // АВВ Ревю. – 2003. №1. С. 6-11.
35. Электрические винто-рулевые комплексы // Клуб судовых механиков. <http://www.clubme.narod.ru>.
36. Радченко А.П., Будашко В.В. Векторне управління допоміжним гребним асинхронним електродвигуном контейнеровозів типу *ULCVs* // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2003. – №9. – Одеса: ОНМА. – С. 122-127.
37. Голубев В.К. Современные системы управления судовыми утилизационными теплоэнергетическими комплексами. – М.: В/О “Мортехинформреклама”, 1986. – 36 с.

38. Bishop G.N., Shelley N.A., Edmonds M.J.S. *Electric propulsion of surface fighting ships: Proc. of Eleventh Ship Control Systems Symposium.* – 1997. - Vol. 2. - pp. 157-171.
39. Blokland, A.J., B. van der Ploeg. *Electric ship propulsion: Proc. of EPE'95. 6th European Conference on Power Electronics and Applications.* – 1995. - Vol. 3. - pp. 29-32.
40. Hackman T. *Electric propulsion systems for ships // ABB Review.* - 1992. - №3. - pp. 3-12.
41. Fracchia M., Sciutto G. *Cycloconverter drives for ship propulsion // Proc. of Power Electronics, Electrical Drives, Advanced Electrical Motors, Symposium.* – 1994. vol. 1. - pp. 255-260.
42. Laukia K. *Service proves electric propulsion design // The Motor Ship.* - 1993. - №2. - pp. 23-26.
43. Комлев В.П., Андрианов М.В. Средства и методика оценки параметров энергопотребления вентильного электропривода // *Электротехника.* – 1992. – №12. – С. 28-30.
44. De Goede Alan. *Variable speed AC inverter drivers – some practical aspects // Elektron.* – 1992. - №8. – pp. 31-33.
45. Juby L., R. Bucknall, Haines N.A.. *A harmonic reduction technique for cycloconverter propulsion drives: Proc. of Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives.* – 1995. - Conf. Publ. №412. - pp. 333-337.
46. Leidi G., Zaninelli D. *Quality of power in ships with electric propulsion: Proc. of ICHQP 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power.* - 1996, pp. 140-146.
47. El-Sayed M. Marwan, Hunyar M., Halasz S., Schidt I. *Energy-saving controllers of induction motors // PEMC'90, Vol. 1.* – 1990. – pp. 119-124.
48. *Monoverter / Antriebstechnik // AEG.* – 2001. – 8 p.
49. *SIMOVERT – A / Umrichter und Antriebe mit digitaler Regelung.* – Katalog DA62.1 / Siemens. – 2003. – 45 p.

50. *Elin electronic / Type UR-J von kW-MW (ELDRIVE) // Elin. – MA-S 170/87d. – 2000. – pp. 1-6.*
51. *SAMICSI – LWA-D // ASEA Brown Boweri (ABB). – 2000. 8 p.*
52. *Stromberg / SAMI 2 SU 85-04/86-06 / Stromberg. - 2001. - pp. 12-13.*
53. Низковольтные блоки *DriveIT ACS_800* для регулирования частоты вращения двигателей переменного тока // *ABB Ревю. – 2002. - №4. – С.16-21.*
54. *ACS 6000 Medium Voltage AC Drive – for speed and torque control for power of 3MW to 27MW motors.: Printed in Finland. – 2004. – 4 p.*
55. Частотный преобразователь 8200 *vector series // Lenze GmbH & Co KG. – 2004. – 199 p.*
56. *DriveIT ACS1000 Data Sheet // ABB Rev. - Printed in Finland. – 2003. 4 p.*
57. Калачев Ю.Н. Управляемый асинхронный электропривод // *Электротехника. – 2002. - №11. С. 13-18.*
58. *Hauosr S., Hanyar M. The calculation methods as induction motor supplied by Back-to-back connected semiconductor pears // Technical papers of symposium “Control in power Electronics and electrical drives. – 2001. pp. 32-34.*
59. Пат. 1802913 СССР. Электропривод с частотно-токовым управлением / М.И. Ярославцев, А.Г. Лукашенко. – НПО Ротор, - 15.03.1993.
60. Пат. 2253531 Великобритания. *Energy saving motor control device / Balls Douglas. - 9.09.1992.*
61. Пат. 5122719 США. *Method and apparatus for reducing recurrent fluctuations in motor torque / Bessenyel B., Niertit T. – 16.06.1992.*
62. Пат. 5099185 США. *Alternating current motor control method / Kono Shinichi, Takanasi Hironobu. – 9.02. 1990.*
63. *Doerry N.H., Davis J.C. Integrated Power System for Marine Application: Naval Eng., J., 1994, p. 77-90.*
64. Радченко А.П., Будашко В.В. Комп'ютерне управління допоміжною гребною енергетичною установкою на контейнеровозах типу *ULCVs //*

- Автоматизация судовых технических средств: научн.- техн. зб. – 2001.- № 6. – Одеса: ОГМА. – С. 98 – 101.
65. Ordys A.W., Pike A.W., Johnson M.A., Katebi R.M. and Grimble M.J. *Modelling and Simulation of Power Generation Plants // Advances in Industrial Control, Springer-Verlag, 1997. – pp. 42-48.*
 66. Hooke R., Jeeves T.A. *Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems. S. Assoc. Computer. Mach. 8, 1962. - pp. 212- 229.*
 67. *Simulation of engines performances* (Расчет характеристик двигателей с различными схемами наддува). <http://www.energy.power.bmstu.ru>.
 68. *Simulation of SI gas and petrol engines* (Расчет сгорания в ДВС). <http://www.energy.power.bmstu.ru>.
 69. Номограмма для определения допустимой нагрузки дизеля. <http://www.dvgma.vld.ru>.
 70. Голиков В.А., Холчев Е.С., Васильев А.Е. Исследование влияния влагосодержания циркуляционных масел ДВС на надежность основных узлов дизеля // Мат. 55 наук. і наук.-метод. конф. проф.-викл. складу та курс., 15-20 травня 2003. – с. 84-88.
 71. Половинка Э. М. Эксплуатационные характеристики смазочного масла при работе двигателя на различных топливах // Судовые энергетические установки: научн. – техн. сб. – 2001. - №6. Одесса: ОГМА. – с. 76-78.
 72. Стандарт ISO 3046-1: 2002. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Эксплуатационные характеристики. Часть 1. Определение мощности, расхода топлива и смазочного масла, и методы испытания. Дополнительные требования к двигателям общего назначения. – Введ. 01.05.02, зарег. 04.06.02, код ОКС (МКС): 27.020. <http://www.stroy.inf.ru>.
 73. Ильинский Н.Ф., Горнов А.О. Критерий эффективности процесса электромеханического преобразования энергии // Электричество, 1997. – 10. С. 40-45.
 74. Веретенников Л.П. Исследование процессов в судовых электро-энергетических системах. Теория и методы. – М.: Судостроение, 1975.

– 217 с.

75. Мелешкин Г.А. Переходные режимы судовых электрических систем. – Л.: Судостроение, 1971. – 248 с.
76. Болнокин В.Е., Чинаев П.И. Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
77. Терешин Д.С. Асинхронные электроприводы на водном транспорте. Системы «преобразователь частоты – двигатель». – М.: Транспорт. – 1984. – 256 с.
78. Трещев И.И. Методы исследования машин переменного тока. – Л.: Энергия. – 1969. – 235 с.
79. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергетика. – 1980. – 344 с.
80. Злакоманов В.В., Яковлев Б.С. Взаимодействие динамических систем с источниками энергии. – М.: Энергоиздат. – 1980. – 176 с.
81. Солонен К. Опыт А/О «Стромберг» по созданию регулируемых электроприводов в области энергетики // Сб. докл. Симпоз. «Минэнерго России – Стромберг». – М., 1990. – С.1-34.
82. Проблемы использования регулируемого электропривода в энергетике / Г.Б. Онищенко, В.М. Пономарев, Ю.Г. Шакарян и др. // Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 156-162.
83. Программный комплекс “Дизель - РК”. <http://www.diesel-rk.bmstu.ru>.
84. Яровенко В.А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов. – Одесса: Маяк, 1999. – 188 с.
85. Евзеров И.Х., Лаптева Н.М. Исследование алгоритмов управления частотно-регулируемым электроприводом. – С.-Петербург: 1992. – 54 с.
86. Радченко А.П., Будашко В.В. Підвищення ефективності передачі потужності в суднових пропульсивних комплексах // Матеріали всеукраїнської наук.-техн. конференції з міжнародною участю “Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів

- (ПАЕТЗ-2005)”. – Миколаїв: ІАК НУК. – 2005, ч. I, С. 115-121.
87. Горб С.И., Бурденко А.Ф. Оптимизация сложного объекта методом случайного поиска экстремума // Автоматизация судовых технических средств: научн. -техн. сб. – 2001. - №6. – Одесса: ОГМА. – с. 18-23.
 88. Численные методы условной оптимизации / М. Дж. Д. Пауэлл, Ф. Гилл, У. Мюррей и др. - М.: Мир, 1977. - 290 с.
 89. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. 3-е изд., М.: Наука, 1989. - 368 с.
 90. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. пер. с англ., 2-е изд., М.: - 1968. – 432 с.
 91. Wasserman P. *Neurocomputing. Theory and practice*, Nostram Reinhold, 1990. (Рус. перевод. Ф. Уоссермэн. Нейрокомпьютерная техника. М.: Мир, 1992. С. 24-32).
 92. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере. Н.: Наука, 1996. – 263 с.
 93. Kohonen T., *Self-organized formation of topologically correct feature maps // Biological Cybernetics*, Vol. 43. – 1982. - pp.59-69.
 94. Kohonen T. *Self-Organizing Maps // Springer*. – 1995. - pp. 74-81.
 95. Hecht-Nielsen R. *Counter propagation networks // Applied Optics*, Vol. 23, 1987. - № 26, pp. 4979-4984.
 96. Hecht-Nielsen R. *Counter propagation networks // Proc. First IEEE Int. Conf. on Neural Networks*. eds. M. Candill, C. Butler. - San Diego CA.: SOS Printing, Vol. 2, 1987. - pp. 19-32.
 97. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. *Learning representations by back-propagating errors // Nature*, Vol. 323. – 1986. - pp.533-536.
 98. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. 2 изд. М.: Наука. – 1979. – 287 с.
 99. Girosi F., Jones M., Poggio T. *Regularization Theory and Neural Networks Architectures // Neural Computation*, Vol.7. – 1995. - pp.219-269.
 100. Martinetz T.M., Berkovich S.G., Schulten K.J. *Neural-gas network for*

- vector quantization and its application to time-series prediction // IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 4. – 1993. - № 4. - pp. 558-569.*
101. Fritzke B. A growing neural gas networks learns topologies // In *Advances in Neural Information Processing Systems 7*, eds. G. Tesauro, D.S. Touretzky, T.K. Leen. - Cambridge MA.: MIT Press. - 1995. - pp.625-632
 102. Doerry N.H., Davis J.C. *Integrated Power System for Marine Application: Naval Eng., J.*, 1994, p. 77-90.
 103. Hansen J.F. and others. *Mathematical modeling of diesel-electric propulsion systems for marine vessels // Mathematical and computer modeling of dynamical systems*, 2001, vol. 7, No. 1, pp. 1-33.
 104. Будашко В.В. Перетворення енергії в допоміжній гребній енергетичній установці // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 2004. - №11. – Одесса: ОНМА. С. 81-85.
 105. Будашко В.В. Комп'ютерне моделювання багаторівневого перетворення електроенергії допоміжної гребної енергетичної установки в пакеті “MatLab”// *Матеріали міжнародної наук.-техн. конференції “Сучасне судноплавство і морська освіта”*. – Одеса: ОНМА. – 2004, ч. II, С. 100-104.
 106. Hans Klein Woud, Douwe Stapersma. *Design of propulsion and electric power generation systems. : IMarEST publications.: London.* – 2003. - 494 p.
 107. Важнов А.И. *Переходные процессы в машинах переменного тока.* – Л.: Энергия. – 1980. – 856 с.
 108. Копылов И.П. *Математическое моделирование электрических машин.* – М.: Высшая школа. – 1987. – 248 с.
 109. Мелешкин Г.А. *Судовые синхронные генераторы с автоматическим регулированием напряжения.* – Л.: Судостроение. – 1982. – 188 с.
 110. *Load Representation for Dynamic Performance Analysis / Price W.W., Chiang H.D., Clark H.K., Concordia C., Lee D.C., Hsu J.C., Ihara S., King C.A., Lin C.J., Mansour Y., Srinivasan K., Taylor C.W. and Vaahedi E.:*

- IEEE Task Force Report. - IEEE Trans. - Power Sys 8(2) (1993), pp.472-482.*
111. Manjrekar M.D., Steimer P.K., Lipo T.A. Hybrid multilevel power conversion system: A competitive solution for high-power applications, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. IA-36, May/June 2000. - pp. 834-841.
 112. Ådnanes A.K., Sørensen A.J., Lauvdal T. Variable Speed Thruster Drives // 2nd international conference on diesel electric propulsion. – Helsinki, Finland, 26-29 April. – 1998. – p. 13.
 113. Будашко В.В. Силовые полупроводниковые приборы и преобразовательная техника: Учебное пособие. - Одеса: ОНМА, 2004. – 152 с.
 114. Воронин П.А.. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2001. 380 с.
 115. Радченко А.П., Будашко В.В. Частотне управління судновим гребним асинхронним електродвигуном // Мат. VII міжн. конф. “Контроль і управління в складних системах (КУСС-2003)”, 8-11 жовтня 2003 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ. – 2003. С. 117.
 116. Будашко В.В. Управление морской силовой установкой с гребным винтом противоположного вращения // Судостроительство. 2003. - №11-12. с.
 117. Будашко В.В., Черных И.К., Кульчицкий С.В., Яцык А.В. Структура и управляющие программы микроконтроллера многоскоростного асинхронного привода // В/О “Мортехинформреклама”, сер. “Техн. Экспл. Флота”: №4(720), 1990. – С. 12-18.
 118. Будашко В.В., Черных И.К. Программное обеспечение МП СУ МАД судовых грузоподъемных механизмов // Тез. докл. VII Всес. научн. – техн. конф. “Проблемы комплексной автоматизации судовых технических средств”, 24-25 мая 1989 г. - Л.: НПО “Аврора”. – С. 28-30.
 119. Васильев В.Н., Черных И.К., Будашко В.В. Синтез микропроцессорная система управления многоскоростным

- асинхронным приводом судового палубного крана // Тез. докл. VIII научн.-техн. конф. “Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями”, 21-24 марта 1989 г. – Свердловск, УПИ. – 1989. – С. 22.
120. Устройство для управления электроприводом: А.с. 1529186 СССР, МКИ G 05 В 15/00 / Будашко В.В., Черных И.К., Черных Я.И (СССР). - № 4385313/24-24; Заявл. 29.02.1988; Оpubл. 15.12.1989, Бюл. № 46. – 8 с.
121. Устройство для управления асинхронным двигателем: А.с. 1582310 СССР, МКИ Н 02 Р 3/22, G 05 В 15/01 / Будашко В.В., Черных И.К., Савельев А.Е., Николаев И.Н. (СССР). - № 4401433/24-07; Заявл. 31.03.88; Оpubл. 30.07.90, Бюл. № 28. – 12 с.
122. Микропроцессорная система управления многоскоростными асинхронными приводами / Будашко В.В., Черных И.К., Савельев А.Е., Винницкий А.А. – Деп. в В/О “Мортехинформреклама”, сер. “Техническая эксплуатация флота”, №10(678), 1988. – 48 с. – рус.
123. Будашко В.В., Черных И.К., Савельев А.Е. Микропроцессорная система управления трехскоростным асинхронным двигателем. - Инженерная методика. – Одесса: ЮЖНИИМФ. – 1990. – 32 с.

Додаток А

Веб-сторінки фірм-виробників суднових дизелів

1. Akasaka Diesels Ltd. - <http://www.akasaka.ko.jp>
2. Alaska Diesel Electric Inc. - <http://www.northern-lights.com>
3. Rolls-Royce Diesel Business. - <http://www2.rolls-royce.com>
4. Anglo Belgian Corporation N.V. - <http://www.abcdiesel.be>
5. Moteurs Baudouin. - <http://www.moteurs-baudouin.fr>
6. Rolls-Royce Marine AS. - <http://www2.rolls-royce.com>
7. Heinrich Callesen A/S. - <http://www.bukh.dk>
8. Caterpillar Inc. - <http://www.cat-engines.com>
9. CRM Spa Motori Morini. - <http://www.crm-spa.it>
10. Cummins Marine Division. - <http://www.cummins.com/marine>
11. Daewoo Heavy Industries Ltd. - <http://www.dhiltl.co.kr>
12. Daihatsu Diesel Mfg. Co. Ltd. - <http://www.dhtd.co.jp/index.html>
13. Deere Power Systems. - <http://www.deere.com/jdpower>
14. Detroit Diesel Corporation. - <http://www.detroitdiesel.com>
15. Deutz AG. - <http://www.deutz.de>, <http://www.deutz.com>,
<http://www.deutzcanada.com>
16. General Motors Corporation. - <http://www.gmemd.com>
17. Fairbanks Morse Engine Division. - <http://www.fairbanksmorse.com>
18. General Electric Company. - <http://www.ge.com/transportation>
19. Grenaa Motorfabrik AS. - <http://www.grmo.dk>
20. Guascor S.A. - <http://www.guascor.com>
21. The Hanshin Diesel Works Ltd. - <http://www.sphere.ne.jp/hanshin-d/engine>
22. Hedemora Diesel AB. - <http://www.hedemoradiesel.se>
23. Hyundai Heavy Ind. Co. Ltd. - <http://www.hyundai-engine.com>
24. Isotta Fraschini SpA. - <http://www.isottafraschini.it>
25. Iveco Aifo SpA. - <http://www.aifo.com>

26. Kelvin Diesels. - <http://www.britishpolarengines.co.uk>
27. Kolomensky Znvod JSC. - <http://www.dieselkolomna.com>
28. Komatsu Diesel Co. Ltd. - <http://komatsy.co.jp/product/compocat/>
29. Caterpillar Motoren GmbH & Co KG. - <http://www.mak-global.kom>
30. Makita Corporation. - <http://www.netwave.or.ip/~makita/>
31. MAN B&W Diesel AG. - <http://www.manbw.de>
32. MAN B&W Diesel Ltd. - <http://www.manbwLtd.com>
33. MAN Nutzfahrzeuge AG. - <http://www.man-nutzfahrzeuge.de>
34. Matsui Iron Works Co.Ltd. - http://www.matsui_j.co.jp
35. Mitsubishi Heavy Industries Ltd. - <http://www.mhi.co.jp/index.html>
36. MTU Motoren- und Turbinen-Union. - <http://www.mtu-friedrichshafen.com/mtu/e/index.html>
37. Niigata Engineering Co.Ltd. - <http://www.nigata-eng.co.jp>
38. Scania. - <http://www.scania.com>
39. Seatek S.p.A. - <http://www.seatek-spa.com>
40. S.E.M.T. Pielstick S.A. - <http://www.pielstick.com>
41. SKL Motoren GmbH. - <http://www.skl-magdeburg.de>
42. Wdrtsild Corporation. - <http://www.wartsila.com>
43. Volvo Penta AB. - <http://www.penta.volvo.se>
44. Wartsila Corporation. - <http://www.wartsila.com>
45. Yanmar Diesel Engine Co.Ltd. - <http://www.yanmar.co.jp>
46. Zvezda Production Association. - <http://www.zvezda.spb.ru>

Додаток Б

Посилання на фірми виробники напівпровідникових приборів і систем управління перетворювачами електроенергії

Табл. Б.1 – Силова електроніка – сторінки Інтернету

№	Фірма	Адреса
1.	Електроні видання	http://www.chipnews.ru/
		http://www.privod-news.ru/
2.	ABB Semiconductors AG	http://www.abbsemi.com/
		http://www.abb.com/
3.	ASCO	http://www.380v.ru/
4.	Dectel Electronics Ltd.	http://www.dectel.ru/
5.	Eupec GmbH	http://www.eupec.com/
6.	Fairchild Semiconductor Corp.	http://www.fairchildsemi.com/
7.	Fuji Electric Co.	http://www.fujielectric.com/
8.	General Electric	Див. «Intersil»
9.	Harris Semiconducto	Див. «Intersil»
10.	Hitachi, Ltd.	http://www.hitachi.com
11.	Infineon Technologies AG	Раніше Siemens Semuconductor
12.	International Rectifier	http://www.irf.com/
13.	Intersil, Inc	http://www.intersil.com/
14.	IXYS Corp.	http:// www.ixys.com/
15.	Mitsubishi Electric Corp.	http://www.msai.com/
16.	Motorola Inc.	Див. «ON Semiconductor»
17.	ON Semiconductor	http://www.onsemi.com/
18.	Philips Semiconductors	http://www.semiconductors.philips.com/
19.	RCA	Див. «Intersil»

20.	<i>RILL</i>	http://www.rill.spb.ru/
21.	<i>Samsung Semiconductor</i>	Див. «Fairchild Semiconductor»
22.	<i>Semicon</i>	http://www.semikron.com
23.	<i>Siemens Semiconductor</i>	Див. «Infineon Technologies»
		http://www.baltic-siem.ru
24.	<i>Siliconix (Vishay Siliconix)</i>	http://www.siliconix.com/
25.	<i>STMicroelectronics, Inc.</i>	http://www.st.com/
26.	<i>Thomson-CSF</i>	Див. «STMicroelectronics»
27.	<i>Tokin</i>	http://www.tokin.com
28.	<i>Toshiba America Electronic Components, Inc.</i>	http://www.toshiba.com/
29.	<i>Triol Corp.</i>	http://triolcorp.com/
30.	<i>Vesper</i>	http://www.vesper.ru/

Додаток В

Моделі дизель-електричного пропульсивного комплексу з МОД і АД на лінії валу при передачі потужності до рушія

В.1 Оптимізація моделі частотно-керованого допоміжного АД з коротко замкнутим ротором

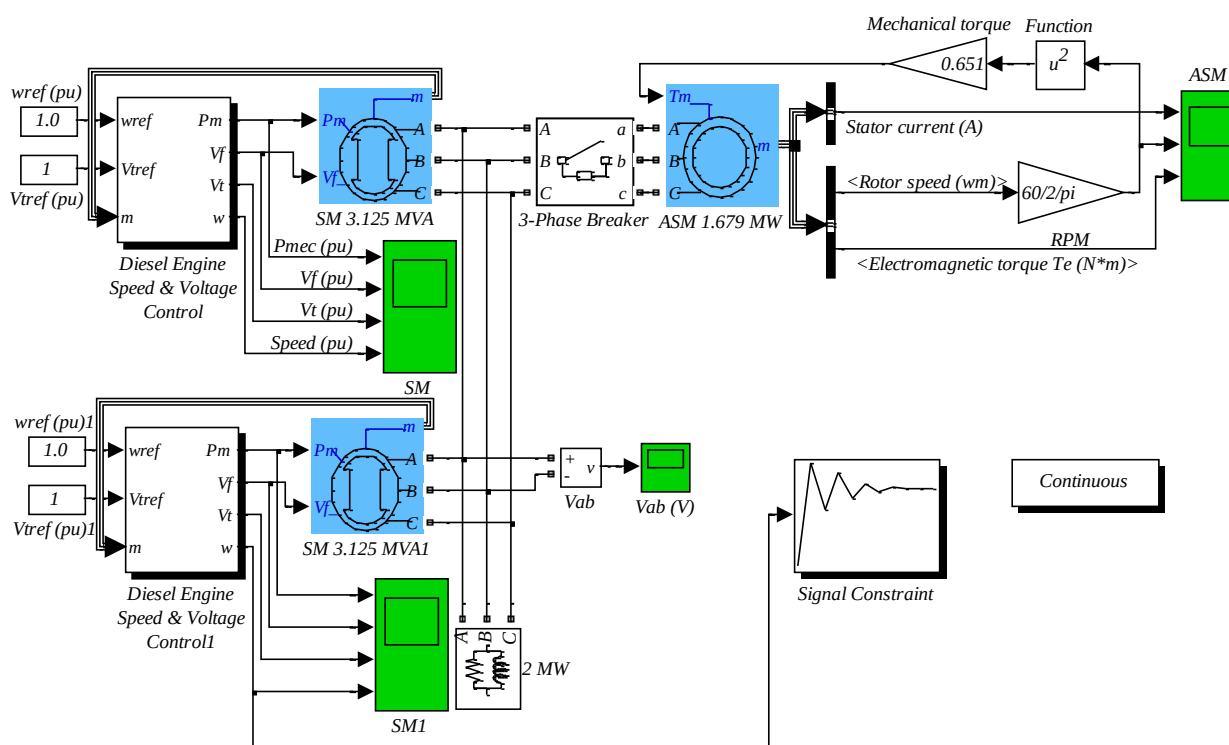


Рис. В.1.1 Математична модель для оптимізації регуляторів ДГ: *Signal Constraint* – блок настроювання параметрів моделі; *3-Phase Breaker* – трифазний вимикач, час спрацювання котрого дорівнює 1.5 с

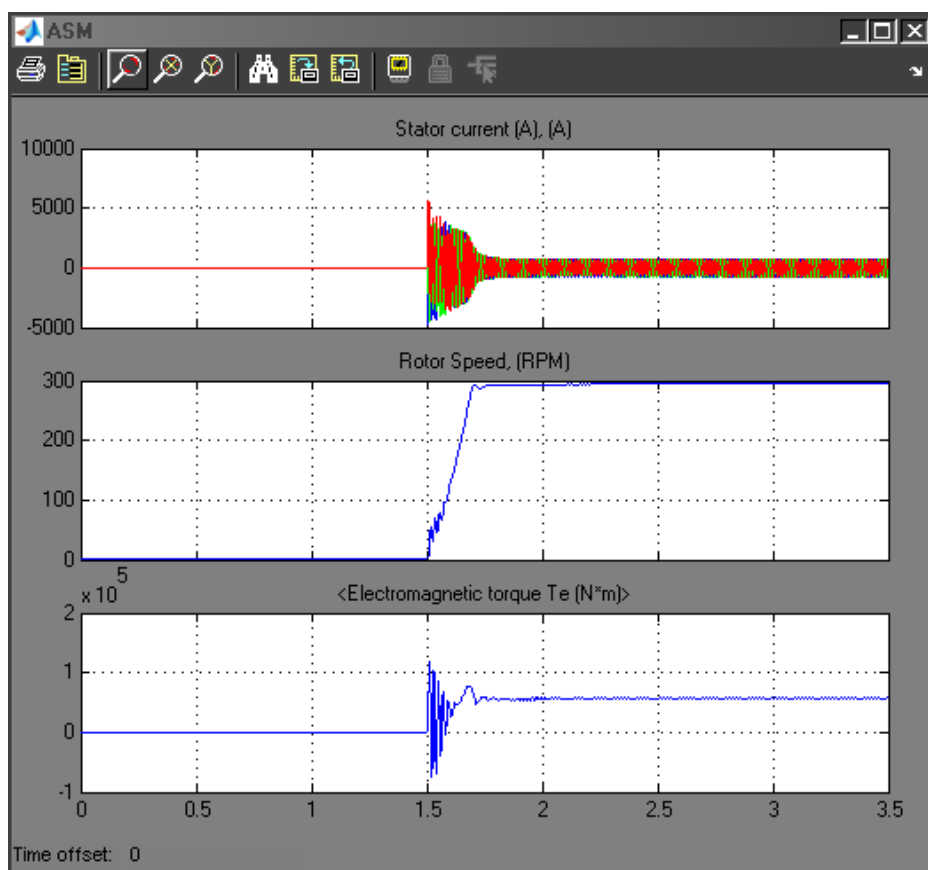


Рис. В.1.2 Графіки перехідних процесів при пуску АД після оптимізації: *Stator current* – струм статора, А; *Rotor speed* – частота обертання ротору, об/хв.; *Electromagnetic torque* – електромагнітний момент, Н • м

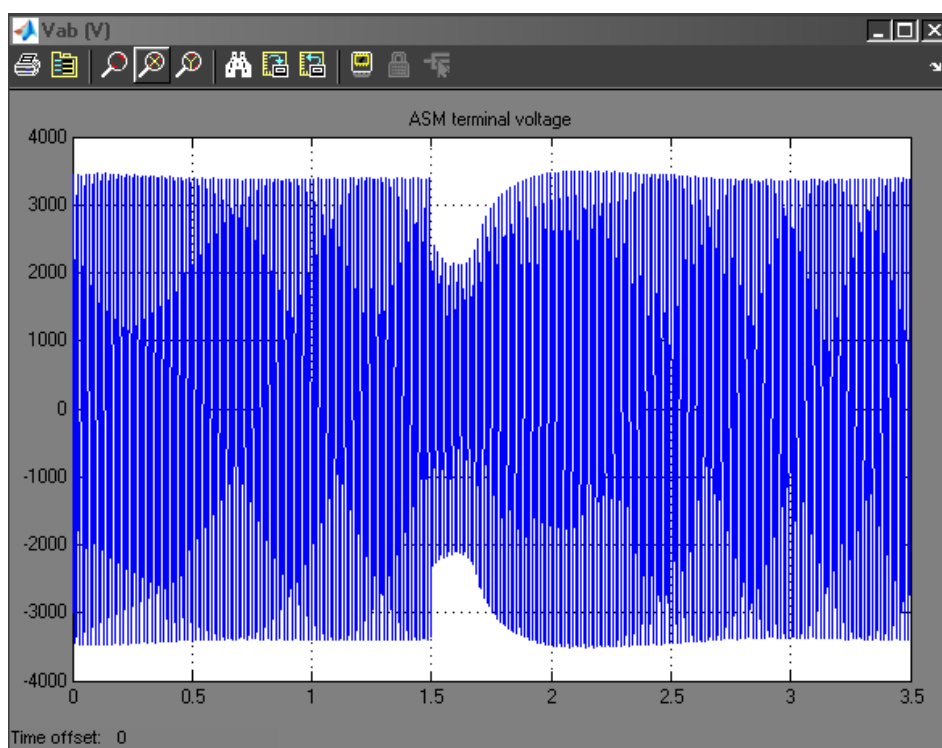


Рис. В.1.3 Графік зміни напруги на шинах СОДГ (*ASM terminal voltage*) при пуску АД

В.2 Загальна модель передачі потужності в дизель-електричному пропульсивному комплексі

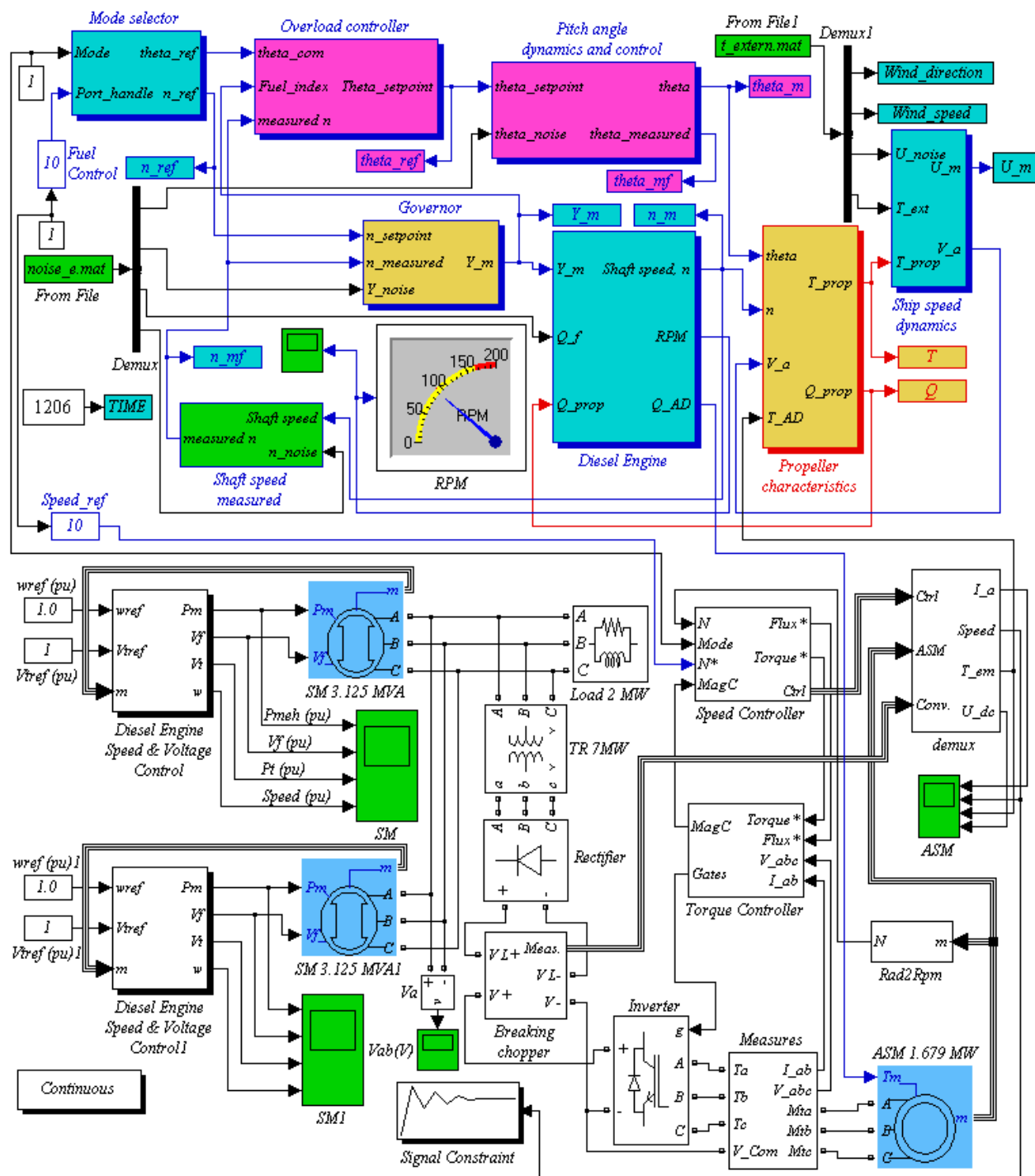


Рис. В.2 Модель передачі потужності в судновому комбінованому пропульсивному комплексі: *Fuel Control* – завдання рівня подачі палива; *Frequency Control (f_{ref})* – завдання частоти обертання АД; *From File ($noise_e.mat$ і $t_extern.mat$)* – завдання відхилень (“шумів”) виміряних та початкових значень; *Mode selector* - селектор режимів роботи пропульсивного комплексу (1 – економний; 2 – маневровий); *Overload controller* – контролер перевантаження МОД; *Shaft speed Measured* – блок виміру оборотів валу; *Governor* – регулятор оборотів МОД; *Diesel Engine* – модель МОД; *Propeller characteristics* – модель гребного гвинта; *Ship speed dynamics* – модель динаміки швидкості судна; *RPM* – тахометр

гребного валу; n_{ref} , n_m , n_{mf} – задане, дійсне і вимірне значення оборотів валу, θ_{ref} , θ_m , θ_{mf} – задане, дійсне і вимірне значення кута атаки гвинта, Y_m – значення паливного індексу, T , Q – упор (*thrust*) і момент обертання гребного гвинта; U_m – швидкість руху судна, $Wind_speed$, $Wind_direction$ – швидкість і напрямок вітру; $wref(pu)$, $Vref(pu)$ – завдання частоти обертання і напруги дизель-генераторів (ДГ); *Diesel Engine Speed & Voltage Control* – регулятор ДГ; SM , $SM1$ – моделі синхронних явно полюсних генераторів (СГ) потужністю 3.125 МВт; TR – трансформатор потужністю 7 МВт; *Rectifier* – некерований випрямляч (міст Ларіонова); *Breaking Chopper* – вимикач зворотної потужності АД; *Inverter* – силовий інвертор на IGBT- транзисторах; *Measures* – блок виміру параметрів перетворювача частоти з ланкою постійного струму; *Speed Controller*, *Torque Controller* – регулятори частоти обертання і моменту АД; *demux* і *ASM* – блоки для вимірювання і спостереження параметрів АД; *ASM 1.679 MW* – допоміжний асинхронний трифазний електродвигун з короткозамкнутою обмоткою (АД); *Rad2Rpm* – конвертор рад/с у об/хв.; *Continuous* – блок для розрахунку початкових параметрів СГ і АД; Vab – блок для вимірювання і спостереження напруги на шинах ДГ, *Signal Constraint* – блок оптимізації параметрів компонентів моделі

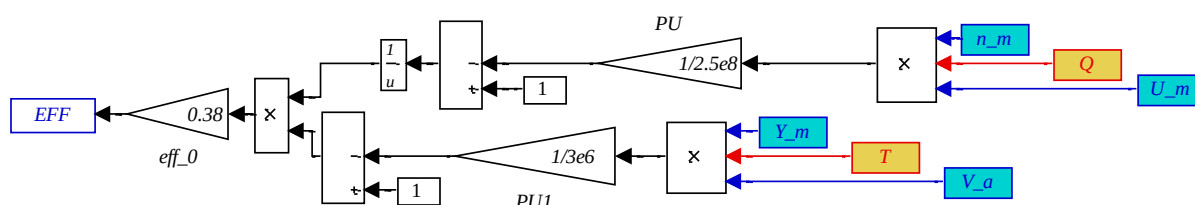


Рис. В.3 Блок функцій для оцінки ефективності СДЕПК: PU , $PU1$ – перехід до відносних одиниць (в.о.); eff_0 – початковий коефіцієнт ефективності, в.о.; EFF – результуючий коефіцієнт ефективності СДЕПК, в.о.; n_m , Q , U_m , Y_m , T , V_a – значення величин із робочого простору моделі передачі потужності в СДЕПК; інші блоки є стандартними блоками *Simulink*

Додаток Д

Характеристика лабораторних досліджень

Рис. Д.1 Лабораторна установка для дослідження асинхронного електродвигуна

Таблиця Д.1 – Технічні дані асинхронного електродвигуна типу МАП 622

Швидкість	Кількість пар полюсів, $2p$	Потужність на валу P_s , кВт	Потужність споживана P_{bus_AD} , кВт	ККД	ПВ, %	n , об/хв.	I_{mNI} , А	$PF (\cos\varphi_N)$
1	24	5	15,7	0,318	15	190	54	0,44
2	12	1	21,5	0,744	25	420	46,5	0,70
3	6	6	37,9	0,844	40	945	70	0,82
Швидкість	Момент на валу M_s , Н·м	Номинальне ковзання s	Струм холостого ходу I_0 , А	Момент пусковий M , Н·м	Струм пусковий I , А	Момент максимальний M_{max} , Н·м	Z_b , Ом	r_{ma} , В.О.
1	251	0,24	44,5	600	79	637	4,074	1,210
2	364	0,16	38,5	680	130	657	4,731	1,210
3	323	0,055	26	730	460	1078	3,143	2,700
Швидкість	r_{ss} , Ом.	r_{ss} , В.О.	r_r , Ом	r_r , В.О.	x_{ss} , Ом	x_{ss} , В.О.	x_r , Ом	x_r , В.О.
0	0,93	0,2283	2,110	0,5179	1,29	0,3166	0,86	0,2111
1	0,31	0,0659	0,660	0,1359	0,91	0,1923	0,27	0,0575
2	0,15	0,0496	0,265	0,0843	0,37	0,1193	0,11	0,0375

Момент інерції АД $J = 3,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;

Номинальна напруга $\Delta/Y = 220/380 \text{ В}$;

Номинальна частота $f = 50 \text{ Гц}$.

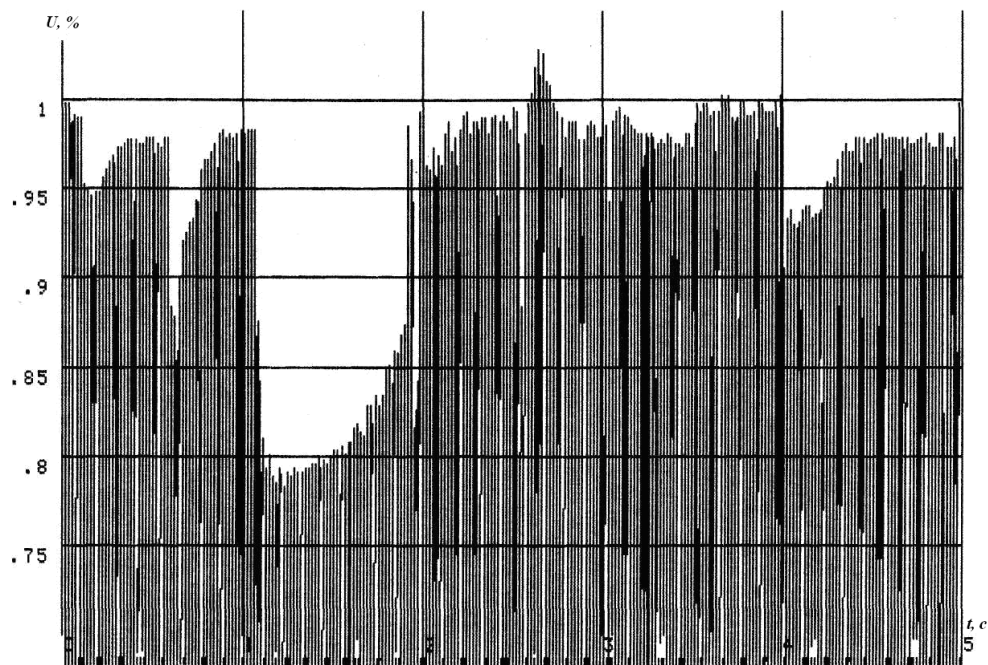


Рис. Д.2 Графік напруги при гальмуванні і розгоні АД МАП 622 в функції часу

Комп'ютерна модель лабораторної установки

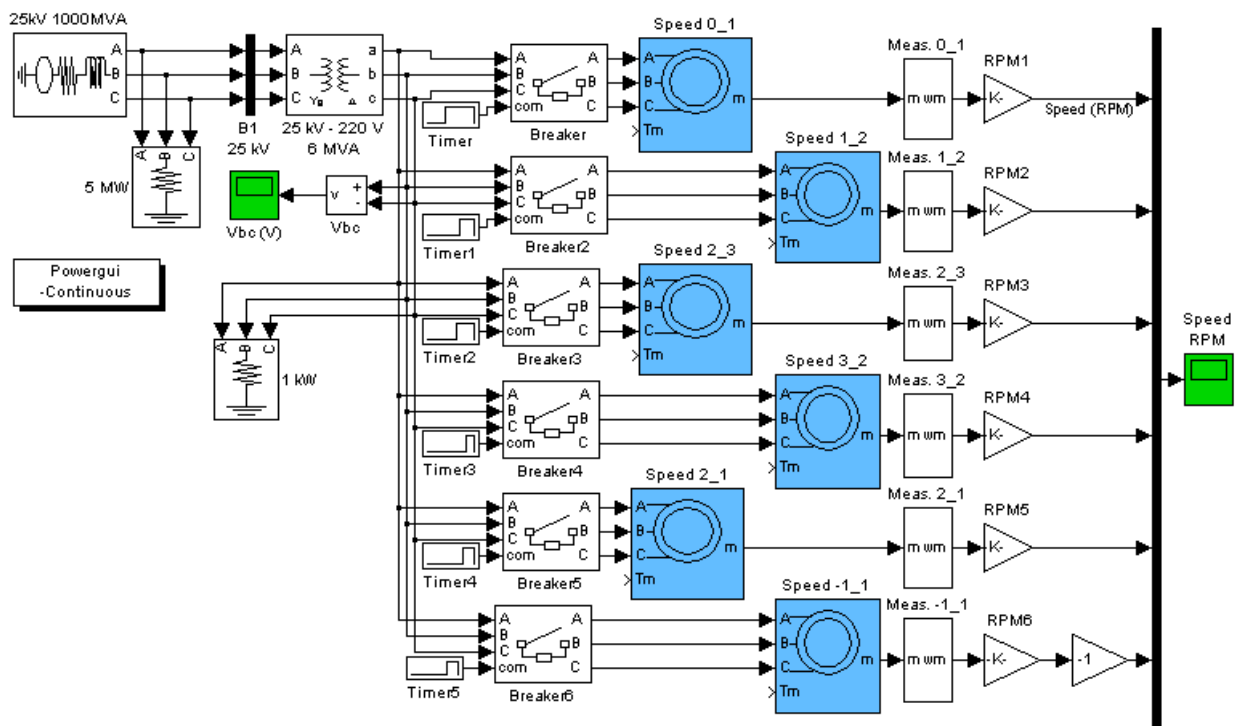


Рис. Д.3 Віртуальна модель АД МАП 622: *Speed 0_1 – Speed -1_1* – моделі обмоток; *Breakers1 – Breakers6* – вимикачі обмоток; *Meas. 0_1 – Meas. -1_1* – блоки вимірювання оборотів АД; *RPM1 – RPM6* – блоки конвертування рад/с у об/хв.; *Timer – Timer5* – завдання часу підключення відповідних обмоток; *Speed RPM* – вимірювач частоти обертання ротору АД

Додаток Ж

Структури файлів моделі суднового дизель-електричного пропульсивного комплексу

Ж.1 Файл сценарію *dmi_tow.m* для *DMI* моделі при двох умовах завантаження судна

```
% Надає дані опору корпусу судна при його русі при повному проектному
% завантаженні і завантаженні баластом
% Процедура надає собою набір кривих, які можуть використовуватися
% для інтерполяції
% Для отримання значень опору корпусу використовуються виміряні дані
% при русі реального судна
% Крива опору для фактичної умови завантаження будується методом
% Ві-лінійної інтерполяції з квадратичним наближенням до значення
% меншого, ніж виміряне.
%  $R(u) = X_{uu} * u^2 + polyval(pRu, \max(u_{ship} - up\_start, 0))$ 
% Це означає багаточленні (поліномні) запуски з мінімальною швидкістю.
% Нижче представлена квадратична залежність опору корпусу  $u_{min}$ 
%       $u_{ship}$        $Ru\_1$   $Ru\_2$   $Ru\_3$ 
%       $m/s$        $kN$     $kN$     $kN$ 
% Таблиці нижче потрібні для кожного конкретного судна,
% для якого необхідно провести симуляцію.
% Дані звичайно одержують шляхом реальних вимірювань.
global loadcond pRu pw0 ptd X_uu up_start
disp_mat = [10009 , 12840]; % Дані при відповідних значеннях
водотоннажності
%  $u$  (kt),  $R(u)$  (kp),  $w$ ,  $t$ ,  $n$  (RPM) враховуючі коефіцієнт 1.058
```

% DMI модель 78023.31 водотоннажністю 12840 m^3

$kuRwtn_2$	15.00	15.50	16.00	16.50	17.00	17.50	18.00	18.50	19.00	19.50	20.00
	37053	40083	43763	47902	52333	56936	61673	66586	71858	77827	85025
	0.121	0.126	0.125	0.122	0.119	0.115	0.113	0.112	0.111	0.109	0.106
	0.181	0.179	0.177	0.176	0.177	0.179	0.180	0.181	0.179	0.176	0.169
	119.3;	123.0;	127.5;	132.4;	137.5;	142.7;	147.8;	152.8;	157.9;	163.2;	169.0];

% u (kt), $R(u)$ (kp), w , t , n (RPM) враховуючі коефіцієнт 1.058

% DMI модель 78023.31 водотоннажністю 10009 m^3

$kuRwtn_1$	17.00	17.50	18.00	18.50	19.00	19.50	20.00	20.50	21.00	21.50	22.00
	44390	47641	50898	54735	59631	65927	73765	83032	93293	103726	113049
	0.141	0.137	0.135	0.133	0.130	0.125	0.120	0.113	0.106	0.100	0.094
	0.170	0.188	0.206	0.218	0.219	0.212	0.200	0.189	0.184	0.189	0.208
	129.9;	135.0;	139.8;	144.8;	150.1;	155.8;	162.2;	169.1;	176.6;	184.5;	192.8];

% Перехід до одиниць SI

$U_dat = [kuRwtn_1(:,1), kuRwtn_2(:,1)].* 0.5144$; % вузли (kt) у м/с (m/s)

$Ru_dat = [kuRwtn_1(:,2), kuRwtn_2(:,2)].* 9.82/1000$; % кПА (kp) у кН (kN)

$w_dat = [kuRwtn_1(:,3), kuRwtn_2(:,3)]$;

$t_dat = [kuRwtn_1(:,4), kuRwtn_2(:,4)]$;

$n_dat = [kuRwtn_1(:,5), kuRwtn_2(:,5)]*2*pi/360$; % об/хв. (RPM) у рад/с (rad/s)

$k1 = length(U_dat)$; % Повертає найбільше значення U_dat

$disp = disp_mat(loadcond)$;

$up_start = U_dat(1, loadcond)$;

$X_uu = 1000*Ru_dat(1, loadcond)/(up_start^2)$;

$u_shift(:,loadcond) = U_dat(:, loadcond) - up_start$;

$R_vec(:,loadcond) = 1000*Ru_dat(:, loadcond)$;

Ж.2 Файл функції *crr.m* для розрахунку параметрів гребного гвинта

```

function TQ = crr(u);
% Функція розраховує упор і момент гвинта регульованого кроку
% Inputs :  u = [Theta : Крок гвинта,
%              n : Частота обертання гвинта, об/сек,
%              Va : швидкість руху гвинта відносно води, м/с,
%              T_AD : Момент опору АД]
% Outputs:  T : Упор гвинта,
%           Q : Момент гвинта
% Розрахунок виконується за умовою вхідного значення кута атаки гвинта
% та не визначених коефіцієнтах CT і CQ :
%  $CT = T / (r \rho (Va^2 + (0.7 \pi n D)^2 \pi/4))$ 
%  $CQ = Q / (r \rho (Va^2 + (0.7 \pi n D)^3 \pi/4))$ 
%  $J_{mod} = Va / (0.7 * \pi * n * D)$ 
% при нормальних умовах J is  $J = Va / (nD)$ 
% при інших  $J = J_{mod} * 1.100$ 
% Важливо: n – частота обертання валу задається у об/с !!!!!
% Дані моделі гвинта:
%  $AD/A0 = 0.60$ 
% Дискове відношення  $P/D = 0.70$ 
global D rho PDrel J_DrI KT KQ
if u(1) > 1,
u(1) = 1;
end;
if u(1) < -1, u(1) = -1;
end;
if u(2) == 0, u(2) = 0.01;

```

```

end;
if u(2) == 0, u(2) = 0.01;
end;
n = u(2)/2/pi;
Va = u(3);
T_AD = u(4);
% Інтерполяція у відповідності миттєвим значенням Va і n за принципом:
J_AD = 1/u(4)
if J_AD >= 0.5, J_AD = 0.5;
end;
if J_AD < -0.5, J_AD = -0.5;
end
J_nu = Va/(D*n) + J_AD; % Фактичне авансове значення вираховане
if J_nu >= 0.9, J_nu = 0.9;
end;
if J_nu < -0.5, J_nu = -0.5;
end
T = interp2(PDrel, J_DrI, KT, u(1), J_nu) * rho*n^2*D^4;
Q = interp2(PDrel, J_DrI, KQ, u(1), J_nu) * rho*n^2*D^5;
TQ = [T, Q];

```

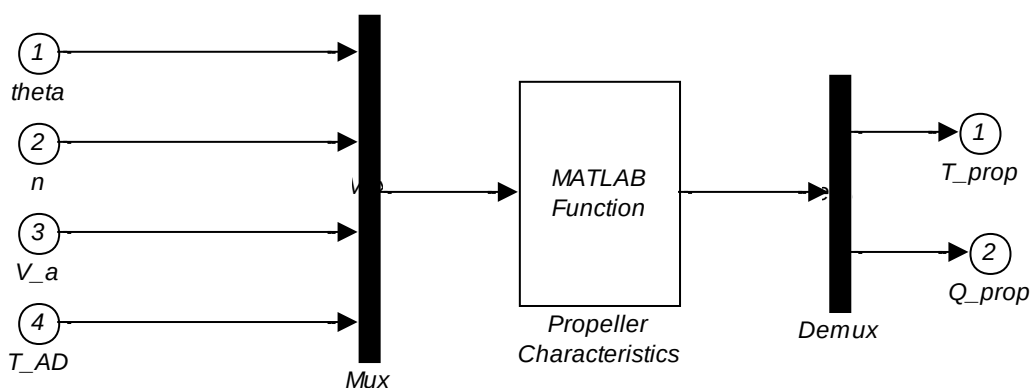


Рис. Ж.2 Модель гребного гвинта: *theta* – значення кроку гвинта; *n* – частота обертання валу гвинта, об/с; *T_AD* – момент обертання допоміжного гребного асинхронного електродвигуна (АД); *T_prop* – упор (*thrust*) гребного гвинта; *Q_prop* – момент обертання гвинта

Ж.3 Файл функції *ru_func.m* для розрахунку параметрів судна, яке рухається в залежності від заданої швидкості

```
function Ru = ru_func(u)
```

```
% Input: u: швидкість судна, м/с
```

```
% Output: R:  $X_{uu} * u^2$ 
```

```
global pRu up_start X_uu
```

```
Ru = polyval(pRu, max(u - up_start, 0)) + X_uu * u^2;
```

Ж.4 Файл початкових даних *compdata.m*

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Початкові дані для моделі управління швидкістю судна і пропульсивним
```

```
% комплексом (Судно+Гвинт+МОД+АД+ПЧ+СОДГ)
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
global X_uu D k_y
```

```
global n_nom
```

```
global KT KQ w_1_0 t_1_0
```

```
global PDrel rho
```

```
global J_DrI T_AD n_AD p
```

```
global epsilon_ol
```

```
global theta_min theta_max
```

```
global V_chop_a V_chop_d freq_chop
```

```
global br cap_bus
```

```
global SwK bs
```

```
global ramp_a ramp_d
```

```

global kp ki
global Tsc fc
global ctrl_sat_a ctrl_sat_d
global Rss nf T_bw F_bw
global freq_max Ts_DTFC
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Постійні і початкові дані %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
v_p = 0; % Початковий момент опору
n_0 = 2.8; % Початкова частота обертання валу, рад/с
taw_c = 2*pi*0.9/n_0; % Початкова постійна часу дизеля
n_nom = 15 % Номінальне значення оборотів валу
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Дані судна %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global loadcond % Тип завантаження судна (Load condition)
loadcond = 2; % Може бути 1 або 2 (в залежності від завантаження)
I_m = 250000; % Інерція судна
D = 4.33; % Діаметр гвинта судна
k_y = 4.02e5; % Коефіцієнт передачі дизеля
nf = 9.39; % Номінальний потік АД, Вб
n_AD = 300; % Синхронна частота обертання допоміжного АД,
% об/хв.
p = 12; % Кількість пар полюсів АД
Rss = 75e-3; % Опір фази обмотки статора АД
if loadcond == 1,
m = 10009*1025; % Вага = водотоннажність * маса одиниці об'єму
% морської води
t_1_0 = 1 - 0.1985; % t_1_0 = 1 - (t_mean = середнє значення вимірюваних
% даних коефіцієнту горизонтального утримання)
w_1_0 = 1 - 0.1213; % w_1_0 = 1 - (w_mean = середнє значення реальних
% даних коефіцієнту попутного потоку)
else m = 12860*1025;
t_1_0 = 1 - 0.1776; % t_1_0 = 1 - (t_mean = середнє значення вимірюваних

```

```

% даних коефіцієнту горизонтального утримання)
w_1_0 = 1 - 0.1163; % w_1_0 = 1 - (w_mean = середнє значення реальних
% даних коефіцієнту попутного потоку)
end
m0 = 1e5; % Вантаж судна
m = m + m0;
%%%%%%%%%%%%%% Параметри вимикача зворотної потужності %%%%%%%%%%%%%%%
V_chop_a = 3700; % Верхня межа напруги ланки постійного струму
V_chop_d = 3500; % Нижня межа напруги ланки постійного струму
freq_chop = 4000; % Максимальна частота вимикача
br = 8; % Активний опір контактів вимикача
cap_bus = 10000e-6; % Ємність конденсатору ланки постійного струму
%%%%%%%%%%%%%% Дані регулятора швидкості АД %%%%%%%%%%%%%%%
% Mode = 1; % Тип регулятора (1 - регулятор швидкості;
%2 – регулятор моменту)
bs = 300; % Базове значення частоти обертання АД, об/хв.
ramp_a = 300; % Верхня межа залежності регулювання оборотів АД
ramp_d = -300; % Нижня межа залежності регулювання оборотів АД
kp = 300; % Пропорційний коефіцієнт передачі ПІ-регулятора
ki = 2000; % Інтегральний коефіцієнт передачі ПІ-регулятора
fc = 100; % Частота відсікання фільтру нижніх частот виміру
% швидкості
Tsc = 150e-6; % Час вибірки моделювання контролеру
ctrl_sat_a = 90000; % Верхня межа обмеження моменту АД
ctrl_sat_d = -90000; % Нижня межа обмеження моменту АД
%%%%%%%%%%%%%% Дані регулятора моменту АД %%%%%%%%%%%%%%%
T_bw = 1000; % Смуга пропускання гістерезису моменту, Н*м
F_bw = 0.02; % Смуга пропускання гістерезису потоку, Вб
freq_max = 20000; % Максимальна частота контролера імпульсів
Ts_DTFC = 15e-6; % Час вибірки моделювання контролеру

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Дані регуляторів %%%%%%%%%%%%%%
k_t = 0.15;                % Коефіцієнт передачі контролера розвороту лопастій
k_r = 0.2211;              % Пропорційний коефіцієнт передачі контролера
                           % оборотів дизеля
taw_i = 5;                 % Постійна часу регулятора дизеля
K = 10;                    % Постійна зворотного зв'язку, яка враховує пориви
                           % вітру
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Обмеження %%%%%%%%%%%%%%
theta_min = -0.68;         % Мінімальний рівень сигналу управління
theta_max = 0.98;          % Максимальний рівень сигналу управління
u_theta_min = -0.2;        % Мінімальний рівень кроку сигналу управління
u_theta_max = 0.2;         % Максимальний рівень кроку сигналу управління
Y_lb = 0;                  % Нижча межа паливного індекса
Y_ub = 1;                  % Вища межа паливного індекса
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Час моделювання і час вибірки %%%%%%%%%%
sim_time = 3500;           % Час моделювання у секундах
step_interval = 1;         % Шаг (інтервал) моделювання
number_of_data = sim_time/step_interval; % Номер даних
tid = 0:step_interval:sim_time-step_interval;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Генерація відповідних шумів (відхілень) для вимірюваних сигналів %%%
global seed_theta
n_noise_mag = 0.005*17.7; seed_n = 11042;
U_noise_mag = 0.01*9.5; seed_U = 6252;
Ym_noise_mag = 0.005; seed_Ym = 123731;
theta_noise_mag = 0.0425; seed_theta = 198272;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Зовнішні навантаження %%%%%%%%%%%%%%
t_ext_s = 1540; t_ext_e = 3260;
t_ext_mag = 32.1e3;        % Збудження
t_ext_seed = 45154;
Qf_seed = 872014; Qf_mag = 2.8e4;

```

%%%%%%%%%%%% Генерація завад та атмосферних збуджень %%%%%%%%%%%%%%

gen_nois

%%%%%%%% Генерація відповідних помилкових сигналів для системи %%%%%%%%%

n_Fault_max_s = 680;

n_Fault_max_e = 710;

n_Fault_max_mag = 18;

n_Fault_min_s = 2640;

n_Fault_min_e = 2670;

n_Fault_min_mag = 0;

%%%%%%%%%%%% Завдання кроків помилок %%%%%%%%%%%%%%

p_Fault_max_s = 180;

p_Fault_max_e = 210; % Максимальна помилка давачів

p_Fault_max_mag = 1;

p_Fault_min_s = 1890;

p_Fault_min_e = 1920; % Мінімальна помилка давачів

p_Fault_min_mag = -0.7;

p_Fault_inc_s = 800; % Початкове значення помилки

p_Fault_inc_e = 1700;

%%%%%%%%%%%% Помилка ланки передачі дизеля %%%%%%%%%%%%%%

ky_Fault_s = 3000; *ky_Fault_e* = 3500;

ky_Fault_procent = 0.20; % Відповідає 20% зниження передачі

% Генерація даних опору корпусу судна, які базуються на реальних даних %

DMI_tow;

%% Установка даних для контролера перевантаження (*overload controller*)%%

global_epsilon_ol

epsilon_ol = 0.05;

% Коефіцієнти передачі для контролера перевантаження (*overload controller*)

k_f = 0.2; *k_b* = 2;

% Виміряні дані, що характеризують модуль гвинта (*propellers module*)%

rho = 1025; *PDrel* = [-1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0];

```

Jmod = [-.5, -.4, -.3, -.2, -.1, 0., 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9];
J_DrI = Jmod/0.415;          % Коливання осі валу
CT = [
    +.0443,  +.1176,  +.1938,  +.3404,  +.4868;
    -.0135,  +.0693,  +.1339,  +.2648,  +.4057;
    -.0705,  +.0221,  +.0820,  +.1859,  +.2790;
    -.1401,  -.0209,  +.0403,  +.0976,  +.2056;
    -.1753,  -.0545,  +.0132,  +.0997,  +.2290;
    -.1965,  -.0704,  +.0059,  +.1048,  +.2315;
    -.1936,  -.0752,  -.0108,  +.0690,  +.1928;
    -.2190,  -.1504,  -.0494,  +.0251,  +.1346;
    -.3270,  -.2454,  -.1013,  -.0190,  +.0770;
    -.4554,  -.3169,  -.1627,  -.0809,  +.0212;
    -.5295,  -.3808,  -.2322,  -.1509,  -.0332;
    -.5813,  -.4493,  -.3041,  -.2216,  -.0885;
    -.6210,  -.5200,  -.3724,  -.2879,  -.1463;
    -.6645,  -.5885,  -.4387,  -.3548,  -.2064;
    -.7121,  -.6536,  -.5018,  -.4217,  -.2688];
CQ = [
    0.0051 -0.0013  0.0034  0.0240  0.0635;
    0.0154  0.0013  0.0033  0.0203  0.0552;
    0.0261  0.0048  0.0034  0.0146  0.0403;
    0.0317  0.0081  0.0032  0.0090  0.0306;
    0.0396  0.0111  0.0033  0.0100  0.0343;
    0.0447  0.0135  0.0033  0.0103  0.0352;
    0.0435  0.0137  0.0032  0.0079  0.0298;
    0.0420  0.0174  0.0031  0.0041  0.0216;
    0.0530  0.0227  0.0029  0.0009  0.0137;
    0.0690  0.0272  0.0027  -.0031  0.0060;
    0.0771  0.0303  0.0020  -.0075  -.0008;
    0.0824  0.0336  0.0007  -.01222  -.0078;
    0.0876  0.0368  -.0014  -.0172  -.0155;
    0.0924  0.0398  -.0025  -.0222  -.0233;
    0.0969  0.0427  -.0024  -.0272  -.0310];
l = length(Jmod);
KT = zeros(l,5); KQ = zeros(l,5);
for I = 1:l
    KT(i,:) = CT(i,:)*(Jmod(i)*Jmod(i)/8/pi/pi + 0.49*pi^3/8);
    KQ(i,:) = CQ(i,:) *(Jmod(i)*Jmod(i)/8/pi/pi + 0.49*pi^3/8);
end
clear CT CQ l i

```

Специфікація деяких типів суден

Судно		Контейнеровози		Маломірні		Пасажирські судна	
Місткість	TEU	6000	3600	340	120	-	-
v_s	Вузли	24	24	15	8	20	30
DWT	Тон	70000	45500	3750	1520	3500	3500
η_D	-	0.75	0.75	0.65	0.40	0.70	0.70
1000 C_E	-	8	9	14	28	20	22
1000 C_D	-	11	12	22	70	29	31
C_{adm}	$\frac{\text{тон}^{2/3} \cdot \text{вузл}^3}{\text{кВт}}$	683	607	338	104	255	232

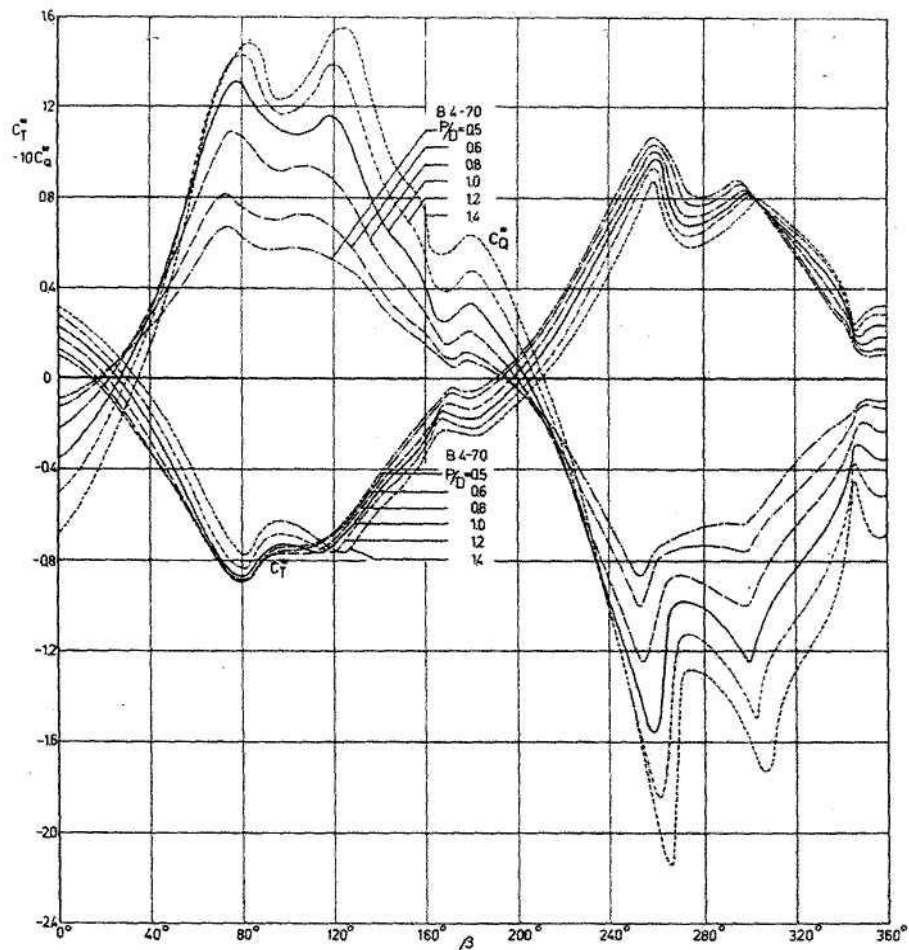


Рис. Ж.4.1 Діаграма вимірних даних гвинтів профілю Wageningen B4-70

Ж.5 Файл функції *limit_y.m* розрахунку обмеження паливного індексу

Function Y=limit_y(u)

% Цією функцією розраховуються обмеження паливного індексу, який
 % генерується регулятором оборотів МОД (*Governor*)
 % Inputs : $u = [\quad Y : \text{Значення паливного коефіцієнту}$
 % $\quad n : \text{Обороти МОД, об/сек}]$
 % Outputs: $Y : \text{Дійсне значення паливного індексу}$

global n_nom

$n_{max} = 1.1 * n_{nom};$

if $u(2) > n_{max},$

$u(2) = n_{max};$

elseif $u(2) < 0,$

$u(2) = 0;$

end

if $u(2) > (0.8 * n_{nom}),$

$y = 1;$

elseif $u(2) < (0.4 * n_{nom})$

$y = 0.4;$

else

$y = (1.5/n_{nom}) * u(2) - 0.2;$

end

$Y = \max(0, \min(u(1), y));$

Ж.6 Файл функції *overld.m* обмеження перевантаження МОД

```

function out = overload(u)
% Цією функцією забезпечується обмеження перевантаження МОД в
% залежності від певного значення кроку гвинта
% Inputs : u = [   Y_m - фактична величина паливного коефіцієнту
%                n_m - виміряне значення оборотів дизеля]
% Outputs:      e_y - розрахована різниця між фактичним (виміряним)
%                індексом пального і обмеженнями
%                OL_on – ініціалізується, коли активна функція обмеження

global n_nom
global epsilon_ol
n_max = 1.1*n_nom;
if u(2) > n_max,
u(2) = n_max;
elseif u(2) < 0, u(2) = 0;
end
if u(2) > (0.8*n_nom), y_lim = 0.75;
elseif u(2) < (0.4*n_nom), y_lim = 0.4;
else
y_lim = (1.375/n_nom)*u(2) - 0.15;
end
e_y = u(1) - (y_lim);
OL_on = (e_y - epsilon_ol)>0;
e_y = e_y*OL_on;
out = [e_y,OL_on];

```

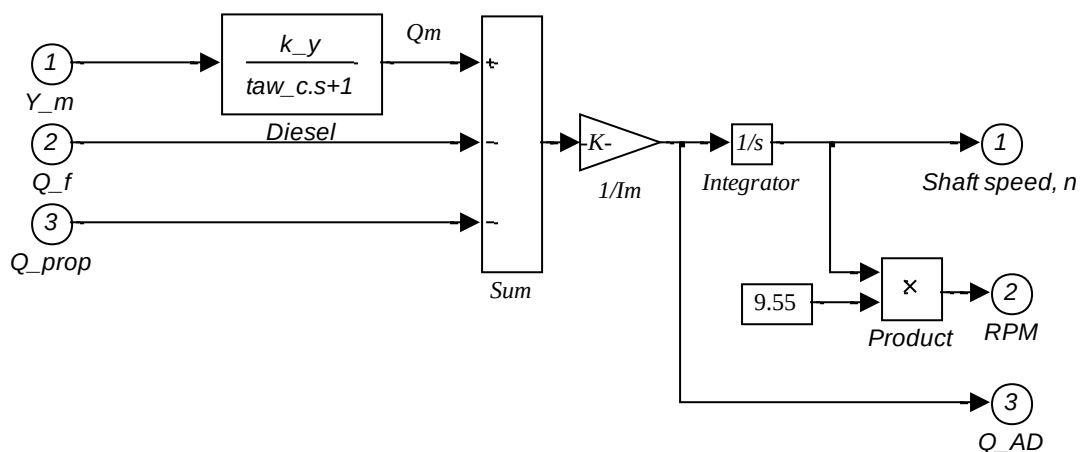


Рис. Ж.6.1 Модель МОД: Y_m – значення паливного коефіцієнту ($0 \div 1$); Q_f – відхилення (“шум”) моменту на валу дизеля; $k_y = 4.02 \cdot 10^5$ – коефіцієнт передачі дизеля; taw_c – початкова постійна часу дизеля ($taw_c = 2 \cdot \pi \cdot 0.9 / n_0$, де n_0 – початкова частота обертання валу, рад/с); $Im = 250000$ – інерція судна; коефіцієнт інтегратора дорівнює 9.55; Q_{AD} – завдання моменту опору на валу допоміжного АД

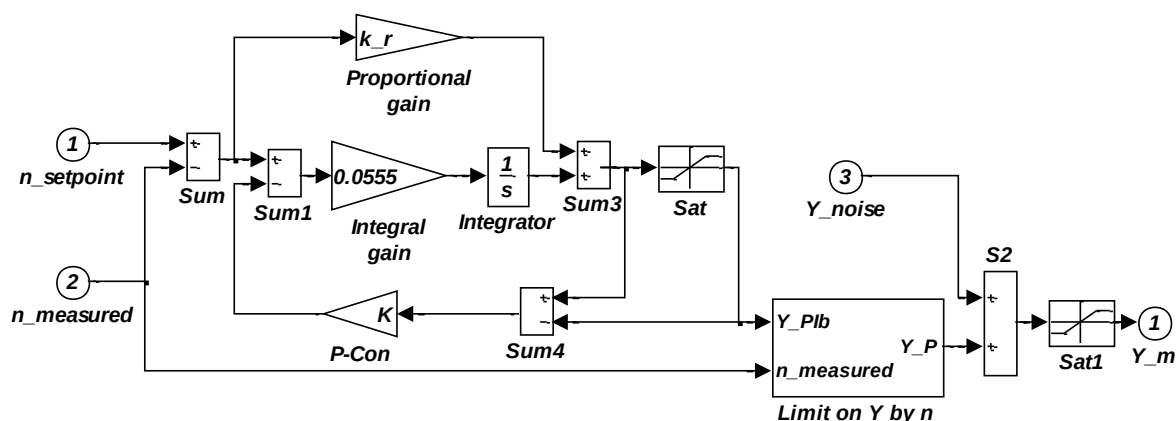


Рис. Ж.6.2 Модель регулятора МОД: $n_{setpoint}$ – завдання оборотів в залежності від положення паливної рейки і величини оборотів холостого ходу; $n_{measured}$ – виміряне значення оборотів валу; $k_r = 0.2211$ – пропорційний коефіцієнт передачі; $K = 10$ - постійна зворотного зв'язку, яка враховує пориви вітру; Sat , $Sat1$ – обмеження; Y_{noise} - відхилення (“шум”) значення паливного коефіцієнту


```

%          u(2) : Положення ручки пульта управління      PH_C !!
%
%          Активний при Mode 1 і 2.
% Outputs: n_p_com : завдання частоти обертання, рад/хв. (Port)
%          theta_p_com : завдання кута атаки гвинта (Port)

Mode = u(1);
PH_C = max(min(u(2),10), -10);
Xp_PH_C = [ -10      -7      -6      -4.6      -3];
Yp_PH_C = [ -0.41     -0.41     -0.41     -0.22     -0.055];
Xp_PH_C = [Xp_PH_C -2.99 -0.01 0    0.9  1.6  1.8  2    3.6  5.3  6
           6.2  7    7.1  7.5  8    8.5  9    9.5  10];
Yp_PH_C = [Yp_PH_C -0.0549    -0.0549    -0.055    0.075 0.2  0.18
           0.24  0.395 0.62  0.72  0.71  0.87  0.91  0.94  0.94  0.94  0.94
           0.94];
Xn_PH_C = [ -10  -9.8  -8    -6.2  -5.65 -0.6  -0.5  4.3  5.3  6
           6.2  7    8.9  10];
Yn_PH_C = [ 30.62 30.62 28.57 25.2  23.55 23.55 23.75 23.75 26.4  27.5
           27.7  28.99 30.5  30.5]*0.577;

% Розрахунок команд завдання для економічного режиму (Mode = 1)

if Mode == 1,
% Розрахунок команди завдання частоти обертання валу
if abs(PH_C) <= 4, n_com = 2.73;
else,
n_com = 0.6617*abs(PH_C)+11.083;
end
% Розрахунок кута розвороту лопастій
if PH_C <= (-5.43), theta_com = -0.39;
elseif (PH_C > -5.43) & (PH_C <= -2),

```

```

theta_com = 0.1137*PH_C + 0.2274;
elseif (PH_C > -2) & (PH_C <= 0), theta_com = 0;
elseif (PH_C > 0) & (PH_C <= 8),
theta_com = 0.1138*PH_C;
else, theta_com = 0.91;
end

elseif Mode == 2,

% Розрахунок команд завдання у маневровому режимі (Mode = 2)
% Завдання частоти обертання валу МОД
n_com = interp1(Xn_PH_C,Yn_PH_C,PH_C,'linear');

% Завдання кута атаки гвинта
theta_com = interp1(Xp_PH_C,Yp_PH_C,PH_C,'linear');
else
error('Wrong mode is chosen. The mode should be either 1, or 2.'
);
end
u_out = [n_com, theta_com];

```

Ж.8 Файл сценарію *gen_nois.m* генерації “шумів” в системі

```

Number_of_samples = 3500; % відповідає 3500 с збирання даних
time = 0:1:3500-1;
randn('seed',seed_theta);
noise_theta = randn(1,Number_of_samples);
noise_theta = (noise_theta-mean(noise_theta))*theta_noise_mag;

```

```

randn('seed',seed_Ym);
noise_Ym = randn(1,Number_of_samples);
noise_Ym = (noise_Ym-mean(noise_Ym))*Ym_noise_mag;
randn('seed',seed_n);
noise_n = randn(1,Number_of_samples);
noise_n = (noise_n-mean(noise_n))*n_noise_mag;
randn('seed',seed_U);
noise_U = randn(1,Number_of_samples);
noise_U = (noise_U-mean(noise_U))*U_noise_mag;

% Генерація зовнішньої сили
[T,X,Y] = sim('gen_extf');
External_Force = Y(1:Number_of_samples,1);
Wind_direction = Y(1:Number_of_samples,2);
Wind_speed = Y(1:Number_of_samples,3);

% Момент опору МОД (Frictional torque)
Q_mag = 0.07*k_y;
randn('seed',sum(100*clock));
noise_Q = randn(1,Number_of_samples);
noise_Q = (noise_Q-mean(noise_Q))*Q_mag;
num = 0.1;
den = [1 0.1];
[numd,dend] = c2dm(num,den,1,'zoh');
Q_f = filter(numd,dend,noise_Q);
Q_f = Q_f/50;
randn('seed',sum(100*clock));
ref_noise_engine = [time; noise_theta; noise_Ym; Q_f; noise_n];
ref_Ext_Force = [time; Wind_direction'; Wind_speed'; noise_U; External_Force'];
save noise_e ref_noise_engine

```

```

save T_extern ref_Ext_Force;
clear time noise_theta noise_Ym Q_f noise_n
clear theta_noise_mag Ym_noise_mag n_noise_mag
clear T X Y External_Force Q_mag noise_Q num den numd dend
clear ref_noise_engine ref_Ext_Force

```

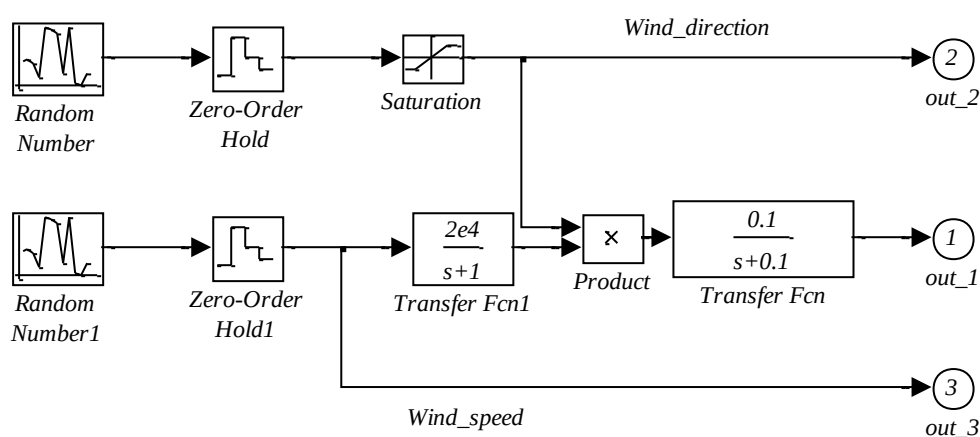


Рис. Ж.8 Модель розрахунку параметрів вітру: *Random Number* – блок випадкового вибору величини у певному заданому діапазоні; *Zero-order hold* – блок реєстрації (“захвату”) нульового значення величини

Додаток 3

Документи по впровадженню результатів досліджень