

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

Кафедра: «Електричної інженерії та електроніки»

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

“ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВОГО ПІДРУЛЮЮЧОГО
ПРИСТРОЮ КОНТЕЙНЕРОВОЗА МІСТкіСТЮ 10600 КОНТЕЙНЕРІВ”

Виконав: студент 6 курсу, групи 3601

спеціальності:

271 – Річковий та морський транспорт

Спеціалізація: «Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики»

МАКАРЕНКО ЮРІЙ ЮРІЙОВИЧ

допущений до захисту 17.12.24

Завідувач кафедри Муха М.Й.

Керівник Бушер В.В.

Нормо контролер А.Шестак

Рецензент Михайленко В.С.

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 04:46:28 17.12.2024

Назва файлу з підписом: ДРМ Макаренко.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 5.1 МБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: ДРМ Макаренко.pdf
Розмір файлу без підпису: 5.9 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: МАКАРЕНКО ЮРІЙ ЮРІЙОВИЧ
П.І.Б.: МАКАРЕНКО ЮРІЙ ЮРІЙОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 3738500031
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 04:46:25 17.12.2024
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000DD77A1019B57C005
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2024.10.24 15:00

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

Кафедра: «Електричної інженерії та електроніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри _____

М. Муха
«17» 12 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу магістра

МАКАРЕНКО ЮРІЯ ЮРІЙОВИЧА

1. Тема: Дослідження режимів роботи суднового підрулюючого пристрою контейнеровоза місткістю 10600 контейнерів

затверджена наказом ректора № 04 від “10” 1703 202__ року

2. Термін закінчення роботи: “13” грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: технічна документація судна та підрулюючих пристроїв, науково-технічні праці підрулюючих пристроїв суден; програмне забезпечення для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем Simulink

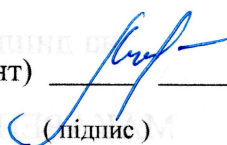
4. Зміст дипломної роботи магістра Вступ, 1. Елементи теорії підрулюючих пристроїв, 2. Параметричне керування підрулюючими системами та інтеграція силових компонентів, 3. Моделювання процесів управління, Висновки, Додатки

5. Перелік ілюстрацій до презентації дипломної роботи магістра: Функціональна схема системи керування позиціонуванням судна, Функціональна схема підрулюючого пристрою, Електрична принципова схема електроприводу підрулюючого пристрою, Графіки перехідних процесів в електроприводі підрулюючого пристрою

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Узгодження проекту плану та завдання до магістерської роботи	15.10.2024	Виконано
2	Елементи теорії підрулюючих пристроїв	16.10.2024 – 23.10.2024	Виконано
3	Налаштування системи управління та параметрів ПП	24.10.2024 – 30.10.2024	Виконано
4	Вибір схеми пуску електродвигуна	31.10.2024 – 06.11.2024	Виконано
5	Просторово-векторна ШІМ для керування електроприводом ПП	07.11.2024 – 13.11.2024	Виконано
6	Побудова моделі ПП та симуляція перехідних процесів	14.11.2024 – 28.11.2024	Виконано
7	Аналіз результатів випробувань	29.11.2024 – 13.12.2024	Виконано

Курсант (студент)

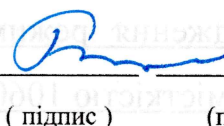


Макаренко Ю. Ю.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



Бушер В. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 35с., 29 рис., 6 табл., джерело

Тема “Дослідження режимів роботи суднового підрулюючого пристрою контейнеровоза місткістю 10600 контейнерів”

Актуальність теми. Актуальність даної теми визначається стрімким розвитком морських перевезень, зокрема контейнерних перевезень, які займають провідну роль у світовій логістиці. Зростання масштабів та обсягу контейнеровозів вимагає впровадження сучасних технічних рішень для забезпечення ефективності їх експлуатації. Одним із ключових аспектів є оптимізація режимів роботи підрулюючих пристроїв.

Метою роботи є дослідження режимів роботи підрулюючого пристрою з метою розробки рекомендацій щодо підвищення ефективності його функціонування в реальних умовах експлуатації.

Об’єкт дослідження є підрулюючі пристрої суден, їх конструкції, робочі характеристики, а також системи керування ними, зокрема під час маневрування.

Предмет дослідження. Оптимізація параметрів і режимів роботи підрулюючих пристроїв з гвинтами регульованого кроку (ГРК), що включає вибір схеми пуску електродвигуна, системи керування кутом атаки лопатей, а також інтеграцію силових компонентів.

Методи дослідження – аналітичний огляд літературних джерел з питань досліджень та проектувань підрулюючих пристроїв судна; віртуальне моделювання електро-привода в програмному забезпеченні Matlab Simulink.

Наукова новизна. Представлено методи попереднього налаштування командних сигналів та параметрів роботи, які враховують індивідуальні характеристики судна та умови його експлуатації, що сприяє зменшенню енергетичних витрат під час маневрування. Розроблено рекомендації щодо вибору схем пуску електродвигуна для забезпечення плавного запуску, що знижує механічні навантаження та витрати енергії.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані підходи до інтеграції системи керування ПП, зокрема використання алгоритмів автоматичного регулювання кута атаки лопатей і автоматичного контролю навантаження, можуть бути використані для підвищення надійності і стабільності роботи ПП в реальних умовах експлуатації.

ПІДРУЛЮЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, ГВИНТ РЕГУЛЬОВАНОГО КРОКУ, СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, АВТОТРАНСФОРМАТОРНИЙ ПУСК, ЕФЕКТИВНІСТЬ ПІДРУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ, ГІДРОДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ГФК – гвинт фіксованого кроку

ГРК – гвинт регульованого кроку

ДП – діаметральна площа

ККД – коефіцієнт корисної дії

КПП – кормовий підрулюючий пристрій

ПП – підрулюючий пристрій

СК – соленоїдний клапан

ЦП – центральний процесор

ЗМІСТ

1. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПІДРУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ.....	6
1.1. Класифікація ПП.....	6
1.2. Показники ефективності ПП	14
1.3. Оцінка появи кавітації.....	16
1.4. Рекомендації по визначенню основних вихідних параметрів.....	18
2. ПАРАМЕТРИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПІДРУЛЮЮЧИМИ СИСТЕМАМИ ТА ІНТЕГРАЦІЯ СИЛОВИХ КОМПОНЕНТІВ	23
2.1. Налаштування системи управління та параметрів ПП	23
2.2. Вибір схеми пуску електродвигуна	32
3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ.....	41
3.1. Побудова моделі ПП та симуляція перехідних процесів.....	41
3.2. Аналіз результатів випробувань.....	41
ВИСНОВКИ	
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	42
ДОДАТОК А. Схему підключення системи керування ПП	
ДОДАТОК Б. Список сигналів та параметрів у системі керування ПП	
ДОДАТОК В. Паспортні дані двигуна електро-приводу ПП	
ДОДАТОК Г. Схема підключення та керування пуском привідного двигуна ПП	

1. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПІДРУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

1.1. Класифікація підрулюючих пристроїв

Керованість судна, здатність слідувати по заданій траєкторії або змінювати напрямок руху по волі судноводія, є однією з важливих морехідних якостей, що визначають не тільки експлуатаційні можливості судна, але й значною мірою безпеку плавання. Спочатку основним засобом управління судном було кормове кермо. Однак дія керма проявляється лише за наявності деякої швидкості ходу, розвинути яку в певних умовах експлуатації (на обмеженому фарватері, на швартових операціях, при маневруванні тощо) неможливо. Відсутність належної керованості стала причиною більшості аварій суден: зіткнень, посадки на мілину та каміння, ударів об стінки тощо. Для забезпечення керованості судном у зазначених умовах стали використовувати буксирні судна як додаткову керуючу тягу. З розвитком техніки з'явилася ідея установки на судні пристроїв, здатних створювати таку тягу. Ці пристрої призначені для керування судном на малому ході і без ходу в складних умовах плавання, котрі називаються «засобами активного керування» або ж підрулюючі пристрої.

Підрулюючі пристрої можна класифікувати за типом робочого органу, типом і кількістю каналів, місцезнаходженням пристрою на судні, за розташуванням і типом приводного двигуна [1].

За типом робочого органу розрізняють ПП з гребними гвинтами (водомерні), крильчатими рушіями (ротаторні) та насосами різних типів. Гребні гвинти монтуються на гондолі, розташованій вздовж осі каналу (рис. 2.1). Усередині гондоли можуть розташовуватися приводний двигун або механізм передачі потужності. Використовуються гвинти фіксованого кроку (ГФК) та гвинти регульованого кроку (ГРК). При використанні ГФК управління величиною та напрямом упору ПП досягається зміною частоти обертання приводного двигуна та його реверсом. При встановленні ГРК управління упором здійснюється поворотом лопатей, що призводить до зміни кроку гвинта за постійної частоти обертання. Оскільки ПП має забезпечувати рівні значення упору на правий та лівий борт, то при проектуванні ПП зазвичай застосовується симетричний профіль лопаті гребного гвинта.

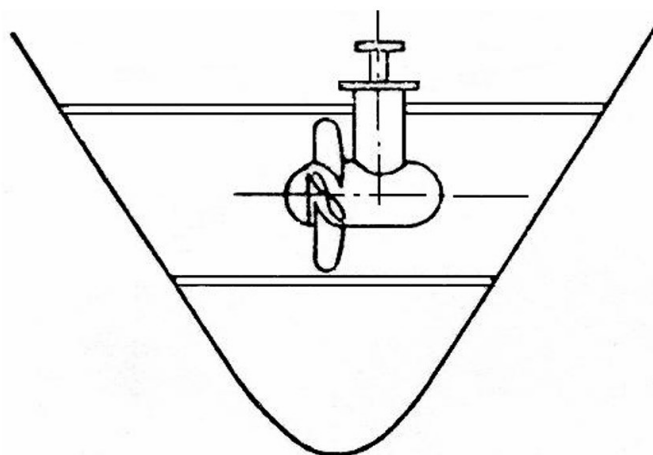


Рис. 1.1. Схема ПП с гребним гвинтом

З метою підвищення ефективності ПП, як робочий орган може застосовуватися комплекс із двох різнооберткових гвинтів (рис. 1.2). Розподіл загального навантаження на два рушії дозволяє змінити діаметр каналу або частоту обертання, тим самим досягається підвищення ККД ПП на 10 - 15%. Схема з парними гвинтами допускає проектування гвинтів як із симетричним, так і з несиметричним профілем лопаті. У другому випадку один гвинт проектується з роботи на правий борт, інший – на лівий.

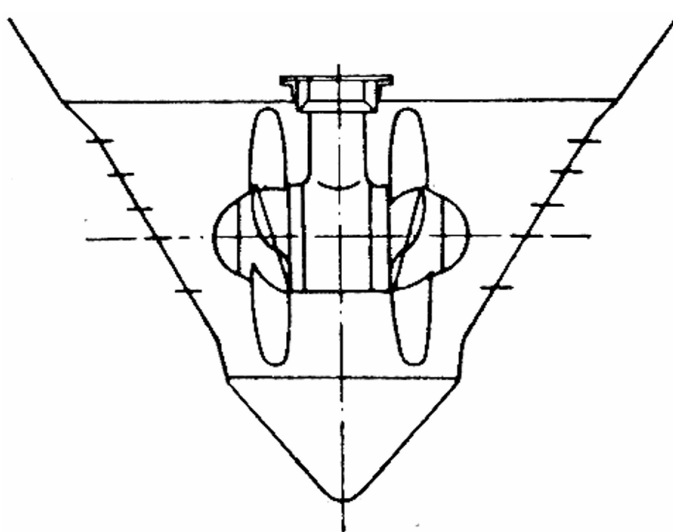


Рис. 1.2. Схема ПП з двома різнообертковими гвинтами

Як робочий орган в ПП знайшли застосування крильчаті рушії (рис. 1.3.). Відмінною особливістю цих ПП є створення упору будь-якої величини від максимального до нуля на будь-який борт без зміни напрямку обертання. Основний недолік крильчатого рушія – це складність його конструкції.

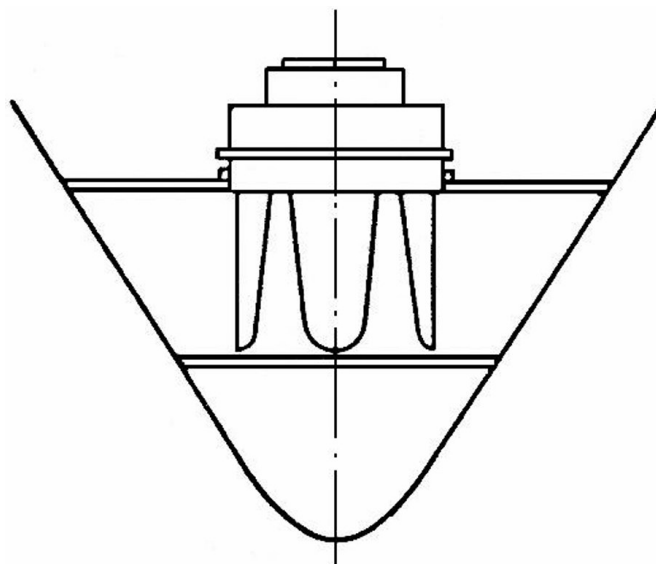


Рис. 1.3. Схема ПП з крильчатим рушієм

Набули поширення ПП, які для створення бічного упору обладнуються насосами. У цих ПП використовуються відцентрові, осьові насоси, ежектори. У ряді випадків знаходять застосування ПП, в яких як робочий орган використовуються насоси загально-суднових систем та спеціального призначення (водовідливні, пожежні, вантажні, рефулерні та ін.). Такі ПП не потребують спеціальних приводних двигунів. Для забезпечення їх роботи передбачаються лише додаткові виводи на обидва борти у відповідній загально-судновій системі (вантажній, протипожежній та ін.) (рис. 1.4).

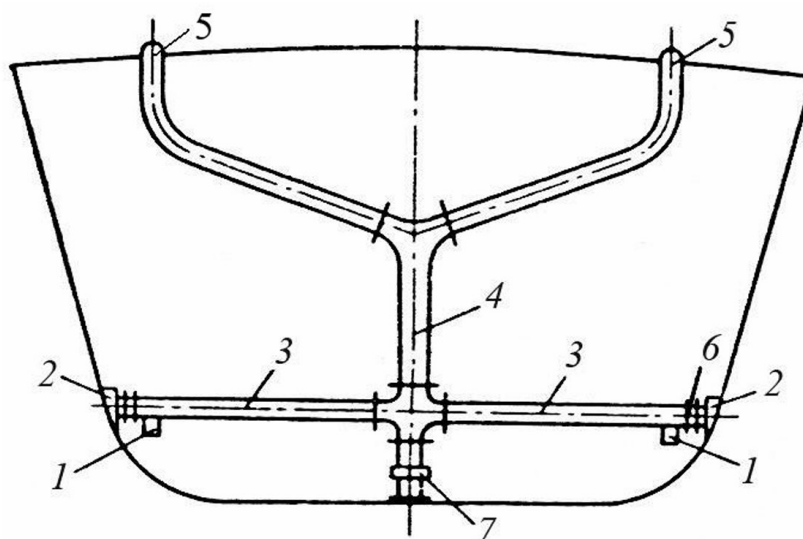


Рис. 1.4. Схема ПУ з використанням вантажних насосів танкера:
 1 – привід заслінки; 2 – бортові отвори; 3 – бортові трубопроводи;
 4 – вертикальний трубопровід; 5 – палубні трубопроводи; 6 – заслінка;
 7 – перепускний клапан

Вода нагнітається насосами по палубних трубопроводах 5 вертикальний трубопровід 4, потім трубами 3 надходить на правий або лівий борт. Напрямок і величина упору регулюються заслінками 6. Внаслідок гідравлічних втрат, обумовлених згинами трубопроводів, такі ПП мають порівняно низьку ефективність.

За типом каналу розрізняють пристрої із прямим і вигнутим каналом. У разі прямого каналу необхідне застосування кутової передачі (конічного редуктора) або занурювального двигуна, що збільшує вартість та ускладнює експлуатацію ПП. Вигнутий канал дозволяє встановити гребний гвинт безпосередньо на вал приводного двигуна. Однак вигин каналу призводить до зростання гідравлічного опору та знижує ефективність ПП. Насправді застосовуються ПП з різною формою каналу (S-, T-, Z-подібної (рис. 1.5; 1.6; 1.7)).

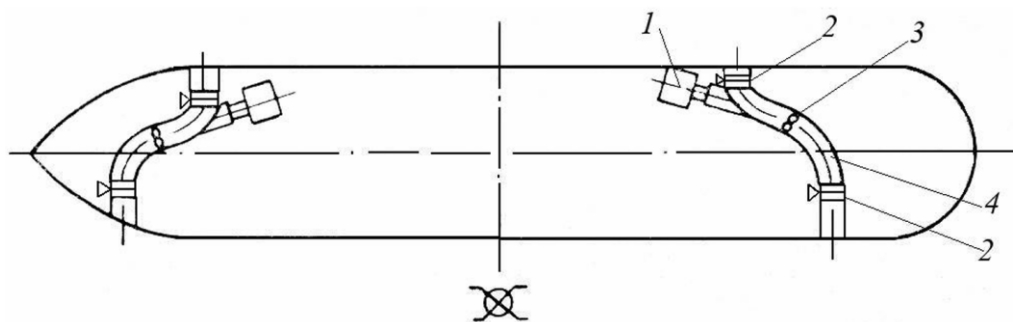


Рис. 1.5. ПП із S-подібним каналом: 1 – приводний двигун; 2 – заслінка; 3 – імпелер; 4 – канал

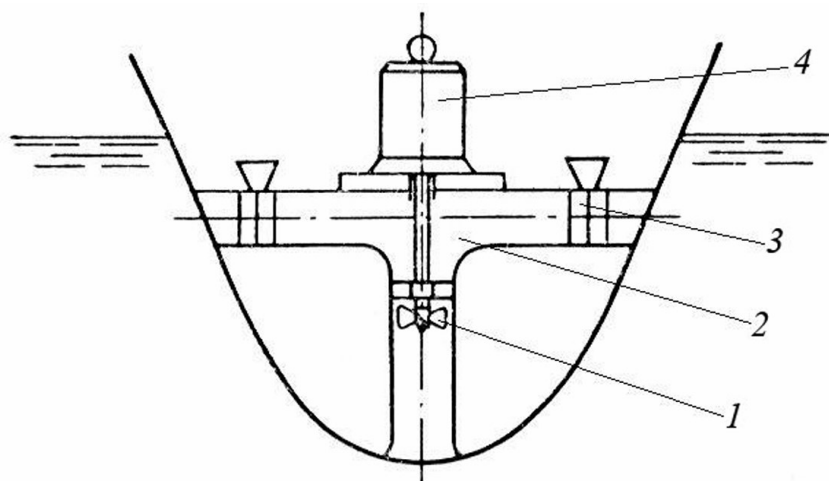


Рис. 1.6. ПП з каналом T-подібною форми та заслінками: 1 – імпелер; 2 – канал; 3 – заслінка; 4 – приводний двигун.

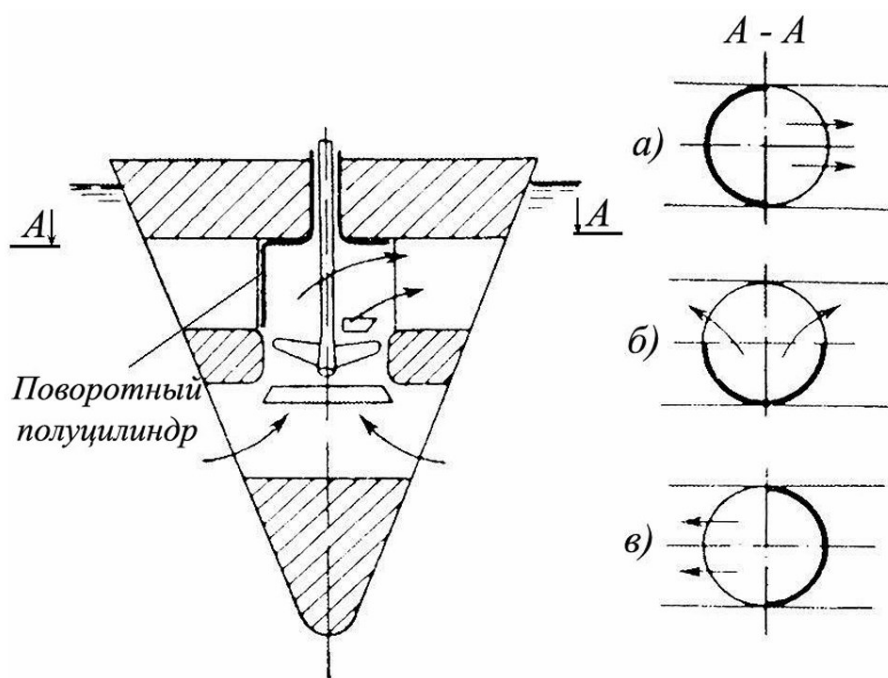


Рис. 1.7. ПП з Z-подібним каналом і поворотним напівциліндром: а) викид води у бік правого борту; б) ПП упор не створює; в) викид води у бік лівого борту

Найбільш поширеною формою перерізу каналу для ПП з гребними гвинтами є кругла і прямокутна для ПП з крильчатими рушіями. За кількістю каналів ПП поділяються на одно- та двоканальні. Найбільш поширені одноканальні ПП із симетричною конструкцією, призначені для роботи на обидва борти. Двоканальні ПП є комбінацією двох ПП односторонньої дії (рис. 1.8). Ці ПП дозволяють підвищити ефективність, але вимагають більше місця розміщення, крім того, збільшується вартість пристрою.

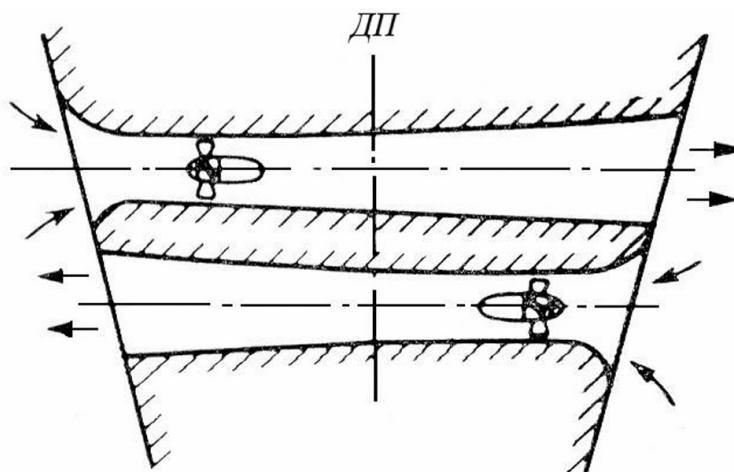


Рис. 1.8. Двоканальні ПП

За місцем розташування розрізняють носові та кормові ПП (рис. 1.9).

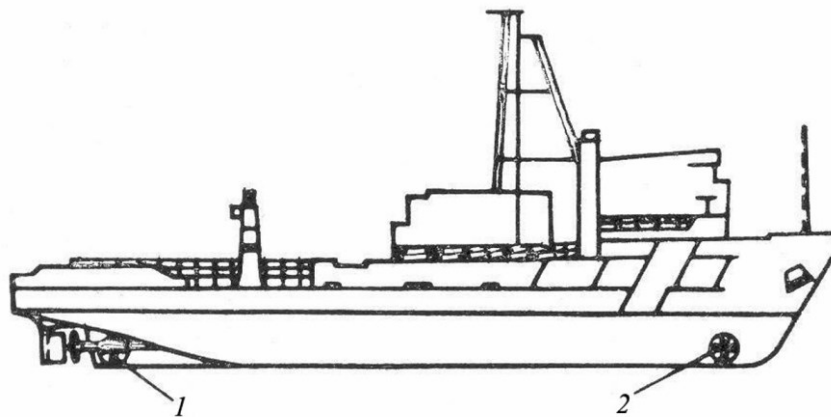


Рис. 1.9. Розміщення ПП на судні: 1 – кормове ПП; 2 - носове ПП

Для забезпечення максимального плеча поперечної сили ПП розміщують на більшій відстані від міделя. Зазвичай кормове ПП (КПП) встановлюють на додаток до носового задля забезпечення судну руху лагом, повороту на місці та інших маневрів. Наявність валопроводу ускладнює розміщення КПП, що спричиняє ускладнення його конструкції та зниження ефективності (рис. 2.10).

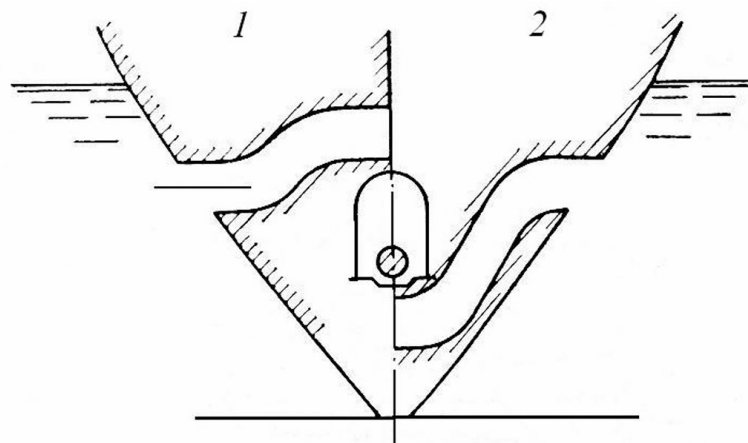


Рис. 1.10. Схеми розміщення каналів КПП в обхід валопроводу: 1 – вище за тунель валопроводу; 2 – нижче за тунель валопроводу

На судах з великою осадкою канал КПП може розміщуватися нижче за лінію гребного валу. Можливі випадки, коли встановлюють кілька ПП в носовій та кормовій частині судна, розташовуючи їх одне одним для забезпечення достатнього упору.

За місцем розташування приводу ПП поділяють на 2 групи: 1. ПП із приводом гвинта з водозанурювальним електричним або гідравлічним двигуном; 2. ПП з приводним двигуном, розташованим усередині корпусу судна, поза каналом ПП. До першої групи відносяться ПП, що приводяться у

обертання від електродвигуна, розташованого безпосередньо в каналі ПП (рис. 1.11).

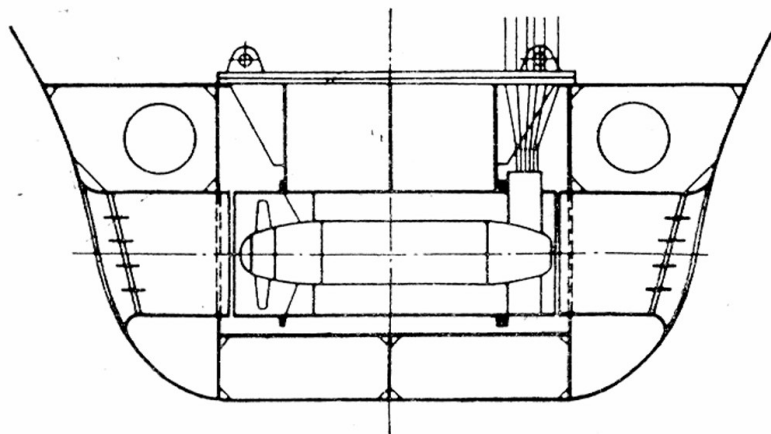


Рис. 1.11. ПП із водозанурювальним електродвигуном

Величина та напрямок упору ПП регулюється відповідно зміною частоти обертання та реверсуванням електродвигуна.

У ПП з приводним двигуном, розташованим поза каналом, передача потужності до гребного гвинта здійснюється через редуктор за допомогою конічної зубчастої передачі (рис. 1.12).

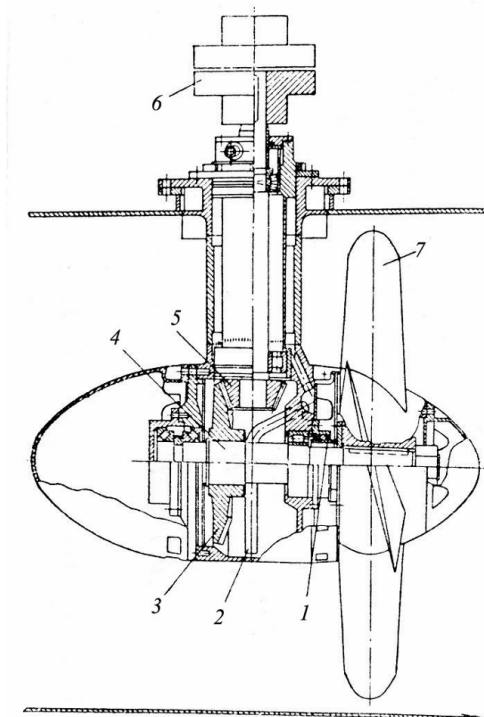


Рис. 1.12. Конструкція одnogвинтового ПП з використанням зубчастого конічного редуктора: 1 – ущільнення гребного валу; 2 – трубка для відкачування мастила; 3 – конічне зубчасте колесо; 4 – гребний вал; 5 – конічна шестерня; 6 – сполучна муфта; 7 – гребний гвинт

Двигун з'єднується з редуктором за допомогою еластичної муфти або за допомогою проміжного валу, наприклад карданного. Залежно від прийнятого компонування ПП та умов розміщення на судні приводний двигун може бути з горизонтальним або вертикальним розташуванням (рис. 2.13). Найбільш поширені схеми «а» і «б», що дозволяють виконати ПП в єдиному блоці. Розміщення за схемою "в" зазвичай використовується, коли не вдається розмістити привід через брак місця. При використанні схеми "г" доводиться встановлювати додаткову кінцеву передачу.

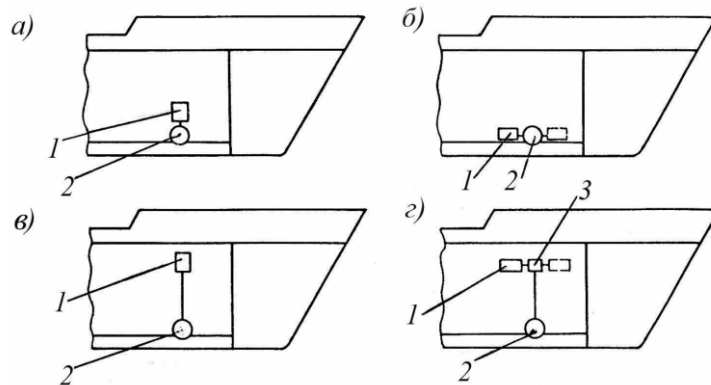


Рис. 1.13. Схеми можливого розміщення ПП та приводного двигуна: 1 – приводний двигун; 2 – канал; 3 – кінцева передача

Регулювання величини та напрямку упору ПП з ГФК проводиться зміною частоти обертання та реверсом приводного двигуна.

У деяких випадках регулювання частоти обертання та реверсування гребного гвинта виконується за допомогою спеціальних муфт та реверс-редукторів (рис. 1.14).

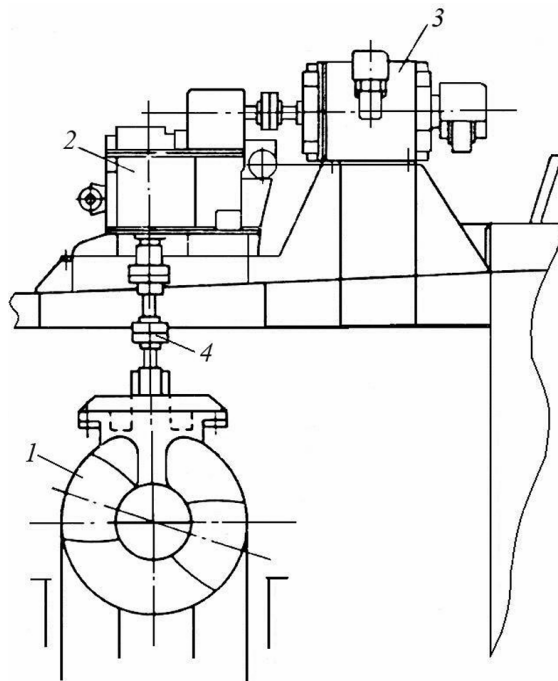


Рис. 1.14. ПП з реверс-редуктором: 1 – гребний гвинт; 2 – реверс-редуктор із гідравлічними муфтами; 3 – електродвигун; 4 – вертикальний валопровід

У цьому ПП величина упору регулюється зміною частоти обертання електродвигуна, а реверс забезпечується спеціальним реверс-редуктором з гідравлічними муфтами, які дозволяють роз'єднати двигун та редуктор. Така конструкція полегшує найважчі режими роботи електродвигуна – пуск та реверс.

При встановленні ПП з ГРК величина та напрямок упору, як зазначалося раніше, регулюються поворотом лопатей при постійній частоті обертання приводного двигуна. Поворот лопатей здійснюється за допомогою гідравлічного або електромеханічного приводу. І тут схема ПП спрощується, так як можливе використання нереверсивного приводного двигуна.

Для приводу ПП з ГФК застосовують асинхронні електродвигуни з фазним ротором і короткозамкнутим ротором. Запуск електродвигуна з фазним ротором здійснюється за кількома пусковими ступенями. Пусковий струм зазвичай становить 1,2-1,4 номінального. Останні пускові ступені використовуються для ступінчастого регулювання частоти обертання електродвигуна від 50 до 100% номінальної. Привід електродвигуна із короткозамкнутим ротором здійснюється за допомогою транзисторного перетворювача частоти [2].

Умовам роботи з ГРК відповідають асинхронні коротко замкнені електродвигуни. У цьому випадку, пусковий струм може бути обмежений введенням у ланцюг ротора на період пуску додаткових опорів. Це можливо завдяки малому пусковому моменту ГРК при встановленні лопатей у положення нульового кроку.

1.2. Показники ефективності підрулюючих пристроїв.

Розрахунковим (основним) режимом роботи ПП є швартовний, при якому ПП не переміщається, а сила його тяги (T_E) не виконує роботи. Пропульсивний коефіцієнт корисної дії, котрий застосовується як показник ефективності роботи головної енергетичної установки судна, стосовно ПП не може бути використаний.

Для оцінки ефективності ПП застосовується безрозмірний коефіцієнт, запропонований Бендеманом [1]

$$\zeta_E = \frac{T_E}{\sqrt[3]{\frac{\rho}{2} \cdot P_D^2 \cdot \pi \cdot D^2}} = \frac{T_E}{\sqrt[3]{2\rho \cdot P_D^2 \cdot F_o}} = \frac{K_E}{\pi \sqrt[3]{2K_q}} \quad (1.1)$$

де T_E – ефективний опір ПП;

P_D – потужність, підведена до імPELLера;

D, F_o – діаметр каналу ПП та площа його гідравлічного перетину відповідно;

K_E, K_q – коефіцієнт опору ПП та коефіцієнт моменту на валу імPELLера відповідно.

Для ідеального ПП коефіцієнт ефективності набуває вигляду

$$\zeta_{Ei} = \sqrt[3]{2K_c} \quad (1.2)$$

де K_c – коефіцієнт розширення (обтиснення) вихідного отвору каналу ПП.

При $K_c = 1$ (циліндричний канал)

$$\zeta_{Ei} = \sqrt[3]{2} = 1,26 \quad (1.3)$$

У деяких випадках на практиці застосовується коефіцієнт ефективності ПП, запропонований Карманом [1],

$$C = \frac{\sqrt{T_E^3}}{P_D \cdot \sqrt{\rho \cdot F_o}} = \frac{\sqrt{K_E^3}}{\sqrt{\pi^3 \cdot K_q}} \quad (1.4)$$

де використовуються прийняті у формулі (2.1) позначення. Співвідношення C та ζ_E визначається формулою

$$C = \sqrt{2\zeta_E^3} \quad (1.5)$$

Для ідеального ПП із циліндричним каналом ($K_c = 1,0$) коефіцієнт ефективності $C_i = 2,0$.

Для оцінки втрат у реальному ПП по відношенню до ідеального застосовується коефіцієнт втрат

$$\alpha = \zeta_E / \zeta_{Ei} \quad (1.6)$$

розрахунок якого виконується за формулою

$$\alpha = \frac{T_E}{\sqrt[3]{4 \cdot \rho \cdot P_D^2 \cdot F_o}} = \frac{K_E}{\pi \sqrt[3]{4K_q}} \quad (1.7)$$

Значення коефіцієнта α лежить у досить вузькому діапазоні: для ПП з гвинтами регульованого кроку $\alpha = 0,52 \div 0,58$; для ПП з гвинтами фіксованого кроку протилежного обертання $\alpha = 0,55 \div 0,62$; для ПП з крильчастими рушіями $\alpha = 0,55 \div 0,62$; для ПП з Т подібними каналами та осьовими насосами $\alpha = 0,46 \div 0,50$ [1].

Ефективність ПП нерідко оцінюють з допомогою найпростішого розмірного показника: відношення тяги ПП до підведеної до імпелера потужності, тобто T_E / P_D . Однак при цьому слід враховувати, що даний показник правомірно використовувати для порівняльної оцінки ПП при рівних значеннях площі гідравлічного перерізу (F_0) каналів.

1.3. Оцінка появи кавітації

Кавітаційні властивості гвинта залежать від низки чинників. Так, на появу кавітації впливає величина розрідження на засмоктуючій поверхні лопатей гвинта. Іншим фактором є положення стрибка статичного тиску в потоці в площині дії гвинта щодо рівня статичного (повного) тиску в непорушеній рідині перед входом в канал ПП. Зазначене є наслідком геометричних особливостей проточної частини ПП.

Сувору оцінку кавітаційних якостей гребного гвинта ПП суто теоретичним шляхом нині неможлива. Для цього використовуються результати експериментальних досліджень моделей ПП з гребними гвинтами в кавітаційній трубці. Так, встановлено [1], що при дисковому відношенні гребного гвинта більше 0,43 досить надійною умовою відсутності кавітації гвинта ПП є таке співвідношення

$$\chi' = \frac{2(p_a + \rho g h_o - p_d)}{\rho \cdot D^2 \cdot n^2} \geq 3,5 \quad (1.8)$$

де p_a – атмосферний тиск, Па;

h_o – глибина занурення осі гвинта щодо ватерлінії, м;

p_d – тиск насиченої пари води при заданій температурі, t °C, Па (рис. 1.15).

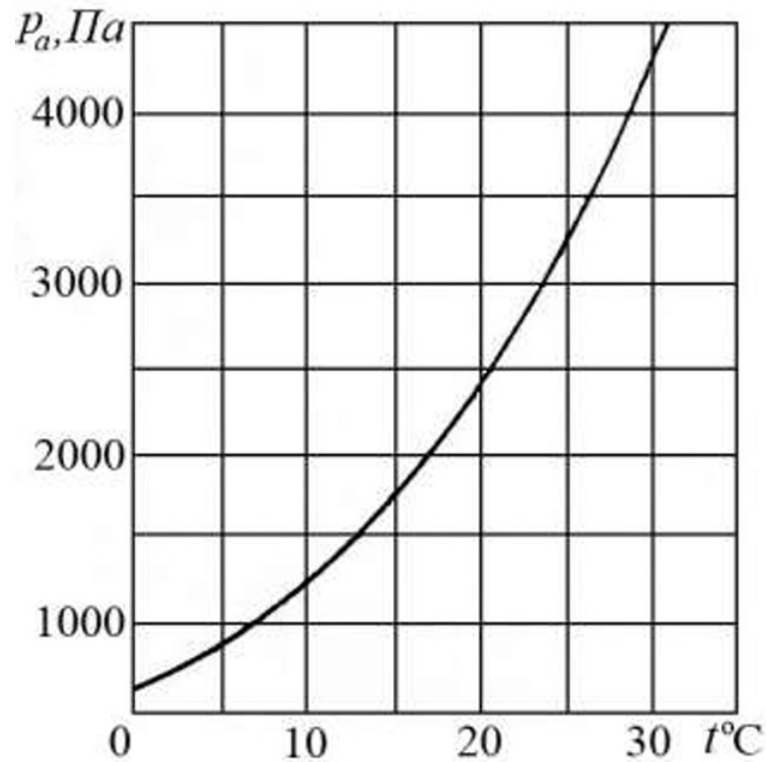


Рис. 1.15. Залежність тиску насиченої пари води від температури

З метою недопущення кавітації гребного гвинта ПП також використовується метод, представлений у [3]. У цьому випадку результати розрахунків дозволяють визначити мінімально допустиме значення відносної ширини лопаті. $\bar{b}_{\min} = b_{\min} / D$, де D – діаметр гвинта). Безпосередньо величина знаходиться за формулою

$$\bar{b}_{\min} = \frac{1.1 \cdot G}{z \cdot \chi_s} \quad (1.9)$$

де z – кількість лопатей гвинта;

χ_s – число кавітації;

G – показник, котрий визначається з графіку рис. 1.16 залежно від коефіцієнта навантаження гребного гвинта за упором (σ_T).

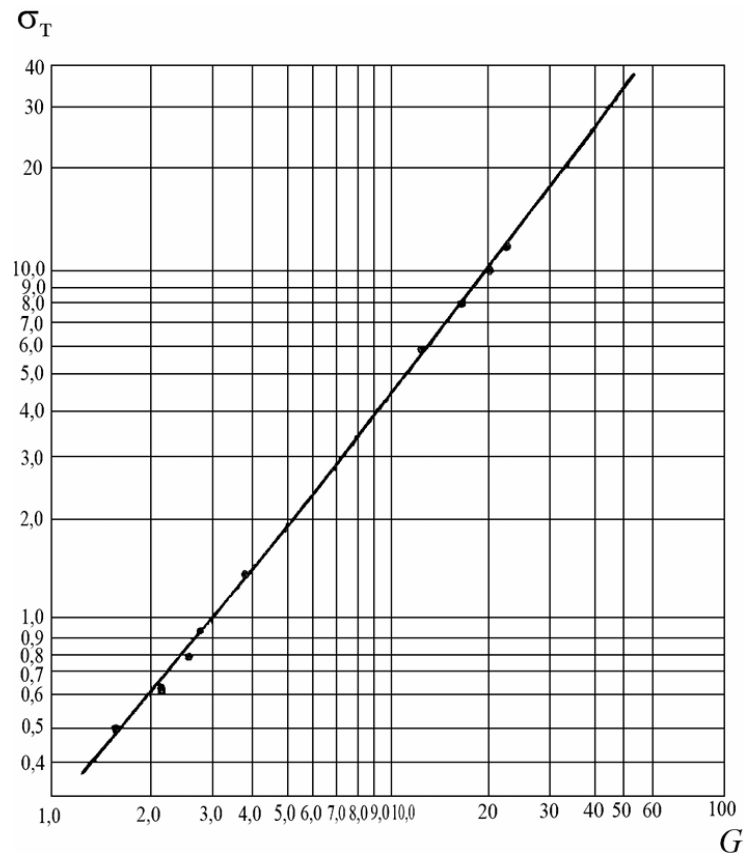


Рис. 1.16. Діаграма для визначення відносної ширини лопаті гвинта

Показник b_{min} дозволяє вибрати, за умовою $b \geq b_{min}$, розрахункову діаграму по гвинту для подальшого її використання при проектуванні ПП.

1.4. Рекомендації по визначенню основних вихідних параметрів

Підрулюючий пристрій повинен забезпечувати маневрування судна при швартовних операціях, при відході від причалу, при розвороті в умовах вітру і течії, під час руху малим ходом на акваторіях портів та в умовах обмеженого фарватеру, а також в інших випадках. Аналіз цих умов дозволив виділити два маневри, які визначають необхідний упор носового ПП (а за потреби і кормового ПП): утримання судна на місці при вітрі найбільш несприятливого спрямування; відвал судна від дебаркадера при зустрічно-навальному вітрі найбільш несприятливого напрямку. Розрахунок необхідного упору носового ПП для цих умов може бути виконаний за відомих показників по судну та впливу на нього вітру по [4].

Схеми до визначення сили упору (T_E) носового ПП дані на рис. 1.18.

На підставі цих схем розрахунок сили T_E виконується по формулам:

– при утриманні судна на місці під час вітру

$$T_E = \frac{1}{L_H - L_B} [(L_P + L_H) y_{p\max} - C_B (T_{B1} + T_{B2})] \quad (1.10)$$

– при відвалі судна необхідний упор ПП визначається за виразом

$$T_E = \frac{1}{L_H + L_a} [(L_B + L_a) \cdot T_{By} - (L_P - L_a) y_{p\max} - C_B (T_{B1} + T_{B2})] \quad (1.11)$$

На рис. 2.17 та у рівняннях (1.10), (1.11) прийняті позначення:

$y_{p\max}$ – максимальна сила тиску води на кермо, розташоване за гвинтом, що працює на передній хід у швартовному режимі;

T_{B1}, T_{B2} – упор гвинтів, що працюють на передній та задній хід відповідно;

C_B – відстань від осі гвинта до діаметральної площини;

G – центр маси судна;

T_B, T_{Bx}, T_{By} – результуюча сила тиску вітру на судно та її складові на осі «X» та «Y» відповідно;

L_P, L_B, L_H – відстань векторів сил (рис. 1.17) від центру маси судна;

L_A – відстань осі "Y" від точки повороту "A" (рис. 1.17).

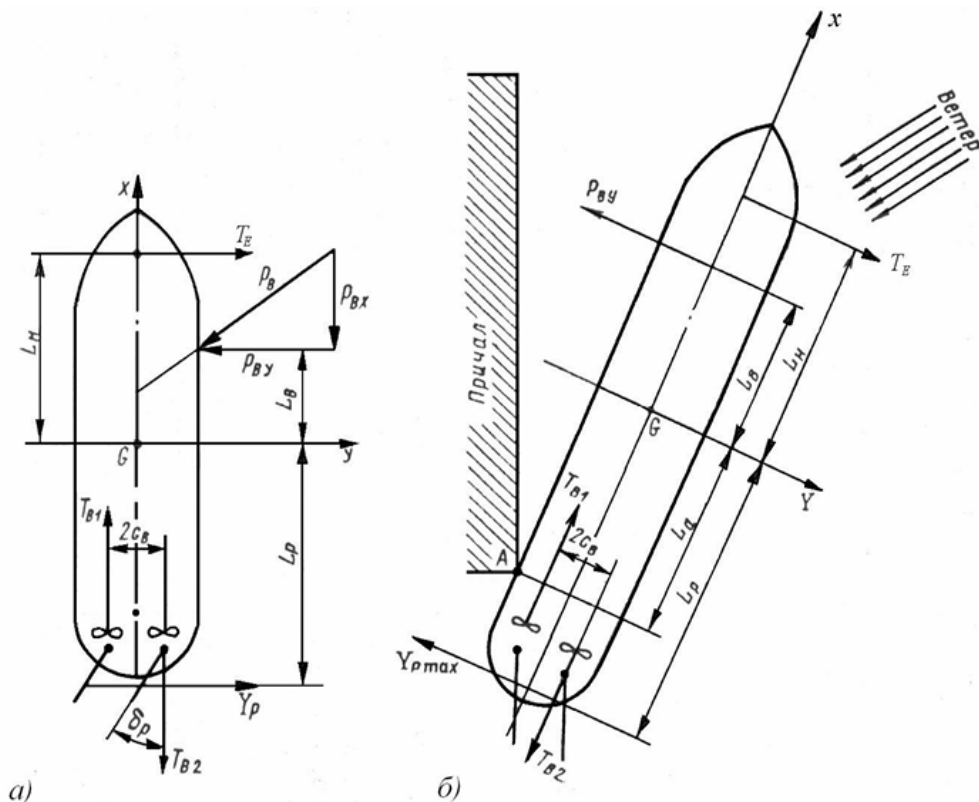


Рис. 1.17. Схема сил, що діють на судно при утриманні його на місці під час вітру (а) і при відході від причалу (б)

Упор ПП, необхідний для швартовних операцій або відходу судна від причалу під час вітру, може бути отриманий за наближеною формулою

$$T_E \approx 0,4 \cdot S_n \cdot v_a^2, \text{ Н} \quad (1.12)$$

де S_n – площа проекції надводної частини судна на діаметральну площину, м^2 ;

v_a – розрахункова швидкість вітру, м/с ;

Відома також наближена залежність для визначення упору носового ПП необхідного для розвороту судна на місці без вітру [4]. Якщо ПП розміщено в районі 1/2 шпангоуту судна, то необхідний розворот судна упор знаходиться за формулою

$$T_E \approx 0,0135 \cdot T \cdot L^3 \cdot \omega^2, \text{ Н} \quad \#1.13$$

де T , L – середня осадка та довжина судна відповідно, м ;

ω – кутова швидкість обертального судна, що встановилося, град/с .

Рекомендовані значення упору ПУ для суден встановлюються в залежності від площі бокової проекції надводної частини судна (S_n) у вигляді [1]

$$T_E \geq 40 \cdot S_n, \text{ Н} \quad \#1.14$$

а для вантажних суден – у залежності від площі підводної частини діаметральної площини (S_d) у вигляді

$$T_E \geq 40 \cdot S_d, \text{ Н} \quad \#1.15$$

Величину упору ПП судів морського плавання можна визначити з використанням даних табл. 2.1.

Таблиця 1.1 – Мініміально допустимий відносний опір ПП морських суден

Типи суден	$\bar{T}_{E1} = \frac{T_E}{S_{\pi}}$		$\bar{T}_{E2} = \frac{T_E}{S_d}$	
	Швидкість вітру, бали			
	5	6	5	6
Пасажирські	100\150	150\220	30\60	50\90
Сухогрузи	50\100	70\150	40\80	60\120

Танкери та наливні (в балласті)	30\60	50\90	30\60	50\90
Контейнеровози	70\140	100\200	50\70	50\100

У табл. 1.1 упор ПП (T_E , Н) в одному випадку віднесений до площі парусності судна (S_n , м²), а в іншому – до зануреної площі ДП (S_d , м²). Завдання на розрахунок гідродинамічних параметрів ПП завжди включає або упор ПП (T_E), або потужність, що підводиться імпеллеру (P_D). Зв'язок між цими показниками для досить добре проєктованих ПП ($\alpha \approx 0,55$) може бути представлений у вигляді

$$P_D = 44 \cdot 10^{-6} T_E^3 D \quad \#1.16$$

або

$$T_E = 8003 P_D^{0,25} D^{0,25} \quad \#1.17$$

де T_E – в ньютонах;

P_D – в кіловатах;

D – діаметр гвинта, м.

Розрахунку гідродинамічних параметрів ПП передують ряд технічних рішень, які приймаються з урахуванням особливостей геометрії корпусу судна, умов його баластування, можливостей енергетичної установки. Так, слід ретельно враховувати ширину та форму шпангоуту, а також кривизну ватерлінії в зоні розміщення ПП. Ефективність ПП в залежності від відносної довжини каналу (l_k/D) має пологий максимум у діапазоні $1,0 \leq l_k/D \leq 2,0$; при цьому слід наближатися до верхньої межі зазначеного діапазону [3].

При попередньому виборі діаметра імпелера (каналу) ПП необхідно враховувати ряд обставин, які впливають на ефективність та надійність роботи ПП: відстань від осі каналу ПП до основної площини корпусу судна та відстань від осі до ватер лінії має бути не менше діаметра ПП; навантаження ПП за потужністю, що припадає на 1 м² площі гідравлічного перерізу імпелера має знаходитися в межах від 100 до 200 кВт/м². Відповідно до останніх рекомендований діаметр (D , м) для ПП при відомій потужності (P_D , кВт) знаходиться в межах

$$P_D \leq D \leq 0,12 P_D \quad \#1.18$$

При виборі типу імпелера ПП рекомендується [1] в якості критерію використовувати коефіцієнт швидкохідності n_s . За значеннями n_s , що відповідають високим значенням насосного ККД, можна вибрати для проєктованого ПП тип імпелера. Коефіцієнт швидкохідності (n_s) для ПП з циліндричним каналом та коефіцієнтом опору каналу $\zeta_K \approx 0,2$ можна визначити за формулою

$$n_s \approx 1750 n \cdot F_o v_s \approx 4,34 \cdot 10^4 n \cdot F_o T \approx 4,75 \cdot 10^4 n \cdot F_o T E \quad \#1.19$$

де n – частота обертання, C^{-1} ;

v_s – швидкість протікання води через імпелер, м/с;

F_o – площа гідравлічного перерізу імпелера, m^2 ;

T, T_E – упор імпелера та ПП відповідно, Н.

Кожному з наведених у табл. 1.2 діапазонів коефіцієнта швидкохідності (n_s) відповідає деякий, оптимальний по насосному ККД, тип імпелера.

При застосуванні гребного гвинта суттєвий вплив на ефективність ПП надає відносний діаметр маточини (гондоли); що менше цей діаметр, то вище ефективність ПП. Бажано, щоб відносний діаметр маточини ($d_{ст} / D$) не перевищував 0,30 [1].

Таблиця 1.2 – Тип імпелера і відповідні ефективним режимам його роботи значення n_s

Тип імпелера ПП		n_s
Відцентрові насоси	Тихохідні	40 ÷ 80
	Нормальні	80 ÷ 140
	Швидкохідні	140 ÷ 300
Діагональні насоси		300 ÷ 600
Осьові насоси, гребні гвинти, крильчасті рушії		600 ÷ 1800

2. ПАРАМЕТРИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПІДРУЛЮЮЧИМИ СИСТЕМАМИ ТА ІНТЕГРАЦІЯ СИЛОВИХ КОМПОНЕНТІВ

2.1 Налаштування системи управління та параметрів підрулюючого пристрою

Починаючи з середини 1950-х років, гвинти з регульованим кроком набули популярності, перейшовши від незначної частки на ринку до нинішнього значного ринкового впливу. На сьогодні гвинти з регульованим кроком займають близько 35% ринку в порівнянні з системами з фіксованим кроком і найбільш популярні серед поромів, вантажних суден, буксирів і траулерів.

Хоча гвинт із регульованим кроком має більшу механічну складність порівняно з фіксованим варіантом, він має кілька важливих переваг. Одна з таких переваг — це керованість, де точне управління тягою можна забезпечити через зміну кроку лопатей, особливо коли використовується обладнання з постійною швидкістю, що дозволяє змінювати робочі режими без необхідності прискорювати чи сповільнювати двигун. Крім того, точне управління тягою є особливо важливим у певних експлуатаційних ситуаціях, наприклад, під час динамічного позиціонування або при частих швартувальних маневрах, як на поромках коротких маршрутів.

Ще одна додаткова особливість основного принципу керованого кроку полягає в тому, що в деяких випадках конструкцію втулки гвинта можна модифікувати для пристосування до флюгування лопатей гвинта. У цьому контексті флюгування означає таке положення лопатей, коли вони вирівняні вздовж корпусу судна, що зменшує опір руху при вимкненому обертанні. Такі рішення застосовуються на двобічних поромках або на невеликих військових кораблях, особливо тих, що працюють на широкому діапазоні швидкостей і можуть використовувати гібридні силові установки. Наприклад, судно може мати три гвинти, де два бічні гвинти використовуються при крейсерському режимі, а центральний не обертається і флюгується для мінімального опору. Коли потрібен швидкісний режим, всі три гвинти працюють з налаштованим кроком для досягнення максимальної швидкості.

Варто лише зазначити, що кожен виробник має свою унікальну конструкцію механізму зміни кроку, і ці конструкції можна поділити на дві основні групи: з внутрішньою та зовнішньою гідравлічною системою. На рис. 3.1 показано ці основні типи схематично.

Маточина гвинта з регульованим кроком, крім розміщення механізму зміни кроку лопатей, має бути достатньо міцною, щоб витримувати силові навантаження, що передаються від лопатей. Тому, як правило, маточини таких гвинтів мають більший діаметр, ніж у гвинтів з фіксованим кроком. Зазвичай, діаметр маточини гвинта з регульованим кроком становить від 0,24 до 0,32

діаметра гвинта, тоді як у гвинтів з фіксованим кроком цей показник зазвичай становить від $0,16$ до $0,25D$. Однак для деяких застосувань, наприклад для льодових класів суден, діаметр маточини може збільшуватися до $0,4$ або навіть $0,5D$. Хоча великі діаметри маточини можуть створювати певні гідродинамічні проблеми, зазвичай пов'язані з кавітацією, у більшості випадків ці проблеми можуть бути вирішені за допомогою відомих проектних рішень.

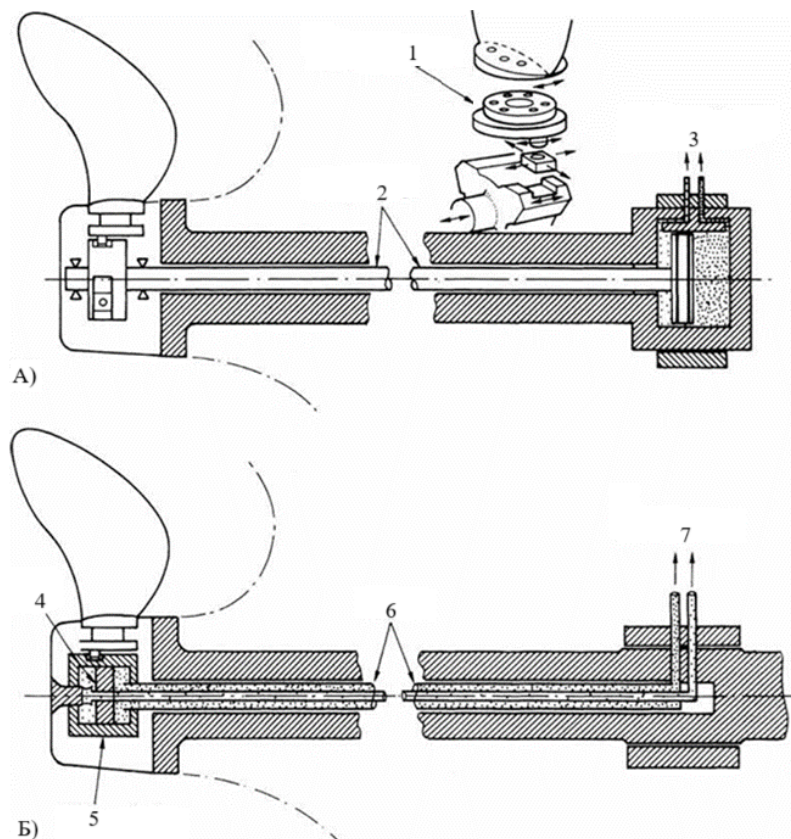


Рис. 2.1 – Схематичні системи керування гвинта з регульованим кроком: (А) система з тягово-штовхальною штангою: 1 – типове кріплення лопаті, 2 – тягово-штовхальний шток, 3 – до системи подачі та розподілу мастила. (Б) система із ступінчастим поршнем: 4 – нерухомий поршень, 5 – рухомий циліндр, 6 – маслопроводи, 7 – до системи подачі та розподілу мастила.

Далі детально розглянуто аспекти інтеграції системи керування підрулюючою установкою і налаштування параметрів її функціонування. Для забезпечення надійності роботи та стабільності маневрування необхідно забезпечити інтеграцію елементів системи керування та оптимізувати алгоритми її роботи. Представлено опис системи керування установкою, а також аналіз режимів її роботи, які дозволяють адаптувати функціонування підрулюючої системи до різних умов експлуатації.

Розглянута система являє собою контролер для управління підрулюючим пристроєм під час швартування чи відходу судна від причалу. Його основна функція полягає в забезпеченні точного управління кутом лопатей підрулювача шляхом обробки команд керування та даних зворотного зв'язку. Контролер підтримує автоматизоване управління підрулюючим пристроєм, оптимізоване завдяки застосуванню сучасних алгоритмів управління.

Таблиця 2.1 – Специфікація головної панелі керування (КТЕ – TMU).

Напруга	24 V DC	
Струм	1 A	
Температура	0 C – 70 C	
Контролер	16 бітний мікро-контролер	
Дисплей	LED індикатор стану	
Метод комунікації	Внутрішній	2 канали CAN
	Зовнішній	2 канали CAN 1 послідовний канал (RS-422 чи RS-485 вибірково)

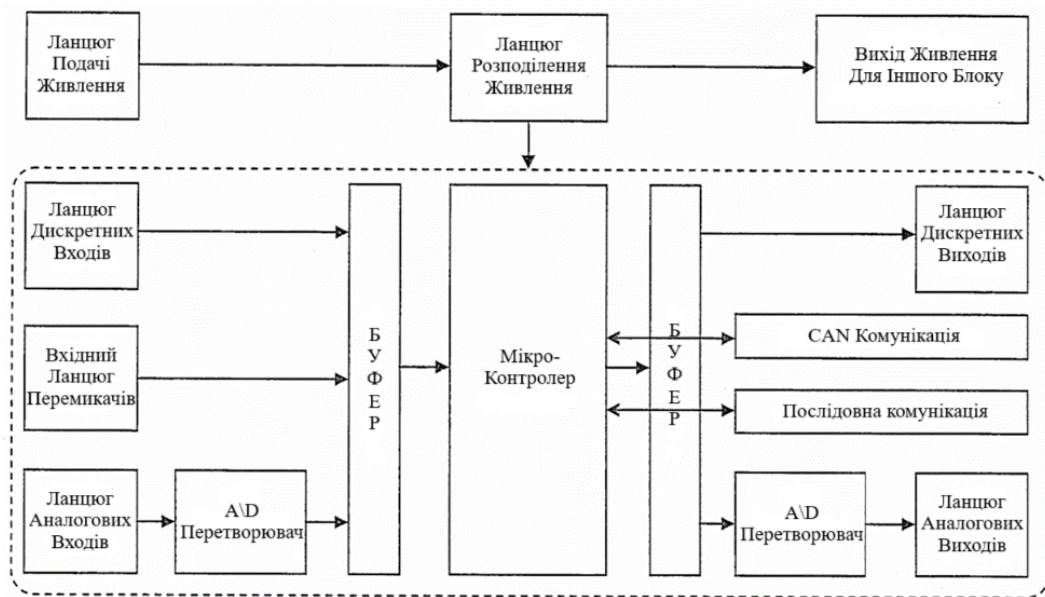


Рис. 2.2 – Функціональна блок-схема головної панелі керування (КТЕ – TMU).

- 1) Ланцюг подачі живлення: Цей компонент забезпечує енергопостачання для всіх функціональних модулів системи з ГРЩ.
- 2) Ланцюг розподілення живлення: Розподіляє подане живлення між різними елементами системи. Він також передає живлення на інші станції управління через вихід.
- 3) Ланцюг дискретних входів: Приймає цифрові сигнали (включення/вимкнення) від зовнішніх пристроїв.

- 4) Вхідний ланцюг перемикачів: Приймає сигнали від перемикачів керування.
- 5) Ланцюг аналогових входів: Використовується для обробки аналогових сигналів (наприклад, сигналів, що поступають від датчиків).
- 6) A/D перетворювач (аналого-цифровий перетворювач): Перетворює аналогові сигнали в цифровий формат для подальшої обробки мікроконтролером.
- 7) Буфер : Служить проміжною ланкою між вхідними ланцюгами та мікроконтролером для тимчасового зберігання і передачі даних.
- 8) Мікроконтролер: Центральний процесорний елемент системи, що керує всіма компонентами, обробляє вхідні сигнали, виконує алгоритми управління та генерує вихідні сигнали.
- 9) Ланцюг дискретних виходів: Передає цифрові сигнали керування на виконавчі пристрої.
- 10) Ланцюг аналогових виходів: Забезпечує передачу аналогових сигналів керування на виконавчі пристрої.
- 11) CAN-комунікація: Взаємодіє з іншими блоками системи через шину CAN, що є стандартом для передачі даних у системах автоматики.
- 12) Послідовна комунікація: Використовується для обміну даними з іншими пристроями через послідовні інтерфейси.

Таблиця 2.2 – Специфікація вхідних сигналів.

Аналогові входи (3)	1 сигнал зворотного зв'язку для купа лопатей
	1 сигнал струму навантаження електродвигуна
	1 командний сигнал зовнішньої системи (наприклад ДП)
Дискретні входи (30)	6 сигналів стану
	12 аварійних сигналів
	6 сигналів контролю
	6 запасних входів

Таблиця 2.3 – Специфікація вихідних сигналів.

Аналогові виходи (2)	2 командні сигнали (вибірково mA або Вольти)
	2 сигнали зворотного зв'язку (вибірково mA або Вольти)
Дискретні виходи (20)	2 сигнали для керування СК, free contact, 10A \ 250V AC
	7 командних сигналів, free contact, 2A \ 30V DC
	5 сигналів стану, free contact, 2A \ 30V DC
	2 запасні виходи, free contact, 2A \ 30V DC

	2 сигнали збою джерела живлення AC чи DC, free contact, 2A \ 30V DC
	2 сигнали несправності установки чи живлення, збій джерела free contact, 2A \ 30V DC

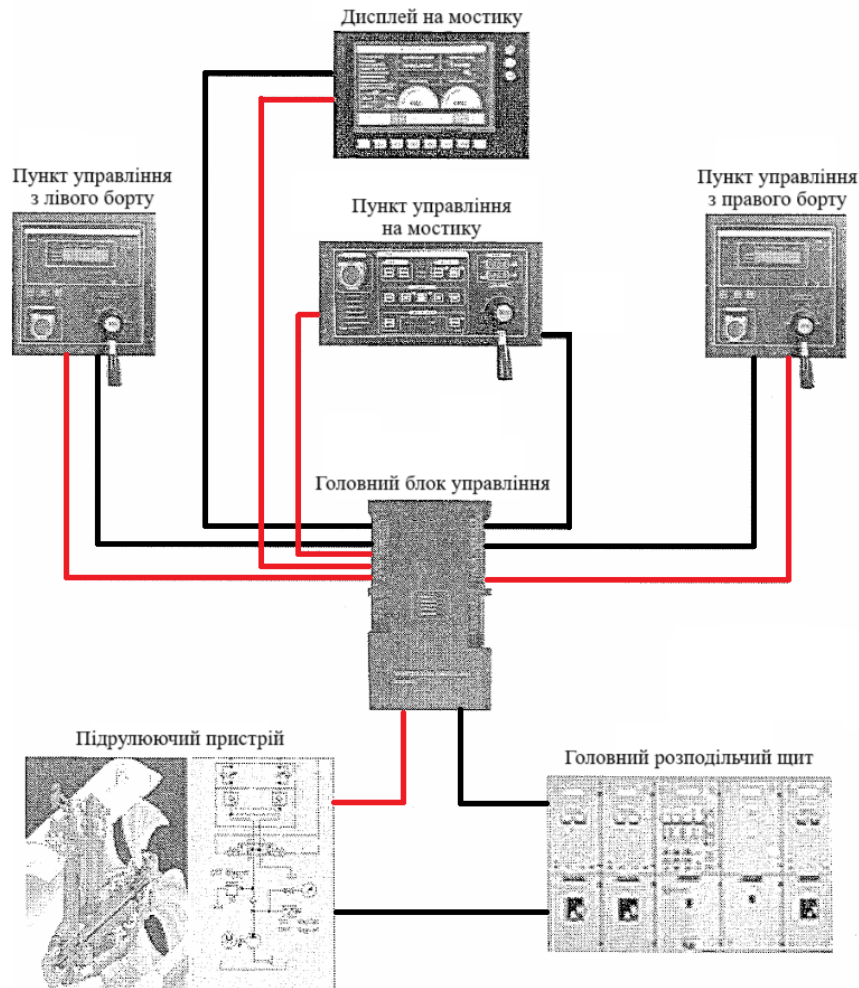


Рис. 2.3 – Структура системи керування кутом атаки підруючого пристрою
Схему підключення системи керування ПП можна знайти у Додатку А.

2.1.1. Автоматичне керування кутом лопатей (follow-up mode)

Основною функцією цієї системи є керування кутом лопатей за допомогою виставленого (командного) значення. Тобто, ця система автоматично контролює кут лопаті за допомогою уставки, коли використовується алгоритм follow-up mode. Якщо значення зворотного зв'язку стає близьким до значення уставки, ця система не передає сигнал керування соленоїдним клапанам на постійній основі, проте імпульсний сигнал із постійним інтервалом часу, і значення зворотного зв'язку може швидко досягти цільового значення не перевищуючи значення команди. Користувачі повинні заздалегідь встановити параметри за допомогою важеля керування, а також необхідно правильно встановити параметри відповідно до характеристик кожного судна [5].

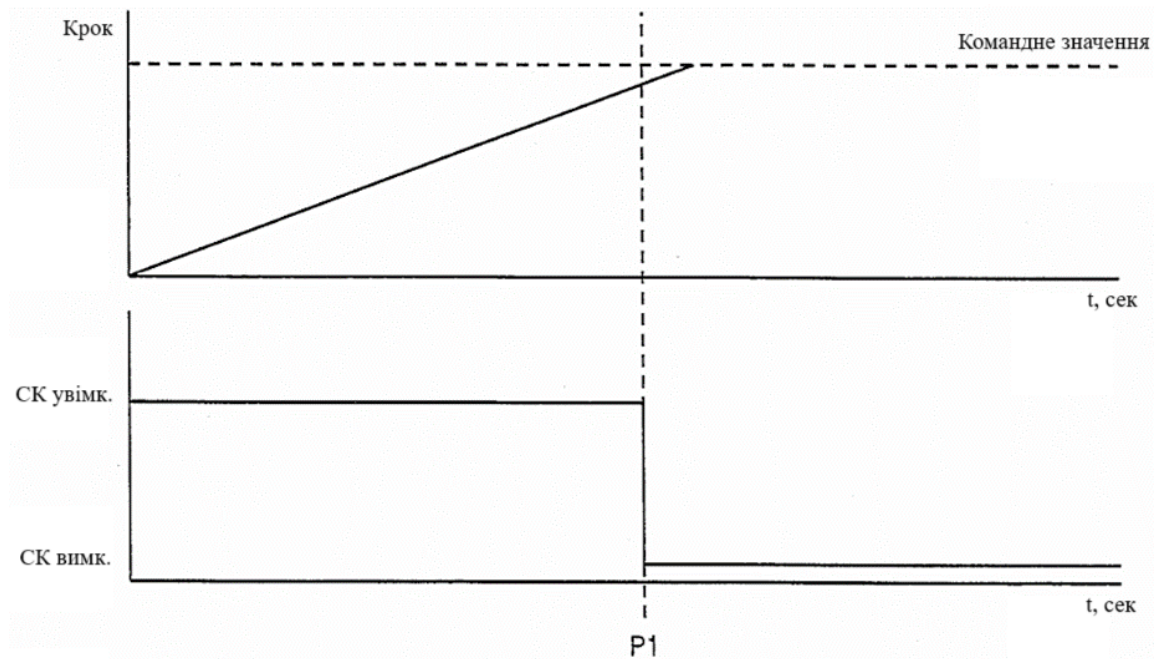


Рис. 2.4 – Графік керування кроком лопатей гвинта та керуючим соленоїдним клапаном.

P1: зона активації алгоритму "Follow up" (= Командне значення – допускове відхилення)

2.1.2. Ручне керування (Non-follow up mode)

У цій системі кут лопаті можна в основному контролювати за допомогою розпізнавання кута, який користувачі вводять до пам'яті ЦП, при цьому автоматичне керування за допомогою алгоритму follow up mode і інші дії не потрібні. В основному ручний режим застосовується при проблемах з процесором або пов'язаними компонентами. Система передбачає два способи перемикавання в ручний режим (non-follow up mode). Перший, користувачі повинні натиснути кнопку "Non-Follow" на панелі керування, або другий, режим "Non-Follow" змінюється автоматично, коли виникає проблема з ЦП. У ручному режимі всі керуючі сигнали, що передаються від плати ЦП, блокуються, і користувачі можуть керувати ними безпосередньо за допомогою кнопки під важелем керування.

2.1.3. Автоматичний контроль навантаження (Auto Load Control)

Це функція створена для захисту від перевантаження електродвигуна ПП. Його можна контролювати автоматично за допомогою обмеження максимально допустимого струму, пропорційного посилення, інтегрального посилення. Коли струм збільшується і досягає обмеження при роботі електромотора, крок лопатей автоматично зменшується до фіксованого кута.

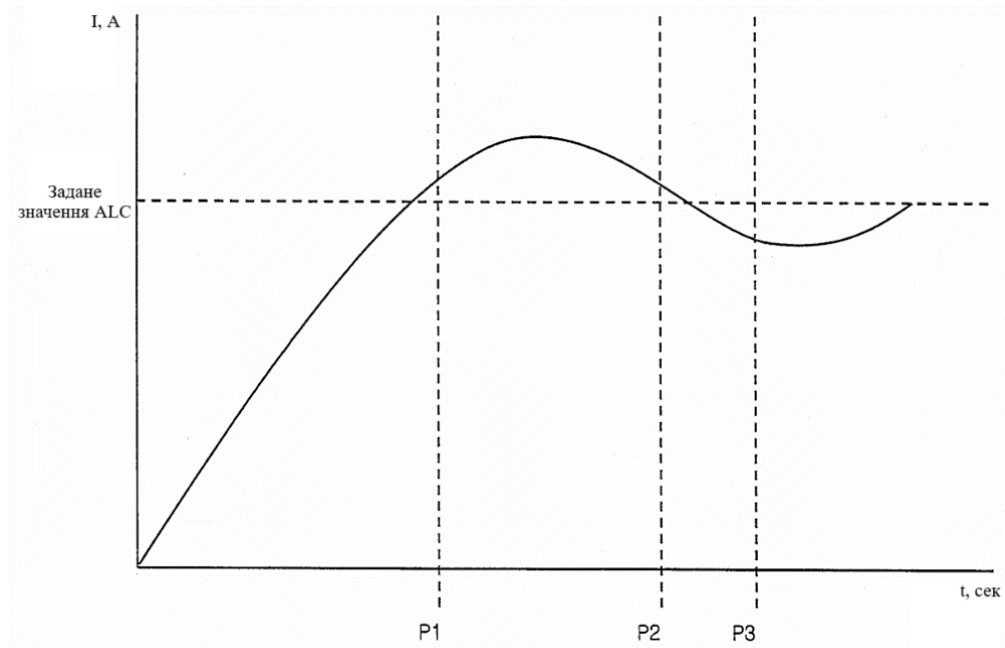


Рис. 2.5 – Графік впливу кроку лопатей гвинта на навантаження електродвигуна

P1: Зниження кроку лопатей

P2: Крок лопатей досягнув заданого значення

P3: Підвищення кроку лопатей

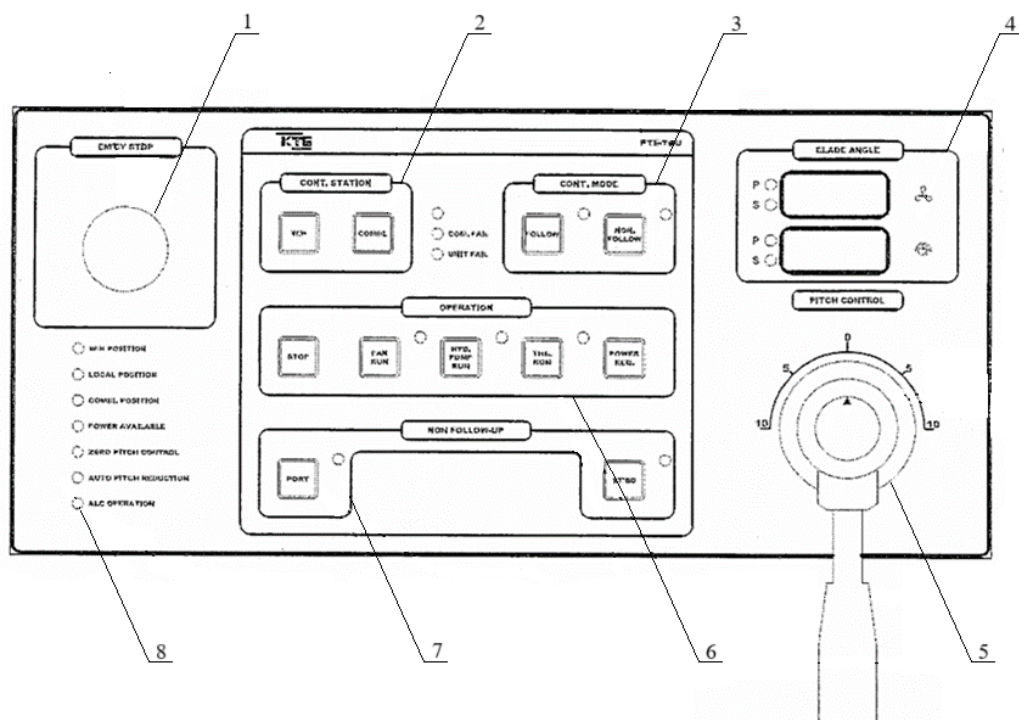


Рис. 2.6 – Зовнішній вигляд панелі керування (КТЕ – TOU): 1 – вимикач аварійної зупинки, 2 – перемикач вибору пункту управління, 3 – перемикач режимів керування, 4 – індикатор кута лопатей та сигналу керування, 5 – важіль керування, 6 – перемикачі управління, 7 – перемикач в режимі “Non-Follow up”, 8 – індикатори стану.

2.1.4. Налаштування командних сигналів

Ця система використовує 3 командних сигнали, які передаються з мосту, крил правого та лівого борту. Кожне вхідне значення передається від потенціометра, розташованого всередині кожного пункту керування, і його можна перетворити на цифрове значення за допомогою АЦП (аналого-цифровий перетворювач).

Аналого-цифровий перетворювач у цій системі має 16-бітну розрядність, при якому (-10V ~ +10V) діапазон напруги відповідає (-32768 ~ 32767) цифрового значення. Але можуть бути деякі відмінності через положення потенціометра або значення змінного резистора схеми.

Дані, які слід встановити заздалегідь, пов'язані з введенням команди: розташування важеля керування (потенціометр), напруга, значення аналого-цифрового перетворення та кут наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Допустимий діапазон керуючого сигналу відповідно до значень зворотного зв'язку.

№	Кут важеля керування	A/D Перетворювач	Кут лопатей
1	Позиція PORT 25	Близько -32768	Port 25 градусів
2	Позиція PORT 20	Близько -26214	Port 20 градусів
3	Позиція PORT 15	Близько -19661	Port 15 градусів
4	Позиція PORT 10	Близько -13108	Port 10 градусів
5	Позиція PORT 5	Близько -6551	Port 5 градусів
6	Позиція 0	Близько 0	0 градусів
7	Позиція STBD 5	Близько 6551	STBD 5 градусів
8	Позиція STBD 10	Близько 13108	STBD 10 градусів
9	Позиція STBD 15	Близько 19661	STBD 15 градусів
10	Позиція STBD 20	Близько 26214	STBD 20 градусів
11	Позиція STBD 25	Близько 32768	STBD 25 градусів

2.1.5. Налаштування параметрів

У цій системі параметри, котрі виводяться на дисплейну панель керуючого блоку, зберігаються у внутрішній пам'яті та завантажуються під час початкової подачі живлення. Користувачі можуть змінювати та підтверджувати параметри на екрані конфігурації параметрів.

Для детального опису сигналів та параметрів у системі дивіться Додаток Б.

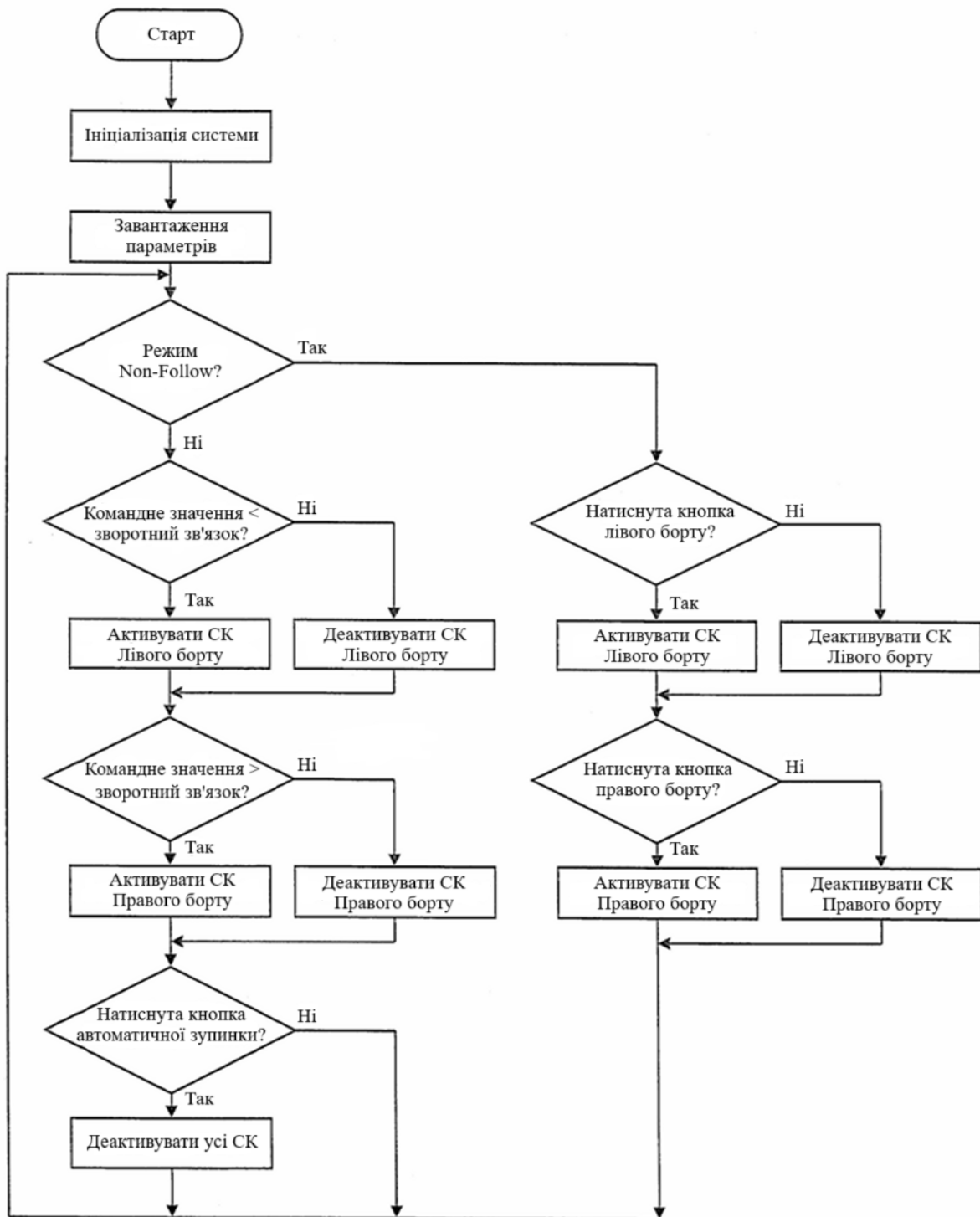


Рис. 2.7 – Блок схема алгоритму керування системою регулювання кроку гвинта.

Блок-схема ілюструє алгоритм роботи системи керування кутом лопатей гвинта підрулюючого пристрою на судні. Опис її функціонування можна розбити на такі кроки:

1) Ініціалізація системи

Першим етапом є запуск системи, під час якого вона ініціалізується та завантажує початкові параметри для роботи.

2) Перевірка режиму роботи "Non-Follow"

Визначається, чи працює система у режимі "Non-Follow".

- Якщо так, система переходить до подальших умов для керування.
- Якщо ні, то система працює в режимі "Follow up".

3) Експлуатація в режимі "Non-Follow"

В цьому режимі штурман вручну керує підрулюючим пристроєм, за допомогою панелі керування, обираючи кут та напрямок нагнітання (лівий чи правий борт) лопатей гвинта, а також активуючи відповідний сервопривід кутового регулювання соленоїдним клапаном.

4) Експлуатація в режимі "Follow up"

В цьому режимі керування відбувається автоматично, шляхом порівняння командного значення, виставленого сигналу зворотного зв'язку, котрий залежить безпосередньо від кута лопатей.

5) Якщо натиснута кнопка автоматичної зупинки, соленоїдний клапан деактивуються.

6) Завершення циклу

Після виконання усіх перевірок система повертається до початку алгоритму.

2.2 Вибір схеми пуску електродвигуна

Для вибору схеми підключення електродвигуна в умовах використання гвинта регульованого кроку необхідно враховувати специфіку нашої системи. Оскільки регульований крок гвинта забезпечує оптимальне навантаження на двигун під час його роботи, головною вимогою в цьому випадку є забезпечення плавного пуску електродвигуна. Це дозволить уникнути різких механічних навантажень, знизити знос компонентів і забезпечити стабільну роботу системи в цілому. Таким чином, ми зосередимо увагу на методах, які гарантують м'який запуск, зберігаючи ефективність і надійність усього механізму.

Коли індукційний двигун підключається безпосередньо до трифазної мережі змінного струму, спостерігається дуже великий пусковий струм статора, який у 5-7 разів перевищує номінальний струм. Це відбувається через максимальну швидкість перетинання магнітного потоку ($s = 100\%$) в роторі, що призводить до виникнення великих індукованих струмів ротора.

Відповідний коефіцієнт потужності мережі під час пуску дуже низький, зазвичай з відставанням 0,2, який зростає приблизно до 0,5 при холостому ході і близько 0,85 при повному навантаженні.

Цей пусковий струм зменшується зі збільшенням швидкості обертання двигуна до номінальної.

Робота двигуна при малих навантаженнях і низькому коефіцієнті потужності є неефективною, оскільки струм мережі відносно високий, що призводить до значних мідних втрат. Єдиний спосіб підвищити коефіцієнт потужності двигуна при малих навантаженнях – зменшити напругу живлення. Це можна досягти за допомогою електронного регулятора напруги, який називається плавним пускачем, який може підлаштовувати напругу живлення під умови пуску і навантаження. Такий регулятор спрямований на підтримання максимально високого коефіцієнта потужності для зменшення струму мережі та пускових струмів.

Два методи зменшення пускової напруги шляхом перемикання називаються пуском зі з'єднанням обмоток статора "зірка-трикутник" та пуском за допомогою автотрансформатора. Однак також використовується електронний варіант "плавного" пуску.

Стартери за схемою "зірка-трикутник"

Для початку розберемося, що таке "зірка", а що - "трикутник", і чим вони відрізняються один від одного. Зірка і трикутник є найпоширенішими і застосовуваними на практиці схемами підключення трифазних електродвигунів. При підключенні трифазного електродвигуна "зіркою" (див. Рис. 3.8 а) кінці обмоток статора з'єднуються разом, з'єднання відбувається в одній точці, яка називається нульовою точкою або нейтраллю. Трифазна напруга подається на початок обмоток.

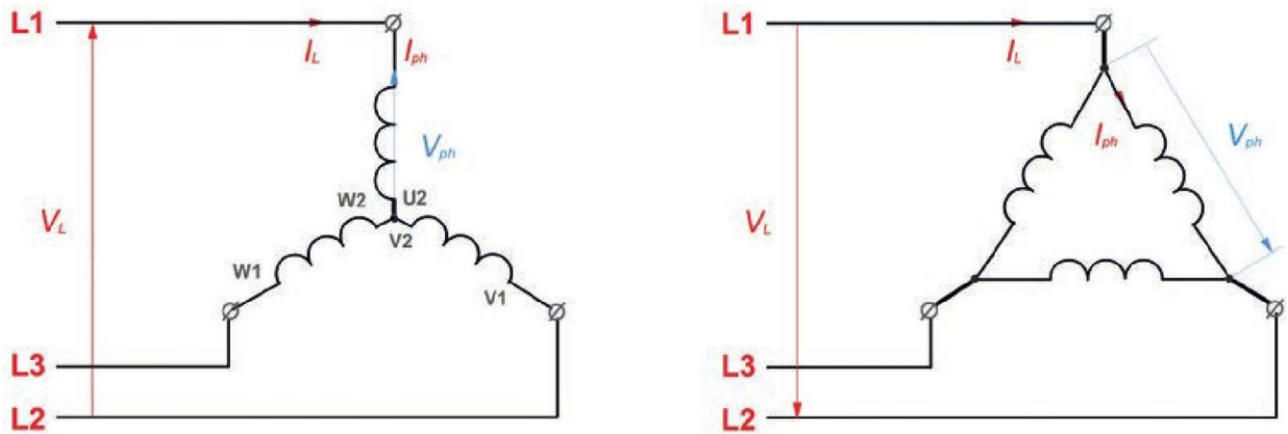


Рис. 2.8 – Підключення схемою: а) “зірка”, б) “трикутник”

При з'єднанні обмоток статора "зіркою", співвідношення між лінійною і фазною напругами виражається формулою:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \cdot \sqrt{3} \quad (2.1)$$

де

$U_{\text{л}}$ – напруга між двома фазами;

$U_{\text{ф}}$ – напруга між фазою та нейтральним проводом;

Значення лінійного та фазного струмів співпадають, тобто $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

Виходить, що з'єднуючи обмотки "зіркою", ми зменшуємо лінійний струм, чого спочатку і добивалися. Але є і зворотний бік цієї схеми: як бачимо з формули (2.1), пусковий момент двигуна прямо пропорційний фазній напрузі:

$$M_n = \frac{m \cdot U^2 \cdot r_2 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot ((r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2)} \quad (2.2)$$

Де

U – фазна напруга обмотки статора;

r_1 – активний опір фази обмотки статора

r_2 – наведене значення активного опору фази обмотки ротора;

x_1 – індуктивний опір фази обмотки статора;

x_2 – наведене значення індуктивного опору фази обмотки нерухомого ротора;

m – кількість фаз;

p – число пар полюсів.

Відповідно, при пуску двигуна за схемою «зірка», фазна напруга у разів менша за лінійну, а за схемою «трикутник» — вони рівні. Звідси випливає, що момент при пуску за схемою "зірка" в 3 рази менше, а значить, запускаючи двигун за цією схемою, ми не зможемо досягти виходу двигуна на номінальну потужність. Вирішуючи одну проблему виникає друга, не менш гостра, ніж підвищені пускові струми. Але єдине рішення все-таки є: необхідно скомбінувати схеми підключення двигуна так, щоб при пуску потужного двигуна не було великих струмів у мережі, а після того, як двигун вийде на необхідні для його роботи оберти, відбувається перемикання на схему трикутник, що дозволяє працювати зі 100% навантаженням без будь-яких проблем.

Стартери "зірка-трикутник" для невеликих двигунів можуть керуватися за допомогою ручного перемикача. Для потужних двигунів фазні обмотки автоматично перемикаються за допомогою контакторів, керованих реле часу.

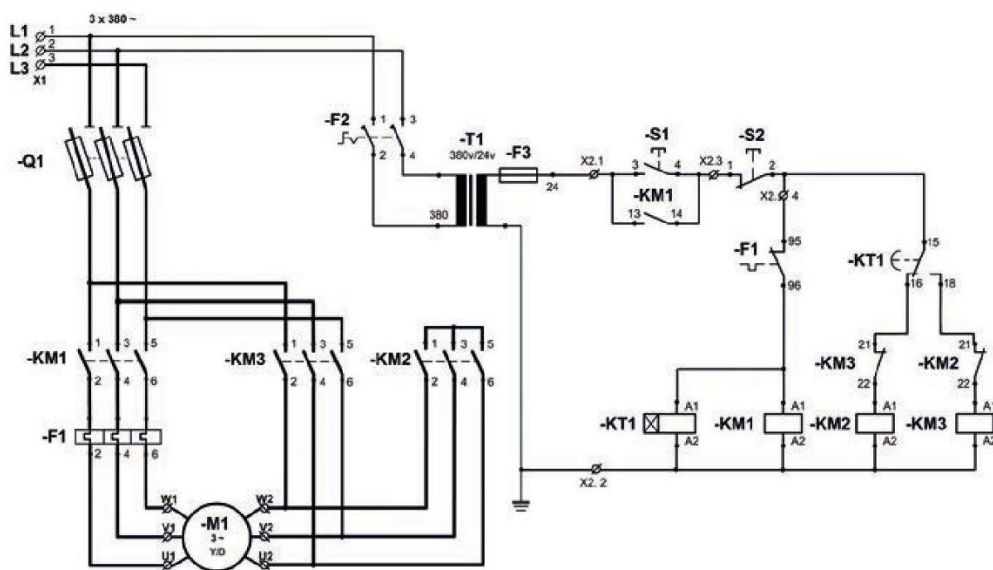


Рис. 2.9 – Типова схема стартера електродвигуна, на основі "зірка-трикутник"

Послідовність перемикання для цієї схеми пускача:

Силовa схема:

- 1) Ручне замикання плавкого запобіжника-ізолятора - Q1
- 2) Замикання контактора -KM1: нейтральний контактор

- 3) Замикання -KM2: зіркова обмотка, двигун запускається в зірковій конфігурації обмотки
- 4) Відкриття -KM2: зіркове з'єднання розривається
- 5) Замикання -KM3: дельта обмотка, двигун перемикається на дельтову конфігурацію обмотки і повну робочу швидкість
- 6) Контактори -KM1 і -KM3 відпадають, двигун зупиняється.

Схема керування:

- 1) Напруга схеми керування доступна (наприклад, 24 В від трансформатора керування) після замикання автоматичного вимикача -F2
- 2) Натискання кнопки пуску -S1 для замикання -KM1; -KM1 утримується; -KM2 збуджується; блокування -KM3 (-KM2 нормально замкнуті контакти 21-22 розімкнуті)
- 3) Реле часу -KT1 збуджується і починає відлік заданої часової затримки
- 4) Закінчився час затримки реле часу -KT1, -KM2 розмикається через -KT1 (нормально замкнуті контакти 15-16 розімкнуті); замикаються блокувальні контакти -KM2 21-22.
- 5) Замикається -KM3 через -KT1 (нормально розімкнуті контакти 15-18 замикаються); розмикаються блокувальні контакти -KM3 21-22.
- 6) Зупинка за допомогою кнопки S2 або спрацювання захисту струмом перевантаження F1: розмикаються -KM1 і -KM3; замикаються блокувальні контакти -KM3 21-22.

Переваги стартерів за схемою "зірка-трикутник":

- 1) Недорогий: Це економічно ефективне рішення для запуску електродвигунів.
- 2) Не виділяє зайвого тепла: Відсутність додаткових втрат на нагрівання підвищує загальну ефективність системи.
- 3) Зменшує пусковий струм: Пусковий струм знижується приблизно в 3 рази порівняно з прямим пуском, що зменшує навантаження на мережу.
- 4) Високий пусковий момент на одиницю струму: Це означає, що для досягнення певного пускового моменту потрібен менший струм.

Недоліки стартерів за схемою "зірка-трикутник":

- 1) Зменшений пусковий момент: Пусковий момент зменшується приблизно в 3 рази порівняно з номінальним моментом, що може бути критичним для деяких навантажень.

- 2) Використання спеціальних двигунів: Для роботи з таким пускачем потрібні електродвигуни зі спеціальними обмотками.

Застосування стартерів за схемою "зірка-трикутник":

Як впливає з переваг і недоліків, стартер за схемою "зірка-трикутник" найкраще підходить для застосування, де потрібен низький пусковий струм і мінімальне навантаження на мережу.

Однак, вони категорично не підходять для застосування, де потрібен високий пусковий момент.

Якщо двигун сильно навантажений, може не вистачити пускового моменту, щоб розігнати його до робочих оборотів до переходу в дельтову схему.

Стартери на основі автотрансформатора

Автотрансформатор – це тип трансформатора, в якому первинна і вторинна обмотки мають спільні витки. Його основною особливістю є те, що він дозволяє регулювати напругу, що подається на електродвигун, поступово збільшуючи її до номінальної. Цей процес значно зменшує пусковий струм. Така схема дешевша та менша за вагою, ніж еквівалентний трансформатор з повною обмоткою, і працює тільки під час початкового пускового періоду.

У морській галузі автотрансформаторний пуск застосовується для керування судовими двигунами і підрулюючими пристроями, де необхідно знизити навантаження на електромережу під час запуску великих агрегатів.

Принцип роботи автотрансформатора в схемі плавного пуску полягає в наступному:

1. На початку пуску на обмотку електродвигуна подається напруга, знижена через автотрансформатор, зазвичай до 50-80% від номінальної.
2. Завдяки цьому зменшується пусковий струм, і двигун починає обертатися плавно, без різкого стрибка струму.
3. Коли двигун досягає необхідних обертів, автотрансформатор автоматично або вручну відключається, і двигун підключається безпосередньо до повної номінальної напруги.

Ця схема пуску дозволяє зменшити пусковий струм приблизно у 2-3 рази порівняно з пуском при повній напрузі.

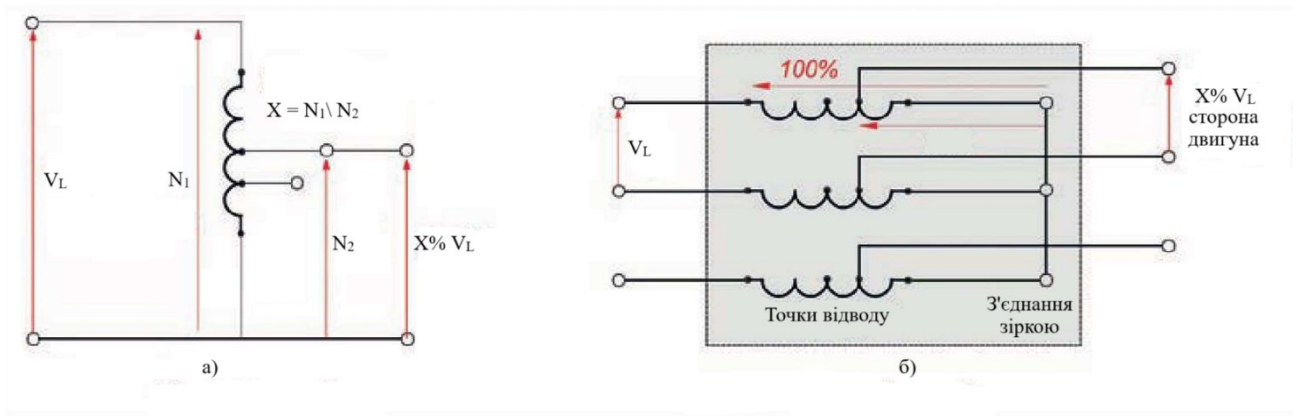


Рис. 2.10 Схема підключень автотрансформатора

Рисунок 2.10 показує, що мережева напруга підключена через всю обмотку, і двигун підключений до зниженої напруги трансформатора. На трансформаторі зазвичай є кілька відводів, що дозволяють отримувати вихідну напругу, яка становить від 50% до 80% від основної мережевої напруги. Наприклад, 60% відвід на автотрансформаторі, підключеному до 440 В, забезпечить вихідну напругу 60% від 440 В, або 264 В.

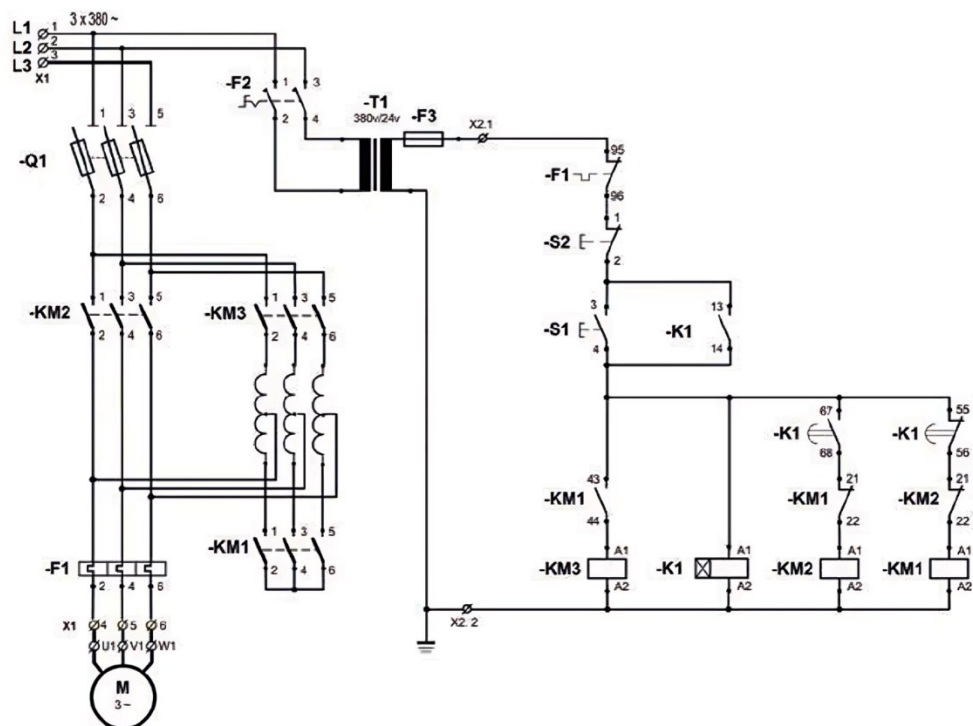


Рис. 2.11 – Типова схема стартера електродвигуна, на основі автотрансформатора

Послідовність перемикачів для цього стартера наступна:

Силовa схема:

- 1) Ручне замикання запобіжників – Q1.
- 2) Замикання -KM1: з'єднання трансформатора зіркою.
- 3) Замикання -KM3: живлення двигуна через трансформатор, двигун запускається.
- 4) Відкриття -KM1: зіркове з'єднання розмикається,
- 5) Замикання -KM2: пряме живлення двигуна (зверніть увагу на електричне блокування між KM1 і KM2).
- 6) Відкриття -KM2: двигун зупиняється.

Схема керування:

- 1) Ручне замикання автоматичного вимикача (MCB) -F2; керуюча напруга доступна (наприклад, 24 В від -T1).
- 2) Натискання кнопки пуску S1 для активації -KM1, яка утримується за допомогою -KM1/13-14.
- 3) Активація керуючого реле -K1 з верхньою пневматичною затримкою часу.
- 4) Активація -KM3 через замкнуті контакти -KM1/43-44.
- 5) Блокування -KM2 через -KM1/21-22.
- 6) Деактивація -KM1 через відкриття -K1/55-56 (після закінчення часу затримки).
- 7) Деактивація -KM3 через відкриття -KM1/43-44.
- 8) Закриття блокуючого контакту -KM1/21-22.
- 9) Активація -KM2 через замкнуті контакти K1/67-68.
- 10) Блокування -KM1 через -KM2/21-22.
- 11) Деактивація -KM2 через кнопку зупинки –S2 або аварійний вимикач OCR (-F1).

Переваги автотрансформаторного пуску двигуна:

- 1) Зниження пускового струму: Завдяки поступовому збільшенню напруги, зменшується струмове навантаження на двигун та мережу. Це особливо важливо для великих двигунів, де пусковий струм може викликати значні коливання напруги в мережі.
- 2) Механічна надійність: Плавний пуск допомагає уникнути різких механічних ударів на обмотки двигуна, підшипники та інші частини обладнання. Це продовжує термін служби двигуна та зменшує ризик поломок.

- 3) Економічність: Автотрансформатор є відносно простим і доступним пристроєм. У порівнянні з іншими методами плавного пуску, автотрансформатор є дешевшим і не потребує складного обслуговування.
- 4) Універсальність застосування: Автотрансформатори можуть бути використані для двигунів різної потужності, від малих до великих, і підходять для різних промислових застосувань.

Недоліки автотрансформаторного пуску двигуна:

- 1) Розміри і вага: Автотрансформатор для потужних двигунів може бути досить габаритним і важким, що робить його менш зручним для монтажу в обмежених просторах.
- 2) Перехідні процеси: При відключенні автотрансформатора і підключенні двигуна безпосередньо до мережі можуть виникати короточасні стрибки струму, хоча вони й значно менші, ніж при прямому пуску.
- 3) Обмежена гнучкість: Автотрансформатор пропонує лише фіксовані рівні зниження напруги (зазвичай 50%, 65% і 80%). Це може бути недоліком у випадках, де потрібна більш точна регуляція.

Висновок до підрозділу

З урахуванням того, що для ПП наш електродвигун повинен забезпечувати високий крутний момент на валу, оптимальним рішенням є використання схеми автотрансформаторного пуску. Ця схема забезпечує поступове збільшення напруги на обмотках двигуна, знижуючи пусковий струм та зменшуючи механічні навантаження. В результаті, двигун досягає необхідних обертів плавно, після чого перемикається в номінальний режим роботи, що робить цей метод ефективним і економічно доцільним у даній системі.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ

3.1. Побудова моделі ПП та симуляція перехідних процесів

Модель складається з блоків живлення, завдання швидкості та моменту опору (з вентиляторної складової та змінної складової, яка моделює навантаження залежно від кута атаки лопатей гвинта підрулюючого пристрою), відображення результатів розрахунків та центральної підсистеми – електроприводу з векторним (поле-орієнтованим) керуванням інвертором та потужним високовольтним двигуном.

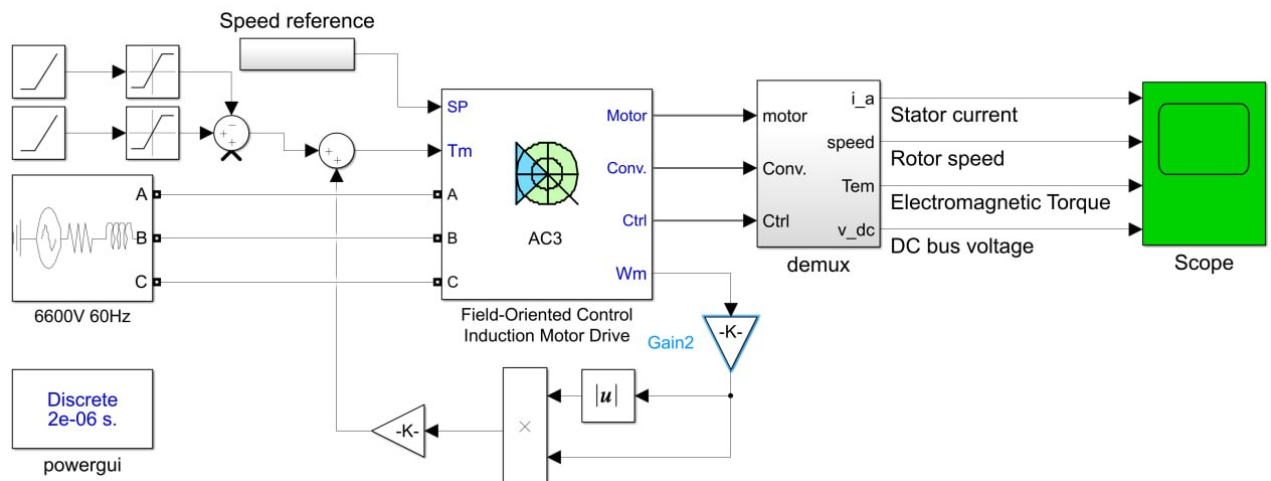


Рис. 3.1. – Модель електропривода підрулюючого пристрою

3.2. Аналіз результатів випробувань

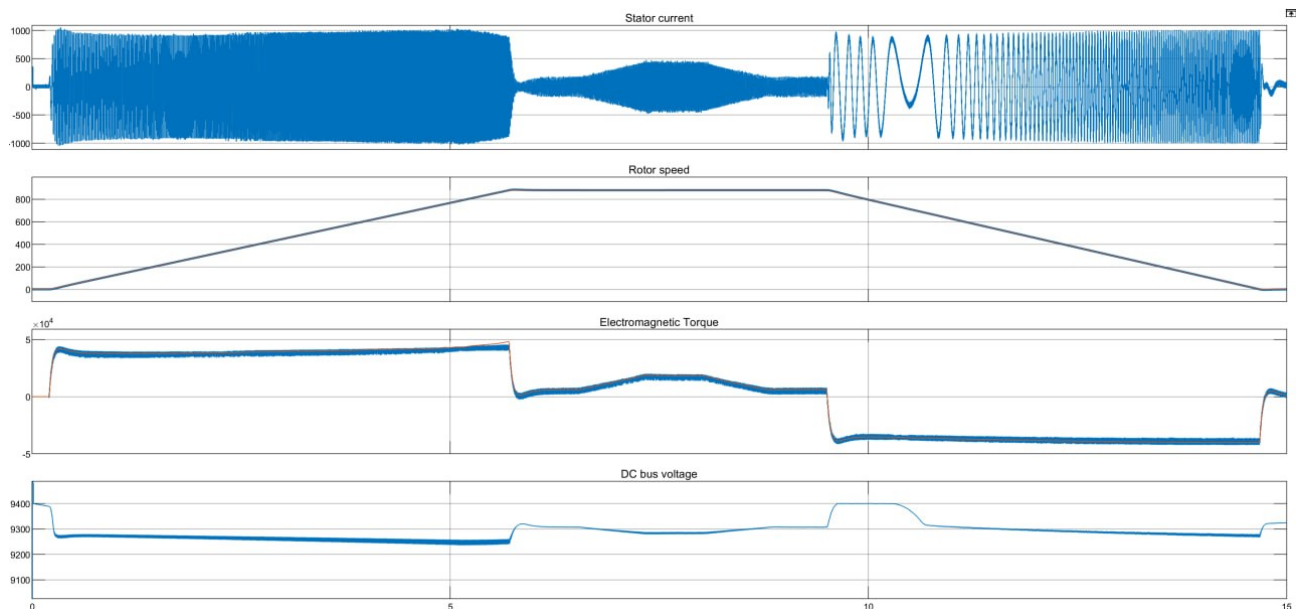


Рис. 3.2. – Графіки перехідних процесів в електроприводі підрулюючого пристрою

Перехідний процес:

- 1) пуск із заданим прискоренням 160 об/хв/с;
- 2) наростання навантаження внаслідок повороту лопатей від 0 до максимального кута атаки;
- 3) зменшення навантаження при повороті лопат від максимального кута до 0;
- 4) гальмування із заданим темпом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. John Carlton. Marine propellers and propulsion – fourth edition: textbook. London, 2018.
2. Bimal Bose. Power electronics and motor drives: textbook. Knoxville, Tennessee, 2006.
3. Anthony F. Molland, Stephen R. Turnock, Dominic A. Hudson. Ship resistance and propulsion – second edition: textbook. University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom, 2017.
4. Asgeir J. Sørensen. Marine Control Systems: textbook. Trondheim, Norway, 2013.
5. Dennis T. Hall. Practical marine electrical knowledge – fourth edition: textbook. Livingstone, Scotland, 2019.