

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ
ЕЛЕКТРОДВИГУНА МОТОРНОГО ЧОВНА ВІД
СОНЯЧНОЇ МІНІ-ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-42
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Куць В.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Куземко Н.А.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Шелестовський Б.Г.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Куць Віталію Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи живлення електродвигуна моторного човна від сонячної міні-електростанції

Керівник роботи к.т.н., доц. Куземко Н.А.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від 31» зрудня 2025 року № 4/7-1163

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Човен із двигуном внутрішнього згорання потребує модернізації Шляхом встановлення електродвигуна, сонячних панелей та акумуляторів

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Класифікація та особливості електродвигунів для водного транспорту

2. Вимоги до систем живлення електродвигунів човнів

3. Основні компоненти рушійної установки човна

4. Підключення та схема

5. Система орієнтації сонячних панелей

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Електричні човни та електричні силові установки

2. Аналіз електродвигуна

3. Графік залежності потужності від швидкості

4. Графік що ілюструє залежність часу автономної роботи від швидкості

5. Схема підключення компонентів

6. Схема підключення сонячних панелей

7. Човен з спроектованим хардтопом

8. Система орієнтації сонячних панелей

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Мовчан Л.Т., к.т.н., доц. кафедри ЕІ</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 04.01.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 19.04.2026 по 25.04.2026	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 25.04.2026 по 21.05.2026	
3	Підготовка розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	з 21.05.2026 по 23.05.2026	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 23.05.2026 по 24.05.2026	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 24.05.2026 по 28.05.2026	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 28.05.2026 по 01.06.2026	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 01.06.2026 по 05.06.2026	

Студент _____
(підпис)

Куць В.М.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Куземко Н.А.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–42. - Т. : ТНТУ, 2026.

Стор. 69; рис. 33; табл. 11; креслень (презентацій) __; джерел 30.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Розробка системи живлення електродвигуна моторного човна від сонячної міні-електростанції».

Метою роботи є розробити систему живлення електродвигуна моторного човна від сонячної міні-електростанції, що забезпечує автономне екологічно чисте функціонування човна.

У роботі проведено аналітичний огляд сучасних фотоелектричних установок, типів фотоелектричних перетворювачів, класифікації та особливостей електродвигунів для водного транспорту, вимог до систем живлення електродвигунів човнів, а також існуючих електричних човнів і силових установок із сонячними панелями. Виконано вибір та обґрунтування основних компонентів системи живлення: електродвигуна, акумуляторної батареї та сонячних панелей; розробити структурну схему підключення компонентів системи електропостачання та описати режими її роботи. Виконано проектування конструкції жорсткого даху для розміщення фотоелектричних панелей та розробити електромеханічну систему орієнтації сонячних панелей. Проведено порівняльний аналіз характеристик розробленої електричної силової установки та традиційної паливної установки.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОДВИГУН, СОНЯЧНА ПАНЕЛЬ, ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ, АКУМУЛЯТОР, ІНВЕРТОР

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1 Принцип роботи та основні компоненти фотоелектричних установок.....	9
1.2 Типи фотоелектричних перетворювачів та їх характеристики	10
1.3 Класифікація та особливості електродвигунів для водного транспорту.....	10
1.4 Вимоги до систем живлення електродвигунів човнів.....	11
1.5 Актуальність та перспективи впровадження.....	12
1.6 Існуючі електричні човни та електричні силові установки.....	14
1.7 Висновки до розділу	16
2 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	14
2.1 Основні компоненти рушійної установки човна	17
2.1.1 Вибір електродвигуна	17
2.1.2 Аналіз і підбір потужності двигуна.....	18
2.1.3 Аналіз електродвигуна Deerp Blue 40	20
2.1.4 Енергоспоживання двигуна та швидкість автономного руху	21
2.1.5 «Регулятор газу» для електродвигуна.....	24
2.2 Акумулятори.....	24
2.2.1 Види акумуляторів	25
2.2.2 Технологія акумуляторів у транспортних засобах	28
2.2.3 Вибір акумулятора	29
2.3 Сонячні панелі	30
2.4 Порівняння ваги паливної та електричної силової установки	33
2.4.1 Вага основних компонентів паливного двигуна.....	33
2.4.2 Вага основних компонентів електричної силової установки.....	33
2.5 Розрахунок автономності електричної силової установки	34
2.6 Підключення та схема.....	35
2.6.1 Перетворювач постійного струму (DC/DC)	35
2.6.2 Випрямляч змінного/постійного струму	35

2.6.3 Контролер відстеження точки максимальної потужності (MPPT).....	36
2.7 Режими роботи	39
2.7.1 Перший режим роботи: човен пришвартований у порту.....	39
2.7.2 Другий режим роботи: рух по воді.....	40
2.7.3 Третій режим роботи: зупинка на якорі.....	40
2.8 Складові системи електропостачання двигуна	41
2.9 Висновки до розділу	42
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ.....	44
3.1 Жорсткий дах із системою орієнтації фотоелектричних панелей	44
3.2 Моделювання жорсткого даху в 3D	45
3.2.1 Імпорт САD-моделі жорсткого даху, створення сітки, властивості матеріалів та граничні умови	46
3.2.2 Вплив ваги сонячних панелей на конструкцію	49
3.3 Система орієнтації сонячних панелей.....	51
3.3.1 Компоненти системи орієнтації.....	51
3.3.2 Концептуальний проєкт механічної системи.....	53
3.3.3 Максимальний нахил системи орієнтації	56
3.4 Висновки до розділу	56
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	52
4.1 Інструктажі з охорони праці	58
4.2 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасний стан справ ставить перед людством низку викликів, пов'язаних із змінами довкілля, виснаженням викопних джерел енергії та необхідністю переходу до сталого енергетичного розвитку. Водний транспорт, зокрема маломірні судна, традиційно використовують двигуни внутрішнього згорання, які є значними джерелами забруднення атмосфери, водойм і шумового навантаження. Посилення екологічних нормативів у багатьох країнах світу обмежує або повністю забороняє застосування двигунів внутрішнього згорання на внутрішніх водоймах, у природоохоронних зонах та національних парках. Це зумовлює зростання зацікавленості в електричних силових установках для водного транспорту, які є екологічно чистими, малошумними та енергоефективними.

Відновлювані джерела енергії, зокрема фотоелектричні установки, набувають дедалі більшого поширення в транспортній галузі завдяки стрімкому здешевленню технологій і підвищенню їхньої ефективності. За даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), вартість сонячної електроенергії знизилася на 89 % у період 2010–2022 років, що робить фотоелектричні системи доступними для широкого кола споживачів. Використання сонячної міні-електростанції для живлення електродвигунів човнів відкриває нові можливості для створення повністю автономних, екологічно безпечних транспортних засобів, здатних функціонувати тривалий час без підключення до зовнішніх електромереж.

Для України, яка має значний потенціал сонячної інсоляції (особливо в південних та південно-східних регіонах) та розгалужену мережу внутрішніх водойм (Дніпро, Дністер, Південний Буг), розвиток автономних електричних човнів на сонячних батареях є особливо актуальним. Військові дії та нестабільність енергетичних ринків продемонстрували вразливість традиційних паливно-енергетичних систем, що підвищує значимість децентралізованих

джерел енергії. Створення вітчизняних розробок електричних човнів із фотоелектричними установками може стати важливим внеском у розвиток зеленої економіки, екологічного туризму, а також забезпечити енергетичну незалежність прикордонних районів і острівних територій.

Таким чином, розробка системи живлення електродвигуна моторного човна від сонячної міні-електростанції є актуальною технічною задачею, що спрямована на створення конкурентоспроможної альтернативи традиційним паливним силовим установкам.

Мета кваліфікаційної роботи: розробити систему живлення електродвигуна моторного човна від сонячної міні-електростанції, що забезпечує автономне екологічно чисте функціонування човна.

Відповідно до даної мети ставляться такі **завдання**:

1. Провести аналітичний огляд сучасних фотоелектричних установок, типів фотоелектричних перетворювачів, класифікації та особливостей електродвигунів для водного транспорту, вимог до систем живлення електродвигунів човнів, а також існуючих електричних човнів і силових установок із сонячними панелями.

2. Виконати вибір та обґрунтування основних компонентів системи живлення: електродвигуна, акумуляторної батареї та сонячних панелей; розробити структурну схему підключення компонентів системи електропостачання та описати режими її роботи.

3. Сформулювати аналітичний вираз залежності миттєвої споживаної потужності електродвигуна від швидкості руху човна.

4. Виконати проектування конструкції жорсткого даху для розміщення фотоелектричних панелей та розробити електромеханічну систему орієнтації сонячних панелей.

5. Провести порівняльний аналіз характеристик розробленої електричної силової установки та традиційної паливної установки.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань.

Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 69 арк. формату А4, графічна частина – ___ аркушів презентації.

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до вимог [1].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Принцип роботи та основні компоненти фотоелектричних установок

Фотоелектрична установка (ФЕУ), або сонячна електростанція, являє собою комплекс технічних засобів, призначених для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Основним елементом будь-якої фотоелектричної установки є фотоелектричний перетворювач — сонячна батарея (панель), що функціонує на основі фотоелектричного ефекту. Принцип дії сонячних батарей базується на явищі внутрішнього фотоелектричного ефекту в напівпровідникових матеріалах, переважно кремнії [2-4].

Сонячна батарея складається з окремих фотоелектричних елементів (сонячних елементів), з'єднаних у послідовно-паралельні групи. Кожен елемент являє собою напівпровідниковий діод (р-п перехід), при освітленні якого виникає електрорушійна сила. Сучасні кремнієві сонячні елементи мають ККД у межах 18–22% для монокристалічних та 14–18% для полікристалічних модифікацій [5,6]. Постійне вдосконалення технологій виробництва дозволяє поступово підвищувати ці показники.

Повна фотоелектрична установка включає кілька функціональних блоків. Сонячні панелі формують первинну енергію у вигляді постійного струму. Контролер заряду регулює процеси заряджання акумуляторної батареї та запобігає її перезаряду чи глибокому розряду. Акумуляторна батарея забезпечує накопичення електричної енергії та живлення навантаження у періоди відсутності сонячного випромінювання. Інвертор перетворює постійний струм у змінний з необхідними параметрами (амплітуда, частота), якщо це потрібно для живлення конкретного електрообладнання.

1.2 Типи фотоелектричних перетворювачів та їх характеристики

Сучасна промисловість пропонує кілька типів фотоелектричних перетворювачів, які відрізняються за матеріалом виготовлення, конструкцією та експлуатаційними характеристиками. Монокристалічні кремнієві панелі вирізняються найвищим ККД та довговічністю (термін служби перевищує 25 років), але мають вищу вартість. Полікристалічні панелі трохи поступаються за ефективністю, проте є дешевшими та добре підходять для застосувань, де площа монтажу не є критично обмеженою [1].

Тонкоплівкові сонячні модулі, виготовлені на основі аморфного кремнію або сполук CdTe, CIGS, мають нижчий ККД (8–13%), але вирізняються гнучкістю, малою вагою та здатністю працювати за розсіяного освітлення. Ці властивості роблять їх привабливими для застосування на невеликих човнах, де важливі компактність і аеродинаміка. Крім того, перовськітні сонячні елементи — новий перспективний клас фотоелектричних перетворювачів — демонструють рекордні лабораторні показники ККД понад 25% і потенційно можуть суттєво здешевити виробництво.

При виборі фотоелектричних панелей для човнового застосування необхідно враховувати специфічні умови експлуатації [7,8]: постійну вібрацію, можливий механічний вплив хвиль, агресивну дію вологого середовища та ультрафіолетового випромінювання. Тому для морських і річкових застосувань рекомендуються панелі з посиленою герметизацією, захисним склом з підвищеною ударною міцністю та антикорозійним алюмінієвим каркасом.

1.3 Класифікація та особливості електродвигунів для водного транспорту

Електродвигуни, що застосовуються для руху моторних човнів, можна класифікувати за кількома ознаками: типом струму (постійного чи змінного), конструктивним виконанням, потужністю та способом управління. За типом

струму розрізняють двигуни постійного струму (ДПС), асинхронні двигуни змінного струму (АД) та синхронні двигуни (СД). Кожен тип має свої переваги та обмеження щодо застосування на маломірних судах.

Двигуни постійного струму традиційно широко використовувалися в електротранспорті завдяки простоті регулювання швидкості обертання та високому пусковому моменту. Однак їхні щітково-колекторні вузли потребують регулярного обслуговування, схильні до зносу та іскріння, що обмежує їх застосування у вологому середовищі. Безконтактні двигуни постійного струму (BLDC — Brushless DC) позбавлені цих недоліків, мають високу надійність та ефективність, тому стали найпоширенішим вибором для електричних човнів.

Асинхронні двигуни змінного струму відрізняються простотою конструкції, високою надійністю та низькою вартістю. Застосування частотних перетворювачів дозволяє ефективно регулювати їхню швидкість, а сучасні векторні системи управління забезпечують високу динаміку та точність. Асинхронні двигуни добре підходять для човнів середньої потужності, де пріоритетними є надійність і економічність.

Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM — Permanent Magnet Synchronous Motor) поєднують переваги BLDC та асинхронних двигунів: високий ККД, високий питомий момент, точне регулювання швидкості та відмінну динаміку. Їх застосування в електричних човнах постійно зростає завдяки розвитку технологій неодимових магнітів та силової електроніки.

1.4 Вимоги до систем живлення електродвигунів човнів

Система живлення електродвигуна моторного човна повинна задовольняти низку специфічних вимог, зумовлених особливостями водного транспорту. По-перше, це автономність: човен, особливо під час тривалих переходів, не має можливості підключитися до зовнішньої електромережі. Тому ємність акумуляторної системи має бути достатньою для забезпечення запасу

ходу відповідно до призначення судна.

По-друге, важливим параметром є питома енергоємність акумуляторів — кількість енергії, що припадає на одиницю маси. Чим вища ця величина, тим меншою буде маса акумуляторної батареї при заданій ємності, а отже, тим більшою буде корисне навантаження човна. Сучасні літій-іонні акумулятори мають питому енергоємність 150–250 Вт·год/кг, що значно перевищує показники свинцево-кислотних (30–40 Вт·год/кг) та нікель-металгідридних (60–80 Вт·год/кг) аналогів.

По-третє, система живлення повинна бути безпечною в умовах можливого контакту з водою, стійкою до корозії та ультрафіолетового випромінювання. Електрообладнання човна має відповідати відповідним класам захисту (IP65 і вище) та витримувати температурні коливання, характерні для відкритих водойм.

1.5 Актуальність та перспективи впровадження

Актуальність використання фотоелектричних установок для живлення електродвигунів моторних човнів зумовлена низкою факторів глобального та регіонального характеру. По-перше, посилення екологічних нормативів у багатьох країнах обмежує або повністю забороняє використання ДВЗ на внутрішніх водоймах. Європейський Союз активно впроваджує директиви щодо зниження викидів від маломірного водного транспорту, а національні паркові зони встановлюють жорсткі обмеження на шум та забруднення.

По-друге, стрімке здешевлення сонячних технологій робить їх доступними для широкого кола споживачів. За даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), вартість сонячної електроенергії знизилася на 89% у період 2010–2022 років і продовжує падати. Це позитивно позначається на вартості фотоелектричних систем для човнів, роблячи їх конкурентоспроможними з традиційними силовими установками.

По-третє, військові дії та нестабільність енергетичних ринків, з якими

зіткнулася Україна, продемонстрували вразливість традиційних паливно-енергетичних систем. Децентралізовані відновлювані джерела енергії, включаючи фотоелектричні установки, забезпечують енергетичну незалежність та стійкість. Для прикордонних районів, острівних територій та зон логістичного забезпечення автономні електричні човни можуть стати надійним транспортним засобом.

Перспективи розвитку цієї галузі пов'язані з низкою технологічних трендів. Підвищення ефективності сонячних елементів дозволить отримувати більше енергії з одиниці площі, що критично для обмеженої палубної площі човна. Розвиток технологій накопичення енергії — зокрема, твердотільні акумулятори та суперконденсатори — забезпечить більшу автономність при меншій масі. Інтеграція систем штучного інтелекту в управління енергоспоживанням дозволить оптимізувати маршрути та режими руху для максимальної економії енергії.

Важливим напрямом є також створення гібридних систем, що поєднують фотоелектричні установки з іншими джерелами енергії — вітрогенераторами, паливними елементами або навіть компактними ДВЗ як резервним джерелом. Такий підхід поєднує переваги різних технологій та забезпечує максимальну надійність і автономність.

В Україні існує значний потенціал для розвитку цього напрямку. Країна має високий рівень сонячної інсоляції (південні та південно-східні регіони), розгалужену мережу річок (Дніпро, Дністер, Південний Буг), а також потужний науковий та інженерний потенціал у галузі електротехніки та суднобудування. Створення вітчизняних розробок електричних човнів на сонячних батареях може стати важливим елементом розвитку зеленої економіки та екологічного туризму.

1.6 Існуючі електричні човни та електричні силові установки

На сьогоднішній день існує багато моделей човнів з електричним приводом. Однак, якщо детальніше розглянути ринок електрочовнів, можна помітити, що знайти моделі, оснащені сонячними панелями для заряджання акумуляторів силової установки, не так просто.

Aquawatt 550:

Aquawatt 550 — це електричний човен довжиною 5,5 метрів, розрахований на 4 особи. Він оснащений сонячними панелями та пропонується у двох моторних версіях. У версії з потужністю 1600 Вт максимальна швидкість човна становить 6 вузлів, а у версії з потужністю 800 Вт — 4,7 вузла.

За умови оптимального сонячного освітлення він може рухатися безперервно шість годин зі швидкістю 5,5 вузлів і десять годин зі швидкістю 4 вузли. [9]



Рисунок 1.1 - Aquawatt 550

- Система приводу Oceanvolt для однокорпусних та багатокорпусних суден:

Системи Oceanvolt розроблені для роботи на напрузі 48 В (поду-двигуни); їхня дальність ходу та заряджання забезпечуються або за допомогою гідрогенерації, або за допомогою сонячної енергії, що дозволяє здійснювати

постійні круїзи на великі відстані. [10]

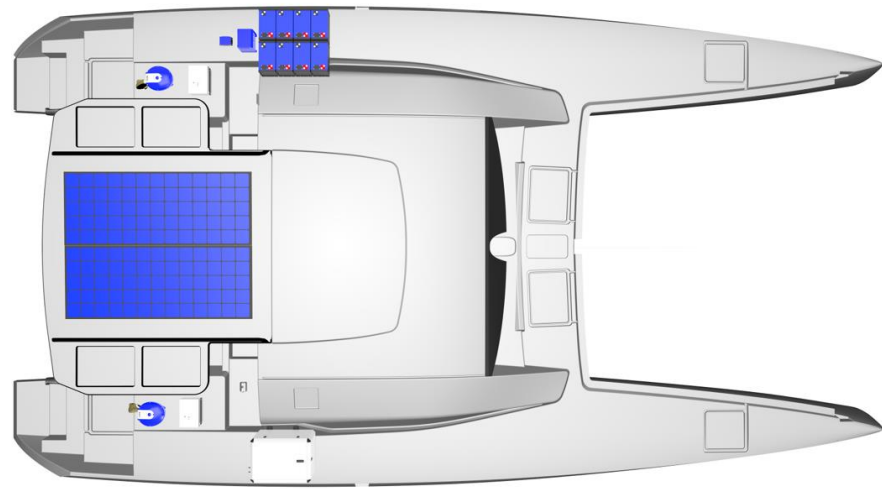


Рисунок 1.2 - Система приводу Oceanvolt для багатокорпусних суден
Ця система приводу Oceanvolt встановлена на деяких існуючих моделях, таких як:

VOYAGE 480: VOYAGE 480 — це катамаран з довжиною по ватерлінії 13,56 метрів, що приводиться в рух двома електричними двигунами Oceanvolt SD15 з приводом на вітрила. 48-вольтні електродвигуни живляться від батареї літій-іонних акумуляторів великої ємності (16 кВт·год).



Рисунок 1.3 - VOYAGE 480

1.7 Висновки до розділу

1. Фотоелектрична установка це система, яка включає сонячні панелі, контролер заряду, акумуляторну батарею та інвертор. Принцип дії базується на явищі внутрішнього фотоелектричного ефекту в напівпровідникових матеріалах.

2. Для застосування на човнах найбільш зручними є монокристалічні панелі завдяки високому ККД та компактності, а також тонкоплівкові модулі, що вирізняються гнучкістю та малою вагою. При цьому необхідно враховувати специфічні умови експлуатації: підвищену вологість, вібрацію, хвиловий вплив та корозійну дію водного середовища.

3. Для живлення моторного човна найбільш доцільним є застосування безконтактних двигунів постійного струму (BLDC) або синхронних двигунів з постійними магнітами (PMSM). Ці типи електродвигунів забезпечують високий ККД, надійність у вологому середовищі, точне регулювання швидкості та не потребують складного технічного обслуговування, що є критично важливим для автономних водних суден.

4. Система живлення електродвигуна човна повинна задовольняти вимоги автономності, безпеки та мінімальної маси. Літій-іонні акумулятори з питомою енергоємністю 150–250 Вт·год/кг є оптимальним вибором порівняно зі свинцево-кислотними та нікель-металогідридними аналогами. Все електрообладнання має відповідати класу захисту IP65 і вище.

5. Аналіз існуючих розробок (Aquawatt 550, Oceanvolt SD15, VOYAGE 480) підтверджує технічну та комерційну доцільність застосування сонячних панелей на електричних човнах.

2 РОЗДІЛ РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

2.1 Основні компоненти рушійної установки човна

2.1.1 Вибір електродвигуна

Для проектування електричної рушійної установки човна, що забезпечує високу ефективність, велике значення мають вага та об'єм усіх деталей і вузлів, що входять до складу такої системи. У цій роботі для побудови електричної рушійної установки розглядаються 3 основні компоненти. Це:

- Двигун.
- Акумуляторні батареї.
- Сонячні панелі.

Електродвигун, обраний для встановлення в систему енергетичного приводу, запропоновану в цій роботі, — це двигун Torqeedo. Torqeedo — німецький виробник морських електродвигунів та акумуляторів, який реалізує свою продукцію по всьому світу. Компанія Torqeedo була заснована у 2005 році Крістофом Балліном та Фрідріхом Бобелем у місті Штарнберг. [11]

Усі моделі двигунів Torqeedo завжди є синхронними. У двигунах такого типу співвідношення швидкості обертання двигуна до частоти напруги живлення є постійним. Синхронні двигуни керуються крутним моментом, що означає, що вони споживають необхідний струм для передачі необхідної потужності до бажаної швидкості обертання двигуна.

Крім того, двигуни Torqeedo є двигунами з електронною комутацією. Це означає, що змінне поле генерується двигуном за допомогою електричної комутації. Завдяки цій технології не відбувається втрат через щітки, і двигуни не потребують технічного обслуговування. Більше того, магнітне поле генерується постійними магнітами. Таким чином, уникнути будь-яких втрат продуктивності через котушку збудження. [11]

2.1.2 Аналіз і підбір потужності двигуна

Для проведення аналізу підбору потужності двигуна за основу взято Quicksilver Activ 505. Для вибору потужності аналізуються різні версії палива.

Оскільки човни Quicksilver працюють лише з бензиновими двигунами марки Mercury Marine, наведений нижче аналіз проводиться з урахуванням деяких двигунів Mercury. Для моделі Quicksilver Activ 505 максимально допустима потужність становить 100 к.с. Однак пропонуються різні моделі Quicksilver Activ 505: модель, оснащена Mercury 40 Four stroke (40 к.с.), Mercury 40 Orion (40 к.с.), Mercury 50 Four stroke (50 к.с.), Mercury 60 Four stroke (60 к.с.), Mercury 60 Bigfoot (60 к.с.), Mercury 75 Optimax (75 к.с.), Mercury 80 Four stroke (80 к.с.) та Mercury 90 Optimax (90 к.с.). На веб-сторінці (touron-nautica.com) було проведено випробування вищезазначених двигунів. [12]

Результати цих випробувань на швидкість наведено в таблиці 1 нижче.

Таблиця 2.1 - Результати випробувань двигунів на швидкість

Двигун	К.С. (кВт)	Круїзна швидкість (вузли)	Максимальна швидкість (вузли)
Mercury 40 чотиритактний	40 (29,83)	15,9	23,1
Mercury 40 Orion	40 (29,83)	16,5	22,9
Mercury 50 Чотиритактний	50 (37,285)	17,9	25,8
Mercury 60 Чотиритактний	60 (44,742)	18,5	27,9
Mercury 60 Bigfoot	60 (44,742)	20,2	28,2
Mercury 75 Optimax	75 (52,2)	23,4	30,2
Mercury 80 Чотиритактний	80 (59,65)	23,3	30,5
Mercury 90 Optimax	90 (67,11)	24,9	36,1

Результати з таблиці 1 показують, що діапазон потужності двигуна має бути обмежений приблизно від 40 к.с. (29,83 кВт) до 90–100 к.с. (67,11 кВт до

74,57 кВт). Отже, щоб бути конкурентоспроможною, система енергетичного човна, що проектується, потребує двигуна з такими характеристиками, щоб конкурувати з моделями, що працюють на паливі.

Компанія Torqeedo пропонує чотири різні моделі електричних підвісних моторів. Це: Ultralight (1 к.с.), Travel (1,5 к.с. і 3 к.с.), Cruise (5 к.с. і 20 к.с.) і, нарешті, Deer Blue (40 к.с. і 80 к.с.) . Для забезпечення необхідного діапазону потужності (тобто від 40 к.с. до 90–100 к.с.) в якості частини силової установки електрочовна обрано Deer Blue.

Щоб визначити, яка з двох версій електродвигуна Deer Blue (40 к.с. та 80 к.с.) є більш придатною для розроблюваної системи, було проаналізовано енергоспоживання двигуна. Також було враховано швидкість. Як показано в таблиці 2.1 вище, максимальна швидкість аналогічних двигунів на паливі становить відповідно 22,9 вузлів та 30,5 вузлів. Це прийнятна швидкість для умов, в яких мають використовуватися відкриті човни, такі як QuicksilverActiv 505. Порівнюючи необхідну вхідну потужність для двох двигунів (див. таблицю 2), обраним двигуном є Torqeedo Deer Blue 40, оскільки він споживає на 33% менше енергії порівняно з версією потужністю 80 к.с.

Таблиця 2.2 - Потужність на вході моделей Deer Blue

Двигун	Вхідна потужність (кВт)
Torqeedo Deer Blue 40 (підвісний)	41
Torqeedo Deer Blue 80 (підвісний)	61

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики Torqeedo Deer Blue 40

Технічні характеристики	Значення
Потужність на вході	30 (кВт)
Пропульсивна потужність	16,2 (кВт)
Порівнянні бензинові підвісні мотори	40 (к.с.)
Номінальна напруга	345 (В)
Маса	139 кг

2.1.3 Аналіз електродвигуна Deep Blue 40

Як можна побачити на рисунку 2.1, можна виділити наступні чотири основні деталі.

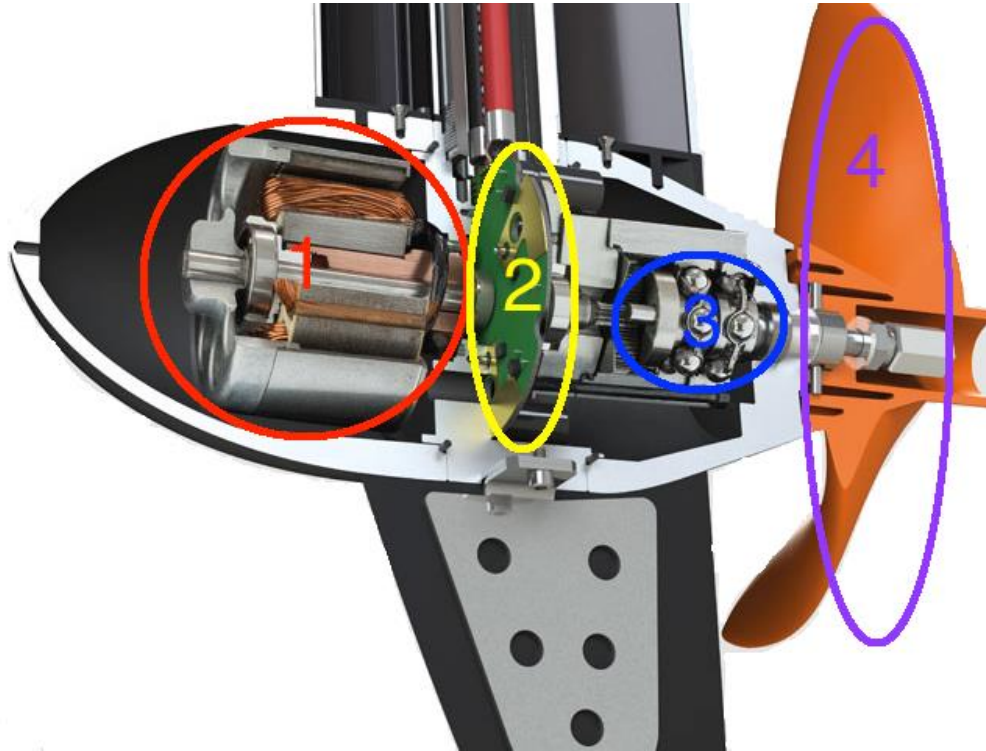


Рисунок 2.1 - Електродвигун Torqeedo Deep Blue

Безщіткові двигуни з зовнішнім ротором та неодимовими магнітами (№ 1 на рисунку 2.1): Torqeedo використовує зовнішні ротори, де статор і котушки розташовані всередині, що дозволяє магнітам обертатися. Така конструкція забезпечує кращий крутний момент, оскільки поле, в якому він створюється, є більш зовнішнім. Цей крутний момент (у порівнянні зі звичайним двигуном) удвічі більший. Оскільки всередині двигуна більше місця, там розміщено вдвічі більше магнітів. Крім того, в електродвигунах Torqeedo використовуються неодимові магніти. Ці магніти мають приблизно в п'ять-шість разів більшу силу, ніж звичайні магніти.

Спеціально розроблена силова електроніка (№ 2 на рисунку 2.1): Для увімкнення електродвигуна необхідне додаткове магнітне поле. У традиційних електродвигунах це необхідне магнітне поле зазвичай створюється за

допомогою ковзних контактів або щіток, однак у двигунах Torqeedo це магнітне поле створюється без будь-яких контактів. Це поле створюється за допомогою безконтактного електронного цифрового перемикачання. Воно перемикає потік струму через котушки 35 000 разів на секунду. Завдяки безщітковій конструкції тертя зменшується, що, очевидно, підвищує ефективність. Також слід додати, що силова електроніка Torqeedo має регулювання швидкості, що забезпечує ідеальне повільне маневрування.

Високоякісна коробка передач (№ 3 на рисунку 2.1): Оскільки гвинти забезпечують високу ефективність при максимальному крутному моменті та низькій швидкості обертання, Torqeedo завжди використовує редуктори для передачі. Зазвичай застосовуються планетарні редуктори.

Конструкція гвинта з комерційного суднобудування (№ 4 на рисунку 2.1): Найефективнішими є гвинти, що мають великий діаметр, великий крок та низьку швидкість обертання. Ефективність гвинта, що потребує високої швидкості обертання, знижується через кавітацію. Отже, двигуни з високим крутним моментом можуть ефективно приводити в дію гвинти. Але наявність високого крутного моменту — не єдиний фактор, що підвищує ефективність гвинта; крім цього, різниця між найвищою та найнижчою точками на кривій крутного моменту двигуна має бути якомога меншою.

2.1.4 Енергоспоживання двигуна та швидкість автономного руху

Для човна, що рухається по воді, необхідна тягова потужність зростає пропорційно до куба швидкості. Це означає, що якщо ви хочете подвоїти швидкість, потрібно у вісім разів більше потужності. Виходячи з цього припущення, ми розрахували миттєву потужність для чотирьох різних швидкостей, як показано в таблиці 2.3.

Миттєва потужність при максимальній швидкості (23,1 вузла) була розрахована на основі даних про дальність ходу, наданих компанією Torqeedo. У Torqeedo зазначають, що максимальний час роботи (на повній потужності) з

аккумулятором ємністю 30 кВт·год становить 1 годину 15 хвилин. Отже, виходячи з цієї інформації та з урахуванням наведеного вище припущення, були розраховані другий і третій пункти таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Відповідність швидкості та потужності

	Швидкість човна (вузли)	Миттєва потужність, кВт
1	23,1	24,4
2	11,55	3,05
3	5,77	0,38
4	0	0

Коли ці точки нанесені на графік, ми отримуємо графік 1. Вісь Y графіка представляє миттєву потужність, а вісь X — швидкість. Також було знайдено лінію регресії та рівняння точок.

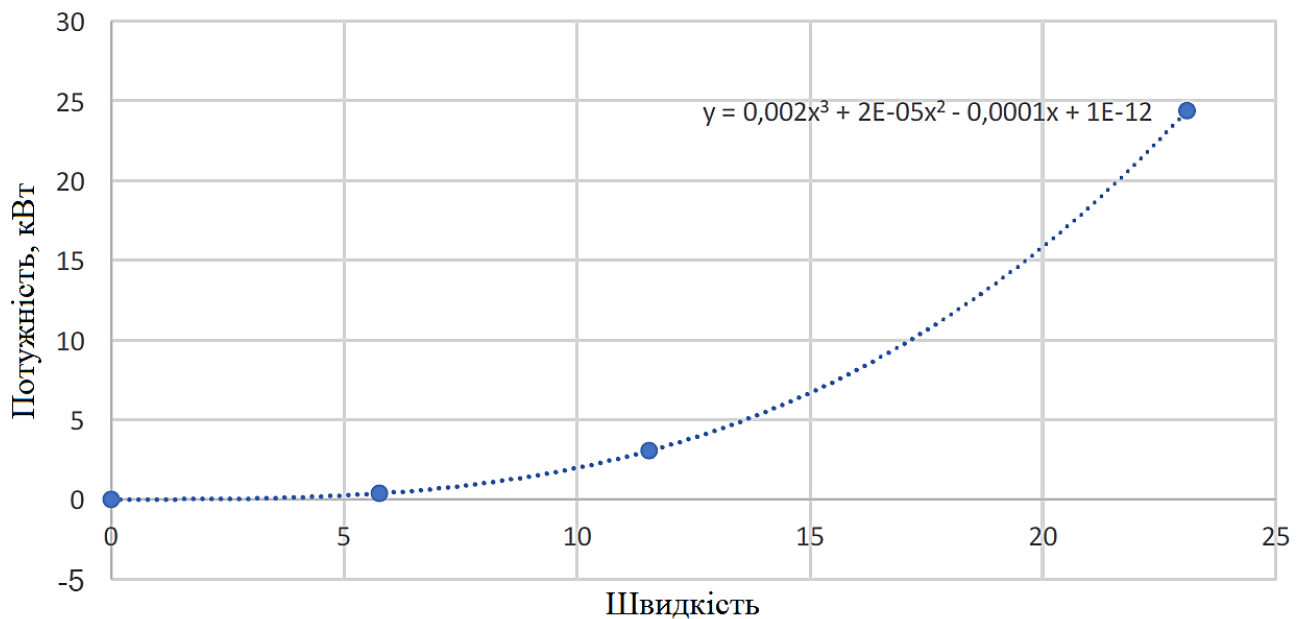


Рисунок 2.2 - Графік залежності потужності (кВт) від швидкості (вузли)

Розрахуємо споживання потужності в залежності від швидкості човна:

$$P = 0,002 \cdot v^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot v^2 - 0,0001 \cdot v + 10^{-12} \quad (2.1)$$

При аналізі отриманого рівняння (2.1) можна помітити, що найзначущішим коефіцієнтом є $0,002 \cdot v^3$. Це надає рівнянню логічності, оскільки воно відображає в'язке тертя. Інші коефіцієнти не є значущими. Але в цьому випадку коефіцієнт $0,0001 \cdot v$ може з'являтися як наслідок сухого тертя.

З огляду на потужність, що надається сонячними панелями, рівняння 2.1 можна використати для визначення автономної швидкості для розглянутого відкритого човна (див. рівняння 2.2).

З огляду на обрані сонячні панелі, максимальна вхідна потужність, що надається сімома сонячними модулями, становить 840 Вт (по 120 Вт кожна). Насправді ці сонячні панелі не матимуть 100% ККД. Тому розрахунки було проведено як із максимальним ККД (100%), так і з більш реалістичним ККД (80%). Очевидно, що погода в зоні, де плаває човен, впливає на ефективність. Враховуючи 100% ефективність сонячних панелей, максимальна автономна швидкість становить 7,48 вузлів (рівняння 2.2). Натомість, якщо враховувати ефективність сонячних панелей 80%, реальна автономна швидкість відповідає 6,95 вузлів (рівняння 2.3).

Розрахуємо автономну швидкість при 100% ефективності сонячних панелей:

$$P = 0,002 \cdot v^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot v^2 - 0,0001 \cdot v + 10^{-12} = (7 \cdot 0,120) \cdot 1 \quad (2.2)$$

$$= 0,840 \text{ (кВт)} \rightarrow v = 7,48 \text{ вузлів}$$

Розрахуємо автономну швидкість при 80% ефективності сонячних панелей

$$P = 0,002 \cdot v^3 + 2 \times 10^{-5} \cdot v^2 - 0,0001 \cdot v + 10^{-12} = (7 \times 0,120) \cdot 0,8 = 0,672 \text{ (кВт)} \rightarrow v = 6,95 \text{ вузлів} \quad (2.3)$$

2.1.5 «Регулятор газу» для електродвигуна

Як вказує його назва, основною функцією регулятора газу є контроль швидкості та напрямку обертання гвинта. У цьому випадку регулятор газу — це високоякісний потенціометр, що зчитує зміни положення важеля. Залежно від положення важеля, наміри водія (прискорення, утримання постійної швидкості або уповільнення) стають відомими, і контролер регулює потужність електродвигуна для збільшення або зменшення швидкості.

У цьому випадку було обрано контролер дросельної заслінки Torqeedo, що встановлюється зверху (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 - Регулятор потужності Torqeedo

2.2 Акумулятори

Як і сонячні панелі, акумулятори є однією з найважливіших частин конструкції. Акумулятори повинні бути здатні працювати кілька годин безперервно. Загалом існує два види акумуляторів залежно від того, чи можна їх заряджати. Очевидно, що в запропонованій системі електричного приводу слід використовувати акумуляторну батарею.

Існують різні типи акумуляторних батарей, але найпоширенішими є свинцево-кислотні, нікель-кадмієві та літій-іонні батареї [13-15].

2.2.1 Види акумуляторів

- Свинцево-кислотні акумулятори

Свинцево-кислотний акумулятор є найстарішим типом акумулятора, який був винайдений у 1849 році. Незважаючи на дуже низький показник енергії на одиницю маси та низький показник енергії на одиницю об'єму, його здатність забезпечувати високі імпульсні струми означає, що елементи мають відносно велике співвідношення потужності до маси. Свинцево-кислотні акумулятори зазвичай використовуються в автомобільній та суднобудівній промисловості для забезпечення необхідною енергією стартерних двигунів. Існує три основні типи свинцево-кислотних акумуляторів: заливні акумулятори, акумулятори з абсорбованим скловолокном (AGM) та гелеві акумулятори. Переваги та недоліки свинцево-кислотних акумуляторів наведено в таблиці нижче: [15]

Таблиця 2.5 - Переваги та недоліки (свинцеві акумулятори)

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> - Недорогі та прості у виробництві. - Низький саморозряд. - Висока питома потужність. - Хороші експлуатаційні характеристики при низьких та високих температурах 	<ul style="list-style-type: none"> - Низька питома енергія. - Повільне заряджання. - Необхідно зберігати у зарядженому стані, щоб запобігти сульфатації. - Обмежений ресурс циклів. - Акумулятори відкритого типу потребують доливання води. - Обмеження щодо транспортування акумуляторів відкритого типу. - Не є екологічно безпечними. - Обмежений ресурс циклів. - Акумулятори відкритого типу потребують доливання води. - Обмеження щодо транспортування акумуляторів відкритого типу. - Не є екологічно безпечними.

- Акумулятори на основі нікель-кадмію (NiCd)

З іншого боку, NiCd-акумулятори були винайдені в 1899 році, і в них як електроди використовуються гідроксид нікелю та металевий кадмій. Ці акумулятори заряджаються складніше, ніж літій-іонні та свинцево-кислотні. Акумулятори на основі нікелю заряджаються постійним струмом, але напруга може вільно зростати. Протягом багатьох років NiCd були найпопулярнішим вибором для рацій, медичного обладнання для екстреної допомоги та професійних відеокамер. Переваги та недоліки NiCd-акумуляторів наведено в таблиці нижче:

Таблиця 2.6 - Переваги та недоліки (акумулятори на основі NiCd)

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> - Міцні, висока кількість циклів за умови належного - Це єдиний тип акумулятора, який можна надшвидко заряджати з мінімальним навантаженням. - Хороші експлуатаційні характеристики (витримує неправильне використання). - Тривалий термін зберігання (можна зберігати в розрядженому стані). - Хороші характеристики при низьких температурах. - Економічно вигідний. 	<ul style="list-style-type: none"> - Відносно низька питома енергія (якщо обслуговування. порівнювати з новими системами). - Потребує періодичного повного розрядження. - Кадмій є токсичним металом.

- Літій-іонні акумулятори

Загальні компоненти літій-іонних акумуляторів — це катод (позитивний електрод), анод (негативний електрод) та електроліт (як провідник). Під час розрядження іони рухаються від анода до катода через електроліт і сепаратор. Під час заряджання напрямок змінюється, і іони рухаються від катода до анода (див. рисунок 2.4).

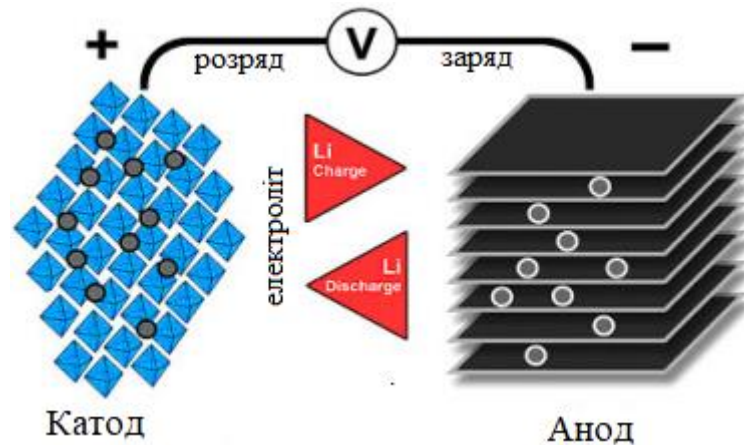


Рисунок 2.4 - Принцип роботи літій-іонних акумуляторів

Зазвичай негативний електрод літій-іонного елемента виготовляється з вуглецю, а позитивний — з оксиду металу.

Літій є найлегшим з усіх металів, має найбільший електрохімічний потенціал і забезпечує найбільшу питому енергію на одиницю маси. Ключовим фактором високої питомої енергії є висока напруга елемента. Крива розряду (рисунок 2.5) забезпечує ефективне використання накопиченої енергії в діапазоні напруги від приблизно 4 В/елемент до 2,8 В/елемент. [16]

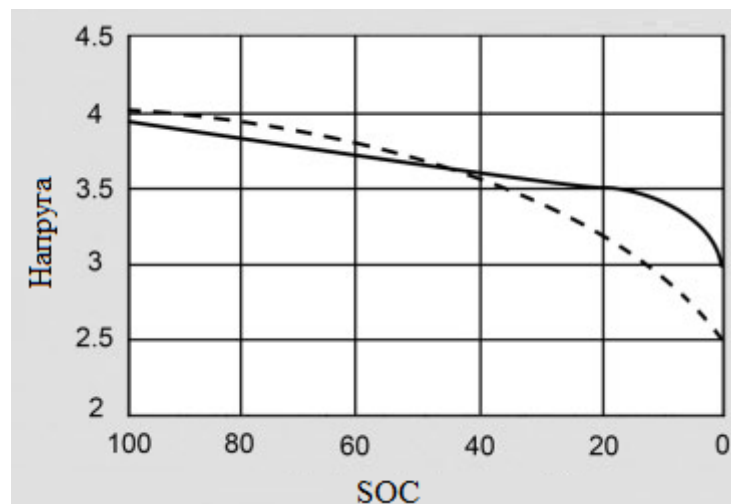


Рисунок 2.5 - Графік напруги в залежності від ступеня заряду

З огляду на ці виняткові якості літій-іонних акумуляторів, такі акумулятори зазвичай використовуються в портативних пристроях (наприклад, мобільних телефонах), електроінструментах (таких як шліфувальні машини, пилки або інше обладнання) та в електромобілях [17-19]. Переваги та недоліки літій-іонних акумуляторів наведено в таблиці нижче:

Таблиця 2.7 - Переваги та недоліки (літій-іонні акумулятори)

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> - Мають високу питому енергію та високу навантажувальну здатність - Довгий цикл та тривалий термін зберігання. - Не потребує технічного обслуговування. - Досить короткий час заряджання. - Низький саморозряд. 	<ul style="list-style-type: none"> - Потребують захисного контуру для запобігання тепловому розгону при навантаженні. - Погіршується при високій температурі та при зберіганні під високою напругою.

2.2.2 Технологія акумуляторів у транспортних засобах

Технологія акумуляторів часто застосовується в автомобільній промисловості. Насправді, застосування акумуляторних батарей в (електричних або паливних) автомобілях є типовим і різноманітним. Крім того, можна помітити, що система приводу автомобіля є схожою (у багатьох аспектах) на систему приводу човна.

Сьогодні існують різні типи систем приводу автомобілів. Вони поділяються на: традиційні, «старт-стоп», мікрогібридні, гібридні, підключні та електричні автомобілі. Традиційні автомобілі використовують акумулятор лише для запуску двигуна; зазвичай використовуються акумулятори для запуску (SLI), які можуть забезпечити необхідний пік енергії. Система «старт-

стоп» автоматично вимикає та перезапускає двигун внутрішнього згорання для зменшення викидів; найпоширенішими акумуляторами в автомобілях, що мають цю систему, є вдосконалені заливні акумулятори (EFB) та акумулятори з абсорбованим скловолокном (AGM). Гібридні та мікрогібридні автомобілі — це транспортні засоби, що приводяться в рух двигуном внутрішнього згорання та електродвигуном, які працюють узгоджено. Зазвичай у цих системах приводу використовуються літій-іонні акумулятори. Літій-іонні акумулятори також використовуються у підключаються до електромережі та електричних автомобілях. Електричні автомобілі приводяться в рух лише електродвигуном. У електричних автомобілях зазвичай використовуються високовольтні акумулятори. [18]

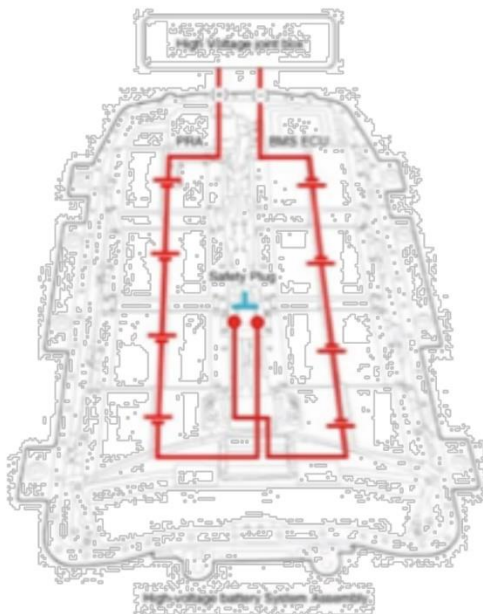
2.2.3 Вибір акумулятора

З концептуальної точки зору можна припустити, що електричний човен дуже схожий на електромобіль, оскільки різниця між ними полягає лише у способі застосування (наземний/земний) є різниця між ними. Таким чином, виходячи з опису батарей, наведеного вище, та їхнього застосування в електромобілях, найбільш підходящою батареєю для електричного човна є високовольтна літій-іонна батарея.

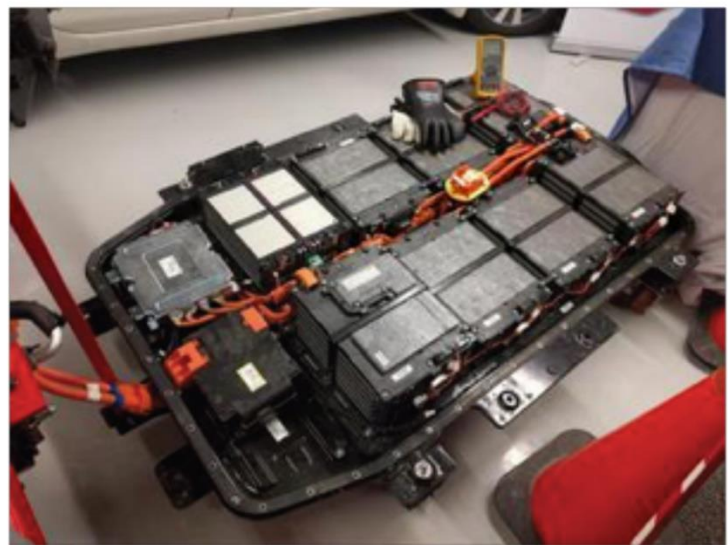
Було проведено порівняння найсучасніших літій-іонних автомобільних батарей з метою вибору марки батареї, яка б найкраще підходила для силової установки електричного човна. Акумулятор Kia Soul EV є моделлю, яку було остаточно обрано завдяки її високій ємності (30 кВт·год). Акумулятор Kia Soul EV складається з восьми модулів елементів. Кожен модуль складається з 14 або 10 елементів, а акумулятор складається з чотирьох модулів кожного типу, з'єднаних між собою послідовно. Цей літій-іонний акумулятор важить 274,5 кг. [19]

Таблиця 2.8 - Технічні характеристики вибраного акумулятора

Технічні характеристики	Значення
Тип акумулятора	Літій-іонний
Кількість елементів	192
Номинальна напруга	375 В
Ємність	30 кВт·год
Маса	274,5 кг



а)



б)

Рисунок 2.6 - (а) Схема акумулятора (б) Акумулятор Kia Soul EV

2.3 Сонячні панелі

В середньому кожен квадратний метр поверхні Землі отримує 164 Вт сонячної енергії. Ця енергія надходить на Землю у вигляді суміші світла та тепла. Енергія світла від Сонця використовується для генерації електроенергії за допомогою фотоелектричного ефекту. Сонячна панель — це сукупність сонячних елементів; у більшості сонячних панелей використовуються кристалічні кремнієві або тонкоплівкові елементи. Чим більше світла потрапляє на ці елементи, тим більше електроенергії вони виробляють. Цікаво, що деякі

спеціальні сонячні модулі містять світлоконцентратори, які фокусують світло на менших елементах.

Усі елементи фотоелектричного модуля мають бути захищені від механічних пошкоджень та вологи. Наприклад, у більшості модулів використовуються роз'єми типу MC4. Роз'єми MC4 — це одноконтактні електричні роз'єми.

Фотоелектричні модулі можуть виробляти електроенергію з діапазону частот світла, але зазвичай не можуть охопити весь сонячний спектр (зокрема, ультрафіолетове, інфрачервоне та слабе або розсіяне світло). Тому значна частина енергії сонячного світла втрачається сонячними панелями, і вони можуть забезпечити вищу ефективність при монохроматичному світлі. [20-23]

Сонячна комірка — це невеликий диск з напівпровідника, з'єднаний дротом з іншими в коло. Якщо детально проаналізувати внутрішню структуру сонячної комірки, можна побачити (як показано на рис. 30) своєрідний «сендвіч» з напівпровідників n-типу та p-типу: коли світло потрапляє на поверхню сонячної комірки, фотони передають свою енергію через шар n-типу до шару p-типу. Коли ця енергія досягає шару p-типу, електрони використовують її, щоб перейти у верхній шар і вийти в ланцюг. [24,25]

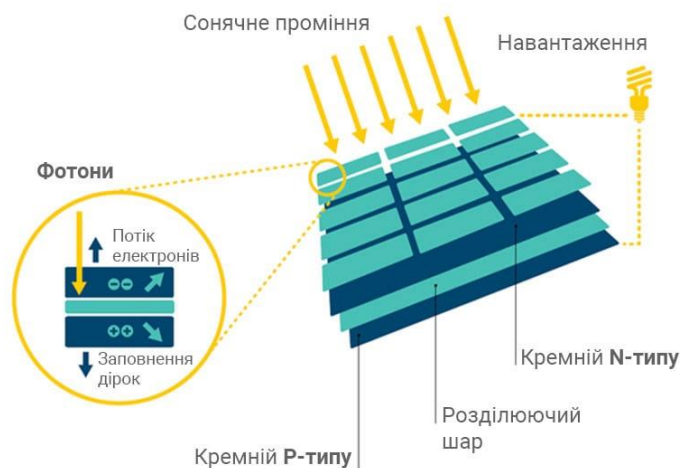


Рисунок 2.7 - Принцип роботи сонячної батареї

У цьому випадку, з огляду на її властивості та, зокрема, невелику вагу, ми вирішили встановити гнучку сонячну панель з високим ККД. Ці модулі призначені для монтажу на човнах, тому вони стійкі до корозії під впливом

морської води. Характеристики цих модулів наведено в таблиці нижче (табл. 2.9). Ці модулі поєднують невелику вагу (2,34 кг на модуль) та високий ККД (ККД елементів становить 22,6 %). Таким чином, кожна сонячна панель може видавати максимальну потужність 120 Вт. Розміри кожного сонячного модуля становлять 540 (мм) x 1200 (мм) x 3 (мм), і він має 36 сонячних елементів SunPower класу А (США).

Таблиця 2.9 - Технічні характеристики обраних сонячних панелей

Модуль сонячної панелі Технічні характеристики (на модуль)	Значення
Максимальна потужність	120 (Вт)
Максимальна напруга	20,88 (В)
Максимальна сила току	5,97 (А)
Ккд елемента	22,60 (%)
Кількість елементів	36
Маса	2,34 (кг)
Розміри	540x1200x3 (мм)

Як показано на (рисунку 2.8), на човні можна розмістити сім сонячних панелей, враховуючи площу жорсткого даху 3,51 м².

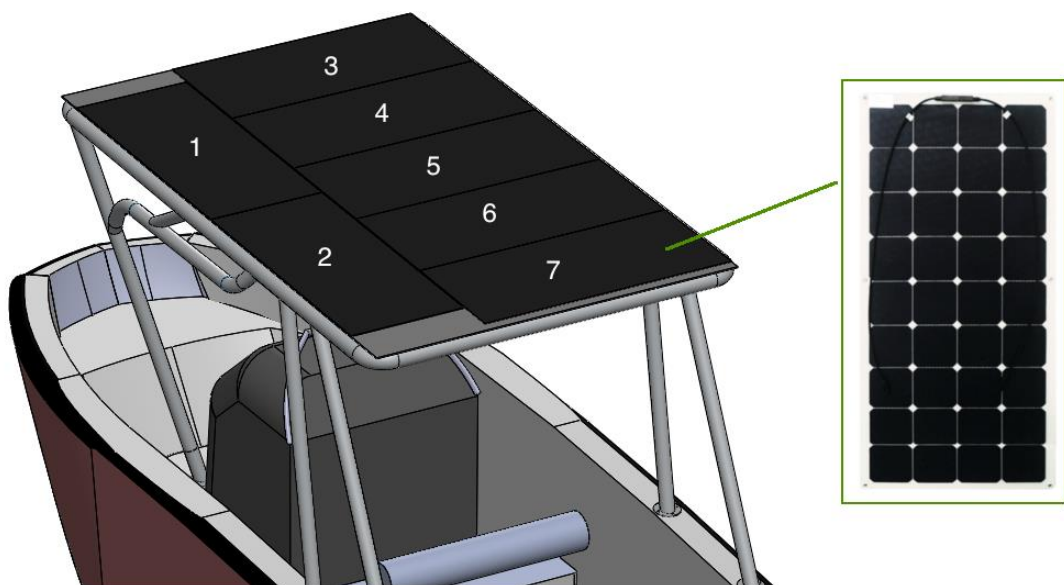


Рисунок 2.8 - Жорсткий дах, обладнаний сонячними панелями

2.4 Порівняння ваги паливної та електричної силової установки

Метою цього розділу є порівняння ваги компонентів паливного двигуна з вагою запропонованої електричної силової установки. Це порівняння було проведено, щоб довести, що різниця у вазі не може спричинити проблем з навігацією або навіть затоплення човна.

2.4.1 Вага основних компонентів паливного двигуна

- Паливний підвісний двигун. В середньому паливні підвісні двигуни, здатні забезпечити подібні переваги та дозволені для цього типу човнів, важать приблизно 1962 Н (200 кг).

- Паливний бак. Оглянувши різні моделі човнів з бажаними характеристиками, було виявлено, що в таких випадках зазвичай використовуються баки на 60–70 літрів. Таким чином, 60–70 літрів бензину важать 400–467 Н (40,70–47,6 кг) плюс приблизно вага самого бака 196,2 Н (20 кг).

- Отже, загальна вага компонентів паливного двигуна становить приблизно 2629 Н (268 кг).

2.4.2 Вага основних компонентів електричної силової установки

- Електричний підвісний двигун. Пропонований електродвигун важить 1363,6 Н (139 кг).

- Акумулятори. Пропоновані акумулятори важать 2688 Н (274 кг).

- Сонячні панелі. З огляду на те, що вага кожної сонячної панелі становить 22,95 Н (2,34 кг), а система приводу оснащена сімома сонячними панелями, загальна вага сонячних панелей становить 160,68 Н (16,38 кг).

Отже, загальна вага електричної системи приводу становить 4212,28 Н (429,4 кг)

Отже, електрична система важить на 40% більше (на 161 кг більше), ніж

паливна рухова установка. Це не дуже значна вага, наприклад, між самими підвісними моторами може існувати (різниця в масі 50 кг), але в гіпотетичному випадку, якщо вага може становити проблему, можна зменшити максимально допустиме навантаження або максимальну кількість пасажирів.

2.5 Розрахунок автономності електричної силової установки

Після вибору різних основних компонентів було проведено приблизний розрахунок автономності човна. Таким чином, у цьому розділі було пов'язано ємність акумулятора (30 кВт·год) [26,27] та споживання електроенергії електродвигуном (рівняння 2.1 та рисунок 2.2).

Отже, на основі цієї інформації було побудовано наступний графік 3 (рисунок 2.9). Він ілюструє автономність у годинах залежно від миттєвої швидкості. З огляду на те, що сонячна енергія може бути нестабільною або відсутньою (наприклад, вночі), у всіх цих розрахунках автономності енергія, що надається сонячними панелями, не враховувалася.

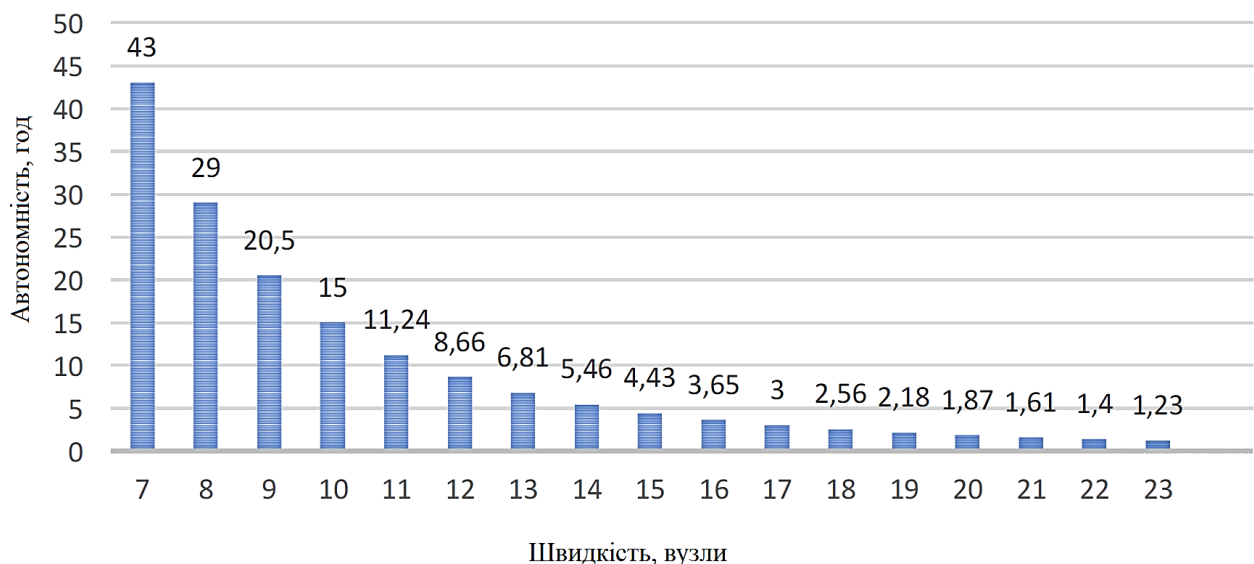


Рисунок 2.9 - Графік що ілюструє залежність часу автономної роботи від швидкості

При аналізі графіку можна помітити, що споживання енергії на низьких швидкостях є дуже низьким. Як наслідок, автономність на низьких швидкостях є дуже високою (понад 40 годин при швидкостях нижче 7 вузлів). Коли човен

рухається на вищій швидкості (23 вузли), можна помітити, що автономність зменшується до 1,23 години.

Згідно з випробуваннями, проведеними *touron-nautica* (таблиця 2.1), при крейсерській швидкості 15,9 вузлів еквівалентний паливний двигун (Mercury 40) споживає 10,2 літра на годину, що означає автономність 4,9 години. При цій швидкості наша силова установка має автономність 3,72 години, що є нижчим показником, але все одно є достатньою конкурентною автономністю.

2.6 Підключення та схема

2.6.1 Перетворювач постійного струму (DC/DC)

Перетворювач постійного струму (DC/DC) — це електронна схема або електромеханічний пристрій, що перетворює джерело постійного струму (DC) з одного рівня напруги на інший. Це тип перетворювача електричної енергії [28].

Перетворювачі постійного струму (DC/DC) зазвичай використовуються в електромобілях. Найпоширенішими перетворювачами постійного струму в електромобілях є однонаправлені та двонаправлені перетворювачі. З одного боку, однонаправлені перетворювачі зазвичай обслуговують різні бортові навантаження, такі як датчики, системи керування, обладнання безпеки та навігації. Вони призначені для передачі енергії в одному напрямку, від спеціального входу до виходу. Однак двонаправлені перетворювачі здатні передавати енергію в будь-якому напрямку. Типовим застосуванням двонаправлених перетворювачів є автомобілі з системою рекуперативного гальмування.

2.6.2 Випрямляч змінного/постійного струму

Випрямляч — це пристрій для перетворення змінного струму в постійний. Змінний струм (AC) тече в обох напрямках, перемикаючись туди-сюди багато разів за секунду. Постійний струм (DC) тече лише в одному

напрямку.

Змінний струм спочатку надходить у трансформатор. Як показано на рисунку 2.10, струм через первинну котушку створює рухоме магнітне поле, яке індукує струм у другій. У підвищувальних трансформаторах напруга збільшується, а в понижувальних — зменшується.

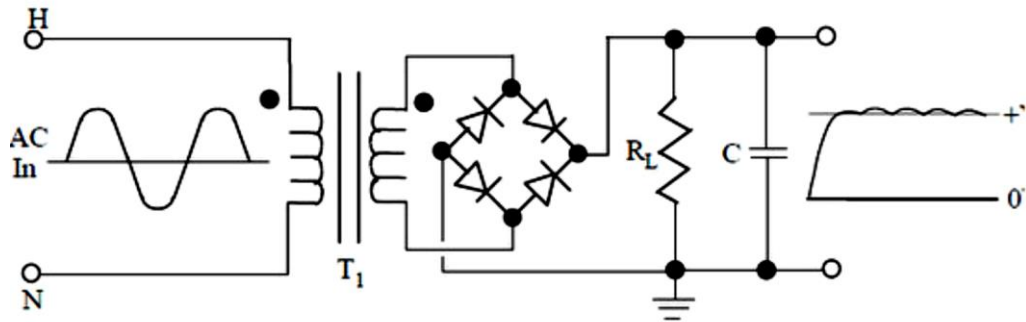


Рисунок 2.10 - Схема роботи випрямляча змінного в постійний струм
Потім струм надходить до діодів. Діоди пропускають струм в одному напрямку і зупиняють його, коли струм намагається протікати в іншому.

2.6.3 Контролер відстеження точки максимальної потужності (MPPT)

Відстеження точки максимальної потужності (MPPT) — це технологія, що використовується у фотоелектричних модулях для отримання максимальної потужності. Ефективність контролерів MPPT досягає 96%. Отже, для підвищення ефективності сонячних панелей необхідно встановити MPPT.

Функція контролера MPPT схожа на роботу коробки передач автомобіля. Коли коробка передач перебуває на неправильній передачі, максимальна потужність не передається на колеса.

2.6.4 Схема підключення основних компонентів системи

Компоненти, що використовуються в цій системі, повинні працювати при дуже різних напругах. Тому знайти найкращий спосіб з'єднання всіх цих компонентів — нелегке завдання. У цій роботі компоненти будуть підключені до «центральної мережі (350 В постійного струму)». Це центральне напруження

не є випадковим значенням, воно визначається, головним чином, напругою двигуна та акумуляторів. Вибрані компоненти, які мають бути підключені до цієї центральної мережі:

- Сонячні панелі (одна панель):

Максимальна потужність	120 (Вт)
Максимальна напруга	20,88 (В)
Максимальний струм	5,97 (А)

- Акумулятор:

Номінальна напруга	375 (В)
Ємність	30 (кВт·год)

- Асинхронний двигун:

Вхідна потужність	30 (кВт)
Номінальна напруга	345 (В)

Перш за все, сім сонячних панелей було підключено паралельно.

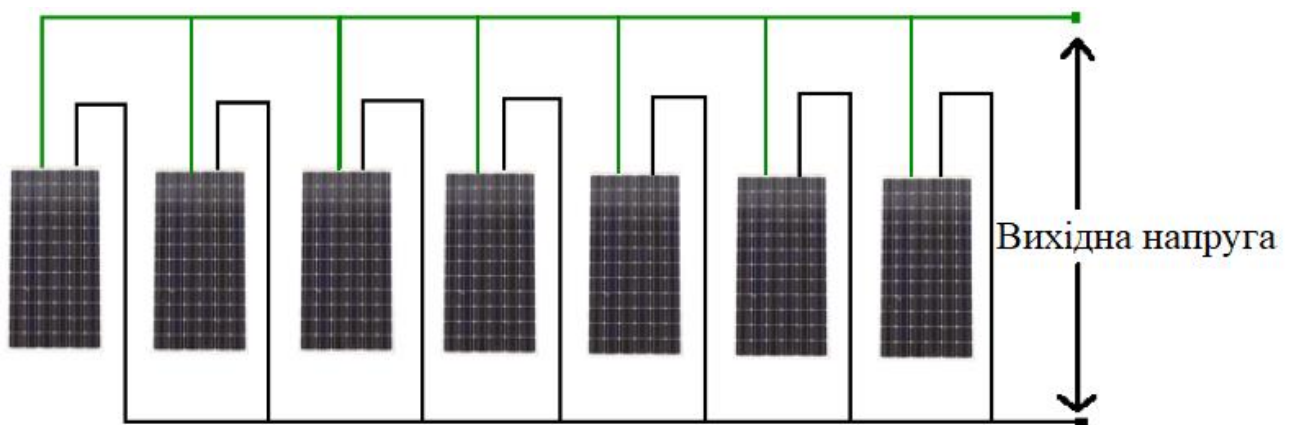


Рисунок 2.11 - Схема підключення сонячних панелей

Отже, остаточна схема підключення виглядає наступним чином (рис. 34).

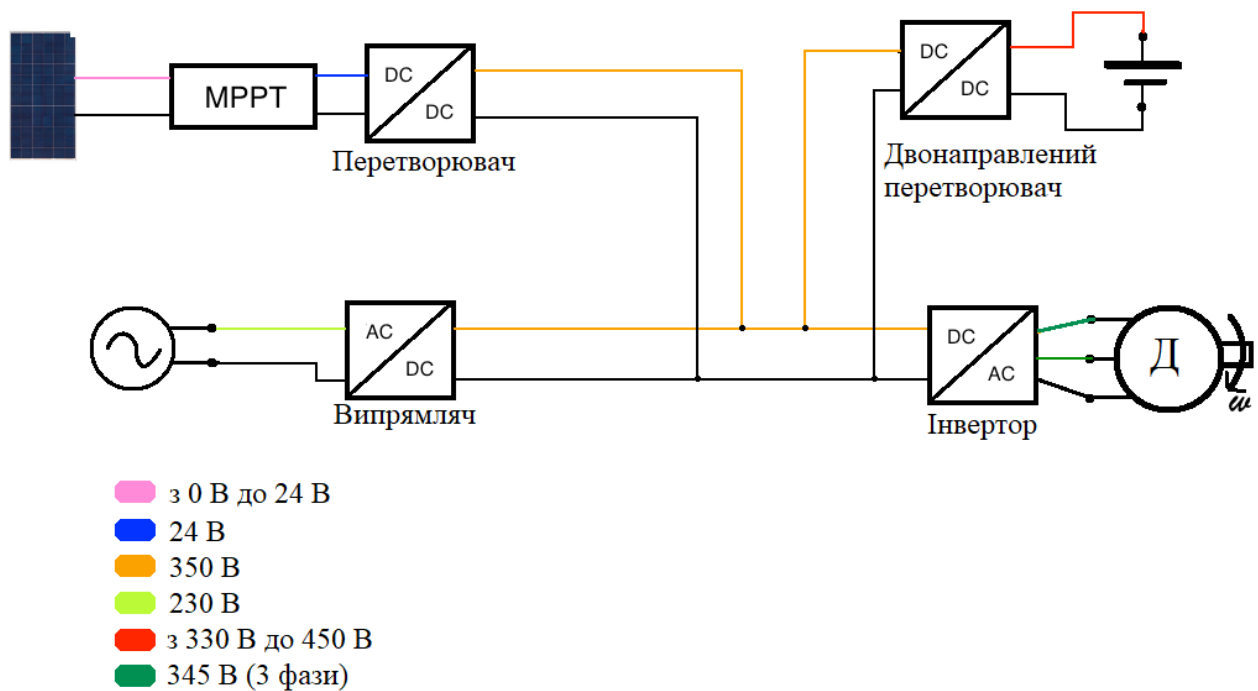


Рисунок 2.12 - Схема підключення компонентів

Таким чином, сонячні панелі підключені до контролера відстеження точки максимальної потужності (MPPT) для отримання максимальної потужності від сонця, а потім до перетворювача постійного струму (DC/DC) для підвищення напруги до 350 В постійного струму.

Акумулятори системи підключені до двонаправленого перетворювача постійного струму. Це дозволяє заряджати та розряджати акумулятор. У цьому випадку літій-іонний акумулятор має номінальну напругу 375 В, і, враховуючи, що він складається з 192 елементів, розподілених у 8 модулях (4 з них по 14 елементів та 4 по 10 елементів), можна обчислити номінальну напругу кожного елемента. Результатом цього розрахунку є те, що номінальна напруга кожного елемента становить 3,9 В. У літій-іонних елементах напругою 3,9 В максимальна напруга заряджання становить 4,2 В, отже, напруга заряджання повинна становити приблизно 420 В. Крім того, напруга акумулятора коливатиметься від 330 В (у розрядженому стані) до 420 В (у зарядженому стані).

Отже, враховуючи, що обраний двигун є трифазним асинхронним двигуном, між двигуном та центральною мережею потрібен інвертор DC/3AC.

Нарешті, система підключається до електричної мережі за допомогою штекера Setac. Setac — це промисловий роз'єм, який сумісний зі штекерами, що встановлені в більшості портів.

Щоб пояснити, як працює система, необхідно проаналізувати різні режими роботи.

2.7 Режими роботи

2.7.1 Перший режим роботи: човен пришвартований у порту

Перший режим — це коли човен пришвартований у порту. У цьому випадку можна припустити, що електродвигун не працює (положення «Вимкнено»), човен підключений до мережі (за допомогою роз'єму Setac), а сонячні панелі генерують енергію.

У цих умовах схема виглядає так (рисунок 2.13):

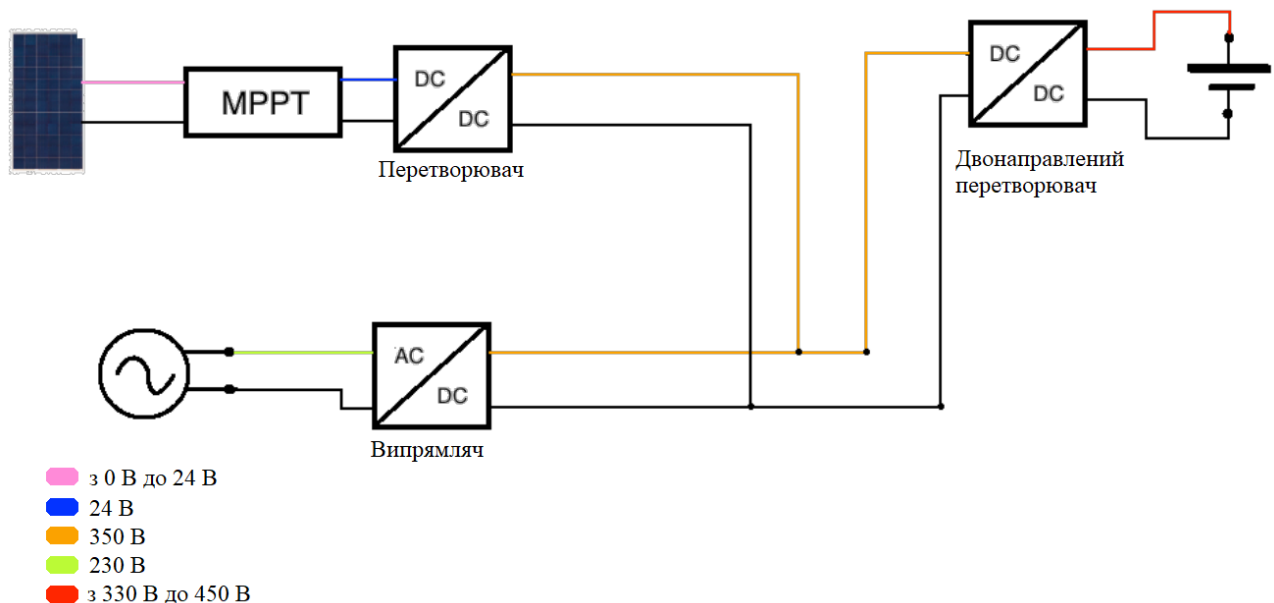


Рисунок 2.13 - Схема першого режиму роботи

Коли човен пришвартований у порту, енергія надходить одночасно від електромережі та від сонця. Вони заряджають акумулятори.

2.7.2 Другий режим роботи: рух по воді

Другий розглянутий режим роботи — це плавання човна. Коли човен рухається, очевидно, що Setac відключений, а двигун працює (споживаючи електроенергію). У цих умовах енергія, що використовується двигуном, надходить від акумулятора та сонячних панелей.

Отже, у цьому випадку схема підключення така (рисунок 2.14):

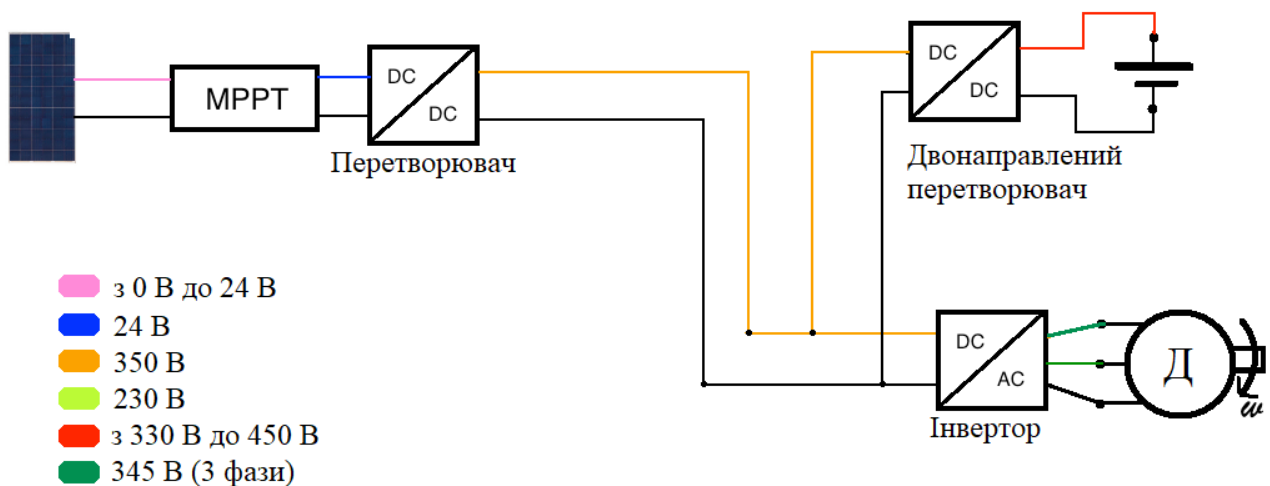


Рисунок 2.14 - Схема другого режиму роботи

2.7.3 Третій режим роботи: зупинка на якорі

В основному, ідея цього третього режиму роботи полягає в тому, що двигун відключений, а Setac від'єднаний. Це може статися, наприклад, коли човен стоїть на якорі (біля берега) або коли човен пришвартований у порту з від'єднаним Setac.

Таким чином, у третьому режимі роботи двигун не споживає енергію, а енергія, отримана сонячними панелями, зберігається безпосередньо в акумуляторах.

Схема підключення в цих умовах є такою (рисунок 2.15):

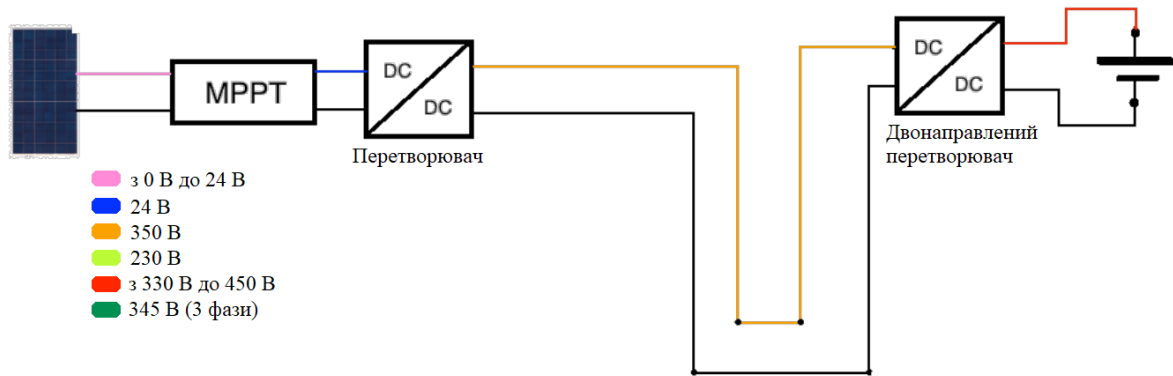


Рисунок 2.15 - Схема третього режиму роботи

2.8 Складові системи електропостачання двигуна

Як пояснено в розділі 2.4 та показано на рисунку 2.11, існує складових системи електропостачання. З огляду на те, що система працює при дуже специфічних та різних напругах, вибір компонентів підключення був нелегким.

З одного боку, трекер точки максимальної потужності (MPPT), розташований поруч із 7 сонячними панелями (з'єднаними паралельно), повинен витримувати максимальну силу струму, максимальну потужність та максимальну напругу (що подаються сонячними панелями). Врешті-решт було обрано трекер точки максимальної потужності Epsolar IT6415ND, який може працювати при напрузі 12/24/36/48 В і підтримує максимальну силу струму 60 А.

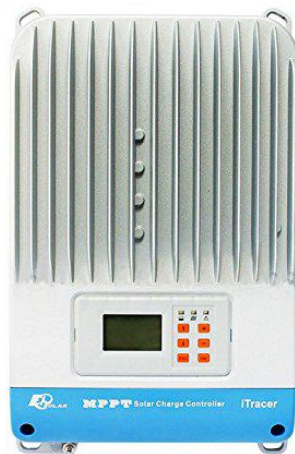


Рисунок 2.16 - Epsolar IT6415ND

З іншого боку, інші компоненти підключення, тобто обидва DC/DC, AC/DC та DC/ЗАС, є дуже специфічними, і в гіпотетичному прототипі їх слід виготовляти спеціально для нього.

2.9 Висновки до розділу

1. Проаналізовано різновиди електродвигунів для суднових рушійних установок та обрано електродвигун Torqeedo Deep Blue 40 потужністю 30 кВт. Зроблено цей вибір на підставі порівняльного аналізу з двигунами внутрішнього згоряння для човна Quicksilver Activ 505.

2. Побудовано апроксимовану залежність миттєвої потужності двигуна від швидкості човна у вигляді поліноміального рівняння третього ступеня. Встановлено, що домінуючим чинником, який визначає споживання енергії, є в'язке тертя (кубічна залежність від швидкості).

3. Розраховано автономну швидкість руху човна, яка забезпечується виключно сонячними панелями: 7,48 вузлів за умови 100% генерації з фотомодулів та 6,95 вузлів при 80%. Це підтверджує технічну можливість самозаряджання системи та руху човна на сонячній енергії в денний час.

4. Проведено порівняльний аналіз акумуляторних батарей. Обрано літій-іонний акумулятор Kia Soul EV ємністю 30 кВт·год та номінальною напругою 375 В як найбільш оптимальний за співвідношенням питомої енергії, ресурсу циклів та експлуатаційних характеристик.

5. Обрано сім гнучких сонячних панелей потужністю по 120 Вт кожна (загальною потужністю 840 Вт) з елементами SunPower класу А (ККД 22,6%). Визначено можливість їх розміщення на жорсткому даху човна площею 3,51 м². Панелі характеризуються невеликою масою (2,34 кг кожна), корозійною стійкістю та придатністю для морських умов експлуатації.

6. Виконано порівняння маси паливної та електричної силових установок. Встановлено, що електрична система приводу важить 429,4 кг, що на 40% (на 161 кг) більше за масу паливної установки (268 кг). Ця різниця не є

критичною для ходових якостей човна та може бути скомпенсована іншими чинниками.

7. Розраховано час автономної роботи. При низьких швидкостях (до 7 вузлів) автономність перевищує 40 годин, при крейсерській швидкості 15,9 вузлів — 3,72 години, при максимальній швидкості 23 вузли — 1,23 години. Отримані значення є конкурентоспроможними порівняно з аналогічною паливною установкою (автономність 4,9 години при 15,9 вузлах).

8. Розроблено структурну схему підключення компонентів системи. Схема передбачає використання контролера відстеження точки максимальної потужності (MPPT) Epsolar IT6415ND, перетворювача постійного струму DC/DC для підвищення напруги з сонячних панелей, двонаправленого DC/DC для акумулятора та інвертора DC/3AC для живлення трифазного асинхронного двигуна.

9. Описано три режими роботи розробленої системи.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ

3.1 Жорсткий дах із системою орієнтації фотоелектричних панелей

Однією з деталей, розроблених у рамках цього проекту, є жорсткий дах. Проектування було виконано за допомогою програми САПР SolidWorks. Основна функція жорсткого даху в нашій системі полягає у збільшенні доступної площі для розміщення сонячних панелей.

Жорсткий дах, як зазначалося раніше, є типовою деталлю для човнів такого типу. У човнах відкритого типу сонце сильно припікає, і посеред моря необхідно знайти тінь. Тому зазвичай жорсткі дахи використовуються для створення тіні на човні. У рибальській версії цих човнів конструкція жорсткого даху зазвичай включає деякі доповнення або додаткові деталі, такі як опори для вудилищ.



Рисунок 3.1 - Традиційний жорсткий дах

У нашому проекті також передбачено створення тіні, але відмінність полягає у верхній частині хардтопа. У цьому випадку замість тканини ця частина покрита сонячними панелями. Ці сонячні панелі дозволяють використовувати сонячну енергію для заряджання акумуляторів і, звісно, створюють тінь на човні.

Дизайн хардтопа був обумовлений розмірами обраних сонячних панелей

і, звісно, розмірами човна. Розташування всіх кріплень обумовлено конструкцією човна. Отже, при проектуванні верхньої частини хардтопа, де розміщуються сонячні панелі, було враховано розміри сонячних панелей (1200 мм × 540 мм × 3 мм). Зрозуміло, що метою є розміщення максимальної кількості сонячних панелей, яку дозволяють розміри човна. У цьому випадку, з огляду на розміри човна, максимальна суцільна поверхня для верхньої зони хардтопа становить (2700 мм × 1740 мм). На цій площі (4,698 м²) можна розмістити сім сонячних панелей.

Нарешті, вигляд човна з хардтопом є таким.

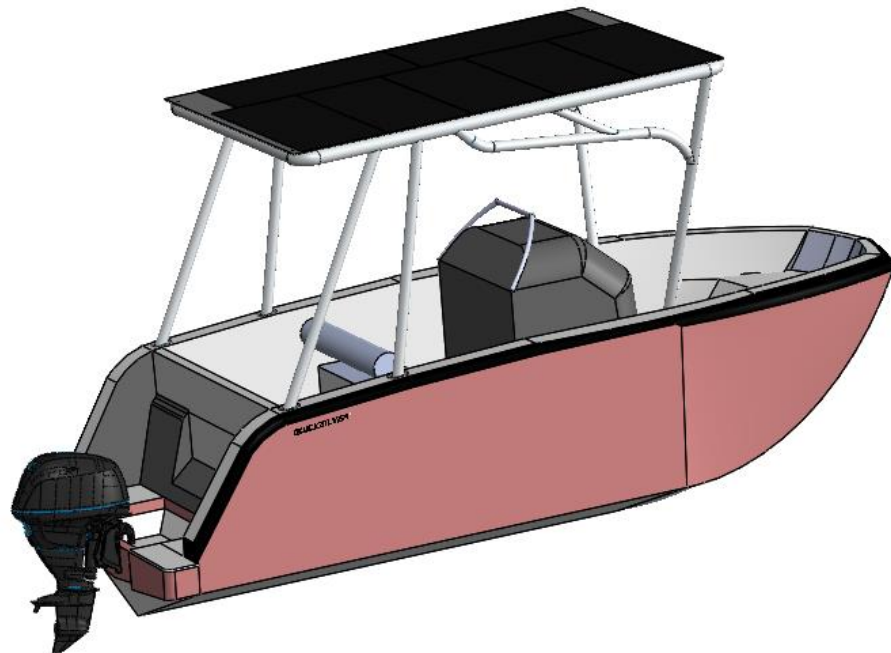


Рисунок 3.2 - Activ 505 з спроектованим хардтопом

3.2 Моделювання жорсткого даху в 3D

У цьому розділі показано та проаналізовано моделювання конструкції хардтопа. Мета цих моделювань — перевірка механічних властивостей та підтвердження міцності конструкції хардтопа.

Протягом терміну експлуатації хардтопа та всієї силової установки компоненти піддаються впливу погодних умов та сили тяжіння. Ці умови можуть пошкодити компоненти системи.

Тому вплив цих умов слід проаналізувати окремо для жорсткого даху. Жорсткий дах включає опори та систему орієнтації сонячних панелей і піддається впливу різних факторів, таких як вітер, сніг або сила тяжіння. Внаслідок цих умов у конструкції жорсткого даху виникають певні реакції.

Отже, досліджувані умови такі:

- Вага сонячних панелей.
- Снігові умови.
- Вітрові умови.
- Максимальна швидкість човна (23 вузли).
- Умови сильного вітру.

Для виконання цього моделювання було використано ANSYS та ANSYS Workbench. ANSYS — це програма для розв'язання задач методом скінченних елементів.

3.2.1 Імпорт CAD-моделі жорсткого даху, створення сітки, властивості матеріалів та граничні умови

Для здійснення правильного моделювання дуже важливо застосувати та відобразити в моделі різні реальні сили та граничні умови.

Це дослідження напружень та деформацій було проведено за допомогою програми скінченних елементів Ansys Workbench. Перш за все, було розроблено CAD-модель жорсткого даху (за допомогою SolidWorks) та імпортовано її (за допомогою розширення Ansys Design Modeller) до програми FEM, підготовленої для створення сітки та розраховування. Після імпортування CAD-моделі першим кроком є визначення властивостей матеріалу. З огляду на те, що цей жорсткий дах має перебувати поблизу моря протягом більшої частини свого терміну експлуатації, для виготовлення конструкції було обрано нержавіючу сталь.

Зрештою, було використано нержавіючу сталь F-313 (UNE 36016). Ця сталь має дуже хорошу стійкість до корозії, навіть при контакті з

електронегативними металами. Вона має високу стійкість до напружень та легко піддається механічній обробці.

Властивості нержавіючої сталі (F-313) такі:

Таблиця 3.1 - Характеристики F-313

	Властивості f-313 (une 36025)
Щільність (кг/м ³)	8030
Модуль Юнга (ГПа)	210
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Межа плинності (МПа)	735,5 - 833,6
Межа руйнування (МПа)	882,6 - 980,6

Наступним кроком є створення сітки структури з урахуванням усіх умов матеріалу. До моделі застосовано сітку з кроком 10 мм (14982 вузли).

У всіх цих моделюваннях вага механічної частини системи орієнтації була виключена. Ця вага була виключена, оскільки сили, що нею спричинені, є дуже малими порівняно з іншими граничними умовами, застосованими до моделі.

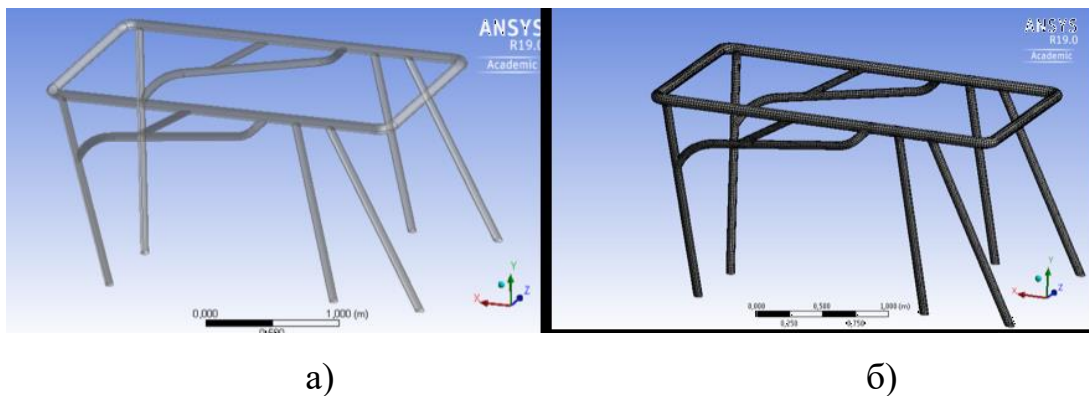


Рисунок 3.3 - Етап створення сітки для жорсткого даху

Нарешті, до моделі з сіткою були застосовані такі граничні умови.

- Сили реакції лінійних двигунів жорсткого даху

З огляду на концептуальну конструкцію *системи орієнтації сонячних панелей* та аналізуючи реакції, які з'єднання викликають на жорсткому даху, ми

можемо визначити, що на верхній конструкції моделі діють чотири лінійні сили.

Ці сили передбачається застосовувати з лінійним розподілом, оскільки направляюча двигуна закріплена на поперечині жорсткого даху.

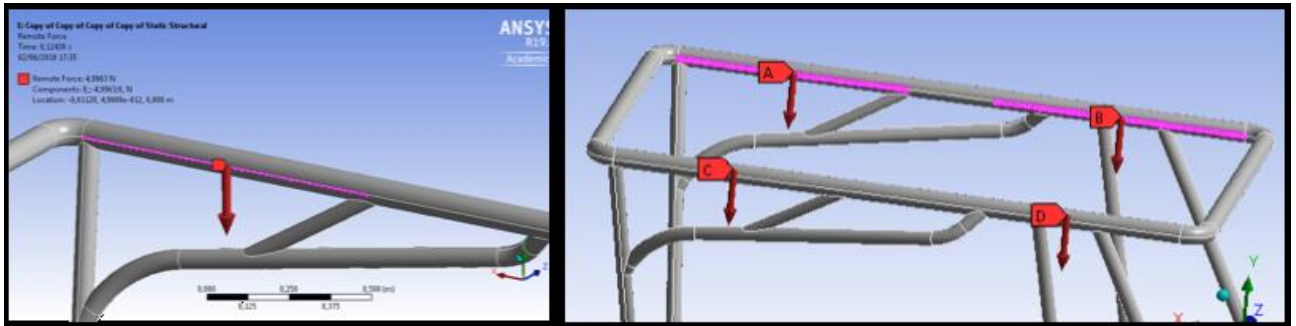


Рисунок 3.4 - Граничні умови сил реакції двигунів

- Кріплення жорсткого даху (анкери)

Цей жорсткий дах закріплений на човні за допомогою шести точок кріплення. Щоб перенести це в граничні умови для нашої моделі Ansys, дуже важливо проаналізувати, як працюють опори. Це передбачає фіксацію нижньої частини сталеві труби. Ми можемо закріпити цю частину, оскільки вона приварена до кріпильної пластини. Ця пластина прикручена до човна. Кількість і розмір цих гвинтів повинні бути пропорційними до сил реакції, що досліджуються. З огляду на те, що конструкція симетрична, у випадках симетричних навантажень реакції анкерів будуть досліджуватися лише в анкерах 1, 2 і 3.

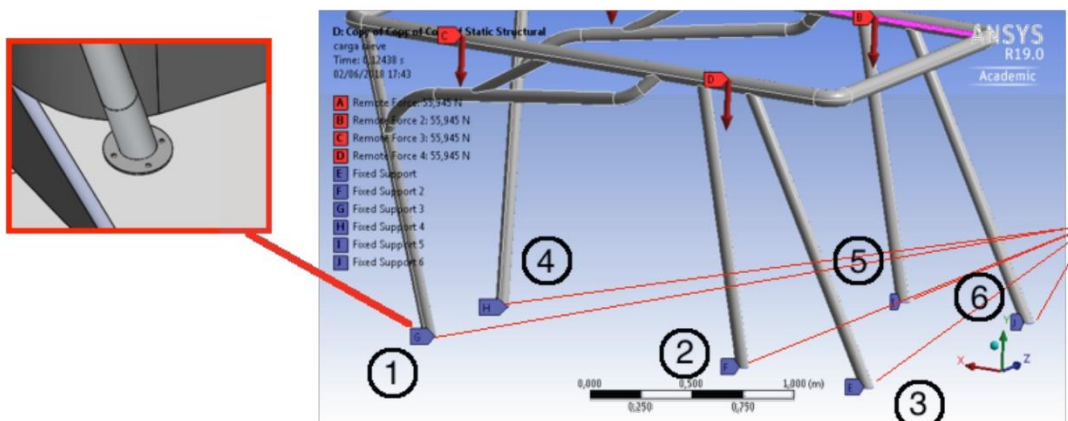


Рисунок 3.5 - Граничні умови кріплень жорсткого даху

Коли вся модель розбита на сітку і відомі граничні умови, які потрібно застосувати, можна перейти до дослідження випадків. Відмінність між кожним випадком полягає у силах, що діють на модель.

У всіх аналізах, проведених у цьому розділі, напрямок осі X збігається з напрямком руху човна, вісь Y перпендикулярна до дна човна, а вісь Z є векторним добутком осей X та Y.

3.2.2 Вплив ваги сонячних панелей на конструкцію

Як пояснювалося раніше, система сонячних панелей складається з семи сонячних панелей. Кожна з них важить 22,96 Н, тому загальна вага системи становить 160,68 Н. З урахуванням сили тяжіння загальна сила, що спричиняється системою на конструкцію жорсткого даху, становить 160,68 Н і, як пояснювалося раніше, розподіляється на чотири сили.

$$F_{TOTAL} = (SolarModule_{weight} \cdot Numb) \cdot g = (2,34 \cdot 7) \cdot 9,81 = 160,68 \quad (3.1)$$

- Графік переміщення

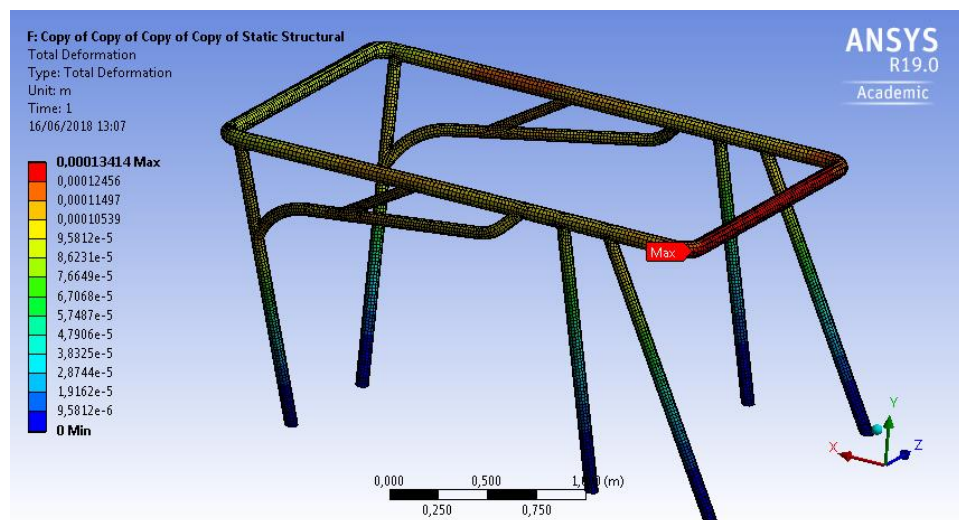


Рисунок 3.6 - Графік переміщення конструкції жорсткого даху

- Графік напружень

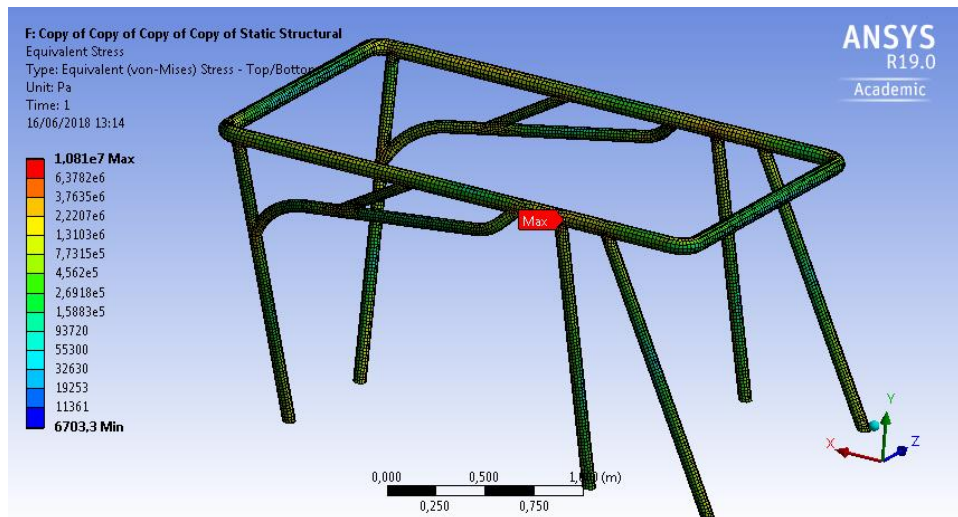


Рисунок 3.7 - Розподіл напружень у конструкції жорсткого даху

- Аналіз результатів:

Максимальне розраховане переміщення знаходиться в задній частині жорсткого даху і становить 0,134 мм.

У цьому випадку максимальне значення (позначене на графіку напружень як MAX) не є точкою максимального напруження, оскільки в цьому з'єднанні спостерігається сингулярність. Якщо цю сингулярність виключити і провести правильний аналіз графіка напружень, можна побачити, що максимальне значення напруження становить 5,5 МПа.

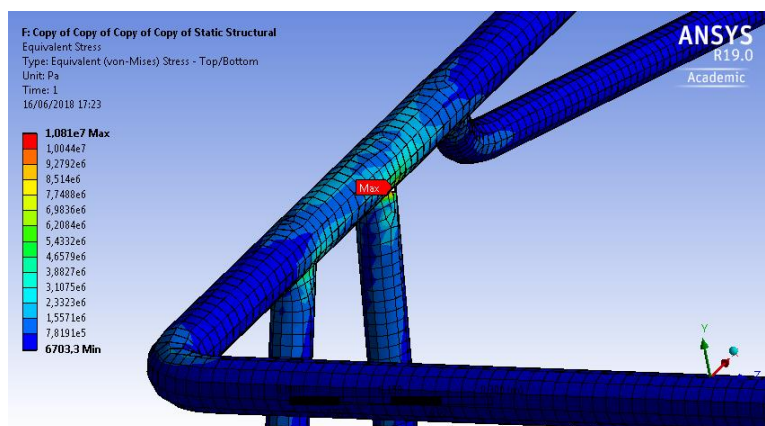


Рисунок 3.8 - Деталь сингулярної точки в жорсткому даху

Очевидно, що всі напруження та деформації в цьому прикладі дослідження не є дуже високими. Це пов'язано з тим, що прикладені

навантаження є дуже низькими. З цими навантаженнями коефіцієнт безпеки є дуже великим, тому його не розраховували.

- Аналіз реакції сил анкерів:

Таблиця 3.2 - Сили реакції анкерів

Номер анкера	F_x (Н)	F_y (Н)	F_z (Н)
1	-1,34	30,36	-7,7178
2	8,759	56,281	0,346
3	-7,421	-6,462	0,426

3.3 Система орієнтації сонячних панелей

Мета цієї системи — орієнтувати сонячні панелі для збільшення коефіцієнта досягнення між сонцем і сонячними панелями. Система орієнтації була розроблена на концептуальному рівні.

Для цього жорсткий дах планується оснастити механічною системою, керованою електронною системою. Ця система надає сонячним панелям два ступені свободи (нахил та поворот), див. рисунки 3.13 та 3.14.

3.3.1 Компоненти системи орієнтації

Що стосується електронної частини системи нахилу, вона складається з трьох основних елементів, що працюють разом:

- Інклінометр.
- GPS.
- Мікроконтролер.

У цьому випадку мікроконтролер відповідає за координацію керування різними двигунами та гальмами механічної системи на основі інформації, що надходить від GPS та інклінометра.

Електронний інклінометр — це прилад, що використовується для вимірювання кутів з високою точністю. Електронні інклінометри використовують внутрішній гіроскоп. Цей гіроскоп залишається в одному положенні незалежно від орієнтації. Для обчислення кута нахилу об'єкта інклінометр порівнює цей кут з даними гіроскопа. Ртутні інклінометри працюють аналогічно, але замість гіроскопа використовують ртутну рідину. Завдання інклінометра полягає у постійному контролі кута нахилу поверхні сонячних панелей. Одночасно GPS передає мікроконтролеру координати човна та його орієнтацію.

Вся ця інформація постійно аналізується мікроконтролером. Цей мікроконтролер обчислює оптимальний кут нахилу i , використовуючи ці дані в реальному часі (кут нахилу, курс i координати), подає команди різним двигунам для виконання нахилу.

Для обчислення оптимального кута нахилу сонячних панелей мікроконтролер повинен враховувати три фактори:

- Широту (положення човна).
- Місяць року.
- Напрямок руху човна.

Якщо човен знаходиться в північній півкулі, сонячні панелі повинні бути спрямовані строго на південь. Якщо човен знаходиться в південній півкулі, сонячні панелі повинні бути спрямовані строго на північ. Таким чином, мікроконтролер забезпечує бічний нахил, коли човен орієнтований у діапазоні від північного сходу до південного сходу та від південного заходу до північного заходу, а в інших випадках (від північного заходу до північного сходу або від південного заходу до південного сходу) він подає команди нахилити поверхню сонячних панелей вперед або назад.

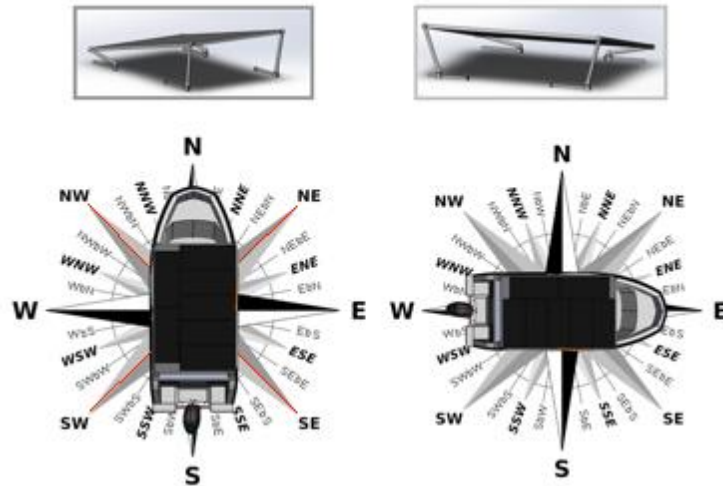


Рисунок 3.9 - Режими нахилу

Широта — це географічна координата, що визначає положення точки на поверхні Землі у напрямку північ-південь. Широта та пора року є параметрами, що визначають кут нахилу.

Таким чином, оптимальний нахил сонячних панелей обчислюється за трьома різними рівняннями: [29]

Перше рівняння (для зими):

$$\text{Нахил (градуси)} = (\text{Широта} \cdot 0,9) + 29 \quad (3.12)$$

Друге рівняння (для літа):

$$\text{Нахил (градуси)} = (\text{Широта} \cdot 0,9) - 23,5 \quad (3.13)$$

Третє рівняння (весна та осінь):

$$\text{Нахил (градуси)} = \text{Широта} - 2,5 \quad (3.14)$$

3.3.2 Концептуальний проєкт механічної системи

Цей механізм має деякі вимоги до конструкції:

- Він повинен бути максимально інтегрованим. Конструкція має бути якомога схожішою на традиційний жорсткий дах. Масивна конструкція може бути візуально неприйнятною для потенційного клієнта.

- Він повинен забезпечувати поверхні сонячних панелей щонайменше 2 ступені свободи.

В основному, механічна частина системи стеження складається з

чотирьох гальм, чотирьох моторизованих лінійних направляючих та чотирьох лінійних двигунів. Поверхня сонячних панелей шарнірно з'єднана у чотирьох крайніх точках. Ця частина з'єднана з механічною системою через кульовий шарнір.

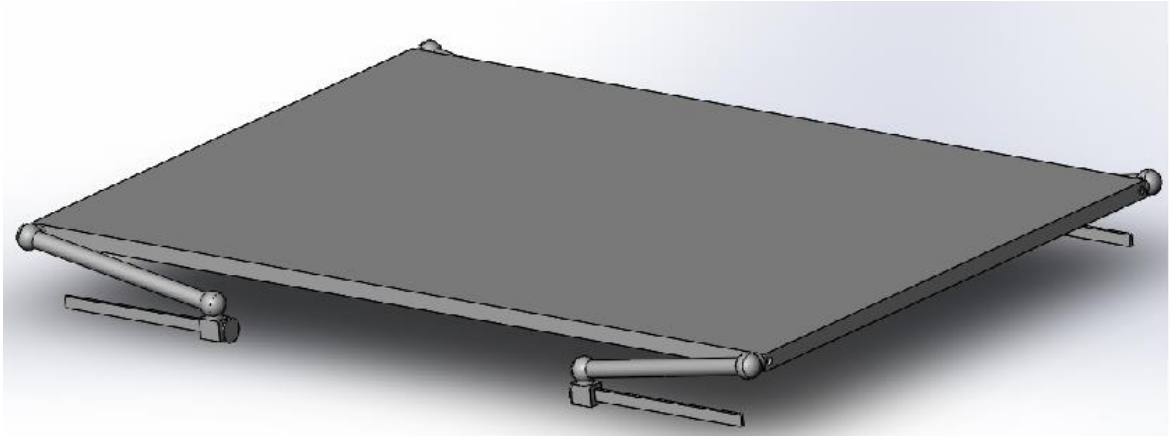


Рисунок 3.10 - Система орієнтації

Завданням чотирьох «рук» є підняття поверхні сонячних панелей. Кожна «рука» має три основні частини:

1. Лінійний двигун.
2. Моторизована лінійна направляюча.
3. Електронно кероване гальмо

Ці три компоненти з'єднані, як показано на наступному зображенні (рисунок 3.11).

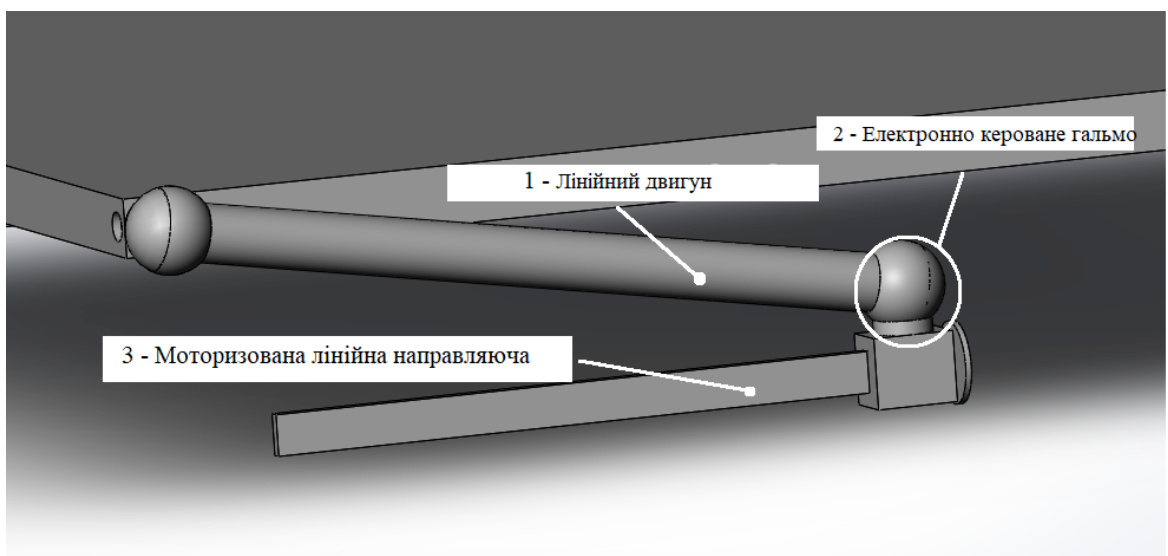


Рисунок 3.11 - Деталі системи орієнтації

Ці компоненти призначені для скоординованої роботи. Коли системі потрібно підняти одну сторону конструкції сонячних панелей, вона блокує гальмо, моторизовану направляючу та лінійний двигун протилежної сторони. Потім перший рух (у «руці» тієї сторони, яку система хоче підняти) виконується моторизованою направляючою, яка переміщується з мінімального положення в максимальне або в бажане положення для формування оптимального кута. Лінійний двигун зазвичай знаходиться в положенні мінімальної довжини, але коли моторизована направляюча знаходиться в положенні максимальної довжини, якщо система хоче надати сонячним модулям більший нахил, цей лінійний двигун надає додатковий нахил (конструкції), подовжуючи свою довжину до необхідного значення.

Мета гальма — контролювати кут (червоний кут на рисунку 3.12) між лінійним двигуном та горизонтальною площиною. Коли гальмо не спрацьовує, з'єднання рухається як кульовий шарнір.

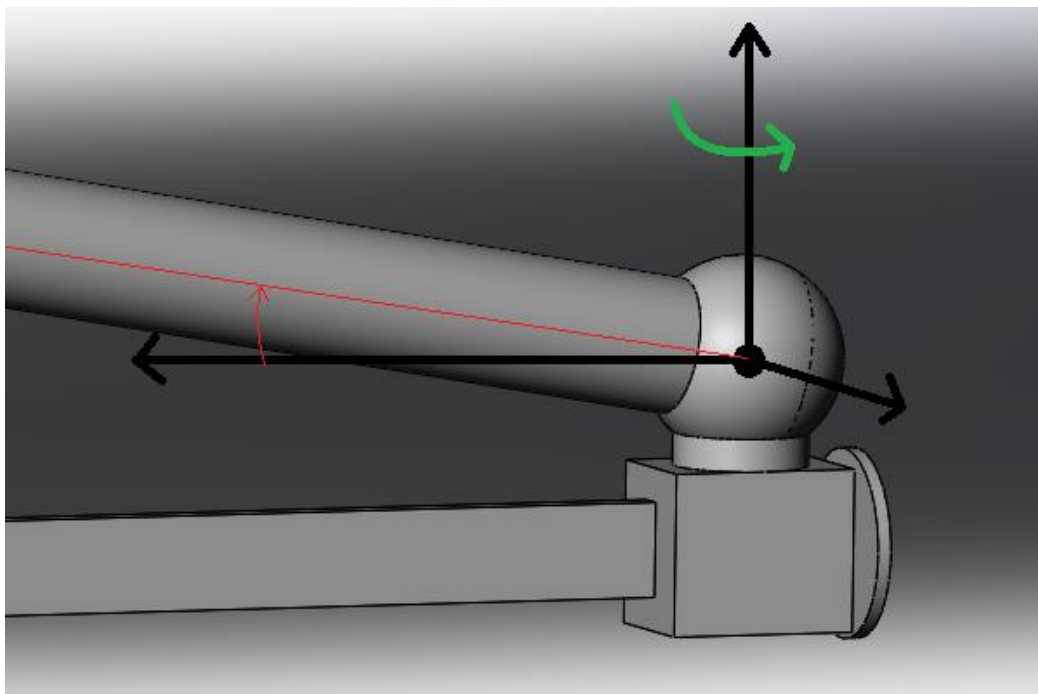


Рисунок 3.12 - Деталі та пояснення системи орієнтації

3.3.3 Максимальний нахил системи орієнтації

У цьому випадку максимальний нахил залежить від типу нахилу. Система може надавати поверхні сонячних панелей два нахили:

- Якщо система надає сонячним панелям бічний нахил, максимальний кут нахилу (без подовження лінійних двигунів) становить 44 градуси, а коли лінійні двигуни знаходяться у крайньому положенні — 90 градусів. Лінійні двигуни — це частина 1 на рисунку 3.11.



Рисунок 3.13 - Бічний нахил системи орієнтації

- Коли система забезпечує фронтальний нахил, максимальний кут нахилу без висунення лінійних двигунів становить 25 градусів, а після висунення лінійних двигунів — 58 градусів.

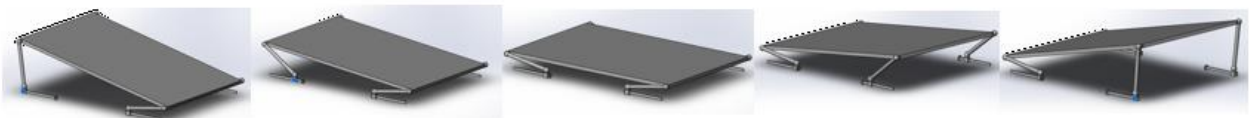


Рисунок 3.14 - Фронтальний нахил системи орієнтації

3.4 Висновки до розділу

1. Розроблено конструкцію жорсткого даху (хардтопа) для моторного човна Quicksilver Activ 505 за допомогою САПР SolidWorks. Конструкція даху дозволяє розмістити сім гнучких сонячних панелей на загальній площі 4,698 м² (2700 мм × 1740 мм), забезпечуючи водночас створення тіні для пасажирів, що є традиційною функцією хардтопів для човнів відкритого типу.

2. Проведено чисельне моделювання механічних властивостей конструкції жорсткого даху у програмному комплексі ANSYS. Визначено граничні умови, що включають сили реакції лінійних двигунів системи орієнтації та умови кріплення через шість анкерних точок.

3. Виконано розрахунок впливу ваги сонячних панелей на конструкцію жорсткого даху. Встановлено, що максимальне переміщення становить 0,134 мм у задній частині даху, а максимальне еквівалентне напруження — 5,5 МПа (з урахуванням виключення сингулярності в точці з'єднання). Отримані значення деформацій та напружень є незначними порівняно з механічними характеристиками матеріалу, що свідчить про високий запас міцності конструкції.

4. Розроблено концептуальний проєкт системи орієнтації сонячних панелей, що забезпечує два ступені свободи (бічний та фронтальний нахили) для максимізації коефіцієнта корисного використання сонячної енергії. Система складається з чотирьох лінійних двигунів, чотирьох моторизованих лінійних направляючих, чотирьох електронно керованих гальм та кульових шарнірів.

5. Визначено максимальні кути нахилу системи орієнтації: для бічного нахилу — 44° (за рахунок моторизованих направляючих) та до 90° (з додатковим висуненням лінійних двигунів); для фронтального нахилу — 25° (за рахунок моторизованих направляючих) та до 58° (з висуненням лінійних двигунів). Ці значення є достатніми для ефективного орієнтування панелей за сонцем у широкому діапазоні широт і пір року.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Інструктажі з охорони праці

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий [30].

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;
- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;
- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;
- який буде виконувати нову для нього роботу;
- . - відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві [25,26].

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами

або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою - 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів - для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт - понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;
- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 - 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних

об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільняти від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.

Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю, характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

4.2 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник безпеки

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами,

чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку [30].

Електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1 %, а в смертельному - біля 15-20 %. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80 % електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, пащ тою понад 1 кВ, - до 20-30 %.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, в більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групу з електробезпеки.

В порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

- людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначити наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потрапляння під напругу;

- струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмопровідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання;

– електротравми можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробі повітряного проміжку між струмопровідними частинами, або між струмопровідними частинами і людиною, чи землею;

– розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено порівняльний аналіз електродвигунів для суднових тягових установок і обрано синхронний безщітковий електродвигун Torqeedo Deep Blue 40. Двигун має вхідну потужність 30 кВт та номінальну напругу 345 В, що забезпечує максимальну швидкість човна 23,1 вузол.

2. Розроблено структурну схему електропостачання на базі центральної магістралі постійного струму 350 В, що передбачає використання перетворювача DC/DC для підвищення напруги з сонячних панелей, двонаправленого перетворювача для акумулятора та інвертора DC/ЗАС для живлення трифазного асинхронного двигуна.

3. Обрано літій-іонну акумуляторну батарею Kia Soul EV ємністю 30 кВт·год та номінальною напругою 375 В.

4. Для фотоелектричної установки обрано сім гнучких монокристалічних сонячних панелей з елементами SunPower класу А, кожна потужністю 120 Вт при ККД 22,6 %. Загальна потужність фотоелектричної установки становить 840 Вт. Панелі підключено паралельно до контролера відстеження точки максимальної потужності (MPPT) Epsolar IT6415ND, що забезпечує ефективність перетворення до 96 %.

5. Сформульовано аналітичний вираз залежності миттєвої споживаної потужності електродвигуна від швидкості руху човна у вигляді поліноміального рівняння третього ступеня. На основі даного виразу розраховано час автономної роботи, який забезпечується виключно сонячними панелями: 7,48 вузлів за умови 100 % генерації з фотомодулів та 6,95 вузлів при 80 %, що підтверджує технічну можливість безпосереднього живлення електродвигуна від сонячних панелей у денний час.

6. Розраховано автономність електричної установки: при низьких швидкостях (до 7 вузлів) вона перевищує 40 годин, при крейсерській швидкості

15,9 вузлів — 3,72 години, при максимальній швидкості 23,1 вузла — 1,23 години.

7. Описано три режими роботи системи: зарядка в порту від електромережі та сонячних панелей, плавання з живленням від акумулятора та фотомодулів, а також режим накопичення сонячної енергії при зупинці.

8. Виконано проектування конструкції жорсткого даху для розміщення сонячних панелей площею 4,698 м². Проведено міцнісний аналіз у програмному комплексі ANSYS Workbench, який підтвердив достатню міцність конструкції при всіх розглянутих навантаженнях.

9. Розроблено електромеханічну систему орієнтації сонячних панелей із двома ступенями свободи. Система забезпечує максимальний бічний кут нахилу до 90° та фронтальний до 58°, що дозволяє оптимально орієнтувати панелі відносно сонця в залежності від географічної широти, пори року та курсу човна.

10. Проведено порівняння маси електричної та паливної силових установок. Встановлено, що електрична система приводу важить 429,4 кг (161 кг більше за паливну), при цьому різниця не є критичною для ходових якостей човна.

11. Результати розрахунків підтверджують технічну доцільність та енергетичну ефективність запропонованої системи живлення електродвигуна моторного човна від сонячної міні-електростанції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19.
3. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173
4. Грицюк М.Я. Переваги концентруючих фотоелектричних електростанцій // М.Я. Грицюк; В.П. Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 29-30.
5. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)
6. Bohdan Orobchuk, Oleh Buniak, Ivan Sysak, Serhii Babiuk, Ihor Bodnarchuk, Vadym Koval (2024) Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation. 2nd International Workshop on Computer

Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 12-14, Vol. 3742, Pages 316-336

7. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10

8. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій —, 25-26 листопада 2020 року.— Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.— С. 80–81

9. Aquawatt 550 specifications. Режим доступу: https://www.aquawatt.at/GB/solarboot_aquawatt_550_11_GB.html. Дата звернення 25.04.2026.

10. Oceanvolt multihull propulsion system. Режим доступу: <https://oceanvolt.com/solutions/private/multihull/>. Дата звернення 25.04.2026.

11. Torqeedo history. Режим доступу: <https://www.torqeedo.com/en/about-torqeedo/company.html> Дата звернення 25.04.2026.

12. Quicksilver Activ 505 speed tests. Режим доступу: http://touronnautica.com/pdfs/datos_rendimientoQS.pdf. Дата звернення 15.05.2026.

13. Акумуляування електроенергії у автономних освітлювальних установках / В.П.Коваль, В.А. Андрійчук, К.М.Козак// Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», 23-27 лютого 2015 р., Тернопіль, Яремче (УКРАЇНА) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2015.– С. 98-99.

14. Філюк Я. О. Автономне живлення зовнішнього освітлення з використанням світлодіодних джерел світла / Ярослав Філюк, Вадим Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 19–21 травня 2015 року — Т. : ТНТУ, 2015 — С. 191-192.

15. Гнатюк В.В. Роль систем зберігання електроенергії для енергосистеми // В.В. Гнатюк; В.І. Кузьмич; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 21-22.

16. Yuan, X., Liu, H., & Zhang, J. (Eds.). (2016). Lithium-ion batteries: advanced materials and technologies. CRC press.

17. Левчук П. П. Зарядка електричних транспортних засобів на основі безпроводної передачі енергії / П. П. Левчук, В. П. Коваль // Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — Том 2. — С. 117.

18. Коваль В.П. Інтегрування електроавтомобіля у систему електроживлення будинку // В.П. Коваль, к.т.н. доц; А.В. Слободян; К.В. Слободян / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 36-37.

19. Малушенко А.С. Перспектива зарядки електромобілів від відновлювальних джерел енергії // А. С. Малушенко; М.Б. Горват; В. П. Коваль / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 225.

20. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали ІІІ Всеукраїнської

науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.

21. Коваль В. П. Енергоефективність системи позиціонування фотоелектричних батарей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, Ю. О. Пилипчук // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 3. — С. 139.

22. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.

23. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.

24. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С .

25. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130.

26. Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керя, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів,

(Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.

27. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.

28. Lago, J., Moia, J., & Heldwein, M. L. (2011, September). Evaluation of power converters to implement bipolar DC active distribution networks—DC-DC converters. In 2011 IEEE energy conversion congress and exposition (pp. 985-990). IEEE.

29. Bakirci, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(8), 6149-6159.

30. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.