

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

“ ” _____ 2021 року

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

на тему: Тяговий електропривод катера

Виконав: студент 3 курсу, групи _____ ЕП-п81

(шифр групи)

Турчиняк Ростислав Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доцент, д.т.н., Шаповал Іван Андрійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

Консультант _____

(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)

Рецензент доцент, к.т.н. Шиманська Анна Анатоліївна

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

[illegible]

				141.8118.015.БР		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Турчиняк Р.П.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Шаповал І.А				2	64
Консулт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського	
Н/контр.	Шаповал І.А				Каф. АЕМС-ЕП	
Зав.каф.	Пересада С.М.				Гр. ЕП-п81	

Пояснювальна записка до дипломного проєкту

на тему: Тяговий електропривод катера

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)

«__» _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Турчиняк Ростислав Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту тяговий електропривод катера,
керівник проєкту доцент, д.т.н., Шаповал Іван Андрійович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту

3. Вихідні дані до проєкту $P_{2n} = 14.9 \text{ кВт}$, $M_n = 79.2 \text{ Нм}$, $\omega_n = 188.4 \text{ рад / с}$,
 $U_{1n} = 460 \text{ В}$, $I_n = 22.9 \text{ А}$, $p_n = 4$, $J_d = 0.202 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $\eta = 0.95$, $\lambda = 1.7$, $f = 120 \text{ Гц}$,
 $\omega_{\max} = 226.1 \text{ рад / с}$, $\omega_{\min} = 9.4 \text{ рад / с}$, $U_{\text{ca}}(\omega_n) = 400 \text{ В}$, $R = 0.207 \text{ Ом}$,
 $L_d = 6.57 \text{ мГн}$, $L_q = 11.040 \text{ мГн}$.

4. Зміст пояснювальної записки Вступ. 1. Аналітичний огляд електроприводу водних транспортних засобів. 2. Визначення потрібної потужності електродвигуна. 3. Вибір електродвигуна та силового обладнання. Розробка силової схеми перетворювального пристрою. 4. Математична модель синхронного ЕП катера. Розрахунок статичних та динамічних параметрів ЕП. 5. Синтез системи керування. 6. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи. 7. Аналіз результатів. Розробка схеми керування.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

7. Дата видачі завдання 12.04.2021

Календарний план


№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вступ. Аналітичний огляд електроприводу водних транспортних засобів.	23.04.2021	Виконав
2	Визначення потрібної потужності електродвигуна	30.04.2021	Виконав
3	Вибір електродвигуна та силового обладнання. Розробка силової схеми перетворювального пристрою.	05.05.2021	Виконав
4	Математична модель синхронного ЕП катера. Розрахунок статичних та динамічних параметрів ЕП.	10.05.2021	Виконав
5	Синтез системи керування.	31.05.2021	Виконав
6	Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи. Аналіз результатів.	03.06.2021	Виконав
7	Розробка схеми керування.	07.06.2021	Виконав

Студент


(підпис)

Р.П. Турчиняк

Керівник проєкту


(підпис)

І.А. Шаповал

(підпис)




РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить: 64 сторінки, 19 рисунків, 4 таблиці.

Метою роботи є розробка та дослідження тягового електроприводу катера.

В роботі виконано аналітичний огляд існуючих систем тягового електроприводу, які застосовуються для розроблення водних транспортних засобів на електротязі. Визначено, які компоненти потрібно розрахувати для подальшого проєктування електрокатера, розраховано його основні параметри. Виконано вибір електродвигуна та силового електрообладнання, розраховані параметри електромеханічної системи. Виконано розробку математичної моделі електроприводу електрочовна. Проаналізовано отримані результати розрахунків, моделювання та зроблені висновки.

СИНХРОННИЙ ДВИГУН ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ, КАТЕР, ЕЛЕКТРОПРИВОД, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ

					141.8118.015.БР				
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	Тяговий електропривод катера	Літера	Акр.	Акрушів	
Розроб		Турчиняк Р.П.							
Перевірів		Шаповал І.А.					6	64	
Н. Контр.		Шаповал І.А.				НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського"			
Затверд.									




SUMMARY

Diploma project contains: pages - 64, drawings - 19, tables - 4

The purpose of the work is to develop and study the traction electric drive of the boat.

An analytical review of existing traction electric drive systems used to develop aquatic vehicles on the electric vehicle has been performed. Determined which components should be calculated for further operating of the electric boat, its basic parameters are calculated. The selection of electric motor and power electrical equipment are executed, parameters of the electromechanical system are calculated. The development of a mathematical model of the boat electric drive is carried out. The results obtained of calculations, modeling and conclusions are analyzed.

SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS, BOAT,
ELECTRIC DRIVE, CONTROL SYSTEM, VECTOR CONTROL

					141.8118.015.BW			
	Letter	No of doc	Sing.	Date				
Devel.	R. Turchyniak				Boat traction electric drive			
Choked	I. Shapoval							
N. Contr.	I. Shapoval							
Замісрді.	S. Peresada							
						L.	Page	Pages
							7	64
						KPI them Igor Sikorsky AEMS-EP EP-g81		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	14
1.1 Технічні рішення електропривода водних транспортних засобів	14
1.1.1 Човни для риболовлі.....	14
1.1.2 Басові човни.....	15
1.1.3 Човни Боурайдер.....	16
1.1.4 Каютні човни.....	16
1.1.5 Реакційний траулерний човен.....	17
1.1.6 Яхти.....	18
1.2 Опис електропривода водних транспортних засобів.....	18
1.2.1 Запас ходу з електродвигуном.....	19
1.3 Приклад електродвигуна.....	21
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	25
2.1 Розрахунок основних параметрів човна.....	25
2.2 Розрахунок потужності двигуна і його вибір.....	30
3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ. РОЗРОБКА (ОПИС) СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	33
3.1 Вибір двигуна.....	33
3.2 Розрахунок автономного інвертора напруги.....	35
3.3 Розрахунок акумуляторної батареї і її вибір.....	38
4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА КАТЕРА. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	42
4.1 Математична модель неявнополюсного синхронного двигуна з постійними магнітами.....	42
4.2 Алгоритм векторного керування СДПМ.....	42
5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	46

6. ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	51
6.1 Дослідження динамічних характеристик при роботі на швидкості $0.5\omega_n$.	52
6.2 Дослідження динамічної поведінки системи векторного керування при відпрацюванні нульової швидкості.....	55
6.3 Дослідження динамічних характеристик системи векторного керування при відсутності компенсацій першої та другої похідних за швидкістю.....	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	63

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун

АІН - автономний інвертор напруги

ДПР - датчик положення ротора

ДПС - двигун постійного струму

ККД - коефіцієнт корисної дії

П - регулятор - пропорційний регулятор

ПІ - регулятор - пропорційно-інтегральний регулятор

ПІД - регулятор - пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ПЧ - перетворювач частоти

СДПМ - синхронний двигун з постійними магнітами

ТЕД - тяговий електродвигун

ШІМ - широтно-імпульсна модуляція

ЕРС - електрорушійна сила

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor (біполярний транзистор з ізольованим затвором)

PWM - Pulse Width Modulation (широтно-імпульсна модуляція)

THD - Total Harmonic Distorsions (коефіцієнт нелінійних спотворень)

ВСТУП

Транспорт з електричним двигуном за притаманними йому екологічними характеристиками значно випереджає інші види транспорту з двигунами, що використовують як рушійну силу тепло. Але попри це тенденції з розробки, створенню і розвитку електричного транспорту передбачили використання такого його виду, в якому електроенергія за допомогою контактних проводів надходить до нього від системи тягового електропостачання. Зважаючи на це маневровість контактного електротранспорту (зміна шляху проходження транспортного засобу, об'їзд різного роду перешкод) поступається маневреності транспорту, що використовує двигун внутрішнього згоряння, оскільки є значно обмеженою. Але попри це, пошук альтернативних варіантів автотранспорту на вуглеводневому паливі безумовно необхідний, оскільки забруднення навколишнього середовища від сучасного автотранспорту отримало велике поширення, особливо в економічно розвинених містах.

Перехід на джерела енергії, безпечні для навколишнього середовища, є одним з найважливіших варіантів розв'язання проблеми щодо зниження негативного впливу транспортних засобів на природу в цілому. Ряд вимог застосовується до накопичувачів енергії акумуляторним батареям тягового електроприводу:

- пожежна безпека та вибухо-безпечність;
- наявність мінімальних масогабаритних показників;
- наявність широкого діапазону робочих температур;
- мінімальний саморозряд;
- тривалий термін роботи;
- наявність механічної міцності;
- простота обслуговування;
- мінімум токсичності, відходів газу;
- наявність коефіцієнта корисної дії зарядно-розрядної характеристики.

Необхідно відзначити той факт, що сучасна акумуляторна електрохімічна батарея - це не тільки носій заряду. Також вона містить у своїй конструкції електронне обладнання для її управління і діагностики власного її стану. Така система управління і контролю в конструкції електрохімічного накопичувача підвищує термін працездатності акумуляторних батарей:

- пожежна безпека та вибухобезпечність;
- простота в обслуговуванні;
- високий коефіцієнт корисної дії заряду і розряду;
- високий термін служби батареї.

Підприємство, яке виробляє продукцію, дає гарантію на термін служби акумуляторної батареї, але тільки при дотриманні умов її експлуатації. Технічна документація на виріб, що випускається і надається підприємством, повинна містити опис режимів експлуатації джерел струму, які, своєю чергою, мають їй відповідати. Індивідуальні експлуатаційні характеристики притаманні кожному типу електрохімічних систем. Якщо виникає потреба підвищеної надійності джерела енергії, то для кожного конкретного набору акумуляторів надаються певні технічні характеристики.

Щоб домогтися повної безпеки використання акумуляторної батареї, а також оптимальних умов її функціонування, необхідно чітко дотримуватися режимів експлуатації та застосовувати механізми, за допомогою яких відбувається перерозподіл енергії батареї між акумуляторами. Невіддільною частиною сучасних накопичувачів енергії є система керування і контролю за станом електрохімічного джерела струму, яка відповідає за правильність режиму роботи даної акумуляторної тягової батареї.

На сьогодні забруднення в цілому є важливою проблемою для нашого суспільства. Одним із найбільш хвилюючих питань, що хвилюють, є парниковий ефект і, як наслідок, глобальне потепління. Однією з причин прискореного глобального потепління є викид занадто великої кількості вуглекислого газу (CO₂) двигунами внутрішнього згоряння в повітря.

Щодня ми звикаємо бачити на вулицях більше електромобілів. Але це не відбувається (все ще) у човновій галузі. Потенційні вигоди в цій галузі такі ж хороші, як і в автомобільній промисловості або краще. Електричні човни є екологічно чистою альтернативою типовій рушійній системі на основі палива і здатні зменшити забруднення повітря та практично усунути шум, викликаний паливними двигунами.

Отже, метою дипломного проєкту є розробка і дослідження тягового електроприводу водних транспортних засобів, зокрема катера.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Технічні рішення електропривода водних транспортних засобів

Електричний привід представляє новий рубіж досліджень у майбутній судновій техніці. Завдяки інтеграції допоміжних та рушійних систем живлення, повністю електричний корабель, як прогнозується, буде більш надійним та універсальним порівняно з традиційною силовою установкою. Цю ж концепцію можна перенести і на човни менших розмірів, де виникає можливість використовувати лише електродвигуни із системами накопичення енергії. У деяких морських районах дозволяється використовувати лише електромеханізм.

1.1.1 Човни для риболовлі

Рибальські човни, як випливає з назви, використовуються для риболовлі [5]. Цей тип човна використовується як на солоних, так і на прісноводних об'єктах. Рибальські човни характеризуються такими якостями, як міцність, стійкість і довговічність, щоб протистояти у важких умовах на різних видах водних шляхів. Зазвичай включають такі особливості, як передня носова частина, шафки для стрижнів і тролінг-система двигуна.



Рисунок 1.1 – Рибальський човен [5]

1.1.2 Басові човни

Басовий човен - це невеликий човен з тонкими профілями, призначений головним чином для риболовлі на баса (або інших риб, таких як окунь чи сонячна риба). Ці човни зазвичай використовуються в прісних водах, таких як озера, річки та струмки. Крім того, вони мають поворотні стільці, що надає рибалці свободу кидати в будь-яке положення навколо човна.

Басові човни зазвичай приводяться в рух за допомогою підвісного двигуна та тролінгового двигуна. Перший використовується для швидкого руху човна, а другий використовується рибалкою для повільного та тихого наближення до риболовних зон.



Рисунок 1.2 – Басовий човен [6]

1.1.3 Човни боурайдер

Носова частина цих човнів підготовлена для забезпечення просторого розташування сидінь. Зазвичай розмір човна-грейдера становить від 5 до 11 метрів. Ці човни зазвичай використовуються для рекреаційних заходів, таких як вейкбординг та плавання.

Човни Bowrider працюють на багатьох типах двигунів, залежно від розміру або стилю човна. Деякі з них призначені для тихішого

круїзу, а інші мають бути досить швидкими. Конструкція та геометрія човна найбільш підходять для внутрішніх водних шляхів та спокійних озер, а не відкритих океанів.



Рисунок 1.3 - Bowrider човни [7]

1.1.4 Каютні човни

Ці човни мають невелику кабіну для укриття. Цей тип човнів добре підходить для занять спортом, таких як риболовля, яхтинг, вітрильний спорт та інші водні види спорту. Зазвичай приємні салонні човни будуються зі склопластику або алюмінію. Діапазон довжин коливається від 4,75 метра до 8,5 метрів.



Рисунок 1.4 – Каютні човни[8]

1.1.5 Рекреаційний траулерний човен

Їх також можна назвати крейсерськими траулерами або яхтними траулерами та є катерами відпочинку [9]. Рекреаційні траулери нагадують риболовецькі траулери. Траулери - це повільні човни з низьким споживанням палива, як правило, вони мають крейсерську швидкість 7-8 вузлів.

Довжина траулерів становить від 11 метрів до 18 метрів і більше.

Більшість з них готуються до тривалих круїзів і можуть приймати від двох до восьми осіб протягом багатьох днів. Траулерний човен можна використовувати як постійний дім.



Рисунок 1.5 - Рекреаційний траулерний човен [9]

1.1.6 Яхти

Яхти - це морські судна, що використовуються для занять спортом та розваг. Довжина човнів починається з 10 метрів, вони можуть досягати понад 50 метрів. В останньому випадку їх називають мегаяхтою.

Зазвичай це найдорожчі човни, і вони оснащені розкішшю. Оскільки рекреаційні траулери готові прийняти людей і ідеально підходять для круїзу на великі відстані.

Зазвичай рухаються одним-двома дизельними або бензиновими бортовими двигунами. Враховуючи те, що ці двигуни мають багато кінських сил, ці човни швидкі, але також мають високі витрати та мають дороге обслуговування.



Рисунок 1.6 – Яхта[10]

1.2 Опис електропривода водних транспортних засобів

Протягом останніх десяти років електричні та гібридні силові установки на катерах і яхтах набули широкого поширення[10]. Покупців приваблюють безшумний рух, відсутність витрат на обслуговування двигуна і можливість пересуватися по закритим для суден з двигунами внутрішнього згоряння водойм. Електричний мотор зручно використовувати на човні, яка проходить невелику відстань, повертається на місце стоянки та заряджає акумулятори від берегової мережі. Наприклад, електродвигуни для яхт на озері використовуються тільки для входу і виходу з гавані. Велика ємність акумуляторів в цьому випадку не потрібна, їх вага і розміри зберігаються в розумних межах, але з'являється можливість маневрувати та рухатися безшумно.

Порівняння енерговитрат підтверджує переваги електромотора. ККД невеликого дизельного двигуна приблизно 20%. Чотири літри палива містять 40 кВтг енергії, але коли двигун спалює їх, для обертання гвинта залишиться тільки 8 кВтг.

По-іншому в установці з електродвигуном. Електрична енергія, що обертає вал електромотора, надходить від берегової мережі в зарядний пристрій, який заряджує акумуляторні батареї. Акумулятори зберігають 80% отриманої енергії, а електродвигун використовує 85% створеного запасу для обертання гвинта. Отже, щоб отримати на валу 8 кВтг необхідно мати:

- на вході в електродвигун $8 \text{ кВтг} / 0,85 \text{ ККД} = 9,41 \text{ кВтг}$
- перед акумуляторами $9,41 \text{ кВтг} / 0,8 \text{ ККД} = 11,76 \text{ кВтг}$
- на вході в зарядний пристрій $11,76 \text{ кВтг} / 0,9 \text{ ККД} = 13,07 \text{ кВтг}$

Як бачимо, човну з електромотором потрібно в три рази менший запас енергії, щоб отримати на валу тугіше потужність, що і у судна з двигуном внутрішнього згоряння. Витрати на енергію в грошовому вираженні у електричного човна також менше. Якщо дизельне паливо коштує 112 грн за 4 літри, а електрику 1.68 грн за кВтг, то вартість енергії для електричного судна $1.68 \times 13.07 \text{ кВтг} = 22 \text{ грн}$. Це в два з половиною рази менше вартості дизельного палива.

Оскільки з урахуванням втрат на гвинті ККД двигуна внутрішнього згоряння ще менше, то реальна відносна ефективність електричної силової установки ще вище. Наприклад, повний ККД електромоторів Torqeedo [11] досягає 50%, а невеликий електродвигун Torqeedo Travel можна порівняти за потужністю на гвинті з підвісним двигуном внутрішнього згоряння потужністю 3 кВт.

1.2.1 Запас ходу з електродвигуном

Електричні човни рідко використовують режим глісування через високі витрати потужності. На судах водозаміщуючого типу існує поріг швидкості

після якого опір корпусу різко зростає. Часто для водозаміщуючих суден збільшення швидкості на два вузли призводить до зростання споживаної потужності у два рази [12].

Наприклад, якщо для руху зі швидкістю 6 вузлів потрібно потужність на валу 9 кВт, то для швидкості 7 вузлів вона зростає до 18 кВт, а для швидкості 8 вузлів до 36 кВт.

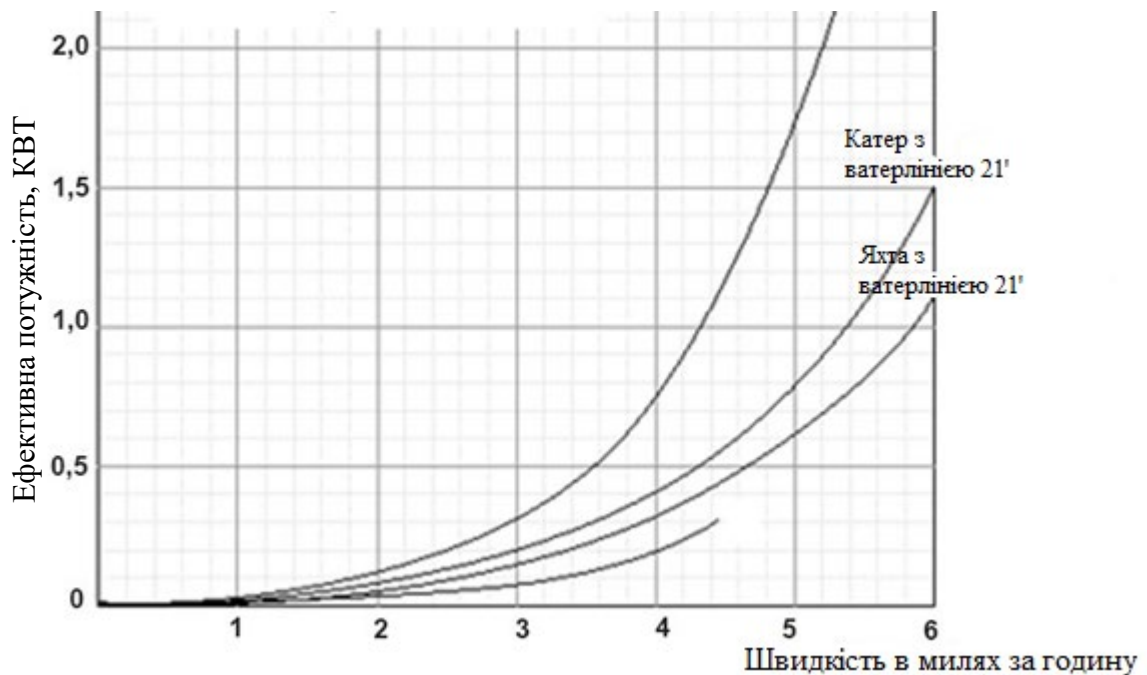


Рисунок 1.7 - Графік залежності потужності від швидкості

Потужність на човні зростає зі збільшенням швидкості. - Якщо підвищити швидкість на 1 вузол, потрібна потужність зростає вдвічі.

Через це ємність акумуляторів необхідна для руху в перебігу години зі швидкістю 8 вузлів виявляється в чотири рази більше, ніж для руху зі швидкістю 6 вузлів. Іншими словами, щоб пройти 20 миль на швидкості 6 вузлів потрібно $(20 \text{ миль} / 6 \text{ вузлів}) \text{ годину} \times 9 \text{ кВт} = 30 \text{ кВт*г}$ доступної ємності акумуляторів. А для того, щоб пройти ті ж 20 миль на швидкості 8 вузлів необхідна акумуляторна батарея ємністю $(20 \text{ миль} / 8 \text{ вузлів}) \text{ годину} \times 36 \text{ кВт} = 90 \text{ кВт*г}$.

Хвилі або вітер підвищують споживання енергії. В результаті для подолання навіть невеликої відстані необхідна акумуляторна батарея великої місткості. Водночас судно має рухатися зі швидкістю значно меншою, ніж з

двигуном внутрішнього згоряння. Цим електричні човни відрізняються від електромобілів, в яких на крейсерській швидкості споживана енергія зменшується і витрачається тільки на підтримку швидкості. Для судна ситуація зворотна - чим більше швидкість наближається до крейсерської, то більша витрати енергії на підтримку цієї швидкості [12].

1.3 Приклад електродвигуна

Для прикладу розглянемо електродвигун Deer Blue 100i 2500 [13].

Опис двигуна:

Внутрішня система з силовою електронікою та 2500 об/хв для плавного переміщення.

Це нове доповнення до сімейства Deer Blue забезпечує 100 кВт безперервної потужності без викидів, максимальний крутний момент, низькі витрати на технічне обслуговування.

Всі компоненти системи ідеально спроектовані, щоб відповідати один одному і повністю водонепроникні.

Рух на електричному човні не лише потужний і безпечний, він також є справжньою комерційною альтернативою для користувачів.

Електрична система приводу вимагає набагато менше технічного обслуговування, ніж порівнянні системи приводу, що використовують вичерпне паливо.

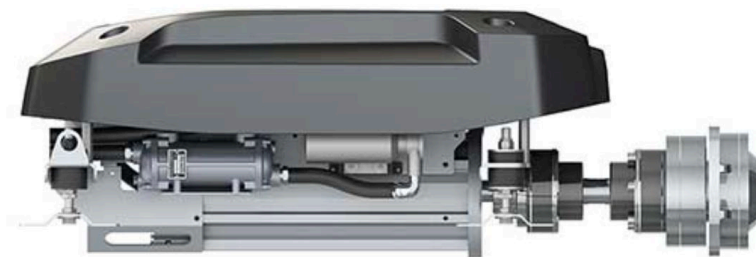


Рисунок 1.8 - Електродвигун Deer Blue 100i 2500.

Цей абсолютно новий двигун потужністю 100 кВт був спеціально сконструйований для швидкого конструювання моторних човнів. Завдяки надійній конструкції з прямим приводом, що не потребує технічного обслуговування, Deer Blue 100i забезпечує надзвичайну продуктивність, до 2500 обертів в хвилину та крутний момент 390 Нм.

Deer Blue стає першим у своєму роді не лише завдяки потужності та продуктивності. Це неперевершена продуктивність у поєднанні з повною інтеграцією системи та рівнями безпеки, що відрізняє Deer Blue від усіх інших електричних силових установок на ринку.

Сучасна технологія моніторингу з контрольними лініями та моніторами ізоляції захищає високовольтну систему від ризику короткого замикання. Ті самі високоефективні літієві батареї, що використовуються для живлення автомобілів, також живлять Deer. Ці та багато інших характеристик безпеки та продуктивності роблять Deer Blue унікальною високовольтною силовою установкою для електричних човнів.

Перша потужна силова установка у серійному виробництві. Повністю інтегрована система, в якій всі компоненти спроектовані так, щоб безперешкодно збігатися між собою та ідеально працювати разом на воді. Загальна концепція, унікальна з точки зору безпеки, продуктивності та діапазону.



Рисунок 1.9 – Перша потужна силова установка у серійному виробництві

Компоненти установки:

1 - Інформаційна система Deer Blue на морському дисплеї високої роздільної здатності: сенсорний екран, водонепроникний, хороша читабельність сонячного світла. Чисте, чітко організоване відображення системної інформації.

2 - Електронний дросель: чистий, гладкий дизайн, з перемикачем ключів, аварійною зупинкою та нейтральним замком для безпечної роботи.

3 - 12 В акумулятор: активує акумулятор великої ємності при кожному запуску. Постачає 12 В для бортової мережі і автоматично заряджається від батареї 360 В. Не потрібно додаткового зарядного пристрою на 12 В.

4 - Потужний електродвигун: спеціально розроблений для вимог системи Deer Blue. Електронно-комутований безщітковий двигун із надзвичайною ефективністю (макс. 98%). Підходить для охолодження солоною водою.

5 - Блок керування системою: об'єднує всі входи змінного струму і дозволяє заряджати від берегової енергії (у док-станції) або від генератора (у морі). Водонепроникний до IP67, з вбудованим датчиком води.

6 - Зарядний пристрій: передове машинобудування з автомобільної промисловості. Водонепроникний до IP67. Швидкістю зарядки можна керувати за допомогою дисплея. Кожна система може підтримувати кілька зарядних пристроїв для швидшого заряджання, коли це потрібно.

7 - Акумулятор BMW і: останнє покоління акумуляторів із серій BMW і3 та BMW і8. Дуже висока щільність енергії, міцна, міцна, найвищий рівень якості та безпеки.

Висновки до розділу 1

В цьому розділі проведено ознайомлення із загальними відомостями типів електро човнів . Детально розглянуто технічні рішення електропривода водних транспортних засобів, описано електропривод водних транспортних засобів, наведено приклад одного з електродвигунів Deer Blue, а саме Deer Blue 100i 2500, описані його характеристики. Наведена перша потужна силова установка у серійному виробництві та описані її компоненти. По зроблених в першому розділі висновках, для подальших розрахунків виберемо катер типу крейсер.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА.

Основні компоненти рухової системи човна.

Для проектування двигуна електричного човна, що призводить до високої ефективності, важлива вага та об'єм усіх деталей, що входять до такої системи. У цій дипломній роботі розглядаються 3 основні компоненти побудови електричної рушійної системи. Це:

- Двигун.
- Акумулятори.
- Інвертори напруги.

2.1 Розрахунок основних параметрів човна

Вантажопідйомність , кг – 300

Маса порожнього, кг – 1700

Маса завантаженого , кг – 2000

ККД – 0.96

Максимальна швидкість, км/год– 46.30

Ходкістю називається здатність судна розвивати певну швидкість за заданої потужності двигуна [14]. Ходові якості будь-якого судна визначаються двома основними характеристиками - опором води руху судна та ефективністю рушія - пристрою, що перетворює енергію двигуна (або вітру в разі парусного судна) в силу - упор, рушійну судно вперед. Під час усталеного руху судна з сталою швидкістю - сила опору дорівнює упору; якщо ж упор рушія стає менше, відповідно знижується і швидкість руху судна.

У сучасній гідромеханіці силу опору складає три умовно незалежних складових: опір тертя, опір форми і хвильовий опір [14].

Опір тертя обумовлено дією сил в'язкості води, яка оточує корпус судна. Під час розгляду явищ, що відбуваються поблизу корпусу, використовується принцип оборотності. Корпус вважається нерухомим і обтічним потоком води зі швидкістю, що дорівнює швидкості судна.

Очевидно, що частинки води, що безпосередньо примикають до обшивки судна, мають бути відносно неї нерухомими - вони мов би прилипають до обшивки. На деякій відстані від корпусу швидкість руху частинок води має стати рівною швидкості потоку.

Цей порівняно тонкий шар води, в якому відбувається зміна швидкості потоку від нуля до швидкості судна v , називається прикордонним шаром[14]. Його товщина становить 1-2% довжини судна по ватерлінії та поступово збільшується в кормовій частині корпусу. В межах прикордонного шару й відбуваються явища, обумовлені в'язкістю води та появою опору тертя.

Дослідженнями [14] встановлено, що величина опору тертя залежить від характеру руху частинок води в прикордонному шарі, який змінюється в залежності від довжини змоченої поверхні та швидкості судна. Характеристикою режиму руху частинок є число Рейнольдса:

$$R_e = \frac{v \cdot L}{\nu} = \frac{0.00000115 \cdot 9.50}{12.861111111111} = 0.00000085 = 85 \cdot 10^{-6} A, \quad (2.1)$$

де ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості води (для прісної води $\nu = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$);

L - довжина змоченої поверхні, м;

v - швидкість судна, м / с.

Силу опору розраховують за формулою [14]:

$$R_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \Omega = \frac{102 \cdot 0.00000115^2}{2} \cdot 5 \cdot 10^4 = 0.0000034 = 34 \cdot 10^{-5} A, \quad (2.2)$$

де $R_{\text{тр}}$ - опір тертя;

$\xi_{\text{тр}}$ - коефіцієнт опору тертя;

ρ - масова щільність води, що дорівнює щільності води, поділений на прискорення сили тяжіння;

Ω - змочена поверхня корпусу.

Хвильовий опір. Виникнення хвиль біля корпусу судна під час його руху викликано дією сил тяжіння рідини на межі поділу води та повітря [14]. У носовій частині - в місці зустрічі корпусу з водою, тиск різко підвищується і вода підіймається на деяку висоту в вигляді носового буруна. Близьче до міделю, де внаслідок розширення корпусу швидкість навколишнього потоку підвищується, тиск в ньому відповідно до закону Бернуллі падає, рівень води знижується - утворюється западина хвилі. У кормовій частині, де лінії струму води, що огинають корпус, з'єднуються, тиск знову підвищується і утворюється вершина кормової хвилі.

Під час переміщення судна біля нього утворюється складна система носових в кормових хвиль, яка за своїм характером однакова для суден будь-яких розмірів.

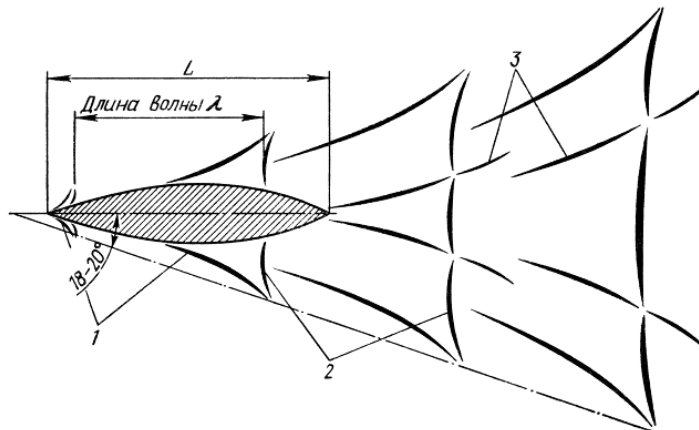


Рисунок 2.1 – Система хвиль, що виникає при рухомого судна [14]

Оскільки в нас максимальна швидкість катера 46.30 км/год переведемо в м/с, отримаємо 13 м/с, беремо середнє значення від максимальної швидкості, а саме, 21.6 км/год, тоді довжина хвилі в нас буде складати 23 м.

$$\lambda = \frac{2\pi \cdot v^2}{g} = \frac{2 \cdot 0.146}{9.81} = 0.029. \quad (2.3)$$

Оскільки хвильова система рухається разом з судном, то і швидкість поширення хвилі дорівнює швидкості судна. Можна підрахувати довжину поперечної хвилі для кожної швидкості:

Таблиця 2.1 – Залежність довжини поперечної хвилі від швидкості судна

Швидкість судна м/с	2	4	6	8	10
Швидкість судна Км/год	7.2	14.4	21.6	28.8	36
Довжина хвилі м	2.6	10.2	23	41	64

Оскільки вище ми дізнались, що висота хвилі складає 23 м, відносно цього ми можемо визначити швидкість хвилі, періодичність хвилі візьмемо в середньому 1-60 с, довжина хвилі, як було вище зазначено, буде 23 м. Розрахувавши, дізнаємось середню швидкість хвилі, в нашому випадку швидкість хвилі буде складати 0.383 м/с.

Для характеристики режиму судна і хвилоутворення використовується безрозмірний параметр – число Фруда [14].

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} = \frac{0.383}{\sqrt{69.65}} = \frac{0.383}{8.34} = 0.045. \quad (2.4)$$

Зауважимо, що у формулу числа Фруда або відносної швидкості входять довжина судна по КВЛ та ті ж елементи, що складають формулу для визначення довжини хвилі. Цим підкреслюється залежність хвилоутворення від сил тяжіння, швидкості і довжини судна по ватерлінії.

Під час глісування, яке характеризується відносною швидкістю, судно розташовується над поверхнею води, торкаючись її тільки невеликою ділянкою днища. Воно підтримується в цьому положенні завдяки гідродинамічного тиску, що виникає як реакція мас води, що відкидають вниз.

$$p = 1 / 2 \rho \cdot v^2 = 0.5 \cdot 102 \cdot 21.6 = 1101.6 \text{ кг} / \text{м}^2. \quad (2.5)$$

Нижня межа швидкості для виходу судна на режим глісування залежить від повної маси судна, включаючи пасажирів, обладнання, запас пального і мотор. Орієнтовно його можна визначити за формулою:

$$V = 34\sqrt[6]{D} = 34\sqrt[6]{0.5} = 30.6 \text{ км / год.} \quad (2.6)$$

Щоб розвинути таку швидкість, на човні потрібно встановити двигун відповідної потужності.

2.2 Розрахунок потужності двигуна і його вибір

Човновий електромотор перетворює накопичену в акумуляторній батареї енергію в механічну енергію обертання гвинта і витрачає її на подолання сили, що діє в протилежному руху напрямі. Опір, що виникає через дії цієї сили, залежить від швидкості, водотоннажності і форми корпусу судна і складається з опору тертя, залишкового і аеродинамічного опору [15].

Опір тертя залежить від розміру підводної частини корпусу і від коефіцієнта тертя. Під час руху опір тертя змінюється пропорційно квадрату швидкості судна і зростає при забрудненні корпусу.

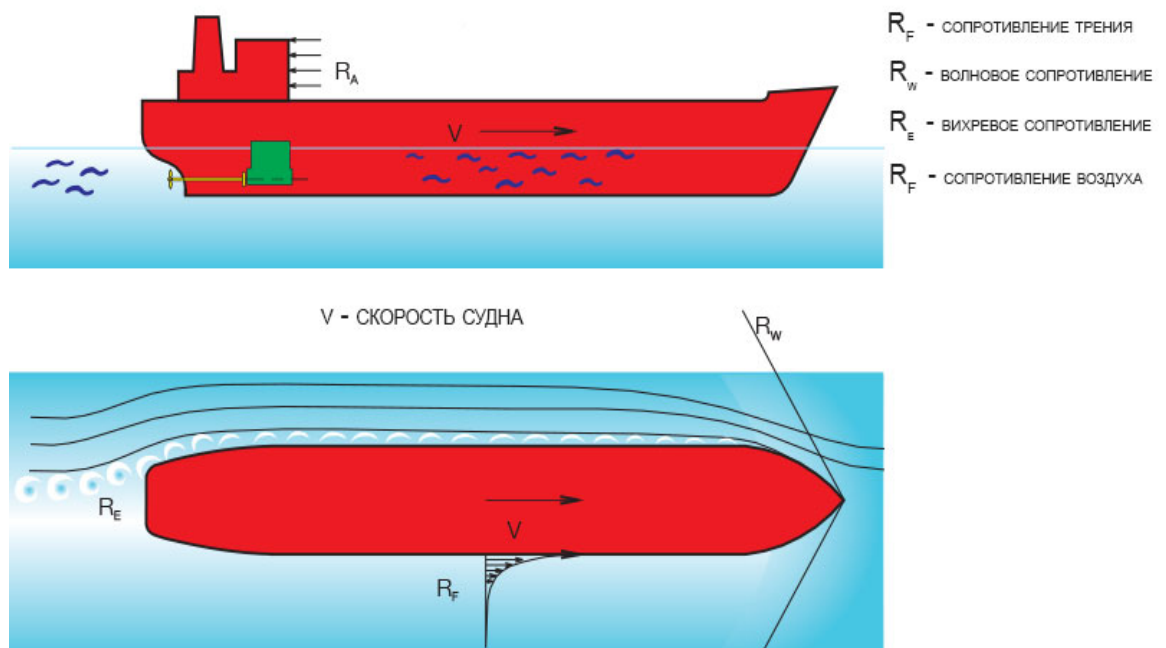


Рисунок 2.2 – Основні опори судна[15]

Залишковий опір складається з хвильового і вихрового опорів. Хвильовий опір характеризує енергію, що витрачається на утворення хвиль під час руху, а вихровий - втрати через перемішування шарів води, що обтікають судно. Хвильовий опір швидко зростає зі збільшенням швидкості, тому для судна існує межа після якого додаткова потужність не підвищує швидкість, а цілком йде на утворення хвиль, що створюють враження швидкого руху.

У спокійну погоду опір повітря пропорційний квадрату швидкості судна і площі поперечного перерізу над ватерлінією. Воно становить приблизно 2% від загального опору і в деяких випадках його не враховують.

Що менше повний опір, то менше потужність, яка потрібна для руху із заданою швидкістю, більше запас ходу і час роботи від акумуляторів.

Опір тертя обумовлений дією сил в'язкості води, яка оточує корпус судна. Під час розгляду явищ, що відбуваються поблизу корпусу, використовується принцип оборотності, тобто корпус вважається нерухомим і обтічним потоком води зі швидкістю, що дорівнює швидкості судна.

Розрахунок загального опору за максимальної швидкості:

$$R_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_T \cdot S \cdot V_{s^2} = \frac{1}{2} \cdot 102 \cdot 0.115 \cdot 46.30 = 271.515 \text{ A} . \quad (2.7)$$

Отримаємо номінальну потужність двигуна:

$$P_\delta = R_T \cdot V_s = 271.515 \cdot 46.30 = 12571.14 \text{ Вт} . \quad (2.8)$$

Тип – двигуна, обирається СДПМ з номінальною потужністю 14.9 кВт.

Висновки до розділу 2

В цьому розділі було визначено, які компоненти потрібно розрахувати для подальшого проектування електрокатера. Розраховані основні параметри. Визначено число Рейнольдса, силу опору, загальний опір при максимальній швидкості та потужність електродвигуна для подальшого його вибору. Після проведення зазначених вище розрахунків був обраний тип двигуна СДПМ з номінальною потужністю 14.9 кВт.

3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ. РОЗРОБКА (ОПИС) СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Вибір двигуна:

Знайдемо кутову швидкість, опираючись на стандартну швидкість двигунів 1800 об/хв:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{30} \cdot n_0 = \frac{3.14}{30} \cdot 1800 = 188.4 \text{ (рад/с)} . \quad (3.1)$$

Приводимо момент інерції механізму до валу двигуна, беручи $i = 100$:

$$J'_m = \frac{J_m}{100^2} = \frac{2020}{10000} = 0.202 \text{ (Нм}^2\text{)}. \quad (3.2)$$

Для попереднього вибору приймаємо, що:

$$J_d = J'_m . \quad (3.3)$$

Сумарний момент інерції

$$J_\Sigma = J_d + J'_m = 2 \cdot J'_m = 2 \cdot 0.202 = 0.404 \text{ (Нм}^2\text{)}. \quad (3.4)$$

Обчислимо динамічний момент:

$$M_{\text{дин}} = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = J_\Sigma \frac{(\omega_0 - 0)}{(t_a - 0)} = 0.404 \cdot \frac{188.4}{0.321} = 237.1 \text{ (Нм)}, \quad (3.5)$$

$$M_n = \frac{M_{\text{мех}}}{3} = \frac{237.1}{3} = 79 \text{ (Нм)}. \quad (3.6)$$

Згідно з отриманих результатів обираємо двигун з $M_n = 79.2 \text{ (Нм}^2\text{)}$.

Параметри двигуна представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні параметри обраного двигуна

Номінальна потужність	$P_{2n} = 14.9 \text{ кВт}$
Номінальний момент	$M_n = 79.2 \text{ Нм}$
Номінальна швидкість	$\omega_n = 188.4 \text{ рад/с}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{ln} = 460 \text{ В}$
Номінальне діюче значення фазного струму статора	$I_n = 22.9 \text{ А}$
Число пар полюсів	$p_n = 4$
Момент інерції	$J_d = 0.202 \text{ кгм}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.95$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 1.7$
Номінальна частота напруги статора	$f = 120 \text{ Гц}$
Максимальна швидкість з постійною потужністю	$\omega_{\max} = 226.1 \text{ рад/с}$
Мінімальна швидкість з постійною потужністю	$\omega_{\min} = 9.4 \text{ рад/с}$
Амплітудне фазне значення проти-ЕРС двигуна при ω_n	$U_{ea}(\omega_n) = 400 \text{ В}$
Параметри схеми заміщення	
Активний опір статора	$R = 0.207 \text{ Ом}$
Індуктивність статора по осі d	$L_d = 6.57 \text{ мГн}$
Індуктивність статора по осі q	$L_q = 11.040 \text{ мГн}$

Критичний момент двигуна (перевантажувальною здатністю λ з каталогу)

$$M_k = \lambda M_n = 1.7 \cdot 79.2 = 134.64 (\text{Нм}). \quad (3.7)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги:

$$U_n = \frac{U_{ln}}{\sqrt{3}} = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265.6 (\text{В}). \quad (3.8)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 265.6 = 375.6 (\text{В}), \quad (3.9)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 22.9 = 32.4 \text{ (A)}. \quad (3.10)$$

Потік постійних магнітів розрахуємо через проти-ЕРС як:

$$\Psi_m = L_m i_f = \frac{U_{be} / \sqrt{2}}{\omega p_n} = \frac{U_{be} (\omega_n) / \sqrt{2}}{\omega_n p_n} = \frac{400 / \sqrt{2}}{188.4 \cdot 4} = 0.375 \text{ (Вб)}. \quad (3.11)$$

Перевіримо розрахунок потоку постійних магнітів через рівняння моменту двигуна в номінальному режимі:

$$\Psi'_m = \frac{M_n}{(3/2)p_n I_{na}} = \frac{79.2}{1.5 \cdot 4 \cdot 32.4} = 0.407 \text{ (Вб)}. \quad (3.12)$$

Коефіцієнт потужності двигуна через номінальну потужність дорівнює:

$$\cos \varphi = \frac{P_{2n}}{3 U_n \eta I_n} = \frac{14.9 \cdot 10^3}{3 \cdot 265.6 \cdot 0.95 \cdot 22.9} = 0.85. \quad (3.13)$$

Розрахуємо усталене значення струму пониження поля за умови роботи на підвищеній швидкості ω_{\max} для стабілізації компоненти u_{lq} :

$$i_{d(\text{weak})} = \frac{\Psi_m}{L_d} \left(\left| \frac{\omega_n}{\omega_{\max}} \right| - 1 \right) = \frac{0.375}{6.57 \cdot 10^{-3}} \left(\left| \frac{188.4}{226.1} \right| - 1 \right) = -9.7 \text{ А}. \quad (3.14)$$

Результати розрахунків параметрів СДПМ зведені до табл. 3.3.

Таблиця 3.2 – Параметри СДПМ потужністю 14.9 кВт

P_{2n} , кВт	14.9	R , Ом	0.207	p_n	4
ω_n , рад/с	188.4	L_d , мГн	6.57	λ	1.7
M_n , Нм	79.2	L_q , мГн	11.040	I_{na}	32.4
M_k , Нм	134.64	Ψ_m , Вб	0.375	η	0.95
ω_{\max} , рад/с	226.1	J_d , кгм ²	0.202	$\cos \varphi$	0.85
ω_{\min} , рад/с	9.4	$i_{d(\text{weak})}$, мкА	-9.7		

3.2 Розрахунок автономного інвертора напруги

Прийнявши перевантажувальну здатність $k_{ovl} = 1.6$, розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача:

$$I_{\max} = k_{\text{ovl}} \cdot I_{\text{на}} = 1.6 \cdot 32.4 = 51.84 \text{ A.} \quad (3.15)$$

Вибір IGBT здійснюється за критерієм:

$$I_c > I_{\max}, U_{\text{cemax}} > U_{\text{ce}}. \quad (3.16)$$

де I_c та U_{cemax} – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор-емітер, які вказані в паспортних даних IGBT. Обов'язковою є умова наявності антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку.

Вибираємо за каталогом SIXPACK IGBT, модуль типу FS75R12W2T7B11 [1] з параметрами $U_{\text{cemax}} = 1200 \text{ В}$, $I_c = 75 \text{ А}$.

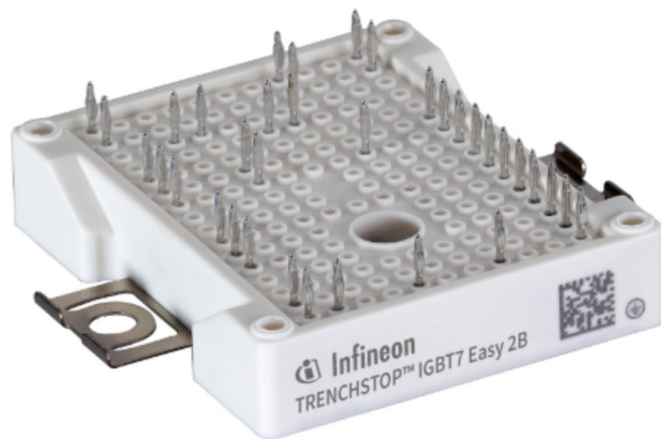


Рисунок 3.1 – IGBT модуль типу FS75R12W2T7B11

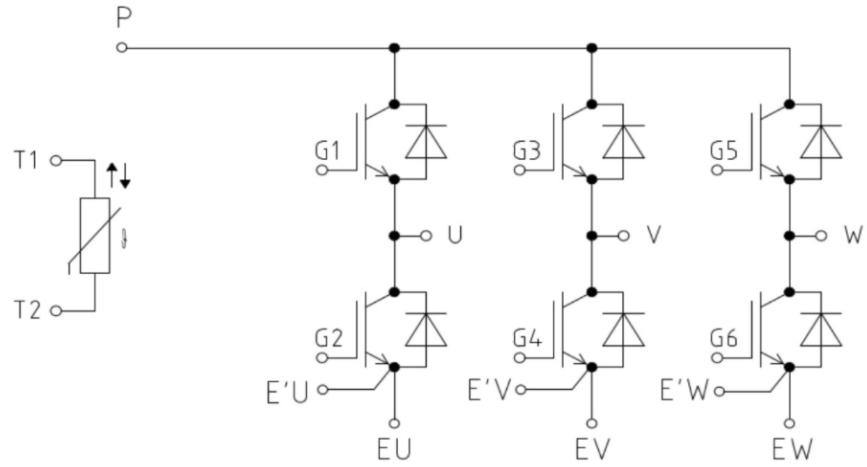


Рисунок 3.2 – Внутрішня структура IGBT модуля типу
FS75R12W2T7B11

3.3 Розрахунок акумуляторної батареї і її вибір

Виконаємо розрахунок ємності батареї. Розрахунок буде проведений за умови, що електрокатер буде їхати зі швидкістю 46.30 км/год.

Розрахуємо скільки буде потрібно часу, щоб проїхати 100 км:

$$t = \frac{S}{V} = \frac{100}{46.30} = 2.12 \quad (3.17)$$

Для того, щоб розрахувати ємність батареї треба визначити витрати, куди енергія витрачається під час руху катера. Загалом енергія витрачається під час передачі від акумулятора до двигуна, і навпаки, що складає електричні витрати, та від двигуна до гребного гвинта, що складає механічні витрати. Електричні витрати складаються із тепла, що виділяється на акумуляторі, інверторі проводах та двигуні, а механічні – із опору тертя, залишкового і аеродинамічного опору.

Визначення енергії:

$$W_{\text{акум}} = W_{\text{мех.втр}} + W_{\text{ел.втр}} \quad (3.18)$$

$W_{\text{мех.втр}}$ - енергія механічних витрат;

$W_{\text{ел.втр}}$ - енергія електричних витрат.

Для точного розрахунку ємності батареї потрібно мати графік руху з діаграмою швидкостей або моменту, а також масив точок ККД двигуна залежно від навантаження та швидкості. У зв'язку з тим, що згаданих вище даних немає, то для розрахунку використаємо інші дані [2]. Орієнтовна ємність батареї становить 9 кВт·год, з яких 7,25 кВт·год відводиться на витрату для забезпечення руху.

Батарею складемо на основі елементів 18650, оскільки це поширений тип акумуляторів, які використовуються широко в портативній техніці та в

сучасних електромобілях. Також в цьому форм-факторі великий вибір елементів за електричним об'ємом, а також за максимальним струмом розряду, що важливо для забезпечення короткочасного перевантаження, щоб батарея витримувала максимальний струм розряду до 200 А.

Порівняльні дані елементів наведено в таблиці.

Таблиця 3.4 – Порівняльна таблиця елементів 18650

Назва елемента	Ємність I_{hb} , А·г	Номинальна напруга U_{bn}	Ном. струм розрядження $I_{ном}$, А	Макс. струм розрядження $I_{макс}$, А	Маса m_b , г
NCR18650GA	3.3	3.6	10	10	49.5
INR18650-25R	2.5	3.64	20	40	43.8
US18650VTC4	2.1	3.7	10	30	45

Як видно з таблиці, серед доступних елементів найвищу ємність має NCR18650GA, але за максимальним струмом він не задовольняє оскільки доведеться брати додаткові елементи для забезпечення максимального струму до 200А. Найвигіднішим за параметрами є елемент INR18650-25R від Samsung, який забезпечує найбільший струм перевантаження, хоча й має меншу ємність. Для того, щоб рівень заряду в батареї не впливав на динаміку човна, під час розрахунків необхідно зменшити напругу базового елемента до рівня $U_b=3.2В$, оскільки згідно з даними, за цього рівня напруги на елементі він віддасть 84% заряду.

Кількість послідовно з'єднаних елементів знайдемо за такою формулою:

$$a = \frac{U_{dc}}{U_b} = \frac{470}{3.2} = 146.785 \approx 147 \text{ шт}, \quad (3.19)$$

де U_{dc} - напруга ланки постійного струму.

$$I_h = \frac{W}{U_{dc}} = \frac{9000}{470} = 19.15 (А \cdot г), \quad (3.20)$$

де $W = 9000 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ - кількість електричної енергії, яку має зберігати батарея.

Кількість паралельних гілок знайдемо за такою формулою:

$$b = \frac{I_h}{I_{h_b}} = \frac{19.15}{2.5} = 7.66 \approx 8 \text{ шт.} \quad (3.21)$$

Перевіримо, чи витримає батарея перевантаження за струмом:

$$I_{\text{бмакс}} = I_{\text{макс}} \cdot b = 40 \cdot 8 = 320 \text{ А.} \quad (3.22)$$

Отже, батарея має запас за струмом, який перевищує потрібний, тому кількість паралельних гілок можна зменшити до 6, зменшивши масу батареї:

$$I_{\text{бмакс}} = 40 \cdot 6 = 240 \text{ А.} \quad (3.23)$$

У цьому випадку ємність буде:

$$W = a \cdot U_{\text{бн}} \cdot b \cdot I_{h_b} = 147 \cdot 3.64 \cdot 6 \cdot 2.5 = 8026.2 \text{ Вт.} \quad (3.24)$$

Отримаємо батареї:

$$m = a \cdot b \cdot m_b = 147 \cdot 6 \cdot 0.0438 = 38.63 \text{ кг.} \quad (3.25)$$

Висновки до розділу 3

В цьому розділі було вибрано двигун СДПМ на 14.9 кВт, зведено його вхідні параметри та розраховані основні параметри, розрахований автономний інвертор напруги та обрано IGBT модуль типу FS75R12W2T7B11, з параметрами $U_{ce\max} = 1200 \text{ В}$, $I_c = 75 \text{ А}$, розраховано акумуляторну батарею та за розрахунками було обрано батарею [2] INR18650-25R.

4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА КАТЕРА. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

4.1 Математична модель неявнополюсного синхронного двигуна з постійними магнітами

Математична модель в синхронній системі координат ротора ($d - q$) має вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - v\omega - M_c), M = \mu(i_{1d})i_{1q}, \\ \dot{i}_{1d} &= \frac{1}{L_d}(-R_1 i_{1d} + L_q \omega p_n i_{1q} + u_{1d}), \\ \dot{i}_{1q} &= \frac{1}{L_q}(-R_1 i_{1q} - L_d \omega p_n i_{1d} - L_m i_f \omega p_n + u_{1q}),\end{aligned}\quad (4.1)$$

де L_d, L_q – індуктивності статора в системі координат ($d - q$),

$$\mu_2 = (i_{1d}) = \frac{3}{2} p_n (L_m i_f + (L_d - L_q) i_{1d}), \quad (4.2)$$

де $k_M = L_m i_f = \text{const}$ – потік постійних магнітів.

4.2 Алгоритм векторного керування СДПМ

Повний алгоритм векторного керування СДПМ має вигляд:

Регулятор струму за віссю d :

$$\begin{aligned}u_d &= R i_d^* - \omega p_n L_q (i_q) i_q + L_{dd} (i_d) (\dot{i}_d^* - k_{il} \tilde{i}_d - x_d), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d,\end{aligned}\quad (4.3)$$

де $(k_{il}, k_{ii}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора струму, похідна заданого струму \dot{i}_d^* задається наперед.

Регулятор швидкості:

$$i_q = \frac{1}{\mu(i_d)} (T_L + \frac{v}{J} \omega^* + \dot{\omega}^* - k_{\omega} \tilde{\omega}), \quad (4.4)$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -k_{\omega l} \tilde{\omega},$$

де $\dot{\hat{M}}_c$ – оцінене значення компоненти моменту навантаження

$\frac{M_c}{J}, \tilde{M}_c = \frac{M_c}{J} - \hat{M}_c$ – похибка оцінювання моменту навантаження,

$k_{\omega} > 0, k_{\omega i} > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора швидкості,

$$\mu(i_d) = \frac{3}{2} \frac{p_n}{J} [\Psi_m(L_d(i_d) - L_q(i_q))i_d] > 0. \quad (4.5)$$

Нелінійний регулятор струму за віссю q

$$u_q = Ri_q^* + \omega p_n \Psi_m + L_{qq}(i_q)(\dot{i}_{ql}^* - k_{il} \tilde{i}_q - x_q), \quad (4.6)$$

$$\dot{x}_q = k_{ii} \tilde{i}_q.$$

де відома компонента похідної струму \dot{i}_{ql}^* дорівнює

$$\begin{aligned} \dot{i}_q^* = & \frac{1}{\mu'(i_d)} \left(\dot{\hat{M}}_c + \frac{v}{J} \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right) - \frac{3}{2} \frac{p_n}{J \mu^2(i_d)} i_d^* \left(\hat{M}_c + \frac{v}{J} \omega^* + \dot{\omega}^* - k_{\omega} \tilde{\omega} \right) \\ & (L_d - L_q) - \frac{k_{\omega}}{\mu'(i_d)} \left(-(k_{\omega} + \frac{v}{J}) \tilde{\omega} + \mu'(i_d) \tilde{i}_q + \frac{3}{2} \frac{p_n}{J} (L_d - L_q) \tilde{i}_d i_q \right). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Структурна схема алгоритму векторного керування кутовою швидкістю СДПМ представлено на рис. 4.1:

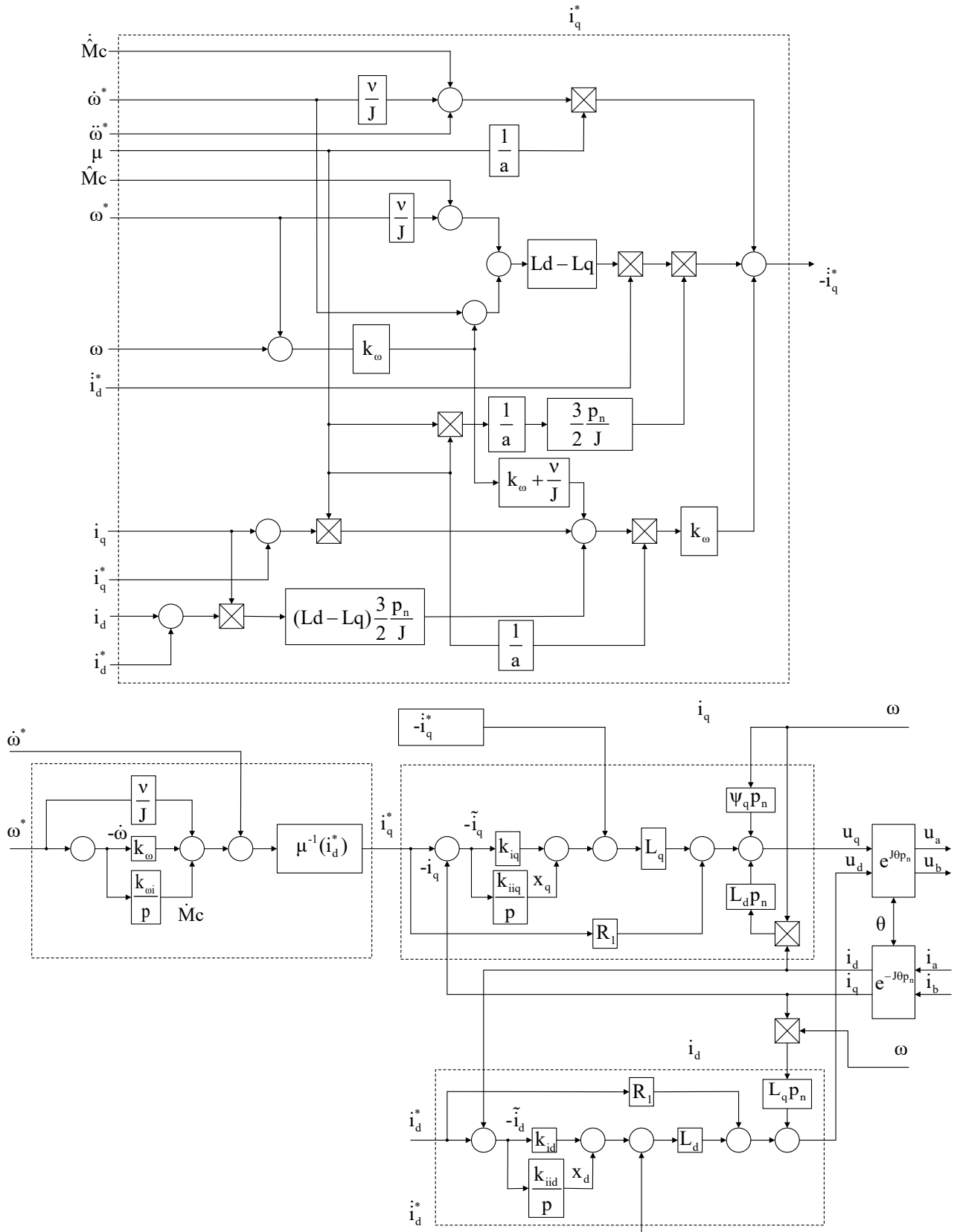


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи векторного керування кутовою швидкістю СДПМ

Висновки до розділу 4

В цьому розділі було розглянуто математичну модель неявнополюсного синхронного двигуна з постійними магнітами, алгоритм векторного керування СДПМ та представлено структурну схему алгоритму векторного керування кутовою швидкістю СДПМ.

5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Зробимо такі пункти для даної моделі СДПМ:

1 - Для вимірювання доступні струми статора, кутова швидкість та кутове положення ротора.

2 - Параметри СДПМ відомі та незмінні у часі.

Виконуючи всі вище перераховані пункти, синтезуємо алгоритм управління, який гарантуватиме наступні цілі :

Асимптотична обробка траєкторії часу така, що:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} (M - M^*) = 0 \quad (5.1)$$

\tilde{M} - похибка крутного моменту;

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} (\psi - \psi^*) = 0 \quad (5.2)$$

ψ^* - похибка крутного моменту;

Синтез регуляторів струму

Запишіть струми у вигляді помилок у розробці:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_d &= i_d - i_d^* \\ \tilde{i}_q &= i_q - i_q^*, \end{aligned} \quad (5.3)$$

\tilde{i}_q \tilde{i}_d - задані значення струмів на осях d і q.

Підставляючи рівняння (5.1) та (5.2) отримаємо

$$M^* + \tilde{M} = k_m (i_{lq}^* + \tilde{i}_q), \quad (5.4)$$

$$\psi^* + \tilde{\psi} = L_1 (i_{ld}^* + \tilde{i}_d) + L_m i_f, \quad (5.5)$$

З рівнянь (5.4) та (5.5) встановимо залежності між змінними:

$$M^* = k_m i_{lq}^*, \quad (5.6)$$

$$\psi^* = L_1 i_{ld}^* + L_m i_f \quad (5.7)$$

Подібно до помилок у розробці:

$$\tilde{M} = k_m \tilde{i}_{lq} \quad (5.8)$$

$$\tilde{\psi} = L_1 \tilde{i}_l d \quad (5.9)$$

Рівняння (5.6) - (5.9) демонструють, що розвиток даних траєкторій крутного моменту та потоку досягається компенсацією помилок потоку.

На основі системи (4.13) динаміка похибок робочих струмів з урахуванням (5.3) матиме вигляд:

$$\dot{\tilde{i}}_d = -\frac{R_l}{L_1} \tilde{i}_d^* - \frac{R_l}{L_1} \tilde{i}_d + p_n \omega \tilde{i}_q + \frac{u_d}{L_1} - \dot{i}_d^*, \quad (5.10)$$

$$\dot{\tilde{i}}_q = \frac{R_l}{L_1} \tilde{i}_q^* - \frac{R_l}{L_1} \tilde{i}_q + p_n \omega \tilde{i}_d + \frac{u_q}{L_1} - \dot{i}_q^* - \frac{L_m}{L_1} \dot{i}_f p_n \omega. \quad (5.11)$$

Для рівняння (5.4) синтезуйте регулятор струму PI вздовж осі D:

$$u_d = L_1 \left(-k_{idl} \tilde{i}_d - x_d + \dot{i}_d^* - p_n \omega \tilde{i}_q + \frac{R_l}{L_1} \tilde{i}_d^* \right), \quad (5.12)$$

$$\dot{x}_d = k_{iid} \tilde{i}_d,$$

де $(k_{idl}, k_{iid}) > 0$ - пропорційні та інтегральні складові регулятора струму вздовж осі D. Після підстановки рівняння (5.6) у (5.4) отримуємо такі рівняння динаміки похибок відпрацювання на осі d:

$$\dot{\tilde{i}}_d = -\left(\frac{R_l}{L_1} + k_{idl}\right) \tilde{i}_d - x_d, \quad (5.13)$$

$$\dot{x}_d = k_{iid} \tilde{i}_d$$

Оскільки магнітний потік у СДПМ утворений постійними магнітами на роторі, то в цьому випадку буде потрібно створити потік струму плями, тому (5.6) ми прийняти $\tilde{i}_d^* = 0$ та $\dot{i}_d^* = 0$. Це підвищує енергоефективність управління двигуном, $\tilde{i}_l = \tilde{i}_q$.

Для рівняння (5.5) синтезуємо ПІ-регулятор уздовж осі q :

$$\begin{aligned} u_q &= L_1(-k_{iq1} \tilde{i}_q - x_q + i_q^* - p_n \omega i_d + \frac{R_1}{L_1} i_q^* + \frac{k_u}{L_1} \omega), \\ \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_q \end{aligned} \quad (5.14)$$

де $(k_{iq1}, k_{iiq}) > 0$ є пропорційними та інтегральними складовими регулятора струму на осі q . Підставивши рівняння (5.8) у (5.5), отримаємо наступні рівняння динаміка помилок поточної роботи на осі q :

$$\begin{aligned} \tilde{i}_q &= \left(\frac{R_1}{L_1} + k_{iq1}\right) \tilde{i}_q - x_q, \\ \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_q \end{aligned} \quad (5.15)$$

Синтез регулятора крутного моменту

З рівняння в системі (4.13) ми визначимо регулятор часу у такому вигляді:

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{2}{3} \frac{M^*}{p_n \omega} \\ \dot{i}_q^* &= \frac{2}{3} \frac{\dot{M}^*}{p_n \omega} \end{aligned} \quad (5.16)$$

де M^* - заданий час з обмеженою першою похідною. При розрахунку траєкторії даного крутного моменту необхідно враховувати, що при роботі в першій зоні регулювання ($\omega < \omega_n$) крутний момент обмежується максимальним значенням, одночасно, у другій зоні ($\omega > \omega_n$) існує обмеження потужності. Структурна схема векторного алгоритму управління Моментом СДПМ представлена на рис. 5.1.

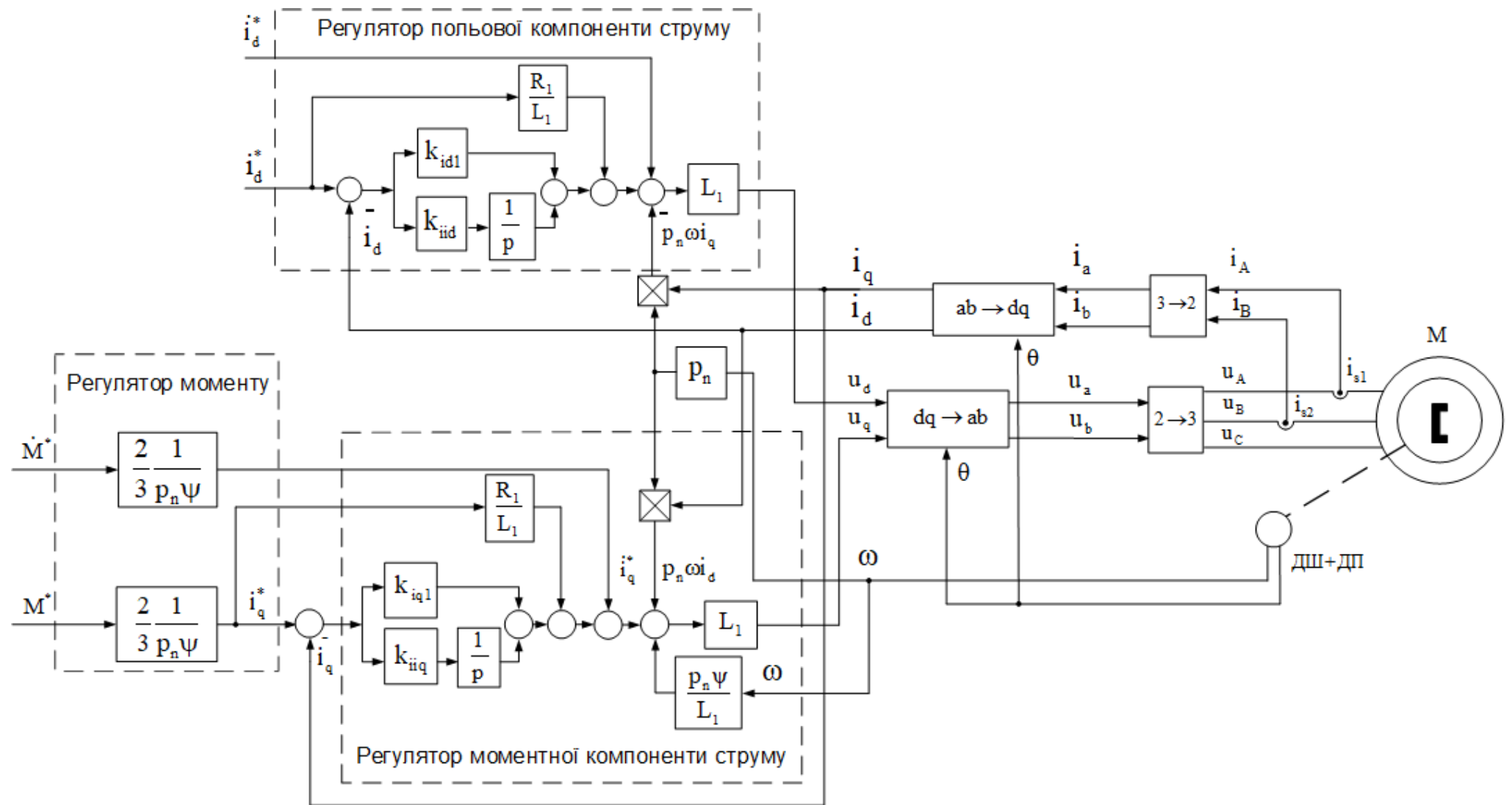


Рисунок 5.1 - Структурна схема векторного алгоритму управління моментом СДПМ

Висновки до розділу 5

В цьому розділі було виконано синтез векторного алгоритму керування, який забезпечує асимптотичне відпрацювання моменту.

Розроблено структурну схему алгоритму керування за отриманими рівняннями.

6 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Досліджувані характеристики будуються на основі відпрацювання заданих траєкторій швидкості та струму статора на осі d . Ці залежності від часу подаються на вхід регулятора, задача якого відпрацювати отримані траєкторії.

З міркувань забезпечення доступної напруги живлення в межах не більше ніж ± 311 В та амплітудного значення часу розгону двигуна 0.305 с, встановимо задану швидкість як: $\omega^* = 0.5\omega_n = 0.5 \cdot 188.4 = 169.56 \text{ рад/с}$.

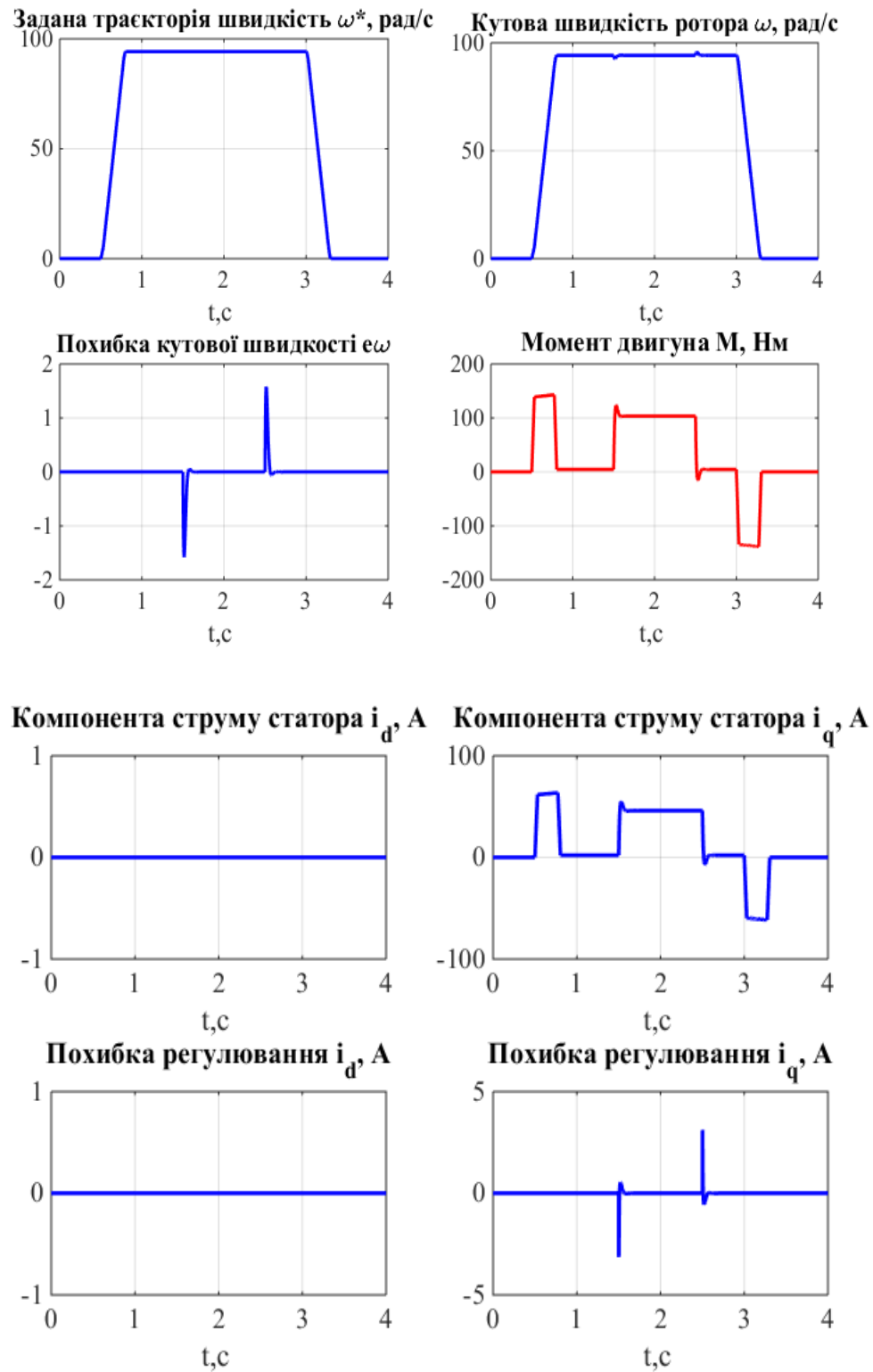
Умови виконання тесту: в час рівний 0.5 с відбувається розгін двигуна від нуля до $0.5\omega_n$; при роботі з постійною швидкістю в час рівний 1.5 с до валу двигуна прикладається, а через час рівний 1.0 с знімається номінальний момент навантаження $M_c = 98.8$ Нм; в 3.0 с двигун зупиняється.

Виберемо коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора швидкості $k_\omega = 100$, $k_{\omega i} = \frac{k_\omega^2}{2} = 5000$, коефіцієнт демпфування $\xi = 0.707$. Для регулятора струму пропорційний та інтегральний коефіцієнти візьмемо $k_i = 1000$, $k_{ii} = \frac{k_i^2}{4} = 250000$, коефіцієнт демпфування $\xi = 1$.

Після створення і передачі заданих траєкторій до двигуна, можемо спостерігати процеси, що відбуваються в двигуні та регуляторі.

6.1 Дослідження динамічних характеристик при роботі на швидкості $0.5\omega_n$.

Графіки перехідних процесів відпрацювання заданої траєкторії швидкості представлено на рис. 6.1.



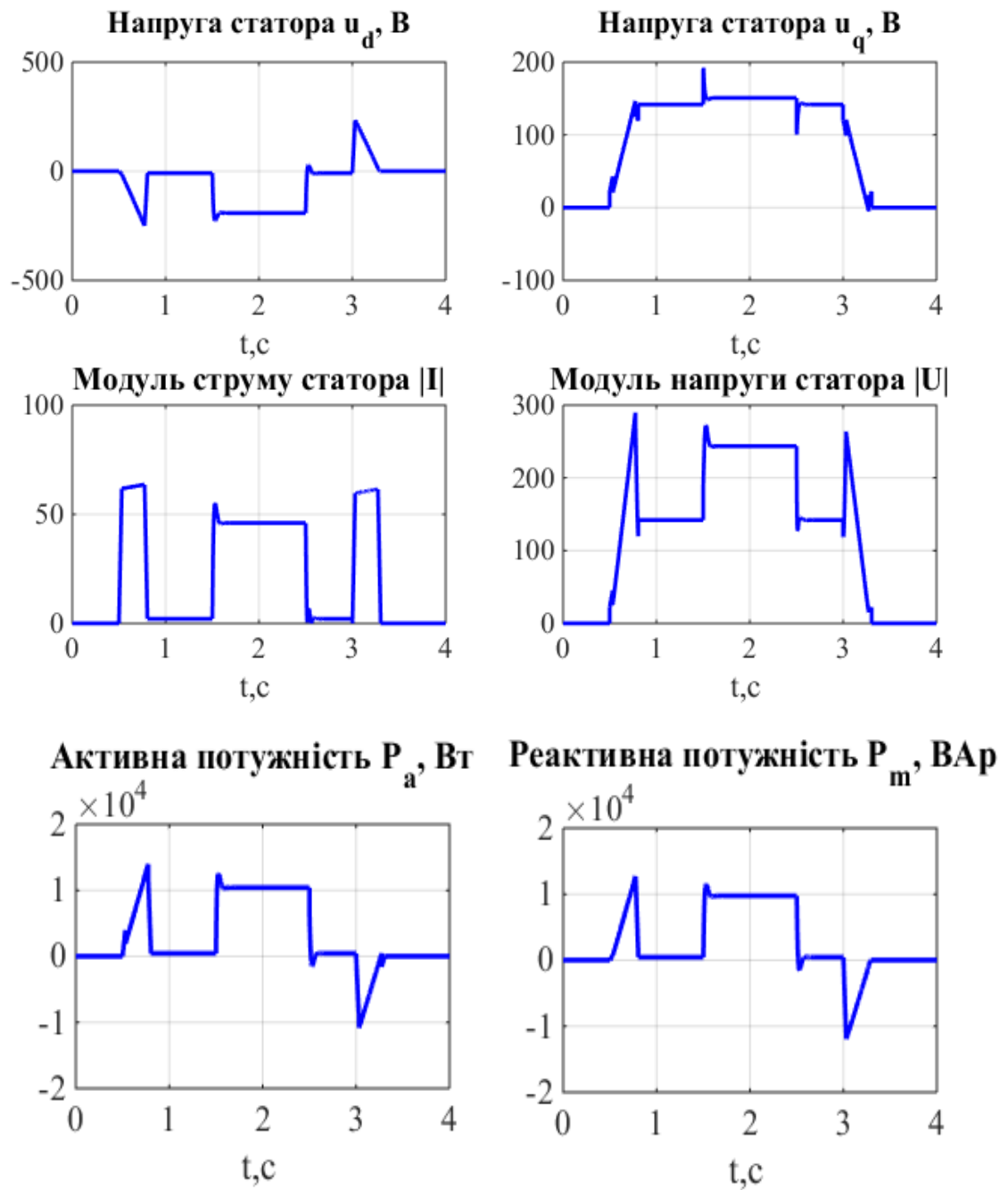


Рисунок 6.1 – Графіки перехідних процесів системи векторного керування

при $\omega^* = 0.5\omega_n$

Модуль напруги статора різко збільшується щоб розігнати двигун, а під час накидання номінального моменту навантаження, збільшується, щоб

компенсувати дію цього моменту і забезпечити відпрацювання заданої швидкості.

Момент двигуна під час розгону різко зростає, через інерційність двигуна. Також, при холостому русі двигуна момент не нульовий через наявність коефіцієнту в'язкого тертя.

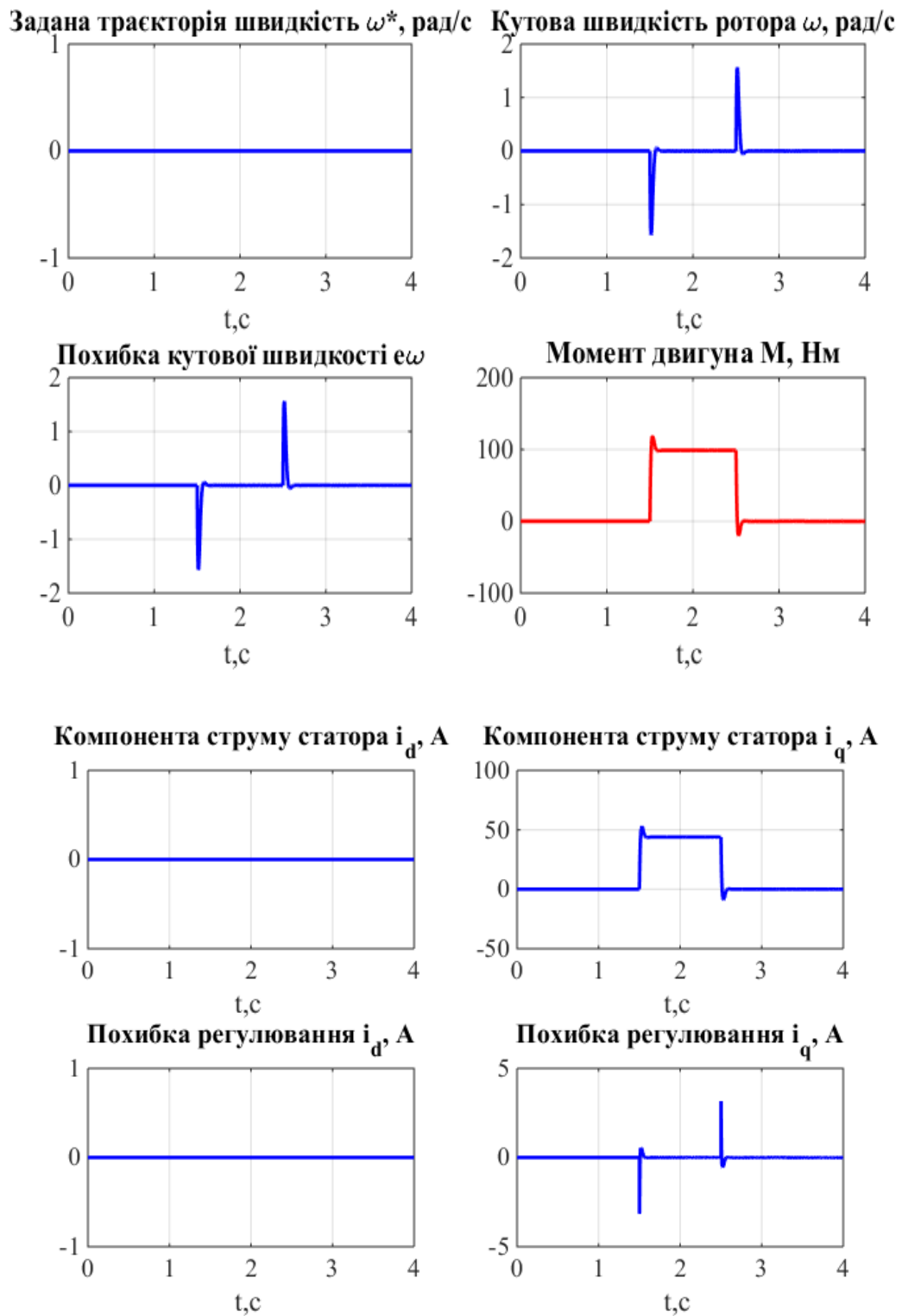
Компонента струму статора по осі d дорівнює нулю, тобто відповідає заданому значенню. Регулювання струму здійснюється на основі розгляду в якості вихідної координати потокозчеплення статора Ψ_{ld} .

Компонента струму статора по осі q регулює момент двигуна, тобто повторює форму моменту.

Процеси в механічній та електромагнітній підсистемах повністю розв'язані.

6.2 Дослідження динамічної поведінки системи векторного керування при відпрацюванні нульової швидкості.

Графіки перехідних процесів відпрацювання заданої траєкторії нульової швидкості представлено на рис. 6.2.



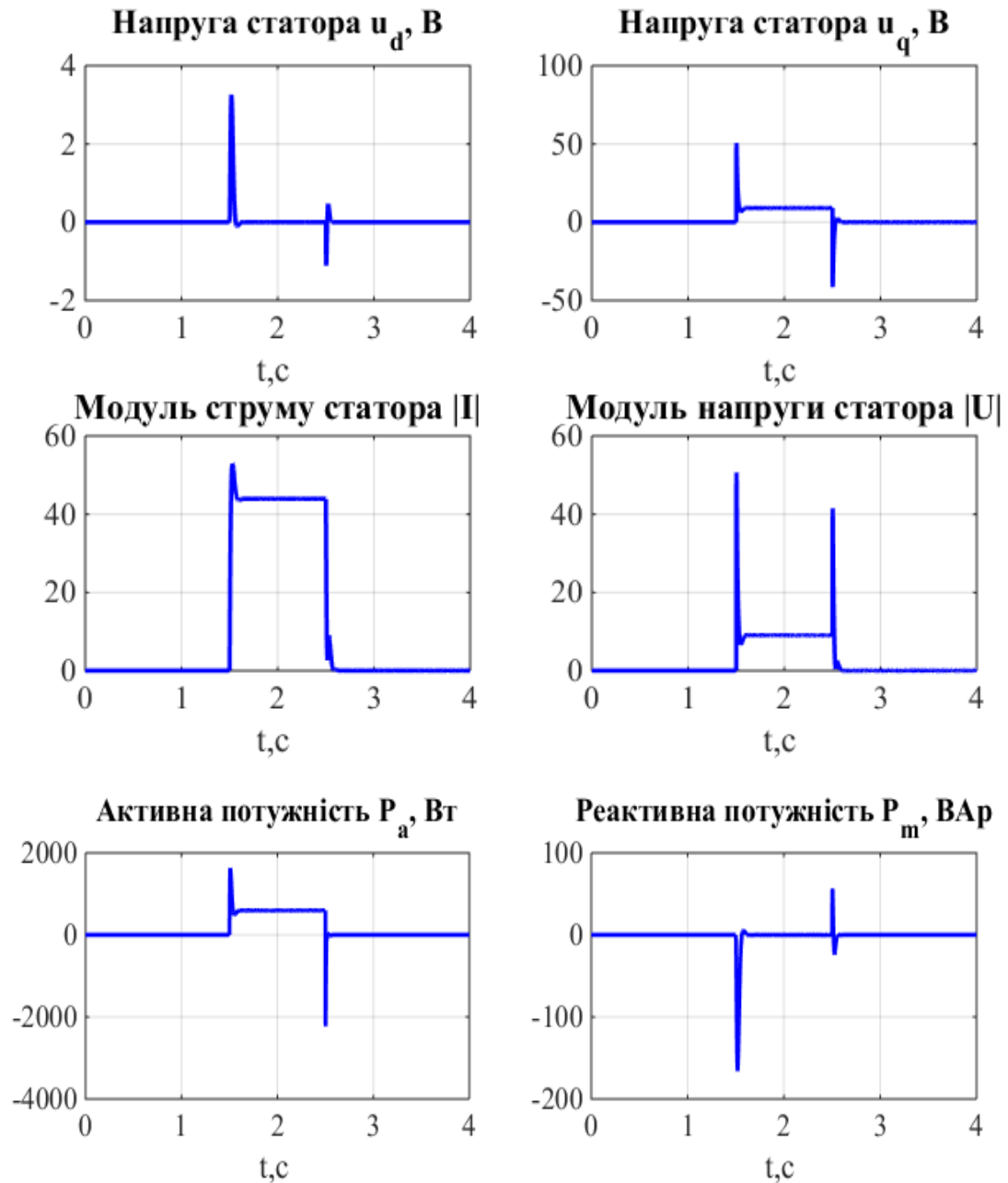


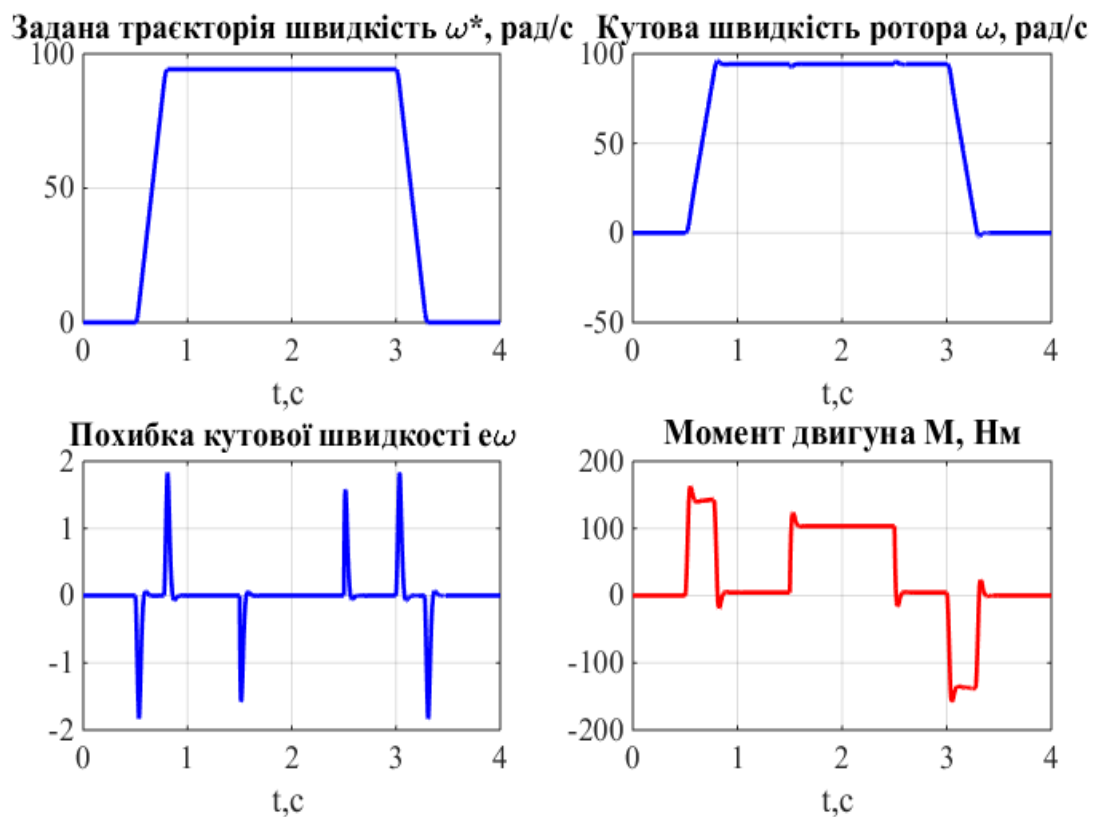
Рисунок 6.2 – Перехідні процеси при відпрацюванні нульової заданої швидкості

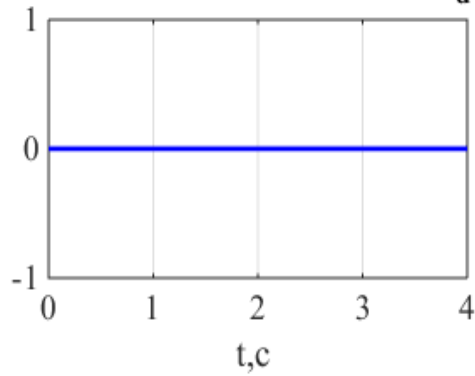
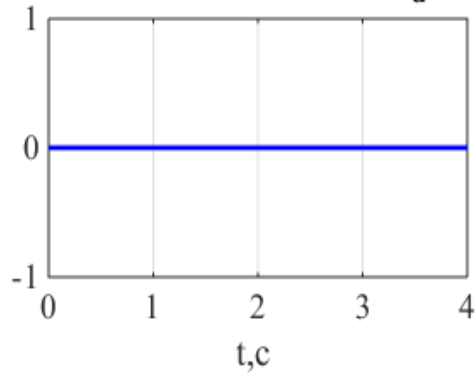
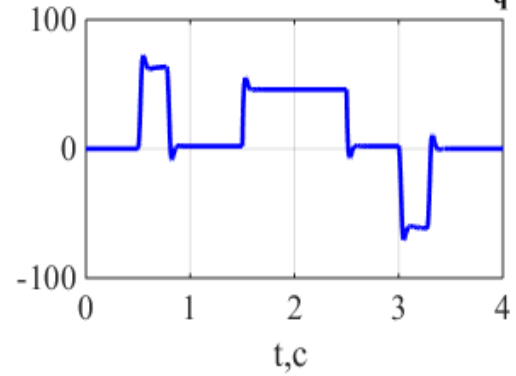
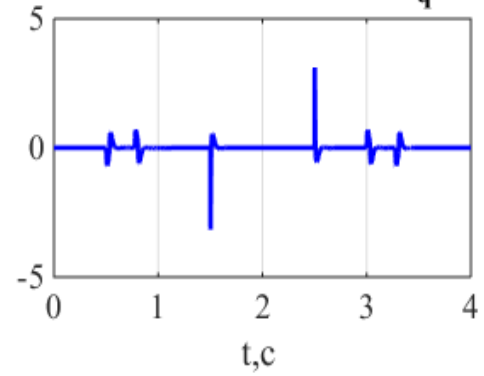
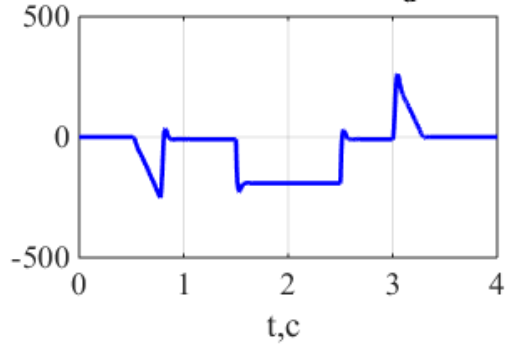
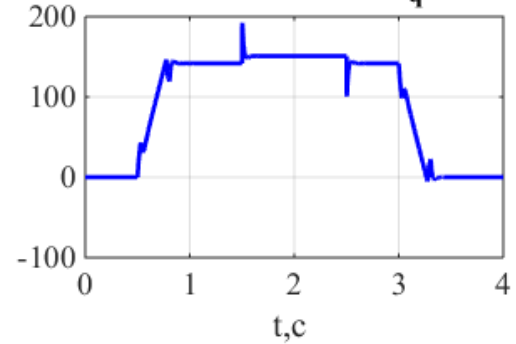
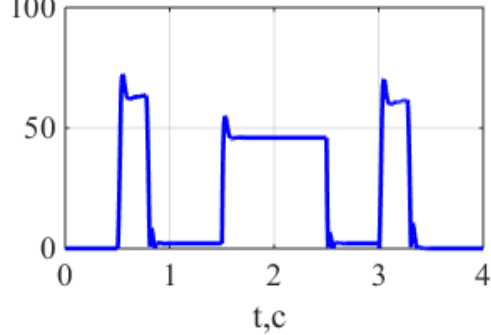
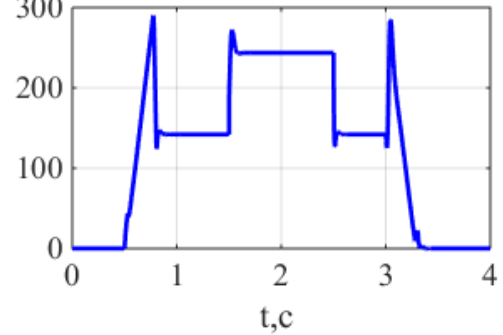
З графіків перехідних процесів відпрацювання швидкості та струму статора по осі d видно, що завдання нульової швидкості повністю відпрацьовуються системою векторного керування швидкістю. Похибки виникають лише при накиданні та скиданні навантаження, але регулятор зводить їх до нуля.

При накиданні навантаження, струм статора по осі d не змінюється. А струм статора по осі q виникає для компенсації збурення, яке спричиняється моментом навантаження і по формі відповідає графіку моменту. Також ми бачимо, що активні втрати присутні при накиданні навантаження у зв'язку зі зростанням струму в роторі, але механічна потужність фактично нульова, оскільки двигун не рухається.

6.3 Дослідження динамічних характеристик системи векторного керування при відсутності компенсацій першої та другої похідних за швидкістю.

Графіки перехідних процесів відпрацювання заданої траєкторії швидкості при відсутності компенсацій першої та другої похідних за швидкістю представлено на рис. 6.3.



Компонента струму статора i_d , АПохибка регулювання i_d , АКомпонента струму статора i_q , АПохибка регулювання i_q , АНапруга статора u_d , ВНапруга статора u_q , ВМодуль струму статора $|I|$ Модуль напруги статора $|U|$ 

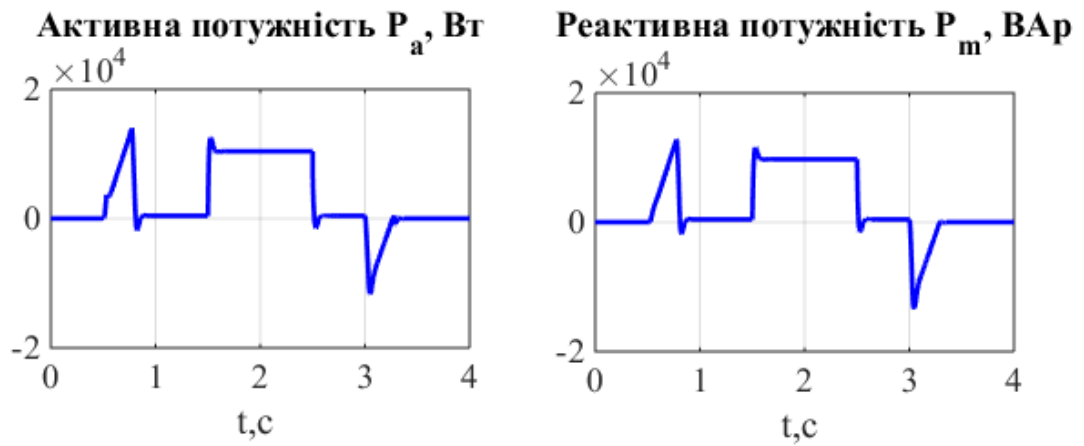


Рисунок 6.3 – Графіки перехідних процесів системи непрямого векторного керування при $\omega^* = 0.5\omega_n$ та при $R_1 = 1,2R_1$

Активний опір статора R_1 входить в контури регулювання струмів і доступний для вимірювання. Умови охолодження статора набагато кращі, ніж ротора як наприклад для АД. Тому варіації R_1 завжди компенсуються інтегральними складовими регуляторів струму.

З графіків перехідних процесів видно що при варіації опору статорного кола система забезпечує потрібне регулювання і швидкість має стійке постійне значення.

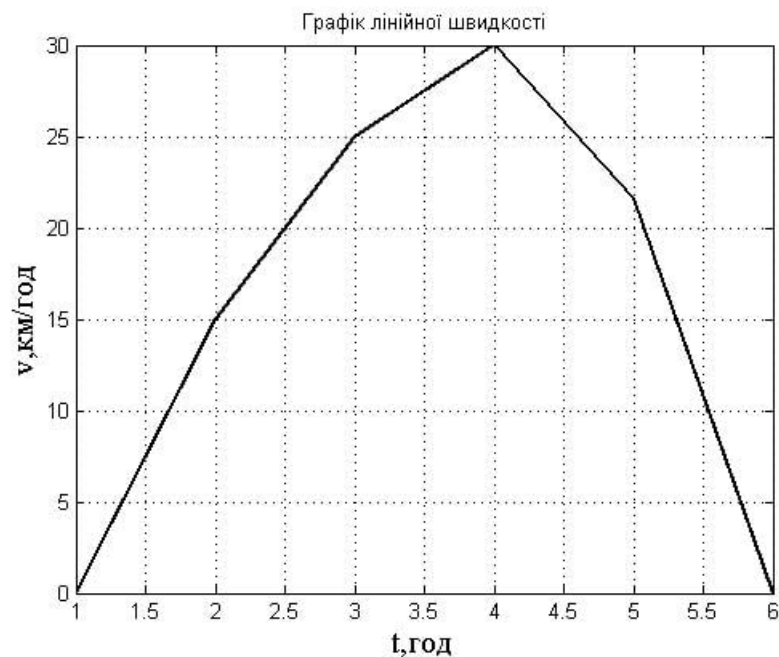


Рисунок 6.4 – Графік лінійної швидкості

Висновки до розділу 6

В цьому розділі було досліджено динамічні характеристики під час роботи на швидкості $0.5\omega_n$, динамічні поведінки системи векторного керування при відпрацюванні нульової швидкості та динамічні характеристики системи векторного керування за відсутності компенсацій першої та другої похідних за швидкістю.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено ознайомлення із загальними відомостями типів електрочовнів. Детально розглянуто технічні рішення електропривода водних транспортних засобів, описано електропривод водних транспортних засобів, наведено приклад одного з електродвигунів Deer Blue, а саме Deer Blue 100i 2500, описані його характеристики. Наведена перша потужна силова установка у серійному виробництві та описані її компоненти. За зробленими в першому розділі висновками для подальших розрахунків обрано катер типу крейсер.

У другому розділі було визначено, які компоненти потрібно розрахувати для подальшого проектування електрокатера. Розраховано основні параметри. Визначено число Рейнольдса, силу опору, загальний опір при максимальній швидкості та потужність електродвигуна для подальшого його вибору.

Після проведення розрахунків був обраний тип двигуна СДПМ з номінальною потужністю 14.9 кВт.

У третьому розділі було зведено вхідні параметри та розраховані основні параметри двигуна СДПМ на 14.9 кВт, розрахований автономний інвертор напруги та обрано IGBT модуль типу FS75R12W2T7B11, з параметрами $U_{\text{семах}} = 1200 \text{ В}$, $I_c = 75 \text{ А}$, розраховано акумуляторну батарею та за розрахунками було обрано батарею INR18650-25R.

У четвертому розділі було розглянуто математичну модель неявнополюсного синхронного двигуна з постійними магнітами, алгоритм векторного керування СДПМ та представлено структурну схему алгоритму векторного керування кутовою швидкістю СДПМ.

У п'ятому розділі було виконано синтез векторного алгоритму керування, який забезпечує асимптотичне відпрацювання моменту.

Представлено структурну схему алгоритму керування за отриманими рівняннями.

У шостому розділі було досліджено динамічні характеристики під час роботи на швидкості $0.5\omega_n$, динамічні поведінки системи векторного керування під час відпрацювання нульової швидкості та динамічні характеристики системи векторного керування за відсутності компенсацій першої та другої похідних за швидкістю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 SIXPACK IGBT [Електронний ресурс]. URL: https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-modules/fs75r12w2t7_b11/. (Дата звернення 20.05.2021)
- 2 INR18650-25R Datasheet [Електронний ресурс] URL: <https://bestbattery.com.ua/image/data/Batteries/Datasheet/INR18650-25Rdatasheet.pdf> (Дата звернення 20.05.2021)
- 3 Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ “КПІ”, 2011 р. –96 с.
- 4 Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напрямку підготовки 6.050702 – “Електромеханіка” спеціальності “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод” / Уклад.: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, С. С. Димко –К.: НТУУ “КПІ”, 2014 р. 43 с.
- 5 Рибальський човен [Електронний ресурс].URL: https://uk.wiki2.wiki/wiki/Traditional_fishing_boat. (Дата звернення 20.05.2021)
- 6 Басові човни [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wiki2.wiki/wiki/Bass_boat. (Дата звернення 20.05.2021)
- 7 Човни боурайдер [Електронний ресурс].URL: <https://www.p-y.ru/nashi-yakhty/chto-takoe-kater-bourayder/>. (Дата звернення 20.05.2021)
- 8 Каютний човен [Електронний ресурс]. URL: <https://boat-ksmz.ru/blog/kayutnyj-kater/>. (Дата звернення 20.05.2021)
- 9 Рекреаційний траулерний човен [Електронний ресурс]. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D0%B0%D1%83%D0%BB%D0%B5%D1%80>. (Дата звернення 20.05.2021)

- 10 Яхта [Електронний ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D1%85%D1%82%D0%B0>. (Дата звернення 20.05.2021)
- 11 Torqeedo [Електронний ресурс]. URL: <https://www.torqeedo.com/en>. (Дата звернення 20.05.2021)
- 12 Электричні лодки [Електронний ресурс]. URL: <https://fisherninja.ru/knowledge-base/elektricheskie-lodki/>. (Дата звернення 20.05.2021)
- 13 Deep Blue 100i 2500 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.torqeedo.com/en/products/inboards/deep-blue-100i-2500/000-01054.html>. (Дата звернення 20.05.2021)
- 14 Справочник по катерам і лодкам [Електронний ресурс]. URL: http://tapemark.narod.ru/vodnik/1_07.html. (Дата звернення 20.05.2021)
- 15 Потужність і швидкість човнові електромотор [Електронний ресурс]. URL : <https://fisherninja.ru/knowledge-base/power-speed/>. (Дата звернення 20.05.2021)