

---

## **Аналіз конструкції електроприводної системи AZIPOD і основних функціональних елементів**

**Тетяна Павленко**

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна  
ORCID ID 0000-0002-2356-4066

**Олена Зарицька**

Кафедра експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматизації, Одеський морський університет, м.Одеса, Україна  
ORCID ID 0000-0002-8530-1106

**Анастасія Боднарчук**

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна  
ORCID ID 0009-0001-5528-0455

**Любов Шиндак**

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна  
ORCID ID 0009-0000-3838-0115

**Для цитування цієї статті:**

Павленко Тетяна, Зарицька Олена, Боднарчук Анастасія, Шиндак Любов. Аналіз конструкції електроприводної системи AZIPOD і основних функціональних елементів. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 2, No. 6, 2023, pp. 53-64. doi: 10.46299/j.isjea.20230206.07

**Надійшла до редакції:** 27 жовтня 2023 р.; **Схвалено:** 28 листопада 2023 р.;

**Опубліковано:** 01 грудня 2023 р.

---

**Анотація:** У роботі показані нові ефективні технічні рішення щодо використання електродвигунів, які сприяють підвищенню швидкості суден, їх маневреності, а також надійності під час експлуатації у системах AZIPOD. Особливість роботи таких систем полягає у розташуванні гребного електродвигуна за межами корпусу судна. Це дає великі переваги у порівнянні з дизель-електричною схемою приводу руху судна, яка продовжує широко використовуватися на цей час. У системах AZIPOD основним елементом є високомоментні електродвигуни змінного струму. Застосування таких електродвигунів зменшило кількість елементів у силовій передачі енергії у порівнянні з елементами механічного руху. Це дозволило встановити гребний вент фіксованого кроку на валу електродвигуна. Для дослідження обрані синхронні електродвигуни з постійними магнітами. Завдяки особливостям конструкцій та принципу дії, використання таких електродвигунів сприяє підвищенню міцності та надійності гребного пристрою при різних режимах та умовах роботи системи AZIPOD. Для визначення оптимального варіанту конструкції двигуна показана мета роботи, яка передбачає аналіз особливостей роботи системи AZIPOD та визначення можливості використання синхронних двигунів з постійними магнітами у системах малотоннажних суден. Відповідно мети проведено аналіз загальних методів розрахунку параметрів з урахуванням можливих припущень.

**Ключові слова:** AZIPOD, електричний двигун, постійні магніти, гребний винт, модуль руху, трансформатор, система керування, малотонажні судна, частотний перетворювач.

---

## 1. Вступ

У світовому суднобудуванні постійно відбувається модернізація основних елементів рушійних систем або впровадження нових технічних рішень. Все це проводиться з метою підвищення швидкості суден, маневреності у важких умовах роботи, збільшення механічної міцності конструкцій елементів, економії палива тощо. Всі заходи в цілому призводять до підвищення експлуатаційних характеристик та надійності роботи функціональних елементів гребних пристроїв суден за різних режимів при важкій роботі у кригах та на відкритій воді.

У даний час на зміну дизель-електричної схеми приводу руху судна прийшло одне з нових ефективних технічних рішень, а саме та використання системи AZIPOD. Це унікальний електричний гвинта-кермовий комплекс судна, що забезпечує привід руху і рульове управління в єдиному блоці.

Виробниками AZIPOD є, в основному, шведсько-швейцарська компанія АВВ та Росія. Сучасні системи AZIPOD широко застосовуються на контейнеровозах, балкерах, пасажирських суднах, криголамах та суднах крижаного плавання.

Компанією АВВ [1, 2] створено кілька типів модулів AZIPOD, які розрізняються між собою за такими ознаками: загальному виду, передбаченим середовищем використання, а також параметрами гребного двигуна: діаметру, довжині та типу. В таких системах використовуються високомоментні двигуни змінного струму. Відповідно, кожному модулю надається свій код, який несе в собі необхідну інформацію. Наприклад, код модуля "AZIPOD VI 1600 A" означає, що система призначена для використання у суднах (криголамах) і має асинхронний двигун з потужністю на валу в нижніх межах діапазону (5 МВт).

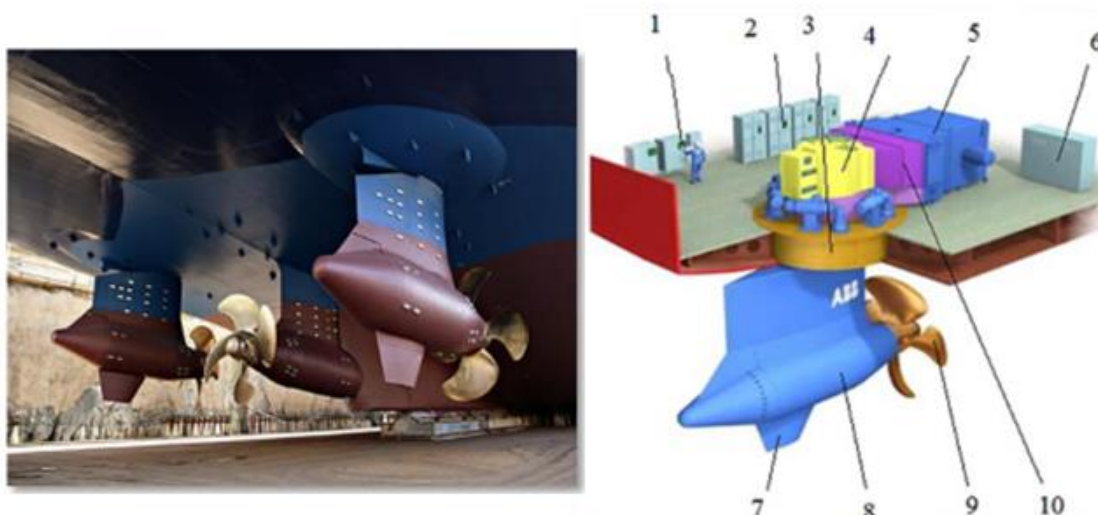
На цей час існує багато науково-технічних рішень, що направлені на підвищення характеристик та надійності роботи модульних систем AZIPOD під час експлуатації суден [3].

Метою роботи є аналіз особливостей системи AZIPOD та функціональних елементів і визначення можливості її використання у малотоннажних суднах при наявності гребного синхронного двигуна з постійними магнітами.

## 2. Об'єкт і предмет дослідження

Особливістю системи AZIPOD є розташування гребного електродвигуна у капсулі (гондолі, рис. 1), яка знаходиться за межами корпусу.

Система AZIPOD має гідравлічну частину повороту у вигляді шарнірного механізму і може обертатися навколо вертикальної осі на 360°. Електроенергія для системи AZIPOD подається від судової електростанції за допомогою гнучких кабелів. У цілому з'єднання силової установки з двигуном стандартне, але можливі варіанти при використанні дизелів або газових турбін.



**Рис. 1.** Загальний вигляд та елементи комплексу «AZIPOD»

- 1 – панель управління; 2 – трансформатори; 3 – кермовий модуль; 4 – блок контактних кілець; 5 – установка охолодження; 6 – розподільний щит;  
7 – стабілізатор; 8 – шумний модуль з електродвигуном усередині;  
9 – гребний гвинт; 10 – повітропровід [1].

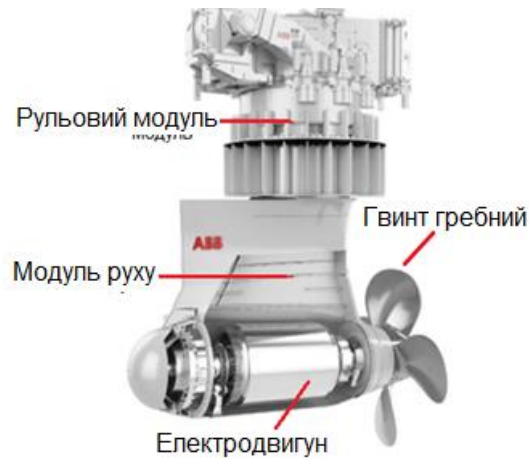
Система AZIPOD на міжнародному ринку з'явилась з моменту удосконалення традиційної дизель-електричної схеми приводу руху судна та з використанням електродвигунів змінного струму. Для плавного регулювання швидкості судна застосовуються частотні перетворювачі (циклоконвертери), що контролюють крутний момент гребного двигуна. Частота обертання гвинта змінюється шляхом регулювання рівня струму, що подається на електродвигун. Сучасні напівпровідникові перетворювачі частоти, що забезпечують керування потужними гребними двигунами змінного струму, створюють незначні спотворення синусоїдальної напруги первинної електричної мережі. Це дозволяє вирішувати проблеми електромагнітної сумісності потужних енергетичних установок та інших суднових споживачів електроенергії. В цілому все це представляє суднову електростанцію де всі споживачі електроенергії об'єднуються в єдину електроенергетичну систему (ЄЕЕС).

Таким чином, гребний електродвигун та пов'язаний частотний перетворювач з енергетичною системою складають головну частину гребного комплексу AZIPOD.

Нова система та існуюча дизель-генераторна схема приводу руху судна мають як переваги так і недоліки. Відмінна особливість таких технічних рішень полягає у тому, що електродвигун традиційних систем руху суден знаходиться усередині корпусу і обертання передається на гвинт через коробку передач. При цьому дизель-електрична схема приводу має ряд переваг у порівнянні з раніше застосовуваною схемою двигун-вал-гвинт. До основних з них відноситься: оптимальне розміщення дизель-генераторів, скорочення довжини гребного валу та інші.

Але істотним недоліком таких електричних схем є втрати потужності при подвійному перетворенні енергії: спочатку з механічної на електричну, а потім знову на механічну. Для деяких суден це не критично, тому що може відбуватися часта зміна режимів навантаження гребної установки, підвищення маневрових якостей і тощо. Така електрична схема використовується на судах спеціального призначення (суховантажах, буксирах, поромах, криголамах), які працюють у особливих умовах.

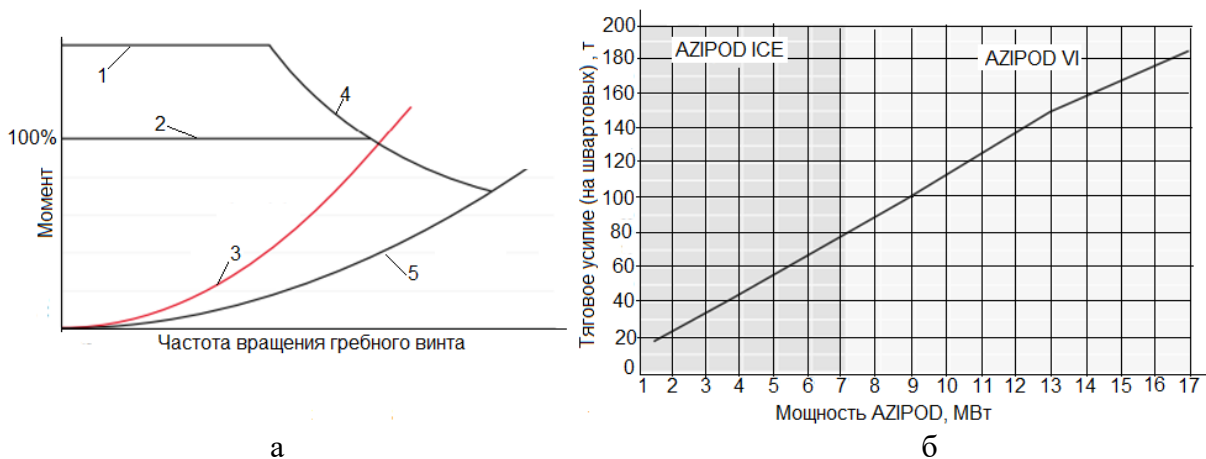
Системи AZIPOD мають високомоментні електродвигуни, що розташовані в окремому корпусі - поді. Тяговий гвинт встановлений на валу електродвигуна (рис. 2). Коробка передач відсутня і завдяки цьому досягається більша ефективність системи під час експлуатації. В цілому гвинта-рульова система AZIPOD складається з шумного та рульового модуля.



**Рис. 2.** Розташування основних елементів системи AZIPOD [2].

Застосування високоефективних двигунів змінного струму в конструкції AZIPOD [2, 4-6] дозволило скоротити елементи в силовій передачі енергії порівняно з елементами механічного руху, які мають складну трансмісію із зубчастими колесами та валами. При цьому в системі AZIPOD гребний гвинт фіксованого кроку встановлюється прямо на валу двигуна. В результаті підвищується міцність та надійність гребного пристрою. Також електрична рушійна система AZIPOD допускає перевантаження по крутному моменту в поєднанні з характеристиками міцності обертання гребного гвинта при важких умовах

Для електричної гребної установки системи AZIPOD одним з основних параметрів є крутний момент електродвигуна. Тому електродвигун і частотний перетворювач проектується таким чином, щоб забезпечити максимальний момент, що крутить, при низьких значеннях частоти обертання гребного гвинта і при його зупинці. Відсутність механічного сполучення між силовою установкою та електродвигуном, що приводить у рух гвинт, дозволяє мінімізувати механічні втрати. Тяга гвинта визначається по кожному конкретному випадку окремо, з урахуванням даних випробувань моделі та індивідуальних параметрів гвинта (рис. 3).



**Рис. 3.** Зміна параметрів гребного гвинта [2]

- а – залежність моменту електродвигуна гвинта та приводу від частоти обертання: 1 – додатковий циклічний крутний момент (для криголамів); 2 – постійний крутний момент; 3 – крутний момент під час роботи на швартових; 4 – при постійної потужності; 5 – при вільному обертанні;
- б – залежність упору під час роботи на швартових від потужності AZIPOD різного типу: AZIPOD ICE – потужністю 2-6 МВт; AZIPOD VI – від 6 до 17 МВт залежно від розміру та характеристик судна.

Двигуни у моделях AZIPOD здатні передавати 100% потужність на гребний гвинт під час роботи на швартових (див. рис. 3, 6). Залежно від умов експлуатації використовуються різні типи двигунів змінного струму. Наприклад, у моделі AZIPOD VI використовується електродвигун синхронного типу. У моделі AZIPOD ICE – електродвигун на постійних магнітах. Це оптимальна технологія для невисоких потужностей, що дозволяє спростити систему та використовувати менше допоміжних блоків. У цих моделях трифазний електродвигун повністю герметизований та розташований у сухому середовищі русійного модуля, що занурюється, і приводить у рух гвинт фіксованого кроку.

Також для кожного конкретного судна та з урахуванням конструктивних особливостей провідні компанії з виробництва AZIPOD виконують конкретний проект гвинта. В основному, у системах AZIPOD для руху судна носом вперед, використовується гребний гвинт типу, що тягне (з безпосереднім приводом).

У модулі електродвигуна розташоване гальмо валу. Для його функціонування використовується стиснене повітря, що надходить від суднової пневмосистеми або окремого компресора двигуна AZIPOD.

### 3. Мета та задачі дослідження

Електродвигун різної потужності є одним із основних елементів системи AZIPOD. На валу електродвигуна встановлено гребний гвинт, що дозволяє передавати крутний момент двигуна на гвинт без проміжних елементів (валів або редукторів). В результаті під час експлуатації зникають втрати енергії в пропульсивній системі. Така особливість AZIPOD покращує маневреність судна за курсом, а також сприяє збільшенню швидкості у порівнянні зі звичайними установками руху.

У сучасних конструкціях модулів руху системи AZIPOD широко застосовуються у криголамних судах неререверсивні синхронні електродвигуни змінного струму з постійними магнітами. Завдяки особливостям електродвигуна забезпечується фіксований крок гвинта, що обертає.

Технічні рішення з використанням синхронних двигунів з постійними магнітами існують вже не перший рік. Спочатку вони застосовувалися як двигуни сервопристроїв та тягових двигунів. Рішення про застосування синхронних двигунів з постійними магнітами в системах AZIPOD викликано тим, що асинхронні двигуни мають ряд недоліків [2,7]. Наприклад, їх частота обертання складає від 750 – 3000 об/хв. Також вони мало придатні для роботи на низьких оборотах, оскільки зі зменшенням частоти обертання ККД у них падає. Крім того, на малих оборотах асинхронні двигуни не забезпечують достатньої рівномірності крутного моменту. Щоб усунути вплив цих недоліків, зазвичай, використовуються редуктори. Однак редуктор – складний пристрій, що вимагає місця, догляду та досить великого використання допоміжних засобів).

При удосконаленні системи управління синхронні двигуни з постійними магнітами можуть мати більш широке застосування в суднових установках, що мають системи AZIPOD. Їх використання сприяє створенню компактної, ефективної і придатної системи не тільки для криголамних електроходів та суховантажів, а також для малотоннажних суден.

Синхронні двигуни з постійними магнітами є конструкцією з радіальним магнітним потоком, повітряним або водяним охолодженням. Завдяки тому, що ротор з постійними магнітами під час роботи не нагрівається, з'являється можливість створення підвищеної потужності при малих габаритах. При дії зовнішнього магнітного поля магніти фіксують ротор у певному положенні стосовно зовнішнього поля. Це дозволяє з великою точністю керувати частотою обертання синхронного двигуна в широкому діапазоні шляхом живлення від перетворювача частоти [8].

Особливістю синхронних двигунів з постійними магнітами є поєднання кількох властивостей. Наприклад, такі двигуни мають високу точність, властиву синхронним

двигунам, і надійність конструкції, що властиво для асинхронних двигунів. Напруга подається безпосередньо на статор від блоку збудження зі змінною частотою. Також синхронні двигуни з постійними магнітами забезпечують створення великого крутного моменту безпосередньо на приводному валу. Це досягається тим, що у двигунах такого типу відсутнє ковзання ротора. У результаті покращується керування двигуном [7, 8].

Традиційні постійні магніти ротора синхронного двигуна виготовлені з магнітного матеріалу NdFeB (неодим залізо бор), який має найвищі магнітні характеристики при кімнатній температурі. Такий матеріал, відповідно своїм властивостям, забезпечує створення магнітного потоку великої щільності та має високу здатність до намагнічування і виключно стійкий до розмагнічування. До того ж він дешевший за матеріал на основі композиції з'єднання кобальту з самарієм.

Для подальшого визначення можливості застосування синхронних електродвигунів з постійними магнітами (СДПМ) у системах AZIPOD малотоннажних суден, необхідно обрати конструкцію двигуна, яка відповідає основним вимогам. При цьому електричний двигун повинен мати:

- максимальний момент, що крутить, при низьких значеннях частоти обертання гребного гвинта і при його зупинці;
- оптимальні перевантаження по крутному моменту електродвигуна у поєднанні з характеристиками міцності AZIPOD (для збереження обертання гребного гвинта у важких умовах);
- підвищену потужність при малих габаритах.

#### 4. Аналіз літератури

Особливості роботи синхронних електродвигунів з постійними магнітами полягають у конструкції. Електродвигун складається з нерухомого статора і рухомого ротора (рис. 4), які при подачі електроенергії взаємодіють між собою. В конструкцію ротора включені магніти постійного типу.

Принцип дії синхронного електродвигуна заснований на взаємодії магнітного поля статора, що обертається і постійного магнітного поля ротора. Концепція роботи синхронного електродвигуна схожа на роботу трифазного асинхронного електродвигуна [7,8].

Завдяки постійним магнітам, що розташовані на роторі СДПМ, утворюється постійне магнітне поле. При синхронній швидкості обертання ротора відбувається зчеплення його полюсів з магнітним полем статора, що також обертається. У зв'язку з цим СДПМ не може сам запуститися при підключенні безпосередньо до мережі трифазного струму (частота струму в мережі 50Гц).

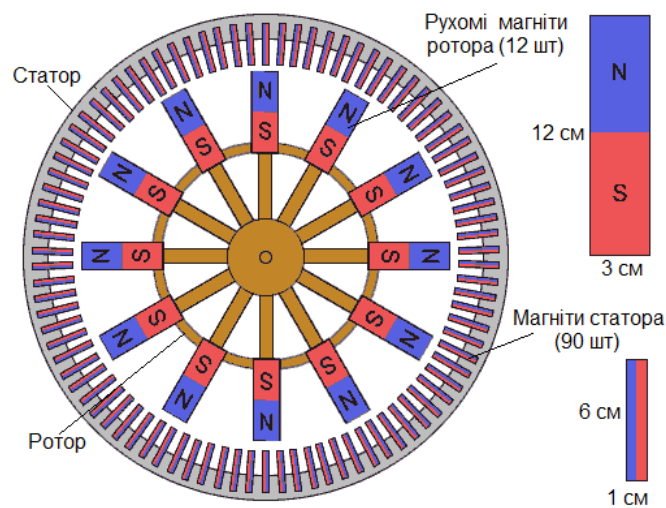


Рис. 4. Модель конструкції синхронного двигуна з постійними магнітами [8]

Тому для роботи синхронного двигуна з постійними магнітами обов'язково потрібна система управління (наприклад, частотний перетворювач або сервопривод). Вибір оптимального способу управління, головним чином, залежить від задачі, що ставиться перед електроприводом.

Унікальність параметрів гребних електродвигунів (ГЕД) полягає у існуванні потужності до кількох десятків мегават при частоті обертання ГЕД 50 – 200 об/хв. Це сприяє пошуку нових науково-технічних рішень, що відповідають необхідним вимогам. Деякі фахівці йдуть по шляху підвищення ККД електродвигунів або зменшення ваго-габаритних характеристик. Інші пропонують зміну режимів роботи електродвигунів з використанням додаткового обладнання.

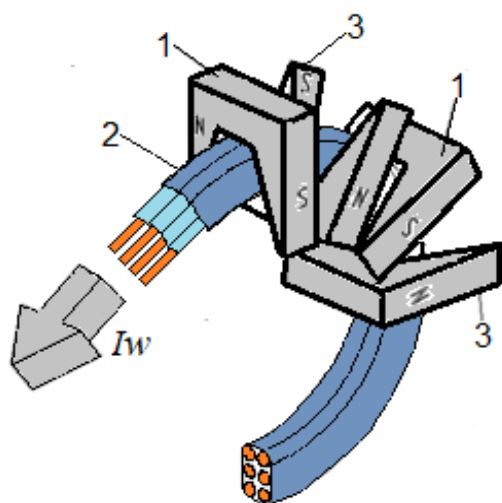
Наприклад, синхронні електродвигуни можуть працювати у режимі вентильного двигуна, де фази машини комутуються за сигналами датчика положення ротора [9].

В роботах [10, 11] показана можливість використання вентильних двигунів з постійними магнітами (ВДПМ) на роторі. Такі електродвигуни не мають втрат потужності на збудження і можуть бути виконані з великою кількістю пар полюсів ротора, що дозволяє знизити вагу магнітопроводу статора та ротора.

Також фірма «Rolls Royce» [12] пропонує ВДПМ з радіально-осьовим магнітним потоком, які називаються TFM (Transversive Flux Motors). Дослідні зразки електродвигунів TFM мають потужність 2,5 МВт. Але на цей час також опрацьовується варіант машини потужністю 20 МВт. Основні елементи конструкції двигунів показані на рис. 5 і рис. 6. [13].

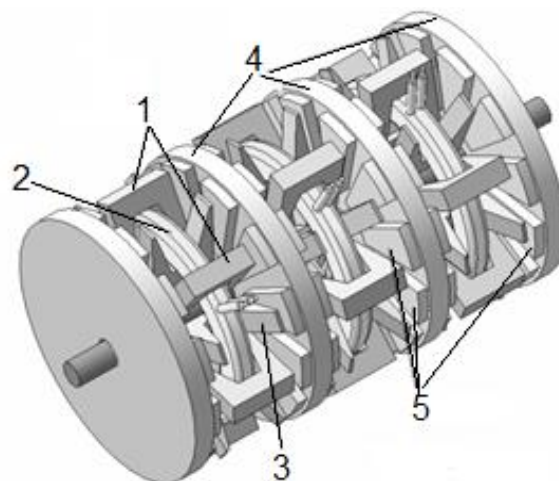
В залежності від подачі напруги на фази відбувається зміна параметрів, що впливає на роботу електродвигуна та режим обертання валу.

Наприклад, при подачі в одну з фаз змінного струму створюється пульсуючий момент. Якщо на фази двигуна подати симетричну трифазну синусоїдальну напругу, то при складанні моментів, створених фазами, виникає постійний момент певного напрямку. Двигун працюватиме, як синхронний - з плавним обертанням валу. Якщо перемикає обмотки за сигналами датчика положення ротора, двигун буде працювати, як безконтактний двигун постійного струму (вентильний).



**Рис. 5.** Елементи фази статора ВДПМ з радіально-осьовим магнітним потоком:

1, 3 – елементи полюсів; 2 – фаза обмотки статора; стрілка – напрямок намагнічуючої сили  $Iw$  кільцевої обмотки, де  $I$  – струм обмотки;  $w$  – число витків



**Рис. 6.** Загальний вид трифазного ВДПМ з радіально-осьовим магнітним потоком:

1, 2, 3 – фази з елементами магнітопроводу; 4 – диски ротора; 5 – постійні магніти

Двигуни TFM дозволяють істотно підвищити індукцію магнітного поля в зазорі і щільність струму в обмотках. В результаті значно знижуються габарити і маса машини. [12].

Але в машинах TFM втрати в магнітопроводі будуть вищими, ніж у ВДПМ з радіальним або осевим магнітним потоком. Конструкція машин TFM менш технологічна, тому що магнітопровід складається з великої кількості окремих елементів. З цієї причини важко забезпечити рівномірний проміжок між магнітопроводом статора і ротором.

Показані технічні рішення та особливості роботи електродвигунів гребних приводів мають свої властивості, а також переваги і недоліки. Такі рішення пропонують усунення часткових проблем. Але розглядати їх потрібно у комплексі та з урахуванням багатьох факторів.

## 5. Методи досліджень

Режими роботи будь якого електричного двигуна залежить від основних параметрів. Для їх визначення використовуються диференційні рівняння, що характеризують параметри електричного стану ланцюга, значення електромагнітного моменту та руху обертових машин. [14]:

Наприклад, загальні рівняння динаміки механічної системи для електричної машини з одним ступенем свободи, мають вид:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_e - M_c); \quad \frac{d\alpha}{dt} = \Omega, \quad (1)$$

де  $J$  – момент інерції ротора;

$M_e, M_c$  – електромагнітний момент та момент опору, що прикладений до валу ротора;

$\Omega$  – кутова частота обертання ротора;

$\alpha$  – кут повороту ротора відповідно статору у момент часу  $t$ .

Для синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ) рівняння змінних стану для всіх обмоток статора можна представити з урахуванням припущень, а саме: знехтування струмів усунення порівняно зі струмами провідності та розглядання обмотки машин як електричні ланцюги із зосередженими параметрами (рис. 7),

$$[u] = \frac{d[\Psi]}{dt} + [R][i], \quad (2)$$

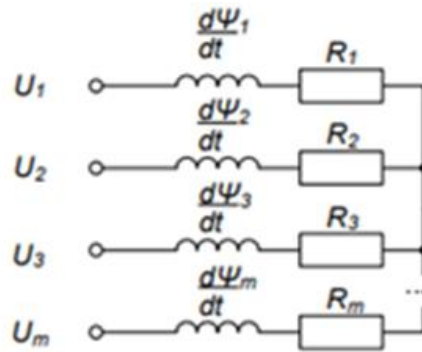
де  $[u] = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]^t$  – матриця миттєвих напруг, що прикладені до фаз обмотки статора;

$[\Psi] = [\Psi_1 \ \Psi_2 \ \dots \ \Psi_m]^t$  – матриця миттєвих потокозчеплень фаз обмотки статора;

$[R] = \text{diag} [R_1 \ R_2 \ \dots \ R_m]$  – діагональна матриця активних опорів фазних обмоток;

$[i] = [i_1 \ i_2 \ \dots \ i_m]^t$  – матриця миттєвих фазних струмів.





**Рис.7.** Електрична схема  $m$  – фазного СДПМ [14]

Також до припущень можна віднести насичення магнітного кола статора, яке зумовлено дією лише постійних магнітів ротора. Тому що відносні магнітні проникності висококоерцитивних постійних магнітів (ПМ) близькі до 1 і менше магнітних проникностей сталі статора.

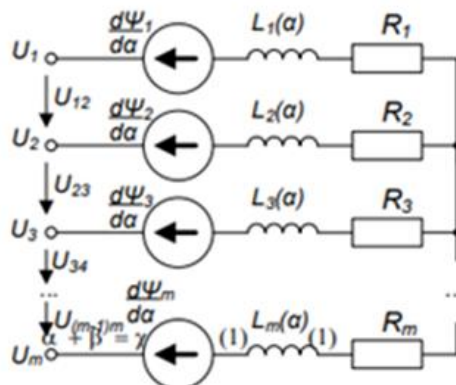
Припущення для потокозчеплення фаз обмотки статора СДПМ можна представити у вигляді суми потокозчеплення від ПМ ротора та статора.

$$[\Psi] = [\Psi_0] + [L][i], \tag{3}$$

де  $[\Psi_0] = [\Psi_{10} \ \Psi_{20} \ \dots \ \Psi_{m0}]$  – матриця потокозчеплень фаз, що обумовлені дією постійних магнітів ротора;

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1m} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{m1} & L_{m2} & \dots & L_{mm} \end{bmatrix} \text{ – матриця саме- та взаємоіндукції фаз обмотки статора.}$$

Таким чином, з урахуванням припущень складається електрична схема заміщення  $m$ – фазного СДПМ (рис. 8).



**Рис. 8.** Електрична схема заміщення  $m$  – фазного СДПМ [14]

Рівняння змінних стану у матричній формі:

$$[u] = \Omega \frac{d[\Psi_0]}{d\alpha} + [L] \frac{d[i]}{dt} + \Omega \frac{d[L]}{d\alpha} [i] + [R][i]. \tag{4}$$

Якщо відсутній нейтральний провід і відомі лише лінійні напруження, то струм однієї з гілок може бути виражений через струми всіх інших. При цьому кількість рівнянь, необхідних для розрахунку електричного ланцюга, буде на одну менше від кількості фаз  $m$ . Параметри електричної схеми можна розрахувати матричним методом контурних струмів [14, 15].

Тоді рівняння (4) перетвориться до виду:

$$\frac{d[i]}{dt} = B' \left( [u_l] - B[R]B' [i_k] - \Omega B \frac{d[L]}{d\alpha} [i_k] - \Omega B \frac{d[\Psi]}{dt} \right) / (B \cdot [L] \cdot B'), \quad (5)$$

де  $[u_l]$  – матриця миттєвих значень лінійних напруг;  
 $[i_k]$  – матриця миттєвих значень контурних струмів;  
 $[B]$  – матриця контурів.

Матриця контурних струмів визначається з матриці фазних струмів при використанні методу перерізу:

$$[i_k] = [G][i], \quad (6)$$

де  $[G]$  – матриця перерізу.

Електромагнітний момент визначається через магнітну коенергію. Підсумкове рівняння для розрахунку електромагнітного моменту від фазних струмів має вигляд:

$$M_e = [i]^t \frac{d[\Psi_0]}{d\alpha} + \frac{1}{2} [i]^t \frac{d[L]}{d\alpha} [i]. \quad (7)$$

Таким чином, з урахуванням залежності  $\Psi_0(\alpha)$  можна визначити елементи матриці  $\Psi_0$  при будь-якому значенні кута  $\alpha$  з використанням польових моделей та з урахуванням реальної геометрії елементів СДПМ, насичення сталі та додаткових параметрів і припущень.

Для розрахунку елементів матриці  $L$  при відомому куті  $\alpha$  необхідно визначити параметри магнітного поля лінеаризованої активної зони СДПМ ( $\mu = \text{const}$ ) при збудженні довільного значення струму в одній із фаз. При цьому області з постійними магнітами замінюються середовищами без джерел поля, з урахуванням рівних значень магнітних проникностей поля і постійних магнітів. При відсутності у роторі СДПМ феромагнітних вставок елементи симетричної матриці  $L$  не залежатимуть від кута повороту ротора  $\alpha$  і можуть бути визначені для одного довільного положення осердя під час розрахунку параметрів магнітного поля.

## 6. Висновки

1. Аналіз особливостей роботи систем AZIPOD для різних суден показав переваги у порівнянні з дизель-електричною схемою приводу руху судна. В результаті проведення аналізу визначена мета роботи, що передбачає можливість використання синхронних двигунів з постійними магнітами у системі AZIPOD малотоннажних суден.

2. Для подальших досліджень та створення нових теоретичних положень розглянути технічні рішення використання різних видів електродвигунів у системах AZIPOD. Отримані переваги та недоліки показали інші шляхи дослідження з використанням синхронних двигунів з постійними магнітами.

В результаті аналізу також показана загальна математична модель визначення основних параметрів з урахуванням припущень в залежності від умов та вимог використання синхронних двигунів з постійними магнітами.

**Список літератури:**

- 1) ABB [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sea-man.org/sistema-upravleniya-azipod.html>
- 2) ABB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new.abb.com/>
- 3) Ericson T. Power electronics and future ships electrical system / T. Ericson, N. Hingorani, Yu. Khersonsky // IEEE Transactions of industry applications. 2006. Vol. 42. -Is. 1. Pp. 76–79.
- 4) Emadi A. Energy-Efficient Electric Motors / A. Emadi. - New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. - 406 p.
- 5) Proverbs J. Aspects of electro-magnetic aircraft launch and linear machine development / J. Proverbs, Colyer, T. Cox, J. F. Eastham // IEEE transaction on Magnetics. - 2010. - Vol. 46. - Is. 12. - Pp. 57–59.
- 6) Ehrhart P. The all-electric ship: ready to take over? / P. Ehrhart // Naval Forces. - 2011. - Vol. XXXII. - Pp. 41-45.
- 7) Cristian Busca. Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application.- Aalborg, Denmark.: Aalborg universitet, 2010.
- 8) Marian P. Kazmierkowski, Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Marcelo A. Perez, Jose I. Leon. High-Performance Motor Drives: IEEE Industrial Electronics, vol. 5, no. 3, pp. 6–26, Sep.2011
- 9) Jamai H. Optimal Switched Reluctance Motor Drive for Hydraulic Pump unit / H. Jamai, M. Kaneda, K. Ohya, Y. Takeda, N. Matsai. - IEEE INTECH, 2000. - Pp. 98–101.
- 10) Hodge Cdr C. G., Mattick Cdr D. J. The Electric Warship III // Trans IMarE. 1997. Vol 110. Part Pp. 119–134.
- 11) Электротехнические и радиоэлектронные системы дизельэлектрических подводных лодок / В.С. Соколов [и др.] СПб.: ФГУП ЦКБ МТ "Рубин", 2005. 256 с.
- 12) Hodge Cdr C. G., Mattick Cdr D. J. The Electric Warship V // A paper for the Institute of Marine Engineers. 2000. Pp. 34
- 13) Калмыков А.Н., Сеньков А.А. Гребные электродвигатели с радиально-осевым магнитным потоком / Труды V международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, 2007. С. 394–397.)
- 14) Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов/ М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
- 15) Осипов Ю.М., Борисов П.А. Методы расчета линейных электрических цепей.– СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 120 с.

---

## **Analysis of the Structure of the AZIPOD Electric Drive System and Its Key Functional Elements**

**Tatyana Pavlenko**

Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine  
ORCID 0000-0002-2356-4066

**Olena Zaritska**

Department of Operation of ship electrical equipment and automation, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine  
ORCID ID 0000-0002-8530-1106

**Anastasiia Bodnarchuk**

Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine  
ORCID ID 0009-0001-5528-0455

**Liubov Shyndak**

Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

ORCID ID 0009-0000-3838-0115

---

**Abstract:** The paper presents innovative and efficient technical solutions for the use of electric motors that contribute to increasing ship speed, maneuverability, and operational reliability in AZIPOD systems. The distinctive feature of such systems is the placement of the propeller electric motor outside the ship's hull. This offers significant advantages compared to the diesel-electric propulsion scheme, which is still widely used today. In AZIPOD systems, the primary element is high-torque alternating current electric motors. The application of such electric motors reduced the number of components in the power transmission compared to mechanical drive components. This allowed for the installation of a fixed-pitch propeller on the electric motor shaft. For the study, synchronous electric motors with permanent magnets were chosen. Due to their structural features and operating principles, the use of such electric motors enhances the strength and reliability of the propulsion device under various operating modes and conditions of the AZIPOD system. To determine the optimal motor design, the paper outlines its objective, which involves analyzing the peculiarities of the AZIPOD system's operation and assessing the possibility of using synchronous electric motors with permanent magnets in small-tonnage vessel systems. Accordingly, the paper conducts an analysis of general calculation methods for parameters while considering possible assumptions.

**Keywords:** AZIPOD, electric motor, permanent magnets, propeller screw, motion module, transformer, control system, small-tonnage vessels, frequency converter.

---