

Д.А. НАГОВСЬКИЙ, Г. Г. ДОЩЕНКО, С.С. ГОЛОЩАПОВ
Херсонська державна морська академія

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ В СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Сьогодні транспортна енергетика стрімко розвивається, і це супроводжується зростанням вимог до безпеки та надійності суднового обладнання. Водночас постійно збільшується потужність головних та допоміжних двигунів. Через це особливо важливим стає підтримання енергоефективності суднових енергетичних установок протягом усього терміну експлуатації.

Еволюція технологій керування гребними приводами почалася із систем на основі двигунів постійного струму (ДПС), які керувалися тиристорними перетворювачами. Ці системи хоча і забезпечували регулювання швидкості, мали суттєві недоліки, такі як високі експлуатаційні витрати, складність обслуговування, а також великі габарити та вага. Розвиток силової електроніки та мікропроцесорної техніки дав змогу перейти до більш досконалих систем змінного струму.

У статті розглянуто еволюцію та сучасний стан застосування перетворювачів частоти в суднових електроенергетичних установках. Проведено детальний аналіз ключових технологій керування гребними приводами, починаючи від історично доцільних систем на базі двигунів постійного струму з тиристорними перетворювачами до сучасних приводів змінного струму.

Особливу увагу приділено порівнянню різних топологій перетворювачів, таких як циклоконвертери, інвертори з джерелом струму та інвертори з джерелом напруги (ШІМ), які є основою сучасних електричних пропульсивних систем. Визначено їхні принципи роботи, переваги, недоліки та особливості застосування, зокрема в системах, що вимагають високої продуктивності та точності, як-от динамічне позиціонування або рух у льодових умовах.

На основі аналізу представлено порівняльну характеристику основних типів приводів за такими критеріями, як пускові струми, динаміка, коефіцієнт потужності, гармонічні спотворення та ефективність. Результати дослідження підкреслюють перехід до приводів змінного струму як найбільш оптимального рішення для сучасного суднобудування.

Таким чином, сучасні електричні пропульсивні системи з перетворювачами частоти на основі інверторів із джерелом напруги (ШІМ) стали найбільш оптимальним рішенням для суднобудування.

Ключові слова: пропульсивна система, перетворювачі частоти, циклоконвертери, інвертори з джерелом струму, інвертори з джерелом напруги, тиристорні перетворювачі.

D.A. NAHOVSKIY, H.G. DOSHCENKO, S.S. GOLOSCHAPOV
Kherson State Maritime Academy

FREQUENCY CONVERTERS IN SHIP POWER PLANTS: COMPARATIVE ANALYSIS

In our time, transport energy is rapidly developing, and this is accompanied by increasing demands for the safety and reliability of marine equipment. At the same time, the power of main and auxiliary engines is constantly increasing. Because of this, maintaining the energy efficiency of ship power plants throughout their entire service life becomes particularly important.

The evolution of propulsion drive control technologies began with systems based on direct current (DC) motors, which were controlled by thyristor converters. Although these systems provided speed regulation, they had significant drawbacks, such as high operating costs, maintenance complexity, as well as large dimensions and weight. The development of power electronics and microprocessor technology allowed for the transition to more advanced alternating current (AC) systems.

The article examines the evolution and current state of the application of frequency converters in ship power plants. A detailed analysis of key propulsion drive control technologies is carried out, from historically appropriate systems based on DC motors with thyristor converters to modern AC drives.

Special attention is paid to comparing different converter topologies, such as cycloconverters, current source inverters, and voltage source inverters (PWM), which are the basis of modern electric propulsion systems. Their operating principles, advantages, disadvantages, and features of application are determined, particularly in systems that require high performance and accuracy, such as dynamic positioning or movement in ice conditions.

Based on the analysis, a comparative characteristic of the main types of drives is presented according to criteria such as starting currents, dynamics, power factor, harmonic distortion, and efficiency. The results of the study emphasize the transition to AC drives as the most optimal solution for modern shipbuilding.

Thus, modern electric propulsion systems with frequency converters based on voltage source inverters (PWM) have become the most optimal solution for shipbuilding.

Key words: propulsion system, frequency converters, cycloconverters, current source inverters, voltage source inverters, thyristor converters.

Постановка проблеми

У сучасному суднобудуванні існує постійна потреба у підвищенні ефективності, надійності та екологічності енергетичних установок. Електричні пропульсивні системи, які базуються на перетворювачах частоти, стали основним напрямом розвитку, витісняючи традиційні механічні приводи. Однак існує широкий спектр технологій перетворювачів, кожна з яких має свої переваги та недоліки.

Проблема полягає у відсутності комплексного порівняльного аналізу цих технологій, що ускладнює вибір оптимального технічного рішення для конкретних умов експлуатації судна. Вибір неправильної топології перетворювача може призвести до:

- низької енергоефективності, що збільшує витрати палива та викиди;
- погіршення динамічних характеристик приводу, що критично для суден, які потребують високої маневреності (наприклад, криголамів або суден із системою динамічного позиціонування);
- високих експлуатаційних витрат та потреби у частому технічному обслуговуванні, особливо для застарілих систем;
- створення гармонічних спотворень у судових електромережах, що може негативно впливати на роботу іншого обладнання.

Таким чином, актуальним є завдання систематизації знань про сучасні та історичні технології перетворювачів частоти та проведення їх об'єктивного порівняння для обґрунтування вибору найбільш доцільного технічного рішення, що відповідатиме вимогам судової експлуатації XXI ст.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перетворювачі частоти застосовуються у судових електроенергетичних установках уже протягом кількох десятиліть, але їх широке впровадження розпочалося лише наприкінці 1960-х років із появою силових напівпровідникових елементів. На початковому етапі електродвигуни постійного струму були найбільш доцільним рішенням для систем керування судовими гребними приводами. Однак у 1980-х роках приводи змінного струму стали промислово доступними та конкурентоспроможними для морського застосування. Відтоді практично всі нові впровадження електричних пропульсивних систем виконуються на базі однієї з топологій приводів змінного струму [1].

Найбільш поширеними типами перетворювачів, що застосовуються у приводах судових електродвигунів, є (у порядку пріоритетності):

- інвертори з джерелом напруги для електродвигунів змінного струму (AC motors), зазвичай асинхронних двигунів;
- циклоконвертори для електродвигунів змінного струму, зазвичай синхронних двигунів;
- інвертори з джерелом струму для електродвигунів змінного струму, зазвичай синхронних двигунів;
- тиристорні перетворювачі на кремнієвих керованих випрямлячах для електродвигунів постійного струму.

Розглянемо переваги та недоліки вищевказаних технічних рішень та порівняємо їх між собою.

Мета дослідження

Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу та обґрунтування доцільності застосування різних типів перетворювачів частоти в судових електроенергетичних установках.

Виклад основного матеріалу дослідження

Найбільш поширеним типом є електродвигун постійного струму з незалежним збудженням, у якому обмотка збудження та обмотка якоря живляться окремо. Передача струму якоря

від нерухомих виводів до ротора здійснюється за допомогою щіток, з'єднаних з обертовим колектором. На практиці струм якоря також проходить через додаткові нерухомі обмотки, які сприяють комутації струму між колекторними пластинами, проте цей ефект у цьому контексті не розглядається. У двигуні постійного струму незалежного збудження індукована напруга якоря прямо пропорційна магнітному полю та швидкості обертання. Магнітне поле є функцією струму збудження, і через ефект насичення на практиці ця залежність не є строго пропорційною. Однак якщо нехтувати насиченням, напруга якоря визначається за формулою [2]:

$$V_a = k\Phi(I_f)n \approx kK_\phi I_f n = K_v I_f n, \quad (1)$$

де K_v – індуктивна постійна, I_f – струм збудження, n – кутова швидкість обертання, K_ϕ та K – коефіцієнти пропорційності, Φ – магнітний потік двигуна. Тоді момент, який пропорційний струму якоря та магнітному полю, визначається як:

$$T = kI_a\Phi(I_f) \approx kI_aK_\phi I_f = K_T I_a I_f, \quad (2)$$

де K_T – постійна моменту і I_a – струм якоря.

Оскільки двигун постійного струму повинен жити від джерела постійної напруги з обмеженими значеннями напруги, струму збудження та струму якоря, межа робочих характеристик буде виглядати, як показано на рис. 1.

Робота розділена на дві області: область постійного крутного моменту, яка характеризується сталим струмом збудження, та область ослаблення поля, де струм збудження зменшується для підтримки максимальної напруги на якорі за збільшення швидкості. Отже, максимальна межа крутного моменту в принципі є сталою в області постійного крутного моменту й обернено пропорційною швидкості в області ослаблення поля.

Проте у низькошвидкісній області струм якоря зазвичай треба обмежувати, щоб уникнути вигорання колектора, а у високошвидкісній області – зменшувати, щоб уникнути іскріння між сегментами колектора. Ці обмеження й показано на рис. 1.

У найбільш поширених потужних застосуваннях є двигун постійного струму, який живиться від тиристорного випрямляча з повним мостом (рис. 2), який забезпечує керований струм якоря. Аналогічно обмотка збудження живиться регульованим струмом збудження. Крутний момент точно контролюється з низькими пульсаціями, якщо індуктивність якоря велика, але це знижує динамічні характеристики, оскільки зростає часова константа якоря.

У цій топології напруга постійного струму на обмотках якоря керується фазовим зсувом часу відкриття тиристорів за кутом відкриття α . Кут відкриття в принципі може регулюватися від 0 до 180 градусів, і відповідно напруга на обмотках якоря може регулюватися від +1,35 до -1,35 від лінійної напруги. Проте на практиці кут відкриття α не буде меншим за 15 градусів, щоб забезпечити керованість приводу навіть за падіння напруги в мережі, і обмежений 150 градусами для наявності так званого запасу комутації [3].

Оскільки струм якоря контролюється за допомогою кута відкриття тиристорів, струми змінного струму будуть зсунуті по фазі відносно базової напруги. Фазовий кут струму майже дорівнює куту відкриття затвора тиристора. Оскільки напруга на якорі пропорційна швидкості обертання, можна побачити, що фазовий кут, який приблизно дорівнює куту відкриття, також буде приблизно пропорційним напрузі і, відповідно, швидкості обертання.

У приводі постійного струму, де швидкість варіюється від 0 до 100%, коефіцієнт потужності відповідно змінюватиметься від 0 до 0,96% (за куту відкриття тиристорів 15 градусів). Низький коефіцієнт потужності збільшує втрати у системах генерації та розподілу і може вимагати роботи більшої кількості генераторів, аніж це потрібно для активної потужності навантаження.

Знос щіток і колектора є причиною відмов та необхідності технічного обслуговування, а також обмежує крутний момент за стоянки. Ураховуючи це, а також те, що практичний опір

у приводах постійного струму становить близько 2–3 МОм, застосування таких приводів постійного струму для двигунів має певні обмеження і доцільне лише як модернізація, коли використовуються вже існуючі установки.

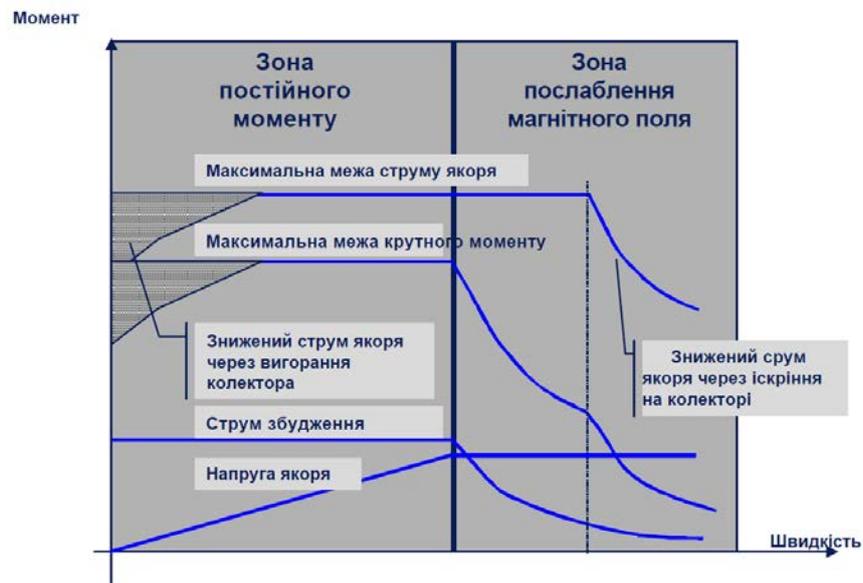


Рис. 1. Характеристики максимальних меж експлуатації для двигуна постійного струму з незалежним збудженням

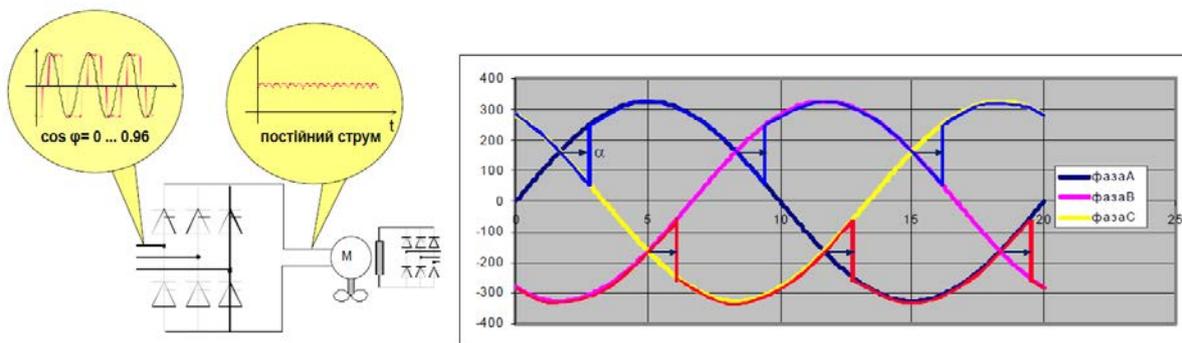


Рис. 2. Повний міст тиристорного приводу постійного струму. Напруга постійного струму на двигуні контролюється затримкою провідності тиристорів за кутом відкриття затвора α ($\alpha = 30^\circ$).

$$\text{Середня напруга на двигуні становить: } V_{dc} = 1.35V \cos\alpha$$

Циклоконвертер – це прямий перетворювач без посередницької ланки постійного струму (рис. 3). Напруга на двигуні змінного струму формується шляхом вибору фазових сегментів напруги живлення за допомогою керування антипаралельним тиристорним мостом.

На схемі показано 12-імпульсну конфігурацію з пониженими гармоніками в лінії, але циклоконвертер також може працювати у 6-імпульсній конфігурації. У 6-імпульсній конфігурації трансформатори живлення можна замінити реакторами, якщо напруга живлення співпадає з напругою інвертора.

Напруга двигуна керована до приблизно однієї третини частоти живлення (близько 20 Гц), тому цей тип найбільше підходить до застосування у прямому приводі валу без редуктора. Його доцільно використовувати у головних пропульсивних системах, включаючи підводні рушії [4].

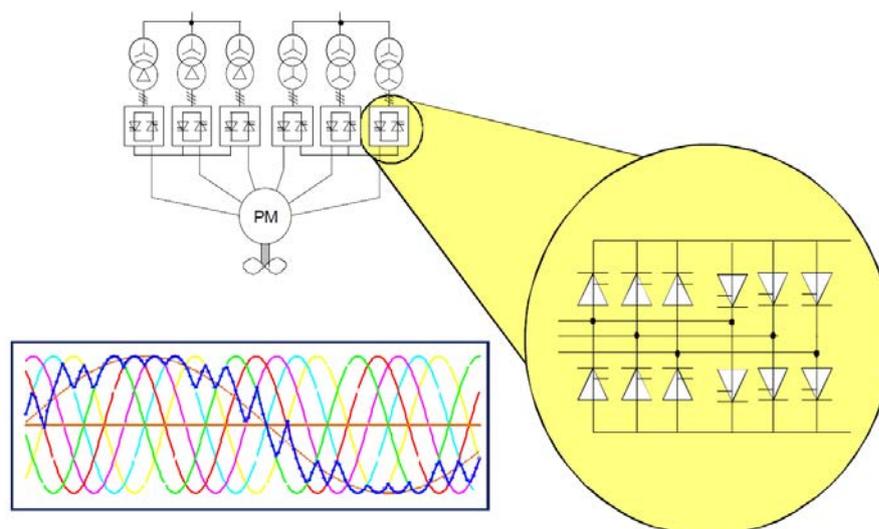


Рис. 3. Привід із використанням циклоконвертера із вхідними та базовими вихідними сигналами. Вихідна напруга формується шляхом вибору фазових сегментів напруги живлення

Напруга двигуна містить менше гармонік, аніж у інвертора з джерелом струму, і коефіцієнт потужності двигуна може підтримуватися високим, дуже наближеним до одиниці.

Коефіцієнт потужності живлення залежить від напруги двигуна і становить приблизно 0,76 в області ослаблення поля. Уміст лінійних гармонік залежить від швидкості й повинен ретельно враховуватися під час проектування системи, особливо коли привід двигуна великий порівняно з установленою потужністю.

Границі роботи подібні до тих, що застосовуються у приводах синхронних двигунів інверторного типу з джерелом напруги за винятком того, що обмеження на низьких швидкостях відсутні, оскільки комутація відбувається відносно мережевої напруги, а не напруги двигуна (рис. 4).

Тому циклоконвертеру доцільно давати перевагу у застосуваннях, де важлива робота на низьких швидкостях та висока продуктивність, особливо в системах для ламаючих лід суден або суден, що йдуть по льоду, а також у системах динамічного позиціонування (DP) і пасажирських суден, де критично важлива маневреність на низьких швидкостях [5].

Циклоконвертери доступні в діапазоні потужностей від 2 до 30 МВт на кожен двигун приводу.

Інвертор із джерелом напруги є найпоширенішим перетворювачем частоти в промислових застосуваннях. Він забезпечує найбільш гнучкий, точний і високоефективний привід і може використовуватися з асинхронними двигунами. Також його доцільно застосовувати для синхронних двигунів і двигунів із постійними магнітами, забезпечуючи значно кращі характеристики порівняно з іншими альтернативами.

Основними обмеженнями цієї топології приводу були доступність високопотужних компонентів та її конкурентоспроможність у високопотужному діапазоні. Донедавна практичний ліміт для таких приводів становив приблизно 8–10 МВт, але з появою нових компонентів цей ліміт зростає і сьогодні сягає близько 25 МВт.

Інвертор із джерелом напруги характеризується використанням випрямляча, зазвичай некерованого діодного випрямляча, підключеного до мережі. Він випрямляє мережеву напругу, що дає відносно сталу напругу постійного струму, яка додатково згладжується банком конденсаторів у ланці постійного струму. Конденсатори у ланці постійного струму також забезпечують відсутність у мережі високочастотних пульсацій перемикання з модуля інвертора [6].

На рис. 5 показано привід із шестипульсним інвертором із джерелом напруги для асинхронного двигуна.

Випрямляч (рис. 5) має шестиімпульсну конфігурацію, яка застосовується, коли перетворювач безпосередньо підключений до мережі. Домінуючими гармонічними складниками струму є 5-та, 7-ма, 11-та та 13-та гармоніки. Гармонічні спотворення можна зменшити, використовуючи 12-імпульсну конфігурацію з подвійним живленням через триобмотковий трансформатор, що дає змогу компенсувати 5-ту і 7-му гармоніки. Якщо трансформатор потрібен для узгодження напруги, зазвичай слід застосовувати саме 12-імпульсну схему. Використовуючи ШІМ-керування та 12-імпульсні конфігурації, рівень гармонічних спотворень зазвичай наближається до меж, визначених правилами та стандартами, але в окремих випадках можуть знадобитися додаткові заходи, наприклад фільтрація [7].

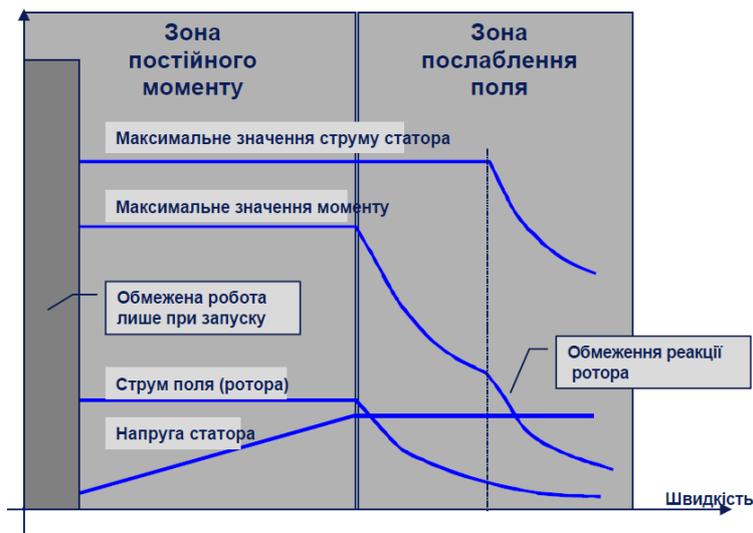


Рис. 4. Характеристики меж експлуатації для синхронного двигуна з перетворювачем інверторного типу з джерелом струму

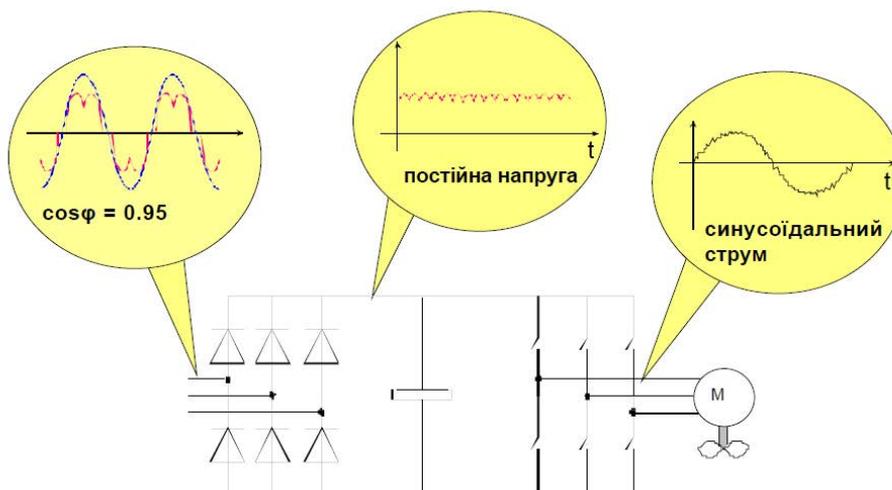


Рис. 5. Привід із шестиімпульсним інвертором із джерелом напруги для асинхронного двигуна

Рішення, яке представлено на рис. 5, здатне забезпечувати роботу двигуна в обох напрямках обертання. Проте через випрямляч із діодним випрямленням живлення енергія може лише надходити з мережі, але не повертатися в неї під час рекуперативного гальмування. Хоча інверторна частина, що живить двигун, має здатність здійснювати рекуперацію у мережу, у цій

схемі під час такої роботи напруга у ланці постійного струму зростатиме, що може призвести до пошкодження компонентів через перенапругу.

Альтернативно випрямляч можна оснастити повномостовим тиристорним випрямлячем, підключеним зустрічно-паралельно до діодного, або ж застосувати активний випрямляч (аналогічний за принципом до інверторного модуля), який дає змогу передавати енергію назад у мережу.

Керування ключовими елементами інвертора для отримання бажаної напруги на виході до двигуна може виконуватися різними методами, але найпоширенішим є ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) у різних варіантах. У найпростішій реалізації трифазна ШІМ-напруга формується шляхом порівняння трьох синусоїдальних опорних сигналів із високочастотним трикутним сигналом (рис. 6).

– Коли значення синусоїди вище за трикутний сигнал, верхній ключ інверторної фази отримує імпульс на відкриття, а нижній закривається.

– Коли синусоїда нижча за трикутний сигнал, навпаки, відкривається нижній ключ, а верхній закривається.

Напруга на виході інвертора повторює цю схему, змінюючись між позитивним і негативним рівнями ланки постійного струму залежно від керуючих сигналів. Лінійна напруга, що діє на двигун, є різницею миттєвих значень напруг двох фаз, як показано на рис. 6.

Як альтернатива методам ШІМ, існують векторні методи модуляції та прямі методи модуляції, наприклад пряме керування моментом, де сигнали керування затворами формуються безпосередньо шляхом розрахунку, який із восьми можливих векторів напруги (включно з двома нульовими векторами) слід подати на обмотки статора.

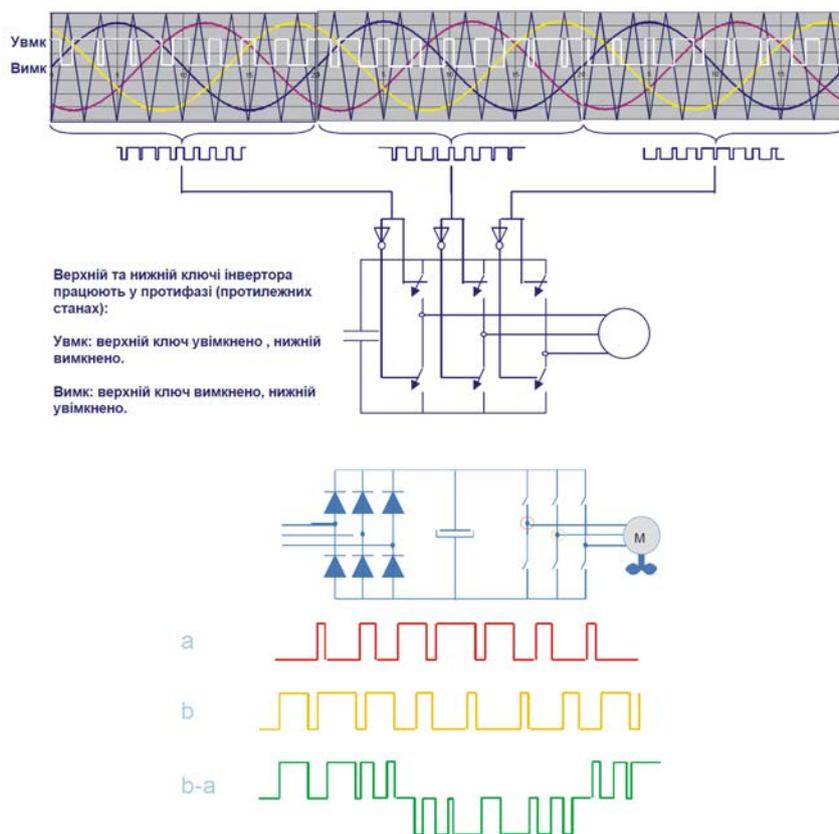


Рис. 6. Формування імпульсів керування для інвертора з ШІМ-модуляцією та отримані вихідні напруги на фазах двигуна і між двома лініями

На практиці зараз використовуються такі методи реалізації контролера двигуна з регулюванням моменту [8]:

– Скалярне керування – це найпростіша та найперша технологія керування асинхронними двигунами. Її можливо було реалізувати навіть на аналогових електронних компонентах.

Принцип базується на стаціонарній моделі асинхронного двигуна, з якої обчислюють відповідну напругу та частоту, що забезпечать потрібний момент або швидкість обертання двигуна. Такий підхід має недоліки:

- модель справедлива лише у стаціонарному режимі;
- параметри моделі значно залежать від температури, частоти та інших факторів;
- погані динамічні характеристики;
- низька ефективність використання потужності двигуна.

– Роторне векторне управління потоками. Ця методика була розроблена наприкінці 60-х років німецьким науковцем Блашке. Метод базується на моделі напруги, потоків і струмів двигуна, поданих у вигляді векторів у системі координат, що обертається. Координатна система орієнтується синхронно з обертовим потоком в обмотці ротора, завдяки чому компоненти вектору струму розділяються на складник потоку та складник моменту, подібно до поля двигуна постійного струму, де є струм збудження та струм якоря [9].

Метод вимагає обчислювальних потужностей, які значно перевищували доступні на момент розроблення методики, тому він почав застосовуватися в комерційних системах лише на початку – у середині 80-х років. Недоліком залишаються параметри моделі, що мають суттєві коливання, зокрема опір ротора, який залежить від температури. Для забезпечення якісної динамічної характеристики необхідно або адаптувати опір ротора в режимі реального часу, або вимірювати температуру.

На рис. 7 наведено схему керування за цією методикою.

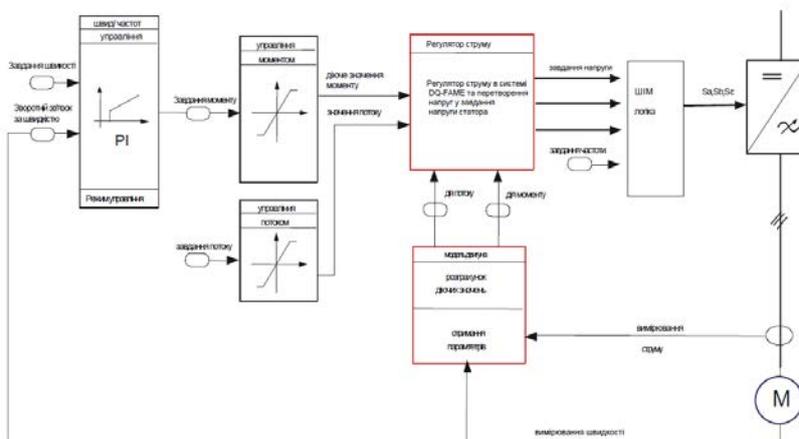


Рис. 7. Функціональна схема роторного векторного управління

– Покращене векторне управління статором. Керування потоком і моментом досягається шляхом використання моделі потоків і струмів статора у координатній системі, орієнтованій на статор. Ця модель є незалежною від швидко змінних параметрів ротора, проте вона потребує значно більшої обчислювальної потужності контролера.

За допомогою моделювання ця методика була відома вже наприкінці 80-х років. У середині 90-х років метод, також відомий як пряме керування моментом (Direct Torque Control, DTC), отримав широке використання.

Математична модель асинхронного двигуна має розв'язуватися з типовою частотою вибірки близько 40 кГц для забезпечення точної керованості. При цьому можливо не лише оцінити електричні величини двигуна, а й механічну швидкість.

Це дає змогу застосовувати приводи без тахогенератора у більшості випадків, що вважається значним підвищенням надійності системи.

На рис. 8 показано обмеження приводу асинхронного двигуна з керуванням через інвертор напруги. Обмеження напруги на статорі визначається максимальною вихідною напругою інвертора за заданої, постійної напруги ланцюга постійного струму ΔI .

Обмеження по струму статора та крутному моменту встановлюються максимальним струмом інвертора або двигуна. Зазвичай це означає, що двигун обмежує струм і крутний момент у режимі безперервного навантаження, а інвертор – у режимі імпульсного (переривчастого) навантаження. Також присутнє обмеження моменту через диферент. Воно зазвичай проявляється за швидкостей від 150% до 200% номінальної, що, як правило, знаходиться поза робочим діапазоном швидкостей суднового рушія.



Рис. 8. Характеристичні межі роботи для асинхронного двигуна, живленого від перетворювача з джерелом напруги

Для відновлення енергії, наприклад під час аварійного зупинення за рахунок реверсу швидкості гвинта, як показано на рис. 9, доцільно використовувати транзисторно керований банк резисторів у ланцюг постійного струму, який активується перед досягненням безпекового ліміту перенапруги в ланцюзі. Відновлена енергія при цьому розсіюється у цьому резистивному банку. Альтернативно випрямляч можна оснастити повним містковим тиристорним випрямлячем, підключеним антипаралельно до діодного випрямляча, або можна використовувати активний вхідний модуль, подібний до інверторного модуля, який працює як випрямляч для подачі енергії назад у мережу.

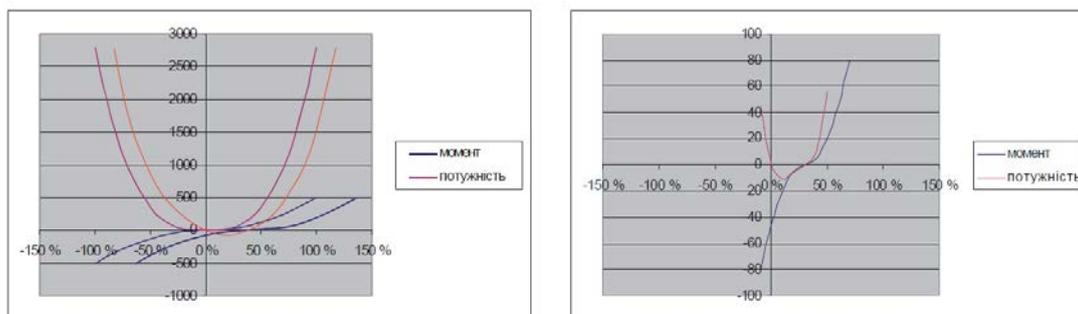


Рис. 9. Здатність до гальмування, необхідна для приводів суднового рушія, де аварійне зупинення виконується шляхом реверсу швидкості гвинта

Виходячи зі сказаного вище, наведемо порівняльну характеристику приводів гвинтів постійного та змінного кроків з огляду на систему управління двигунами (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика приводів суднового гвинта

	Прямий пуск асинхронного двигуна з фіксованим кроком	Привід постійного струму на основі тиристорного випрямляча	Циклоконвертор	Інвертор із джерелом струму	Інвертор напруги з ШІМ
Пусковий струм	x5 від номінального	≈0 під час пуску трансформатора	≈0 під час пуску трансформатора	≈0 під час пуску трансформатора	≈0 під час пуску трансформатора
Динаміка зміни крутного моменту під час запуску двигуна	x2-x3	≈0	≈0	До 50% від номіналу	≈0
Споживання потужності за низького тягового зусилля	≈15% від номіналу	≈0	≈0	≈0	≈0
Сила струму за низького тягового зусилля	45-55% від номіналу	Залежить від моменту	Залежить від моменту	Залежить від моменту	≈0
Сos φ Повне навантаження	0.85	> 0.9	> 0.76	> 0.9	> 0.95
Сos φ Змінне навантаження	0.15-0.85	0-0.9	0-0.76	0-0.9	> 0.95
Реакція	3-5с	<100мс	<100мс	<20мс	<50мс
Пульсації крутного моменту	Нема	Помірні	Помірні	Сильні	Помірні
Ефективність за повного завантаження	Висока	Мала	Висока	Висока	Висока
Гармонійні спотворення	Нема	Функція моменту	Функція моменту	Функція моменту	Функція потужності, ≈0
Струми КЗ	x5	Нема	Нема	Нема	Нема
Узгодження двигуна	-	Незначне	Незначне	Потрібно	-
Комутатор	Ні	Так	Кільця ковзання	Кільця ковзання	Ні

Таким чином, виходячи з табл. 1, привід постійного струму доцільно використовувати в промисловості та судноплавстві, де потрібні широкий діапазон регулювання швидкості, стабільне регулювання крутного моменту, наприклад у тралових лебідках, де використовуються двигуни постійного струму; циклоконвертори більш прийнятні для суднових рушіїв, де

є необхідність у великій потужності та широкому діапазоні регулювання; інвертори з джерелом струму, як і циклоконвертори, але мають більш м'яку перехідну характеристику; інвертор напруги з ШІМ – у випадках, де важлива швидкість реакції та, як висновок, точність позиціонування, тобто нагально для DP-систем.

Висновки

Проведений аналіз сучасних технологій перетворювачів частоти для суднових електроенергетичних установок дає змогу зробити такі ключові висновки.

Сучасне суднобудування здійснило перехід від застарілих приводів постійного струму на основі тиристорних перетворювачів до більш сучасних та ефективних систем змінного струму за рахунок використання сучасних технологій. Хоча приводи постійного струму були доцільними на початкових етапах, їхні недоліки: низький коефіцієнт потужності, необхідність технічного обслуговування щіток і колектора, а також обмежені динамічні характеристики зробили їх менш конкурентоспроможними.

Сучасні приводи змінного струму, зокрема на базі циклоконвертерів та інверторів із джерелом напруги, демонструють значні переваги. Вони забезпечують високу енергоефективність, відмінні динамічні характеристики та високий коефіцієнт потужності. Це критично для суден, які потребують точного керування, наприклад у системах динамічного позиціонування або для роботи у складних умовах (криголами).

Сьогодні циклоконвертери є оптимальним рішенням для високопотужних систем із прямим приводом валу, де потрібна висока продуктивність на низьких швидкостях.

Інвертори з джерелом напруги (ШІМ) є найбільш універсальним та поширеним рішенням. Завдяки високій точності, гнучкості керування (зокрема, з використанням векторних методів) і можливості роботи без тахогенератора вони значно підвищують надійність та ефективність системи.

Сучасні методи керування, такі як роторне та векторне управління потоками, дали змогу подолати недоліки простих скалярних систем, забезпечивши високу динаміку та точність регулювання крутного моменту. Це дає змогу використовувати всі переваги електричних двигунів змінного струму, зокрема асинхронних.

Загалом стаття демонструє, що вибір перетворювача частоти для суднових установок є складним завданням, яке вимагає комплексного підходу. Відповідно до вимог конкретного судна (потужність, маневреність, умови експлуатації) необхідно вибирати найбільш доцільну технологію, що забезпечить максимальну ефективність, надійність та довговічність системи.

Список використаної літератури

1. Сидоренко В.М. Електропривод суднових механізмів : монографія. Одеса : ОНМА, 2022. 256 с.
2. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. London : Academic Press, Elsevier, 2019. 720 p.
3. Rashid M.H. Power Electronics Handbook. 3rd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2020. 1520 p.
4. Pedersen T., Andersen B. A Review of DC Shipboard Microgrids Part I: Power Architectures, Energy Storage and Power Converters. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 8. P. 2999. DOI: 10.3390/en15082999
5. Kumar A., Singh R. Cycloconverter: Types, Working & Applications Guide. *Circuit Digest*. 2022. URL: <https://circuitdigest.com/tutorial/cycloconverter-types-working-circuits-applications> (дата звернення: 16.08.2025).
6. Hansen J., Nielsen K. Review of Power Quality Issues in Maritime Microgrids. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 12. P. 3456. DOI: 10.3390/en14123456
7. Дощенко Г.Г., Наговський Д.А. Реалізація блока просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції для суднових високошвидкісних приводів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2024. Т. 35(74). Вип. 5. С. 73–80. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.5.2/13

8. Lee S., Park J. Common Architectures and Devices for Current Source Inverter in More-Electric Applications. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 15. P. 5645. DOI: 10.3390/en16155645
9. Cycloconverter in Electronics: AC-to-AC Power Conversion. *Electronics For You*. 2025. URL: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/cycloconverter> (дата звернення: 16.08.2025).

References

1. Sydorenko, V.M. (2022). *Elektropryvod sudnovykh mekhanizmiv.: monohrafiia* [Electric drive of ship mechanisms: monograph]. Odesa: ONMA [in Ukrainian].
2. Bose, B.K. (2019). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Academic Press, Elsevier [in English].
3. Rashid, M.H. (2020). *Power Electronics Handbook* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann, Elsevier [in English].
4. Pedersen, T., & Andersen, B. (2022). A Review of DC Shipboard Microgrids Part I: Power Architectures, Energy Storage and Power Converters. *Energies*, 15(8), 2999. <https://doi.org/10.3390/en15082999> [in English].
5. Kumar, A., & Singh, R. (2022). Cycloconverter: Types, Working & Applications Guide. *Circuit Digest*. Retrieved from <https://circuitdigest.com/tutorial/cycloconverter-types-working-circuits-applications> [in English].
6. Hansen, J., & Nielsen, K. (2021). Review of Power Quality Issues in Maritime Microgrids. *Energies*, 14(12), 3456. <https://doi.org/10.3390/en14123456> [in English].
7. Doshchenko, H.H., & Nahovskyi, D.A. (2024). Realizatsiia bloka prostorovo-vektornoї shyrotno-impulsnoї moduliatsii dlia sudnovykh vysokoshvydkisnykh pryvodiv [Implementation of a space-vector pulse-width modulation unit for shipboard high-speed drives]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernad skoho*. Vol. 35(74), 5, 73–80. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/13> [in Ukrainian].
8. Lee, S., & Park, J. (2023). Common Architectures and Devices for Current Source Inverter in More-Electric Applications. *Energies*, 16(15), 5645. <https://doi.org/10.3390/en16155645> [in English].
9. Cycloconverter in Electronics: AC-to-AC Power Conversion. (2025). *Electronics For You*. Retrieved from <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/cycloconverter> [in English].

Наговський Дмитро Анатолійович – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії. E-mail: dymon.ksu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6920-0324.

Дощенко Галина Геннадіївна – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії. E-mail: hersongala@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1004-4934.

Голошапов Сергій Степанович – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії. E-mail: goloschapov46@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5206-4610.

Nahovskyi Dmytro Anatoliiovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Operation Vessel Electrical Equipment and Automation of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: dymon.ksu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6920-0324.

Doshchenko Halyna Gennadiivna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Operation Vessel Electrical Equipment and Automation of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: hersongala@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1004-4934.

Goloschapov Sergey Stepanovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Operation Vessel Electrical Equipment and Automation of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: goloschapov46@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5206-4610.

Отримано: 03.11.2025

Рекомендовано: 08.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

