

## DYNAMIC POSITIONING SYSTEMS: MATHEMATICAL MODELING AND CONTROL ALGORITHMS

### СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АЛГОРИТМИ УПРАВЛІННЯ

Y. Bogachenko<sup>1</sup>, graduate student, I. Vorokhobin<sup>2</sup>, D.Sc., Professor, I. Burmaka<sup>3</sup>, D.Sc., Professor, O. Melnyk<sup>4</sup>, D.Sc., Associate Professor, O. Onishchenko<sup>5</sup>, D.Sc., Professor

Є. Богаченко<sup>1</sup>, аспірант, І. Ворохобін<sup>2</sup>, д.т.н., професор, І. Бурмака<sup>2</sup>, д.т.н., професор, О. Мельник<sup>4</sup>, д.т.н., доцент, О. Онищенко<sup>5</sup>, д.т.н., професор

<sup>1,2,3,5</sup>National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine

<sup>1,2,3,5</sup>Національний Університет «Одеська морська академія», Україна

<sup>4</sup>Odesa National Maritime University, Ukraine

<sup>4</sup>Одеський національний морський університет, Україна

#### ABSTRACT

*The importance of using dynamic positioning (DP) systems to ensure the stable location of marine vessels and platforms, especially in difficult weather or high traffic conditions, is outlined. The role of DP in reducing the risks of collisions and loss of position for vessels performing complex operations at sea is highlighted. The field of DP for offshore vessels is briefly described, and the importance of this topic in offshore operations is highlighted. Modern information sources dedicated to DP systems are characterized and the methodology of mathematical modeling used for the research is defined. Key to the analysis are academic sources and the work of the Marine Technology Society on ship position loss analysis. The data presented allowed understanding various aspects of DP systems management, including lost-of-position incidents. An overview of the main functions of DP systems and how they ensure the stability of offshore vessels and platforms. It has been identified that key trends or innovations are used in DP technology (for example, in the form of control algorithms for propeller-steering column motors and Azipod systems, improvements in power equipment). It is determined why DP systems are critical for offshore vessels, in particular from the point of view of safety and environmental impact, impact on the efficiency of operations, accident prevention, ensuring the operation of vessels in accordance with international maritime standards.*

*The possibility of using a simplified system of differential-algebraic equations describing electromechanical energy transformations in positioning systems is proposed. On this basis, a three-contour nonlinear positional system is given. The system includes position, speed and current controllers with corresponding sensors and a power converter. The classifications of typical positioning modes are given and the main differences in these processes are defined. It was determined that the proposed structural scheme of the positioning system allows for effective synthesis of individual coordinate controllers, which will ultimately improve the quality of positioning processes and is a direction for further research.*

**Keywords:** positioning, offshore platform, offshore fleet, Asipod, propeller, electric motor, mathematical model, safety, reliability, regulators, control algorithms, energy efficiency, wind-wave load.

## **Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями, аналіз сучасних публікацій**

Динамічне позиціонування (*DP*) суден є критично важливим елементом сучасної морської індустрії, забезпечуючи точне утримання судна у визначеній позиції без використання якорів. Це має вирішальне значення для операцій на шельфових платформах, бурових установках, а також у рятувальних та наукових місіях. Однак, сучасні *DP*-системи офшорного флоту стикаються із численними викликами, такими як високе енергоспоживання, обмежена стабільність у складних погодних умовах, недостатня адаптивність до динамічних змін навколишнього середовища, та, що є головним, вірогідність втрати позиції.

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Матеріали *Marine Technology Society* [1-10] дають достатньо повне уявлення про головні досягнення, виклики, проблеми та існуючі методології досліджень у технологіях використання та побудови систем *DP* – від енергозберігаючих операцій, моделювання до програм навчання та заходів безпеки. Так, загальні процеси управління у системах *DP* розглянуто у [1]. Типи двигунів пропульсивних комплексів з властивостями енергозбереження наведені у [2], важливість симуляції у навчанні і тренінгу персоналу при роботі з системами *DP* розглянуто у [3], застосування систем *DP* в особливих умовах (плавучих електростанціях) у [4]. Розширені функції безпеки в операціях динамічного позиціонування, в суворих умовах експлуатації, контроль позиції в режимі реального часу під час операцій *DP*, у тому числі на декількох суднах розглянуто у [5-8]. Засобам моделювання, тестування відмов та інноваціям, системам управління, вимогам до систем позиціонування присвячені роботи [7-10].

Актуальність проведення наукових досліджень, яка визначає необхідність удосконалення та підвищення комплексної ефективності (у тому числі – безпечної експлуатації, екологічної та енергетичної ефективності) функціонування систем позиціонування суден офшорного флоту, обумовлена не лише літературним оглядом [1-10], а і практичними запитами та досвідом експлуатації таких систем [11-13]. Ці системи є критичними для забезпечення стабільності та економічної доцільності робіт, наприклад, шельфових, під час виконання інших складних операцій, таких як буріння та обслуговування платформ, доставка матеріалів у віддалених морських та океанічних зонах. Загалом – у всіх випадках, де стабілізація судна чи платформ на основі якорів є малоефективною.

Так, згідно з дослідженнями та рекомендаціями [11, 14, 15-17], системи динамічного позиціонування є ключовими для зменшення ризику дрейфу суден та зіткнень, що є критичним в складних погодних умовах і при сильних течіях. Також вони є ключовою технологією для забезпечення маневровості та стабільності роботи суден в умовах відкритого моря. Сучасні дослідження [14-18] в цій сфері зосереджені на підвищенні енергоефективності, надійності *DP*-систем та інтеграції їх з відновлюваними джерелами енергії. Наприклад, дослідження Fossen (2011) [17] надає всебічний аналіз гідродинаміки та управління суднами, пропонуючи фундаментальні алгоритми для *DP*-систем. Огляд Sørensen (2011) і [14, 18, 19] підкреслює важливість інновацій у технологіях *DP* для забезпечення стабільності і безпеки експлуатації суден у різних умовах. Ці роботи формують основу для подальшого розвитку *DP*-систем.

Johansen та Sørensen (2015), Yang та Wang [20, 21] аналізують можливості використання прогностичного управління для зменшення енергоспоживання *DP*-систем, що є важливим кроком до сталого розвитку судноплавства та досліджують адаптивні способи управління для *DP*-систем з урахуванням зовнішніх збурень і обмежень вхідних параметрів.

Nielsen et al. (2020) [22] акцентують увагу на енергетичній оптимізації в *DP*, пропонуючи практичні рішення для зниження витрат енергії без втрати ефективності системи,

Perez та Blanke (2012) [23] пропонують гібридний підхід до моделювання та впровадження новітнього *DP*-контролю, що дозволяє досягти високої ефективності навіть у складних умовах експлуатації.

Kou et al. (2021) [24] досліджують можливості інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких, як сонячна та вітрова енергія в *DP*-системи, акцентуючи увагу на їхній потенціал для зменшення вуглецевого сліду. Vanem та Sørensen (2014) [25] аналізують ризики, пов'язані з використанням ВДЕ у *DP*, пропонуючи практичні підходи до управління ризиками.

Додатково вказується [11, 19-22], що більшість сучасних офшорних суден використовують електромеханічні системи динамічного позиціонування, які здатні забезпечити високу точність та стабільність позиціонування в умовах сильного вітру, течій та хвиль. Серед них поширеними є установки, що базуються на асинхронних та синхронних електродвигунах, які забезпечують стабільне регулювання тяги та маневреність судна за мінімальних енергетичних втрат. Зокрема, гвинто-рульова колонка (ГРК) є однією з ключових складових багатьох систем позиціонування, що дозволяє підтримувати позицію шляхом поворотного руху. Максимально високий рівень маневреності, також, забезпечують азимутальні рушії, відомі як Азіпод (*Azimuthing Podded Drives*), які складаються з гвинта, розташованого на поворотному підшипнику, можуть повертатися на 360°, та дозволяють регулювати тягу у будь-якому напрямку. Такі системи позиціонування набули широкого розповсюдження завдяки зручності управління та їх енергетичної ефективності [11, 21-23].

Електромеханічні рушії, зокрема ті, що оснащені електродвигунами, використовують складні системи контролерів для регулювання та підтримки позиції судна. Найбільш поширеними є *PID*- та адаптивні контролери. Останні застосовують сучасні методи прогнозування поведінки системи, ідентифікацію навантажень, що дозволяє автоматично адаптувати параметри алгоритмів управління залежно від зміни умов навколишнього середовища (хвилювання, вітер). Огляд досліджень, зокрема Herdzik (2013) [16, 18, 19], демонструє, що сучасні алгоритми керуючих контролерів дозволяють значно знижувати відхилення позиції під час впливу зовнішніх факторів, водночас мінімізуючи споживання енергії.

З погляду забезпечення енергетичної ефективності при функціонуванні систем *DP*, застосування асинхронних і синхронних електродвигунів, у поєднанні з частотними перетворювачами різного типу, ефективними датчиками параметрів та алгоритмами керуючих контролерів, дозволяє значно знизити рівень споживання енергії в умовах постійного або змінного навантаження. Частотні перетворювачі забезпечують ефективне регулювання швидкості обертання валу двигуна ГРК або Азіпод, що дозволяє суттєво зменшити споживання енергії під час роботи на низьких швидкостях або в стані утримання судном позиції. Як зазначено в *DP Operations Guidance* (2012) [26], розробка енергетично ефективних керуючих систем, які одночасно дозволяють утримувати позицію судна з заданою точністю, є пріоритетом у розвитку сучасного офшорного флоту, оскільки це сприяє не лише зниженню витрат, а й зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

### **Формулювання цілей статті (постановка завдання)**

З проведеного огляду літературних джерел та підсумовуючи означені проблеми систем *DP* у найбільш загальному їх вигляді, ураховуючи їх зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями, у пропозиціях шляхів підвищення ефективності динамічних систем позиціонування для морських платформ і суден офшорного флоту, особливу увагу необхідно приділити наступним складовим, які є окремими, але взаємозалежними напрямками сучасних наукових досліджень.

**1. Підвищення загальної енергетичної ефективності суден офшорного флоту, що функціонують у режимах позиціонування.** Зменшення споживання енергії для *DP*-систем є критично важливим, оскільки вони працюють тривалий час в автономному режимі. Вдосконалені системи контролю, діагностики та управління дозволяють оптимізувати роботу пропульсивних установок суден за рахунок використання сучасних електродвигунів,

регульованих джерел живлення та налаштування енергозбережних режимів роботи двигунів, контрольованого зниження енергетичних витрат у залежності від погодних умов.

**2. Безпека експлуатації.** Сучасні дослідження підтверджують [27], що фактори людського впливу є вагомим причиною помилок у системах позиціонування у зв'язку з операційною завантаженістю операторів під час їх роботи в складних умовах. Для вирішення цієї проблеми необхідно використовувати системи підтримки прийняття рішень з елементами штучного інтелекту (ШІ) та сучасні, надійні, системи автоматизованого управління двигунами, використовувати постійний моніторинг та системи попередження аварійних ситуацій.

**3. Оптимізація алгоритмів управління.** Одним із напрямків попередження інцидентів [28-31], є вдосконалення систем *DP* за допомогою розробки адаптивних алгоритмів управління, які дозволяють оперативно змінювати параметри налаштувань всієї системи *DP* у відповідь на зміни зовнішнього середовища. Такі алгоритми враховують вітрові навантаження, силу течій та хвиль, а також внутрішні зміни параметрів системи, що дає змогу забезпечити стабільне утримання позиції судна.

**4. Моделювання та випробування.** Вирішальним аспектом є попереднє математичне моделювання ефективності роботи систем *DP* у змінних умовах та синтезу на цій основі ефективних алгоритмів управління. Проведення тестів на симуляторах та імітаційних моделях дозволяє відпрацювати аварійні сценарії, а також дозволяє перевірити ефективність різних алгоритмів управління двигунами, визначити необхідні налаштування, напрямки удосконалення тощо.

Огляд літературних джерел продемонстрував, що сучасні *DP*-системи перебувають у фазі активного вдосконалення завдяки впровадженню енергоефективних алгоритмів управління, багатоканального контролю та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Проте залишається ряд викликів, таких як інтеграція нових технологій у наявні системи та мінімізація ризиків. Це підкреслює необхідність багатофакторного підходу, що враховує технічні, економічні та екологічні аспекти для досягнення сталого розвитку судноплавства. Попередні дослідження акцентують увагу на окремих аспектах енергоефективності або стабільності *DP*-систем, однак їх інтеграція у загальний аналіз функціонування *DP*, побудований на структурному уявленні електромеханічних перетворювачів і багатоконтурних систем управління залишається недостатньо вивченим.

Дане дослідження заповнює цю прогалину шляхом розробки комплексного підходу до класифікації процесів позиціонування і моделювання електромеханічних систем управління. Метою статті є представлення достатньо простого структурного методу моделювання процесів позиціонування у системах *DP* та опис основних режимів виходу на задану позицію

## **Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів**

Як відомо, досі немає апробованих математичних моделей (ММ), що дозволяють проводити одночасно дослідження процесів позиціонування, електромеханічних, електромагнітних та енергетичних процесів і режимів морських платформ та суден офшорного флоту в динамічних режимах стабілізації заданої позиції. Створення такої ММ (повний облік і властивостей керованого електромеханічного перетворювача енергії (ЕПЕ) і, що важко піддаються аналітичному опису, властивостей судна, і алгоритмів керування, і силового перетворювача, датчиків тощо та з одночасним урахуванням нелінійностей) ускладнюється і тим, що системи диференціальних рівнянь (ДК), що описують одночасно роботу ЕПЕ та судна, належать до класу жорстких нелінійних систем рівнянь, оскільки швидкості протікання механічних переміщень та електромагнітних процесів можуть відрізнятися в сотні разів, а у описі об'єкта, перетворювача енергії тощо присутні різноманітні нелінійні елементи та змінювані параметри.

Використання структурних методів подання нелінійних ДУ дозволяє перейти до деталізованого моделювання процесів енергоспоживання та зміни позиції судна за допомогою

апробованих методів теорії автоматичного керування (ТАУ). Такий вибір обґрунтовується і тим, що для ММ процесів у різних типах ЕПЕ методи ТАУ добре зарекомендували себе, для них існує величезна кількість прикладних середовищ математичного моделювання, наприклад, *Simulink* з доповненнями енергетичних, механічних і інших бібліотек.

Слід зазначити, що у подальшому аналізі таких структурних методів подання, можливий обґрунтований перехід до використання спрощеної ММ судна, що об'єднує у собі всі основні вузли системи *DP* і ураховує головні чинники. При цьому можна скористатися різними відомими методами синтезу алгоритмів управління, використовувати частотний аналіз, адаптивні, нечіткі і нейрорегулятори, еталонні моделі та інші. Незважаючи на спрощення в математичному описі, результат синтезу контролерів виявляється цілком задовільним та дозволяє його подальше уточнення, визначення напрямків удосконалення.

Наприклад, для оцінки витрати електричної енергії на процеси позиціонування при різних режимах роботи судна, попередньо можна прийняти, що ЕПЕ, який функціонує у складі ГРК або Азіпод, може бути представлений спрощеною системою (1) диференціальних і алгебраїчних рівнянь. Такий запис цілком коректний, оскільки робоча ділянка механічної характеристики асинхронного або синхронного електродвигуна може бути апроксимована аперіодичною ланкою першого порядку і передаточною функцією (ПФ) динамічної жорсткості із забезпеченням амплітуди пускового струму, близького до пускового струму реального двигуна, забезпеченням номінальної частоти обертання та моменту.

Таким чином, вважаємо, що основні статичні та динамічні властивості ЕПЕ представлені за допомогою системи (1) узагальненим лінеаризованим електромеханічним перетворювачем (ЕМП) енергії.

У системі (1) для ЕМП енергії позначено:  $U(\tau)$ ,  $I(\tau)$ ,  $M(\tau)$  – відповідно, напруга живлення, В, струм, А, електромагнітний момент, Нм;  $R_s$  і  $L$  – еквівалентні опір, Ом, індуктивність обмоток, Гн (у тому числі обмотки ЕМП);  $E(\tau)$  – проти-ЕРС, В;  $J_\Sigma$  – сумарний, приведений до валу двигуна, момент інерції, кг·м<sup>2</sup>;  $c\Phi$  – конструктивний коефіцієнт, В·с/рад;  $\omega(\tau)$  – кутова швидкість двигуна, рад/с;  $l(\tau)$  – поточна позиція (пройдений шлях), м. Статичний момент  $M_c(\omega)$  описано нелінійним виразом ("вентиляторна" характеристика).

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI(\tau)}{d\tau} &= \frac{1}{L} \cdot (U(\tau) - I(\tau) \cdot R_s - E(\tau)) \\ E(\tau) &= c\Phi \cdot \omega(\tau) \\ M(\tau) &= c\Phi \cdot I(\tau) \\ \frac{d\omega(\tau)}{d\tau} &= \frac{1}{J_\Sigma} \cdot (M(\tau) - M_c(\omega)) \\ \frac{dl(\tau)}{d\tau} &= \omega(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Після формальної заміни  $d/d\tau \equiv p$  у (1), де  $p$  – оператор Лапласа, всі рівняння записуємо у операторній формі, і далі, замикаємо отриману систему від'ємними зворотними зв'язками (за струмом/моментом, швидкістю і позицією). Отримана ММ з регуляторами позиції (РП), швидкості (РШ і струму/моменту (РС), силовим перетворювачем (СП), практично безінерційними датчиками струму, швидкості і позиції (ДС, ДШ, ДП) та узагальненим ЕМП енергії, легко представляється у вигляді структурної схеми (см. рис. 1). Пройдений судном шлях  $l(\tau)$  визначається інтегруванням швидкості ЕМП  $\omega(\tau)$  за допомогою рушійного органу (РО) з механічним коефіцієнтом передачі (редукції)  $i$ .

Структурна схема (рис. 1) ураховує, також, нелінійні елементи типу "обмеження" вихідних сигналів:

- регулятора положення  $U_{зш}$ , який є задавальним сигналом регулятору швидкості РШ;
- регулятора швидкості  $U_{зс}$ , який є задавальним сигналом регулятору струму РС;
- регулятора струму  $U_y$ , який є задавальним сигналом для силового перетворювача СП.

Також, ураховано обмеження вихідного сигналу  $U_{СП}$  силового перетворювача СП.

Помилка позиціонування визначається як різниця між сигналом заданої позиції  $l(\tau)$  і сигналом зворотного зв'язку від датчика позиції:  $\delta_c = U_{зп} - U_{дп}$ .

Тут представлена електрична частина (ЕЧ) ЕМП аперіодичною ланкою, де  $T_{\Sigma} = L/R_{\Sigma}$  – електромагнітна стала часу, с; інтегральною ланкою – механічна частина (МЧ) ЕПМ, де  $T_M = J_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} / (c\Phi)^2$  – електромеханічна стала часу, с. Статичний струм  $I_c(\omega)$ , А, визначається як нелінійна ("вентиляторна") функція поточної швидкості  $\omega(\tau)$ .

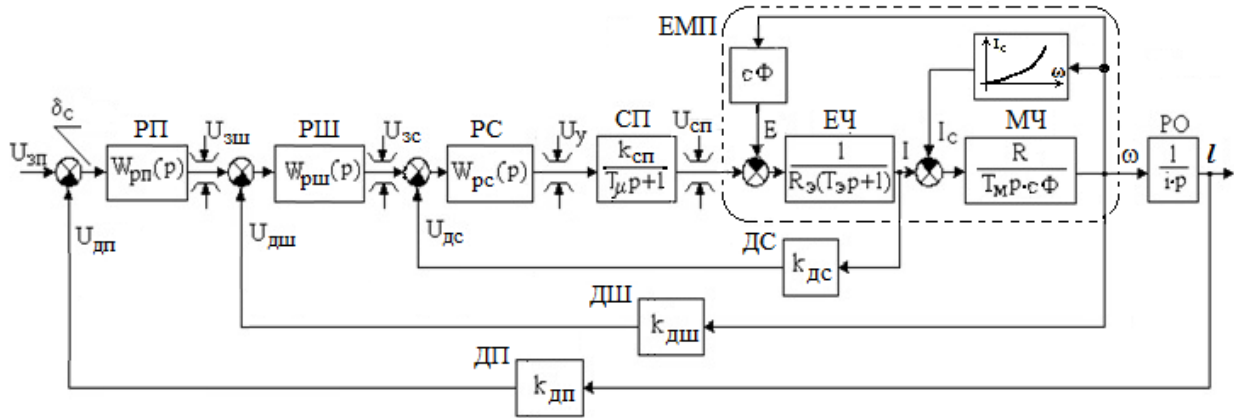


Рис. 1. Структурна схема системи позиціонування, яку побудовано на основі спрощеного електромеханічного перетворювача енергії

Синтез передаточних функцій регуляторів  $W_{рп}(p)$ ,  $W_{рш}(p)$  і  $W_{рс}(p)$ , є складною задачею із визначення структури і параметрів регуляторів, які, у кінцевому підсумку, визначають якість всіх процесів у системі, у тому числі – процесів позиціонування, головними з яких є висока швидкість, задане перерегулювання і відсутність суттєвих режимів "дотягування".

Загалом, завданням системи позиціонування є найскоріше переміщення судна з одного положення до іншого заданого та утримання його у цій позиції. Основною характеристикою цієї системи є швидкість і точність відпрацювання зовнішніх коригувальних сигналів, що задають і формують команду на переміщення (на рис. 1 це сигнал  $U_{зп}$ ). Оскільки у процесі відпрацювання заданого переміщення необхідно контролювати динамічні процеси зміни струму/моменту і швидкості двигуна та обмежувати їх на певному максимальному значенні, тому сучасні позиційні системи є триконтурними (рис. 1), з підпорядкованим регулюванням координат. Перший (внутрішній) контур, це контур струму/моменту, який підпорядкований другому, зовнішньому, контуру швидкості. У свою чергу, контур швидкості підпорядкований третьому, головному, контуру положення. З аналізу будь яких можливих переміщень, отриманих на основі наведеної структурної схеми, можна класифікувати типи переміщень – на визначенні головних відмінностей координат (струм/момент та швидкість) у процесах позиціонування.

З аналізу наведеної структурної схеми (рис. 1) визначимо чотири основних режими роботи позиційної системи при умові практично нульового моменту опору  $M_c$ .

1. Режим великих переміщень (рис. 2, а). У цьому режимі – сигнали регуляторів положення РП, швидкості РШ і струму РС виходять на обмеження (див. позначення на рис. 1), а двигун розганяється до максимальної швидкості  $\omega_{max}$  та деякий час її підтримує. Тобто у цьому режимі система управління є суттєво нелінійною. Тахограма режиму великих переміщень, відповідно до рис. 2, а має вигляд трапеції. При цьому струм/момент двигуна також підтримується на максимальному значенні  $M_{max}$ , яке, зазвичай перевищує номінальне значення у 2-3 рази.

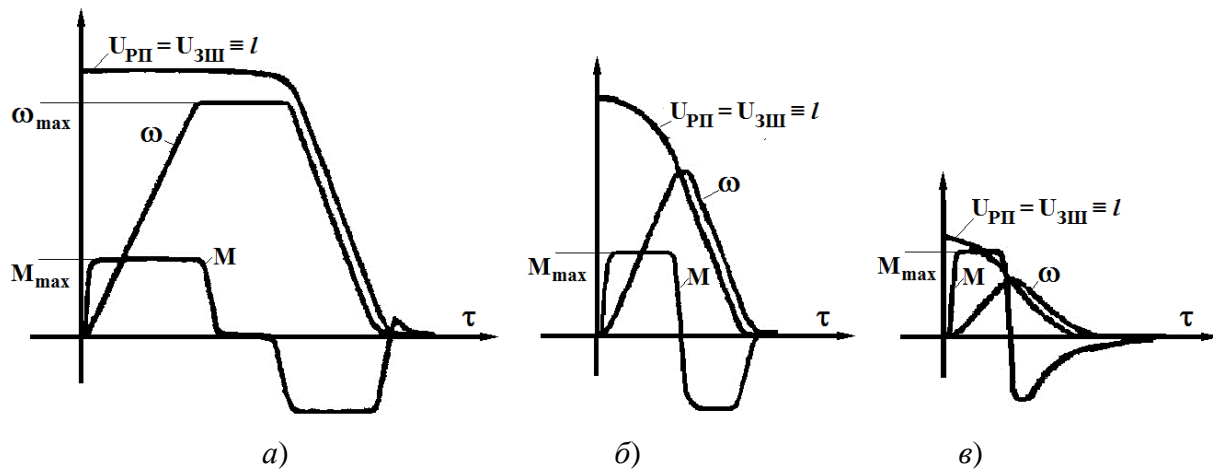


Рис. 2. Основні режими позиціонування у системах DP

2. Режим середніх переміщень (рис. 2, б). У цьому режимі регулятори положення і швидкості також виходять на обмеження, система також нелінійна, але швидкість двигуна у процесі відпрацювання заданої позиції не виходить на максимальний рівень  $\omega_{\max}$  і відсутній режим підтримання максимальної швидкості. Тахограма режиму середніх переміщень, що зображена на рис. 2, б, має вигляд, близький до трикутника.

3. Режим малих переміщень (рис. 2, в). У цьому режимі лише сигнал регулятора швидкості короткочасно виходить на обмеження, підтримуючи максимальне значення струму/моменту, тобто система поводить себе практично, як лінійна. У цьому режимі можливий так званий процес "дотягування" до заданої позиції, який є небажаним.

4. Режим мікро-переміщень. У цьому режимі система працює як лінійна, жодна з координат не обмежується. Такий режим може характеризуватися або тривалим "дотягуванням", або неможливістю руху, при цьому буде існувати струм через двигун, що приводить до його нагрівання та енергетичним витратам.

Аналіз наведених режимів роботи позиційної системи показує їх вплив не лише на динамічні характеристики, а і на енергетичну ефективність процесів позиціонування.

Оскільки миттєва споживана потужність визначається, як добуток миттєвих значень швидкості на момент  $P(\tau) = \omega(\tau) \cdot M(\tau)$ , тому легко знайти інтеграл за часом від миттєвої потужності за проміжок часу позиціонування, що дорівнює повній переданій енергії  $E$  за цей час:

$$E = \int_{\tau_0}^{\tau_1} P(\tau) d\tau, \quad (2)$$

Для кожного режиму важливо визначити оптимальні умови функціонування системи DP - щоб зменшити втрати енергії та забезпечити якість та стабільність процесів позиціонування. Особливо критичним є уникнення "дотягування" у режимах малих переміщень та мікро-переміщень, оскільки це спричиняє значне перевитрачання енергії та підвищене зношування компонентів системи. Наведена структурна схема дозволяє легко визначати енергетичні витрати при моделюванні.

Перспективними напрямками подальших досліджень вважаємо наступні.

Для підвищення енергоефективності та надійності роботи системи позиціонування пропонується оптимізація налаштувань регуляторів координат, зокрема – регулятора позиціонування РП; впровадження адаптивних алгоритмів управління, які автоматично коригують налаштування та сигнали регуляторів, залежно від умов навколишнього середовища та стану системи, що, зокрема, зменшить нагрівання двигуна в режимах мікро-переміщень. Додатково рекомендується розробка таких алгоритмів енергозбереження, які

автоматично вимикають або знижують потужність двигуна під час тривалих періодів "дотягування", а також використання високоточних датчиків положення для мінімізації похибок у режимах малих і мікро-переміщень, що дозволить уникнути перевитрат енергії та покращити загальну точність позиціонування (табл.1).

Таблиця 1 - Ключові пропозиції для підвищення ефективності системи

| Рішення   | Опис   | Очікуваний ефект  |
|---|--|---|
| Удосконалення і оптимізація алгоритмів роботи регуляторів РП, РШ та РС. Використання сучасних адаптивних алгоритмів управління з самоналаштуванням параметрів | Автоматичне коригування сигналів регуляторів залежно від умов навколишнього середовища та стану системи      | Зменшення нагрівання двигуна, підвищення ефективності в режимах мікро-переміщень, відсутність перерегулювання, підвищення швидкодії у всіх режимах позиціонування |
| Удосконалення процесів управління, що забезпечують режими енергозбереження  | Автоматичне вимкнення або зниження потужності електродвигунів під час тривалих періодів "дотягування"        | Зниження енергоспоживання, уникнення перевитрат енергії в режимах низької інтенсивності роботи  |
| Використання датчиків покращеної точності   | Високоточні датчики положення та швидкості забезпечують зменшення похибок у режимах малих і мікро-переміщень | Підвищення точності позиціонування, зменшення тривалості "дотягування" до заданої позиції   |

Подальші дослідження повинні включати: а) математичне моделювання перехідних процесів для виявлення оптимальних налаштувань системи  $DP$  та уведення у систему додаткових коригуючих впливів, що забезпечують інваріантність до збурень; б) зосередження на адаптації режимів роботи систем  $DP$  до реальних умов експлуатації, оптимізації енергоспоживання та підвищенні довговічності системи. Щоб оцінити практичну ефективність запропонованих змін, результати моделювання повинні бути верифіковані – на тестових стендах [27] і експериментально. Особливу увагу слід приділити дослідженню засобами моделювання перехідних процесів при зміні режимів роботи. Перехід від одного режиму до іншого має бути плавним, без суттєвих перевантажень двигунів та механізмів. Для цього рекомендується використання інтегрованих алгоритмів прогнозування навантажень.

### Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

1. У дослідженні акцентовано важливість використання систем динамічного позиціонування для стабільного утримання морських суден та платформ у заданій позиції, особливо за умов складних погодних умов або інтенсивного судноплавства. Показано, що системи  $DP$  демонструють ефективність у зниженні ризиків зіткнень і втрати позиції під час виконання критичних морських операцій, у т.ч. на шельфі. Коротко розглянуто сучасний стан технологій  $DP$  та основні тенденції у їх вдосконаленні, зокрема у інноваційні алгоритми керування, використанні сучасних рушійних пристроїв і необхідності вдосконалення енергетичного обладнання.

2. Показано, що сучасні  $DP$ -системи стикаються з низкою проблем, серед яких найбільш критичними є високі енергетичні витрати та низька надійність у складних умовах експлуатації, таких, як шторм чи сильні течії. Вирішення цих проблем вимагає розробки нових підходів, що інтегрують сучасні алгоритми управління. Проблеми посилюється в умовах високих хвильових навантажень, коли традиційні системи часто демонструють низьку надійність управління через нелінійні характеристики пропульсивного комплексу та дуже високі витрати енергії, що знижує загальну ефективність експлуатації. Показано, що необхідно розроблювати інноваційні підходи до методів аналізу і синтезу процесів управління, які враховують динамічну природу навантажень, оптимізують витрати енергії та підвищують точність



стабілізації суден. Проведено аналіз ключових функцій *DP*-систем, їх роль у забезпеченні безпеки експлуатації суден і платформ, відповідності міжнародним морським стандартам та проблематиці інцидентів втрати позиції. Окреслена важливість використання систем *DP* для забезпечення стабільного розташування морських суден та платформ, особливо в умовах складної погоди або підвищеної навантаженості трафіку, у зменшенні ризиків зіткнень та втрати позиції для суден, які виконують складні операції на морі. Охарактеризовані сучасні інформаційні джерела, присвячені системам *DP* та методологію математичного моделювання. Ключовими для аналізу є академічні джерела та роботи *Marine Technology Society* з аналізом втрат позиції суден. Наведені дані дозволили зрозуміти різноманітні аспекти управління системами *DP*, включаючи інциденти втрати позиції.

3. Запропонована можливість використання спрощеної системи диференціально-алгебраїчних рівнянь, що описують електромеханічні перетворення енергії у системах позиціонування і на цій основі наведена трьохконтурна нелінійна позиційна система, що містить регулятори положення, швидкості та струму з відповідними датчиками і силовим перетворювачем. Наведена класифікація типових режимів позиціонування та визначені основні відмінності у аналізі цих процесів. Визначено, що запропонована структурна схема системи позиціонування дозволяє проводити ефективний синтез регуляторів окремих координат методами теорії автоматичного управління і електромеханіки, що у підсумку дозволить підвищити якість процесів позиціонування і є напрямком подальших досліджень. Наведені результати дослідження сприятимуть підвищенню ефективності, безпеці та екологічності судноплавства, що є важливим кроком до сталого розвитку морської галузі.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Miyazaki M., Tannuri E. A. (2013). A General Approach for Dynamic Positioning Weathervane Control. *Marine Technology Society Journal*, 47(2), 31-42. DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.47.2.3>
- [2] Svenning E., Sørensen A. J. (2019). Energy-Efficient Thruster Allocation for Dynamic Positioning Systems on Offshore Vessels. *Marine Technology Society Journal*, 53(1), 29-38. <https://www.mtsociety.org/marine-technology-society-journal-mtsj->
- [3] Cruder T., Bruzelius F., Nedstam J. (2017). The Role of Simulation in Dynamic Positioning Training and Competency. *Marine Technology Society Journal*, 51(3), 23-34.
- [4] Reichel M. S., Stalhane M. (2020). Dynamic Positioning: Applications in Floating Wind Farms. *Marine Technology Society Journal*, 54(4), 10-19.
- [5] Quesada A., DeFilippo L. (2014). Advanced Safety Features in Dynamic Positioning Operations. *Marine Technology Society Journal*, 48(3), 12-22.
- [6] Tan Z., Jiang S. (2018). Dynamic Positioning Operations in Harsh Environments: Challenges and Solutions. *Marine Technology Society Journal*, 52(2), 50-61.
- [7] Olsen H. R., Heinke P. (2015). Real-Time Position Control in Multi-Vessel DP Operations. *Marine Technology Society Journal*, 49(2), 38-47.
- [8] Smith J., Pedersen T. (2016). DP Systems and Positioning Integrity in Offshore Operations. *Marine Technology Society Journal*, 50(4), 16-25.
- [9] Gupta A., Dyer R. (2021). Dynamic Positioning Innovations for Reduced Fuel Consumption. *Marine Technology Society Journal*, 55(1), 15-26.
- [10] Rajaram V., Lindstrom K. (2017). Simulation and Testing of DP System Failures. *Marine Technology Society Journal*, 51(1), 11-20.
- [11] Bogachenko Y. DP Concept Principles of Dynamic Positioning - 2020. – 154 p. ISBN: 978-617-7822-88-1.
- [12] Bogachenko Y., Pipchenko O. Monitoring and Identification of DP Operators Behavioural Traits and Common Errors During Simulator Training. *TransNav, the International Journal on*

- Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2021, Vol. 15, No. 2. <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.09>, pp. 337-341, 2021.
- [13] Pipchenko O., Konon N., Bogachenko Y. Mathematical modelling of "ASD tug - marine vessel" interaction considering tug's maneuverability and stability limitations. *Journal of Maritime Research*, 2023, № 20, pp. 117-124 (2). <https://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/view/722>, DOI: 10.5281/zenodo.8370780.
- [14] Sørensen A. J. (2011). A survey of dynamic positioning control systems. *Annual Reviews in Control*, 35(1), 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2011.03.008>.
- [15] Hauff K.S. Analysis of Loss of Position Incidents for Dynamically Operated Vessels. Department of Marine Technology, NTNU (2014).
- [16] Herdzik J. Dynamic Positioning Systems during emergency or unexpected situations. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 20, 3, 153–159 (2013).
- [17] Fossen T. I. (2011). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons. DOI not available, accessible at Google Books.
- [18] Guidelines for vessels and units with dynamic positioning (DP) systems, (2017), 106 p.
- [19] Bray David. DP Operators Handbook (2nd Edition) Nautical Institute, 2015, FNI, 155 p.
- [20] Johansen T. A., Sørensen A. J. (2015). Energy-efficient dynamic positioning of ships by use of model predictive control. *Control Engineering Practice*, 42, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.05.009>.
- [21] Yang, C., & Wang, J. (2019). Adaptive robust control for dynamic positioning systems with input saturation and external disturbances. *Ocean Engineering*, 191, 106525. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106525>.
- [22] Nielsen U. D., et al. (2020). Energy optimization in dynamic positioning. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(2), 209–225. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00634-6>.
- [23] Perez T., Blanke M. (2012). Simulation and implementation of energy-efficient hybrid DP control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(6), 1471–1480. <https://doi.org/10.1109/TCST.2011.2179316>.
- [24] Kou G., et al. (2021). Integration of renewable energy into dynamic positioning systems: Opportunities and challenges. *Renewable Energy*, 179, 1401–1412. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.001>.
- [25] Vanem E., Sørensen A. J. (2014). Risk assessment of dynamic positioning operations with renewable energy systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 123, 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.09.005>.
- [26] DP Operations Guidance: Marine Technology Society (2012).
- [27] Pipchenko O., Tsymbal M., Shevchenko V. Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth Thrusters. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 12/3, 567–571 (2018). <https://doi.org/10.12716/1001.12.03.17>.
- [28] Investigation of collision between Sjoborg supply ship and Statfjord A on 7 June 2019: Petroleum Safety Authority, Stavanger (2019).
- [29] Øvergård K. I., Sorensen L. J., Nazir S., Martinsen T. J.: Critical incidents during dynamic positioning: operators' situation awareness and decision-making in maritime operations. *null*. 16, 4, 366–387 (2015). <https://doi.org/10.1080/1463922X.2014.1001007>.
- [30] Dynamic Positioning Station Keeping Review: Incidents and events reported for 2018 (DPSI 29), (2019, 2020).
- [31] Dynamic Positioning Station Keeping Review: Incidents and events reported for 2020 (DPSI 30). (2021).