

**В. В. БУДАШКО**, канд. техн. наук, доцент ОНМА;

**О. А. ОНИЩЕНКО**, д-р техн. наук, професор ОНМА

## **УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПІДРУЛЮЮЧИМ ПРИБРОЄМ КОМБІНОВАНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ**

На основі аналізу існуючих експлуатаційних проблем енергетичних установок єдиних електроенергетичних систем комбінованих пропульсивних комплексів з підрулюючими пристроями, що працюють в режимі утримання судном позиції, пропонується новий метод побудови їх систем управління. Результати досліджень можна використовувати при розробці та експлуатації існуючих судових енергетичних установок різних типів і комплектацій.

**Ключові слова:** динамічне позиціонування, підрулюючий пристрій, енергетична установка, комбінований пропульсивний комплекс, момент, втрата позиції.

### **Вступ**

Міжнародна морська організація дає визначення: «Система динамічного позиціонування – система, яка автоматично контролює судно для утримання його позиції і курсу виключно засобами активного використання судових рушіїв». Щоб ефективно справлятися зі своїм головним завданням – утримуватися у заданій позиції, судно повинно мати такий підрулюючий комплекс, який здатен виконувати всі завдання, позначені маневрово-технічними характеристиками – відповідно до технологічного призначення судна. Однокорпусні судна оснащують системою динамічного позиціонування (DPS), яка обладнуються двома головними двигунами і, або гвинтом регульованого кроку (CPP – Controllable Pitch Propeller), або гвинто-рульовою колонкою (Azimuth Drive Thrusters), носовими підрулюючими пристроями (ПП) і кормовим трастером. Так, самохідні нафтовидобувні напівазглибні платформи, оснащують системами класу DP2 або DP3 і мають 6-8 азимутальних рушіїв, здатних за будь-яких погодних умов утримувати платформу у заданій позиції.

### **Аналіз основних досягнень**

Дослідження принципів синтезу і функціонування DPS таких суден, оснащених складним пропульсивним комплексом, виявляє широке застосування типових ПД-регуляторів у різних контурах системи керування, не дивлячись на суттєві результуючі недоліки (складність параметризації, чутливість до шумів, необґрунтовані витрати енергії й інші) [1-3]. Також відомо [4], що у деяких DPS1 можна «загасити» головний і допоміжний двигуни, трастери, і все одно судно утримає позицію навіть у складних погодних умовах. Іноді робота з DPS2 суден, де присутня глобальна супутникова навігаційна система (GNSS) із виведеним пристроєм FanBeam [5] і працюючим автопілотом, зводиться по суті, до роботи DPS1. А на найсучасних бета-версіях K-POS [6], судно буде у деяких ситуаціях дуже

© В. В. Будашко, О. А. Онищенко, 2014

важко керованим. Зрозуміло, що підвищення швидкодії системи DP дає суттєві технологічні переваги, але енергетична ефективність таких DPS дуже сумнівна.

Таким чином, вирішення завдання підвищення енергетичної ефективності функціонування DPS: а) з забезпеченням необхідної, технологічно обумовленої, точності позиціонування; б) з урахуванням дії зовнішніх збурень у відкритому морі є актуальним і має практичну значущість [7].

### Мета досліджень

Підвищення енергетичної ефективності суден із одночасним забезпеченням виконання їх технологічних завдань за рахунок удосконалення систем управління підрулюючими пристроями (ПП) у режимі динамічного позиціонування із використанням гнучких зворотних зв'язків.

### Матеріал досліджень

Стратегія управління моментом ПП судна, працюючого у режимі DP, полягає у заміні зовнішнього контуру зворотного зв'язку за швидкістю петлею прямого управління моментом (Direct Torque Control – DTC). Це здійснюється за допомогою функції розрахунку  $Q_p$  (рис. 1), яка визначається із уставки  $Q_{ref}$ , як похідна від стандартної [8]

$$Q_{ref} = g_{T0}(T_{ref}), \quad (1)$$

і, після очевидних підстановок [1, 6, 8], отримаємо:

$$Q_{ref} = \rho \cdot D^5 \cdot K_{Q0} \cdot |n_{ref}| \cdot n_{ref}, \quad (2)$$

де  $T_{ref}$  – упор гвинта, Н;

$n_{ref}$  – частота обертання валу гвинта, рад/с;

$Q_{ref}$  – момент на валу, Н·м;

$\rho$  – густина води кг/м<sup>3</sup>;

$D$  – діаметр гвинта, м;

$K_Q$  – коефіцієнт приведення моменту.

Тобто, виходячи з (1) і (2), співвідношення між осьовим упором і моментом буде мати вигляд:

$$Q_{ref} = \frac{DK_{Q0}}{K_{T0}} T_{ref} = g_{T0}(T_{ref}), \quad (3)$$

де  $K_T$  – коефіцієнт упору гвинта;

$K_{Q0} = K_Q$  ( $\lambda=0$ , відносна хода гвинта);

$K_{T0} = K_T$  ( $J \approx 0$ , момент інерції валу).

Функція розрахунку (рис. 1), виходячи із завдання  $T_{ref}$ , за допомогою опорного генератора та генератора форсування формує обмежені за максимумами  $Q_{max}$  і  $P_{max}$  скореговані завдання обертаючого моменту. Дану блок-схему можна удосконалювати застосовуючи, наприклад, у ланці зворотного зв'язку матриці аеродинамічних та інерційних коефіцієнтів [9]. Але, за великим рахунком, таке ускладнення ніяк не вплине на поведінку ПП у разі одночасного зниження тяги і зміни напрямку тяги через взаємодію потоку від ПП з корпусом.

сом, викликаного ефектами тиску – коли мала тяга ПП проноситься вздовж корпусу.

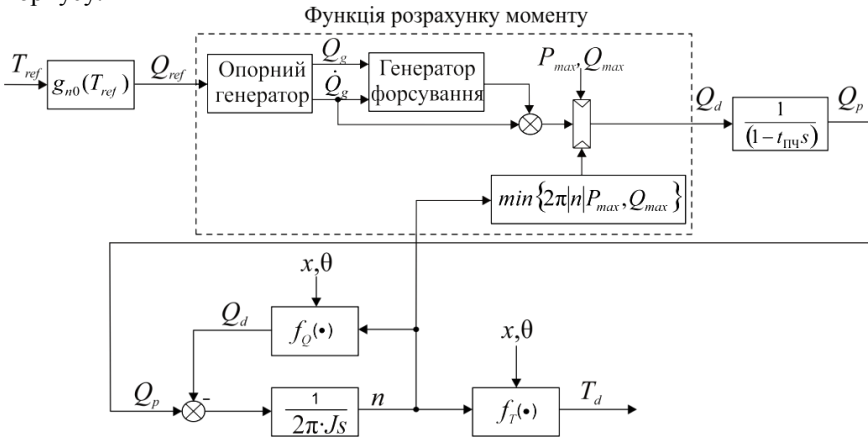


Рис. 1 – Блок-схема регулятора моменту:  $t_{ПЧ}$  – стала часу перетворювача частоти (ПЧ)

Можна зрозуміти: зменшення тяги потребує керування DPS з підтримкою, наприклад – за допомогою підпорядкованої системи управління, розподілу потужності (Power Management System – PMS) за відповідною інформацією давачів. Але тенденція втрати судном позиції триває, бо продовжує дію вищезгаданий ефект. Закінчується це тим, що після того, як потік ПП «відірветься» від корпусу судна, його вплив на потоки інших ПП буде на кшталт дії струї води з раптово відкритого брандспойту, що й призведе до виникнення крос-поєднання опорів. Поведінка всієї DPS у цьому випадку непередбачувана, відомий лише кінцевий результат – судно втрачає позицію.

Для утримання судном позиції у таких випадках можливе визначення дій операторів DPS, які призводять до поліпшення ситуації. Тобто, вирішити зворотну задачу і «навчити» всі системи управління у ланцюгу DP-PMS-DTC діяти «інтелектуально» і нестандартно – за рахунок удосконалювання алгоритмів функціонування «защитих» у них програм.

На багатопривідних суднах з 6-8 ПП, ця проблема частково вирішується таким алгоритмом – виведення слабого потоку із зони контакту з корпусом судна здійснюється перерозподілом упорів між діаметрально-протилежними ПП. Деколи, під час виникнення подібних ситуацій у режимі DP, допомагає рестарт системи з постановкою лопатей у нульове положення у разі використання гвинта регульованого кроку, або скидання обертів ПП у випадку застосування гвинта фіксованого кроку (ГФК) з подальшим терміновим накиданням моменту, а значить і упору.

Урахування означених складних ситуацій дозволило удосконалити роботу вузла широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) у складі системи управління ПП [9, 10]. Це удосконалення здійснюється введенням системи імпульсно-

фазового управління (СІФУ), де замість розподілу керуючих сигналів по фазах пропонується одночасна їх подача на електроди силових комутаторів з синхронізацією з будь-якої із фаз з необхідною шпаруватістю. За рахунок дії такої СІФУ розширюється зона стійкого регулювання, практично до максимально-можливих меж  $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ . Це досягається із одночасним використанням сучасних безінерційних, наприклад – п'єзо-електронних, давачів, миттєво реагуючих на відхилення упору ПП від розрахованих значень (рис. 2).

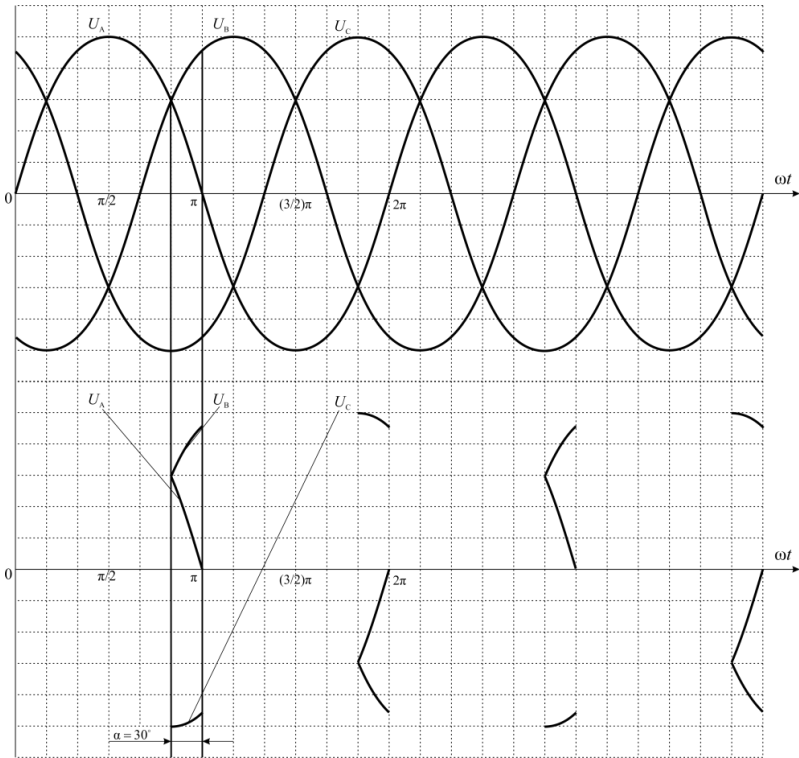


Рис. 2 – Діаграми управляючих напруг СІФУ

Кут  $\alpha$ , який у вказаній зоні є кутом відкриття, у разі перевищення значення  $\pi$  стає кутом регулювання інтенсивності наростання упору у квадратичній залежності, а ШІМ – засобом згладжування пульсацій, бо є складовою ланки постійного струму, половина рівня напруги на якій визначається, наприклад, таким чином:

$$U_{dc\_N} = \frac{1}{\text{modind\_N}} \cdot \frac{U_m \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (\text{В}), \quad (4)$$

де  $U_m$  – максимальне значення лінійної напруги живлення;  $\text{mod}ind\_N = 1,01$  – значення випадкової величини оптимальних кутів переключення, як функції індексу модуляції для усунення 5-ої, 7-ої, ... 25-ої гармонік із основної.

Тоді генерація імпульсів управління, з точки зору отримання синусоїдальної форми напруги на ПП, підвищить ефективність передачі потужності до гвинта і виходить із основної форми хвилі вихідної напруги ПЧ:

$$U(\varphi - \alpha, (t - t_{\text{ПЧ}}) / S) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_{dc-N}}{2} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin(n \cdot \frac{\pi}{2}) [\cos(n(\omega \times ((t - t_{\text{ПЧ}}) / S) + (\varphi - \alpha))) + \cos(n(\omega \times ((t - t_{\text{ПЧ}}) / S) - (\varphi - \alpha)))] \quad (5)$$

де  $\varphi$  – фаза вихідної напруги;

$n$  – номер гармоніки вихідної напруги;

$S$  – необхідна шпаруватість вихідної напруги, яка залежить від інтенсивності завдання  $T_{ref}$ .

Таким чином блок-схема регулятора моменту перетворюється у блок-схему регулятора потужності, оскільки в деяких випадках має місце її обмеження на вільній воді (рис. 3).

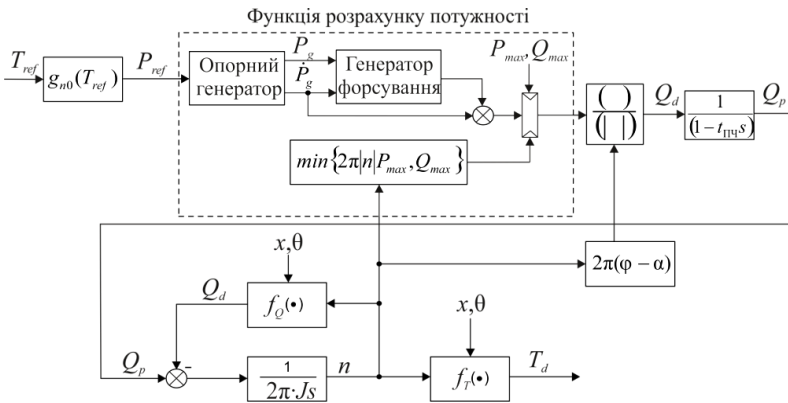


Рис. 3 – Модифікована блок-схема регулятора

За таких умов побудови DTC, системі DP немає потреби «знати» у якому положенні знаходиться ПП відносно корпусу судна, оскільки раніше це було необхідно тільки для того, щоб не заважати роботі інших ПП. Зараз авторами проводяться інтенсивні дослідження з метою уніфікації представлених блок-схем регуляторів і алгоритмів управління для різноманітних комплектацій СЕУ комбінованих пропульсивних комплексів (КПК) різними типами ПП.

### Результати досліджень

Запропоноване удосконалення методу управління моментом ПП СЕУ КПК на основі синергетичної структури з ШІМ і СІФУ дозволяє вирішувати завдання оптимізації процесу керування системи DP з одночасним підви-

щення ефективності передачі потужності до гвинтів, збільшення надійності та розширення функціональних можливостей.

Запропоноване управління дозволяє, на основі застосування незалежного від характеристик вхідної напруги формування моменту ПП, реалізувати необхідні керуючі сигнали з урахуванням дислокації актичних упорів відносно корпусу судна, з можливістю оперативного перенаштування залежних від довкілля параметрів ланок ланцюга DP-PMS-DTC.

На рівні технічної реалізації у ланках орієнтації, навігації та управління авторами запропоновано застосування таких елементів, як твердотілі хвильові гіроскопи та п'єзоелектричні давачі, які динамічно налаштовуються та на відміну від традиційно використовуваних приладів у DPS, можуть працювати у незалежних режимах виміру кута і швидкості.

### **Висновки**

Інформаційне наповнення запропонованих авторами рішень є підґрунтям для подальшого розвитку сучасних систем управління ПП та їх експлуатації. Отримані результати можуть бути покладені в основу подальших розробок та створення інтелектуальних судових систем управління, які забезпечують в складних експлуатаційних умовах стабілізацію в цілому параметрів ПП, СЕУ та КПК при мінімізації втрат енергії у СЕУ КПК під час розвідувально-бурових, підйомно-транспортних та вантажно-розвантажувальних робіт.

**Список літератури:** 1. Woud H. K. Design of propulsion and electric power generation systems / H. K. Woud, D. Stapersma // IMarEST publications: London. – 2003. – 494 p. 2. Юдин Ю. И. Расчет радиальной диаграммы предельных значений скорости ветра для бурового судна «В. Шашины» [Текст] / Ю. И. Юдин, А. Б. Гарбаровский, С. Н. Холщев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. – 2014. – Вып. 1. – С. 7-12. 3. Christiaan de Wit. Optimal Thrust Allocation Methods for Dynamic Positioning of Ships / de Wit Christiaan // A thesis submitted to the Delft Institute of Applied Mathematics in partial fulfillment of the requirements. – Delft, the Netherlands: Delft University of Technology. – 2009. – 68 p. 4. Холодов Г. Г. Требования национальных морских классификационных обществ к работам на морских шельфах и системам ориентации судов, оснащенных системами динамического позиционирования, и их классификация [Текст] / Г. Г. Холодов. – Вестник МГТУ, том 13, №4/1. – 2010. – С. 712-718. 5. MDL Home Page: Fanbeam® Laser DP reference system [Електронний ресурс]. URL: <http://www.mdl-laser.com/en/rugged-laser-equipment-for-extreme-environments-14735> (дата звернення: 01.07.2014). 6. Home Kongsberg Meritum: Dynamic positioning – DP system Single system K-Pos DP-11/12 [Електронний ресурс]. URL: <http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/E477FA13B4BCC535C1256A570031678D?OpenDocument> (дата звернення: 01.07.2014). 7. Одесский кьюринг – форум вне политики: Форум [Електронний ресурс]. URL: <http://wap.odessa.crewing.borda.ru/?1-16-0-00000422-000-80-0> (дата обращения: 01.07.2014). 8. Гончаренко Д. А. Моделирование систем управления мощностью и крутящим моментом подруливающих устройств при позиционировании судов [Текст] / Д. А. Гончаренко, В. В. Будашко // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCF 2014): Материалы межд. науч. Конф. – Херсон: ХНТУ, 2014. – С. 59-61. 9. Тимченко В. Л. Робастно-оптимальная стабилизация морских подвижных объектов в режиме динамического позиционирования [Текст] / В. Л. Тимченко, О. А. Ухин // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техника. – 2014. – № 13 (89). – С. 19 – 26. 10. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [Текст] / Шрейнер Р. Т. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

- Bibliography (transliterated):** 1. Woud H. K., *Design of propulsion and electric power generation systems*. H. K. Woud, D. Stapersma. IMarEST publications: London. – 2003. – 494 p. [Print].
2. Udin U. I. *Raschot radial'noy diagrammy predel'nykh znachenij skorosti vetra dlja burovogo sudna «V. Shashin»* [Calculation of the radial diagram limit values of wind speed for drilling vessel “MV Shashin”], (2014), *Vestnik gosudarsvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. Publ.*, St. Petersburg, No1, pp. 7-12, (In Russian). [Print].
3. Christiaan de Wit. *Optimal Thrust Allocation Methods for Dynamic Positioning of Ships*. de Wit Christiaan. A thesis submitted to the Delft Institute of Applied Mathematics in partial fulfillment of the requirements. – Delft, the Netherlands: Delft University of Technology. – 2009. – 68 p, (In Russian). [Print].
4. Holodov G. G. *Trebovanija nacional'nykh morskikh klassifikacziornykh obschestv k robotam na morskikh shel'fakh i sistemam orientacziy sudov, osnaschjonykh sistemami dinamicheskogo pozicziirovaniya, i ikh klassificacija* [Requirements of the national marine classification societies to work offshore and systems orientation of vessels equipped with dynamic positioning systems and their classification], (2010), *Vestnik MGTU Publ.*, Moscow, Vol. 13, No4/1, pp. 712-718. [Print].
5. MDL Home Page: Fanbeam@Laser DP reference system, Available at: <http://www.mdl-laser.com/en/rugged-laser-equipment-for-extreme-environments-14735> (ac-cessed 01.07.2014) Web.
6. Home Kongsberg Meritime: Dynamic positioning – DP system Single system K-Pos DP-11/12 Available at: <http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/E477FA13B4BCC535C1256A570031678D?OpenDocument> (accessed 01.07.2014) Web.
7. *Odesskii krjuing – forum vne politiki*: Forum [Odessa Crewing - apolitical forum: Forum], (In Russian), Available at: <http://wap.odessacrewing.borda.ru/?1-16-0-00000422-000-80-0> (accessed 01.07.2014).
8. Goncharenko D. A. *Modelirovanie system upravlenija moschnost'u i krutjaschim momentom podrulivajuschikh ustroistv pri pozicziirovanii sudov* [Simulation of power management systems and torque thrusters for positioning vessels], (2014), *Intellectual systems for decision making and problems of computational intelligence (ISDMCI'2014): International Conference, HNTU Publ.*, Kherson, Ukraine, pp. 59-61 (In Russian). [Print].
9. Timchenko V. L. *Robastno-optimal'naja stabilizacziya morskikh podvizhnykh ob'ektov v rezhime dinamicheskogo pozicziirovaniya* [Robust-optimal stabilization of marine motion objects in the dynamic positioning mode], (2014), *Electrical and Computer Systems, Tekhnika Publ.*, Kiev, Ukraine, No 13 (89). – pp. 19-26 (In Russian). [Print].
10. Shreiner R. T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters ], *Ekaterinburg: URO RAN*, (2000), 654 p. (In Russian). [Print].

Надійшла (received) 05.08.2014



Будашко Віталій Віталійович,  
канд. техн. наук., доцент, докторант кафедри технічної експлуатації флоту Одеської національної морської академії,  
65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8  
Тел.: +38(067)9375578  
e-mail: bvv@te.net.ua



Онищенко Олег Анатолійович,  
д-р техн. наук., професор, професор кафедри технічної експлуатації флоту Одеської національної морської академії, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8  
Тел.: +38(067)4826991  
e-mail: olegoni@mail.ru