

ISSN 2313-4763

Міністерство освіти і науки України

Херсонська державна морська академія

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 2 (21)

Херсон
2019

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2019. № 2 (21). 180 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 3 від 24.10.2019 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Букетов А. В., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, головний редактор.

Тематична спрямованість – Транспортні технології:

Гнатів А. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Аргун Щ. В., к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, член редколегії;

Ляшук О. Л., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Patlins Antons, Doctor of Engineering Science, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

Шарко В. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології:

Рожков С. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Жук Д. О., к.т.н., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна, член редколегії;

Zhiravetska Anastasia, Dr. Sc. Ing., Professor, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

Полівода О. В., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, член редколегії;

Степенко С. М., к.т.н., Чернігівський національний технічний університет, Україна, член редколегії;

Хлопенко М. Я., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Матеріалознавство:

Сапронов О. О., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Акімов О. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Брайло М. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Dulebová Eudmila, PhD., assoc. Prof., Technical University of Kosice, Словаччина, член редколегії;

Сизоненко О. М., д.т.н., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Україна, член редколегії;

Стухляк П. Д., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Фесенко І. П., д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України, Україна, член редколегії.

Адреса редакційної колегії: 73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20, тел. (0552) 22-35-69

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 18987-7776ПР від 11.05.2012 р.

Журнал внесено до Переліку наукових фахових видань України (постанова президії ВАК України № 1-05/3 від 30.03.2011 р., Наказ МОН України № 374 від 13.03.2017 р.)

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «Україніка наукова», міжнародною наукометричною базою «Наукова електронна бібліотека E-Library.Ru» (Російський індекс наукового цитування – РИНЦ), міжнародною реферативною базою даних Google Scholar, міжнародною наукометричною базою Researchbib, представлений у Науковій електронній бібліотеці Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського, міжнародній реферативній базі даних Crossref.

ISSN 2313-4763

© Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 2019

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.61

БЕЗПЕКА ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В УМОВАХ ПОГІРШЕНОЇ РОБОТИ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Габрук Р. А., к.т.н., керівник проєктів ТОВ «Оверсіз Лоджистік», e-mail: grostyslav@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-5639-2475

У роботі розглянуто питання гарантування безпеки динамічного позиціонування рухомих об'єктів водного транспорту в умовах, коли на просторово-часовому проміжку здійснення високоточної навігації кількість видимих навігаційних супутників зменшується через специфіку виконуваної технологічної роботи або від того, що потужність сигналу навігаційних супутників супутникових радіонавігаційних систем серйозно послаблюється перешкодами від різних джерел. Метою дослідження є можливість гарантування безпеки ДП РОВТ в умовах, коли апаратура споживача не здатна прийняти сигналів достатньої кількості НС. Запропоновано альтернативний підхід визначення місця рухомого об'єкта водного транспорту. Визначено умови та фактори, котрі можуть погіршити роботу СРНС в акваторії при здійсненні розробки ресурсів шельфу України. Визначено перспективні напрями подальших наукових досліджень.

Ключові слова: система динамічного позиціонування, безпека мореплавства, судноводіння, рухомий об'єкт водного транспорту, супутникова радіонавігаційна система.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.004-009

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. У світовій морській галузі існує багато практичних завдань, що вимагають надійного високоточного позиціонування різних видів рухомих об'єктів водного транспорту (РОВТ). Ці завдання здебільшого мають на меті як виконання конкретної технологічної роботи у сфері видобутку або розвідки вуглеводневих ресурсів континентального шельфу, так і забезпечення здійснення процесів високоточної навігації, яка стає необхідною складовою флоту двадцять першого століття і відкриває шляхи для подальшого розвитку світової морської галузі в бік створення дистанційно керованих людиною-оператором, а потім і автономних РОВТ під керуванням штучного інтелекту.

Динамічне позиціонування – це позиціонування РОВТ за допомогою активної тяги рушійного комплексу [1]. А його перевага в мобільності та можливості контролю руху порівняно з іншими видами позиціонування, що зумовлює економічну ефективність.

Система динамічного позиціонування (СДП) призначена для автоматичного утримання позиції РОВТ винятково за допомогою рушійного комплексу і вона є складовою бортового багатофункціонального комплексу навігаційного обладнання (ББКНО).

Аналіз перспективного розвитку флоту України однозначно вказує на те, що невід'ємною частиною вітчизняної сфери видобутку морських ресурсів континентального шельфу буде застосування РОВТ з СДП.

Зростання інтенсивності використання СДП визначає не тільки перспективу подальшого розвитку цього напрямку, а й ставить гостро питання безпеки РОВТ при здійсненні динамічного позиціонування (ДП). Постановою Верховної Ради України № 3938-ХІІ від 04.02.1994 р. Україна стала учасником Конвенції про Міжнародну морську організацію, а також нашій державі створено єдину систему управління безпекою на морським і річковим транспортом [2]. Саме тому безпеці на морі приділяється багато уваги і розробки та дослідження в цьому напрямі ведуться у профільних державних закладах.

При реалізації процесів високоточної навігації одним з основних завдань є визначення місцеположення РОВТ за сигналами радіонавігаційних систем, зокрема, супутникових радіонавігаційних систем (СРНС). Подальший розвиток способів визначення параметрів руху при ДП та потреба в навігаційних приладах, що надійно працюють в умовах перешкод, свідчить про те, що наявні методи та засоби навігації потребують

подальшого розвитку з метою підвищення функціональної стійкості (надійності та ефективності) засобів визначення навігаційних параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми. На підставі аналізу технічної документації сучасних СРНС, можна зробити висновок, що конфігурації глобальних супутникових радіонавігаційних систем Navstar (США), ГЛОНАСС (Росія), COMPASS (Китай), Galileo (Європейський Союз), IRNSS (Індія), сформовані таким чином, що єдиним методом визначення навігаційних параметрів є метод псевдодальності [3].

В умовах збоїв або перешкод практично стає неможливим визначення навігаційних параметрів РОВТ за допомогою наявних стандартних методів вимірювання в СРНС. Наслідком цього, залежно від ступеня узгодженості всіх компонентів СРНС, можуть стати різні ситуації здійснення помилкових маневрів РОВТ при ДП у локально обмеженому просторі виконання технологічних робіт. Зрозуміло, що це неприпустимо ні в нормальних, ні тим більше в екстремальних умовах експлуатації РОВТ, враховуючи критерій безпеки людей, збереження вантажів, РОВТ.

У роботі [4] було запропоновано гарантувати безпеку мореплавства шляхом підвищення рівня знань судноводіїв щодо можливості гарантованого визначення місця РОВТ та його кінематичних параметрів.

Сформовано умову спостережуваності навігаційних параметрів для супутникових радіонавігаційних систем: тобто, як мінімум, має виконуватися така умова:

$$\det X_{\Delta} \neq 0 \quad (1)$$

Особливості матриці X_{Δ} залежать від геометричного фактору фактичного місцезнаходження НС у СРНС. Також можлива відсутність реальної спостережуваності навігаційних параметрів навіть у разі наявності в області видимості необхідної кількості НС, сигнали від яких можуть бути прийняті, оброблені, а отже, отримані значення координат НС.

Так для достовірності навігаційних визначень у будь-якій точці на поверхні Землі має виконуватися необхідна умова прямої видимості щонайменше чотирьох навігаційних супутників (НС). Проте при практичній експлуатації РОВТ з динамічними принципами позиціонування досить часто трапляються ситуації, коли приймач, установлений на РОВТ, не може прийняти радіосигнали від чотирьох НС будь-якої СРНС одночасно, що створює загрозу безпеці навігації при ДП і потребує подальших досліджень.

Постановка задачі. Метою дослідження є можливість гарантування безпеки ДП РОВТ в умовах, коли апаратура споживача не здатна прийняти сигналів достатньої кількості НС.

Викладення основного матеріалу дослідження. При аналізі можливості виникнення випадків, коли сигнали від НС можуть бути не прийнятими АС РОВТ при проведенні технологічних робіт, які пов'язані з ДП в акваторіях Чорного та Азовського морів можна стверджувати, що такими випадками є робота постачання морської стаціонарної платформи, самопідйомної плавучої бурової установки, які є найбільш перспективними технічними засобами освоєння вуглеводневих ресурсів вітчизняного шельфу. При виконанні роботи постачання РОВТ підходить близько до технічних засобів, які значно вище місця розташування антен АС. Тому НС у великому секторі (до 180 градусів) можуть бути закритими, а при використанні масивних кранів для підняття вантажів – цей сектор може бути розширено.

Також можна вважати, що сигнали можуть надходити зі значними затримками чи похибками. Кількість видимих НС може зменшуватись від того, що потужність сигналу НС СРНС серйозно послаблюється перешкодами. Сигнал СРНС також може бути послаблений чи пригнічений ненавмисними активними перешкодами, такими, як наземні радіоджерела, що працюють на близьких до сигналів НС, однакових або побічних частотах. Необхідно

окремо зазначити, що сигнал може бути послаблений навмисними активними перешкодами, що використовуються для кримінальних або військових цілей.

Для гарантування безпеки ДП у таких ситуаціях потрібно розширити функціональні можливості наземної інфраструктури СРНС, тобто АС, за допомогою нових підходів до визначення навігаційних параметрів. Зокрема, можна використовувати нові технічні рішення та алгоритми обробки сигналів НС, які не реалізовані в АС СРНС, але відомі та успішно застосовуються в радіотехнічних системах, що вирішують завдання активної та пасивної радіолокації, у фазованих антенних решітках, де застосовуються методи просторової обробки сигналів.

Для методу псевдодальності, який використовується у СРНС, відома система навігаційних рівнянь записується у вигляді:

$$\begin{cases} R_1^2 = (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 + c \cdot \Delta t; \\ R_2^2 = (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 + c \cdot \Delta t; \\ R_3^2 = (X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2 + c \cdot \Delta t; \\ R_4^2 = (X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2 + c \cdot \Delta t. \end{cases} \quad (2)$$

де R_1, R_2, R_3, R_4 – відомі вимірювані псевдодальності до першого, другого, третього і четвертого НС відповідно; X, Y, Z – невідомі координати в прямокутній глобальній системі координат з центром у центрі Землі (далі «прямокутна глобальна система координат»); $X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, X_3, Y_3, Z_3, X_4, Y_4, Z_4$ – відомі координати відповідно першого, другого, третього і четвертого НС у глобальній прямокутній системі координат, які визначають із закодованого сигналу; c – швидкість світла у вакуумі; Δt – час неузгодженості системного часу СРНС і таймера апаратури споживача на борту РОВТ.

У загальному вигляді (2) можна переписати наступним чином:

$$\hat{R}_k = \sqrt{(X - X_k)^2 + (Y - Y_k)^2 + (Z - Z_k)^2} + c\Delta t, \quad k = 1, \dots, M \quad (3)$$

де \hat{R}_k – псевдодальність між РОВТ та k -м НС, X_k, Y_k і Z_k – координати k -го НС, що одержуються приймальним пристроєм.

На рис. 1 зображено просторові координати РОВТ та НС і основні залежності, які складають суть проблеми.

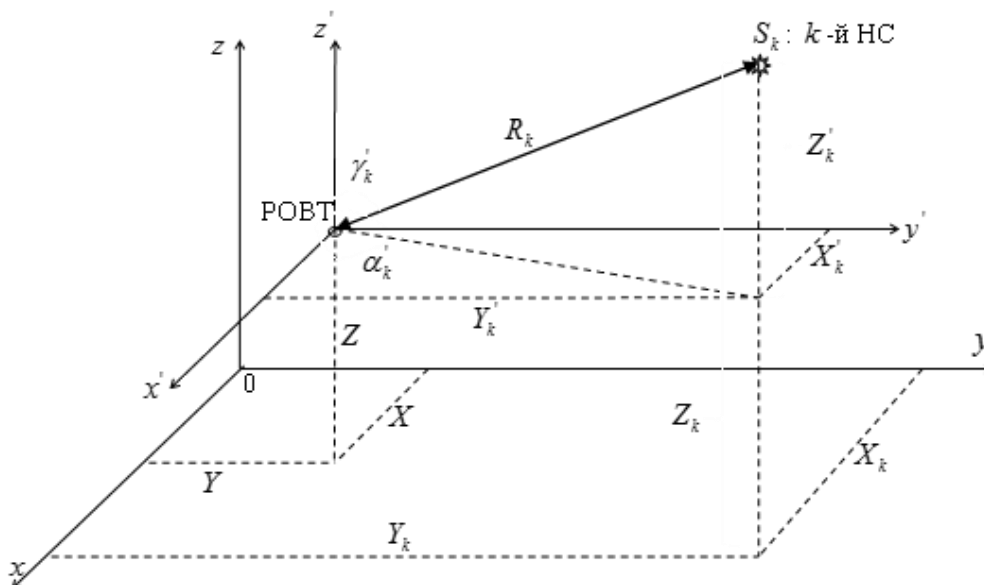


Рисунок 1 – Просторові координатні системи

Система (3) може бути вирішена в разі, коли $1 < M < 4$, якщо додатково ввести три рівняння, які виражають залежності між прямокутними та сферичними координатами НС відносно РОВТ, тобто:

$$\begin{cases} X = X_k - R_k \sin \gamma'_k \cos \alpha'_k; \\ Y = Y_k - R_k \sin \gamma'_k \sin \alpha'_k; \\ Z = Z_k - R_k \cos \gamma'_k; \\ R_k = \sqrt{(X - X_k)^2 + (Y - Y_k)^2 + (Z - Z_k)^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Для отримання оцінки сферичних координат НС, а саме: кута місця γ'_k та азимута α'_k (рис. 1) можна запропонувати створення алгоритму просторової обробки сигналів за хвильовим фронтом.

Підставивши значення в (4), завжди можна визначити шукані координати НО. На рис. 1 прийнято $M = 1$ і $k = 1$, що відповідає наявності єдиного НС у зоні видимості НО.

Процедура просторової обробки передбачає наявність низки антенних елементів (АЕ). Найбільш ефективним буде розташування АЕ на площині (рис. 2), що також має сенс з погляду спрощення проектування вимірювача.

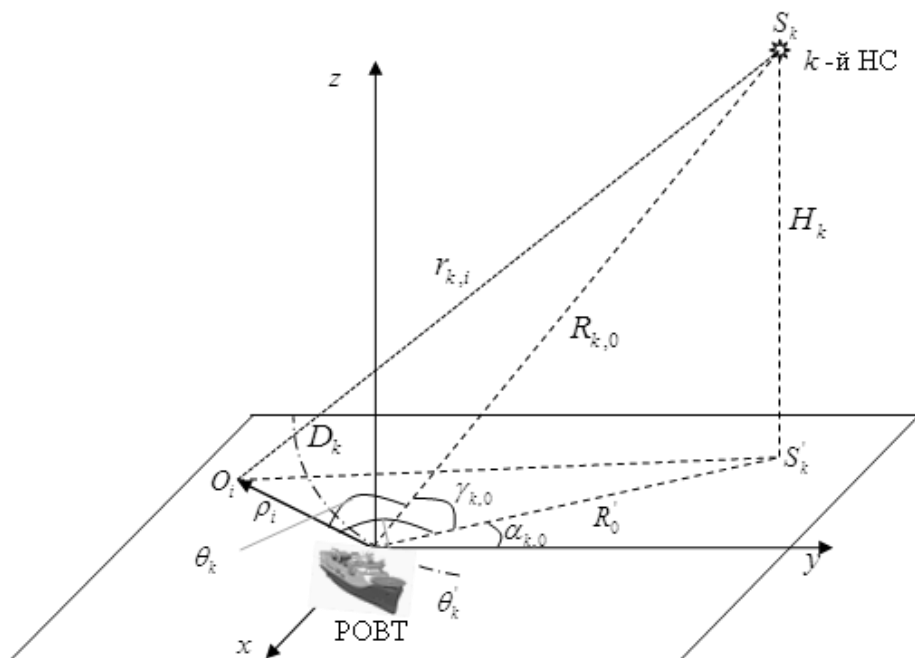


Рисунок 2 – Зв'язана система координат РОВТ

Як показано на рисунку, розташування АЕ в площині й наведені основні залежності надають можливість однозначно визначати кут місця та азимут.

Положення i -го АЕ характеризується вектором координат $\rho_i(\rho_i, \eta_i)$, де ρ_i – відстань від нульового до i -го АЕ, η_i – кут між нульовим спрямуванням і спрямуванням на i -й АЕ.

У зв'язаній з РОВТ системі координат, що зображено на рис. 2, НС має координати $\mathbf{R}_{k0}(R_{k0}, \gamma_{k0}, \alpha_{k0})$, а в системі координат рис. 1: $\mathbf{R}_k(R_k, \gamma'_k, \alpha'_k)$.

Висновки і перспектива подальших наукових досліджень. Ґрунтуючись на попередніх дослідженнях спостережуваності навігаційних параметрів для вирішення завдання гарантування безпеки ДП в умовах, коли на просторово-часовому проміжку здійснення високоточної навігації кількість видимих НС зменшується через специфіку

виконуваної технологічної роботи або від того, що потужність сигналу НС СРНС серйозно послаблюється перешкодами від різних джерел, запропоновано альтернативний підхід визначення місця РОВТ.

Розроблено систему рівнянь для визначення координат РОВТ в умовах недостатньої інформації.

Визначено умови та фактори, котрі можуть погіршити роботу СРНС в акваторії при здійсненні розробки ресурсів шельфу України.

Практична реалізація на борту РОВТ потребує впровадження додаткових технічних засобів вимірювання і обробки даних для знаходження : кута місця γ'_k та азимута α'_k , що є перспективним напрямом подальших досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ІМО КБМ Циркуляр 645. Керівництво для суден з системами динамічного позиціонування. / ІМО, Лондон, 1994. 22 с.
2. Про затвердження Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському і річковому транспорті. *Наказ № 904 МТУ від 20.11.2003*. Київ : Офіційний вісник України, 2004. № 52 (09.01.2004) (частина 2). С. 2844.
3. Соловйов Ю. А. Системи супутникової навігації. Москва: Еко-Трендз, 2000. 267 с.
4. Габрук Р. А., Горішна І. Я. Убезпечення мореплавства шляхом контролю спостережуваності навігаційних параметрів. *Метрологія та прилади : науково-виробничий журнал*. Харків : ХНУРЕ, 2016. Випуск № 4 (60). С. 62–64.

REFERENCES

1. IMO MSC Circular 645. Guidelines for vessels with dynamic positioning systems. / IMO, London, 1994.- 22 p.
2. Order No. 904 of the MTU dated 20.11.2003. «On approval of the Regulations on the system of safety management of navigation on the sea and river transport». - Kyiv: Official Gazette of Ukraine, 2004. - No. 52 (January 9, 2004) (part 2). - P. 2844.
3. A. Soloviov - “Satelite Navigation Systems” / Yuri Alexandrovich Soloviov – Moscow: Eco-Trends, 2000. – 267 p.
4. R.A. Gabruk. Ensuring safety of navigation by monitoring the navigation parameters observability / R.A. Gabruk, I.Y. Goryshna / Metrology and appliances. Scientific production journal. – Kharkiv: KhNURE, 2016 – Issue №4 (60). - P. 62-64

Габрук Р.А. БЕЗОПАСНОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ УХУДШЕННОЙ РАБОТЫ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В работе рассмотрены вопросы обеспечения безопасности динамического позиционирования подвижных объектов водного транспорта в условиях, когда на пространственно-временном промежутке осуществления высокоточной навигации количество видимых навигационных спутников уменьшается из-за специфики выполняемой технологической работы или от того, что мощность сигнала навигационных спутников спутниковых радионавигационных систем серьезно ослабляется помехами от различных источников. Предложен альтернативный подход определения места подвижного объекта водного транспорта. Определены перспективные направления дальнейших научных исследований.

Ключевые слова: система динамического позиционирования, безопасность мореплавания, судовождение, подвижный объект водного транспорта, спутниковая радионавигационная система.

Gabruk R. A. SAFETY OF DYNAMIC POSITIONING DURING DEGRADED CONDITION OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEM

In the paper it was considered the issue of dynamic positioning safety of mobile water transport objects during time-space interval of high-precision navigation when the amount of visible navigational satellites is reduced by specific of performed technological work or by the fact that the signal strength of navigation satellites of satellite radio navigation system is seriously weakened by obstacles from different sources. The purpose of the study is to guarantee the safety of DP ROVT in conditions where the equipment of the consumer is not capable of receiving signals of a sufficient number of emergencies. An alternative approach to determining the location of a moving water transport object is proposed. The conditions and factors that may interfere with the work of the SNAs in the water area during the development of offshore resources of Ukraine are identified. Perspective directions of further scientific researches are defined. An alternative approach to determining the location of a mobile water transport object was proposed. The perspective directions of further scientific researches are determined. Based on previous studies of the observability of navigation parameters to solve the problem of guaranteeing the safety of the DP in conditions where the space-time interval of high-precision navigation, the number of visible NS decreases due to the specifics of the technological work being performed or from the fact that the signal strength of the NRC NS is seriously impaired by obstacles, an alternative approach for determining the location of the PWT is proposed.

A system of equations is developed to determine the coordinates of the ROVT under conditions of insufficient information. The conditions and factors that may interfere with the work of the SNAs in the water area during the development of offshore resources of Ukraine are identified.

The practical implementation on board the ROVT requires the introduction of additional technical means of measurement and data processing for finding: angle of location and azimuth, which is a promising direction for further research.

Keywords: *dynamic positioning, safety of navigation, navigation, mobile water transport object, satellite radio navigation system.*

© Габрук Р. А.

Статтю прийнято
до редакції 10.07.2019

AUTOMATIC CONTROL OF THE VESSEL'S MOVEMENT UNDER EXTERNAL CONDITIONS

Zinchenko S. M., *Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Ship Management Department, Kherson State Maritime Academy, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;*

Mamenko P. P., *Deep Sea Captain, Senior Lecturer of Ship Management Department, Kherson State Maritime Academy, e-mail: pavlo.mamenko@gmail.com;*

Grosheva O. O., *Senior Lecturer of Ship Management Department, Kherson State Maritime Academy, e-mail: olgamelyaeva@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9022-4697;*

Mateychuk V. M., *Head of Laboratory Navigation Simulator, Kherson State Maritime Academy, e-mail: mateichykv@gmail.com*

The article deals with the issues of automatic control of the vessel's movement under external conditions of wind and current. A brief review of the sources was carried out and the limitations of the traditional control schemes with one stern rudder were shown. A control scheme with additional bow rudder has been proposed. It allows to reduce fuel consumption, the number of actuations of actuators and to increase reliability through redundancy management. A comparison of the proposed and traditional control schemes for mathematical modeling in the MATLAB environment has been made.

Keywords: *control object, control system, mathematical model, numerical integration.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015

Introduction. The effects of wind and current refer to external influences. Wind has an adverse effect on the movement and maneuvering of ships, especially those that have a greater freeboard and highly developed superstructures. The degree and nature of the impact of wind on the vessel depends on many factors, the main ones of which are: the area and location of the center of sail, the ratio of the size of the freeboard to the draft of the vessel, the force and direction of the wind relative to the diameter plane (DP) of the vessel, course and the speed of the vessel relative to the wind direction. The greatest influence on the ship has a wind directed perpendicularly or at an angle to the ship's DP. In this case, there is a drift (side drift), heeling, turn of the vessel to the wind or under the wind, as well as a change in the speed of movement. The flow directed at an angle to the vessel's DP also has an adverse effect. The presence of the lateral component of the flow leads to the appearance of the drift angle, a change in the speed of movement, lateral displacement and rotational movement of the vessel. Since almost all vessels operate under the conditions of external influences of wind and flow, the search for optimal schemes and optimal vessel control under external conditions allowing them to optimize their movement **is an urgent scientific and technical task.**

Currently, most transport ships use one or two engine, aft steering and thruster. At the same time, the thruster and engines are used for maneuvering only at low speeds, in maneuvering mode. At the transition, the engines used in the mode of ensuring the maximum speed of the vessel and are not used for maneuvering. Support a given course or driving along a given route is ensured only by the aft steering wheel. In autopilot mode, the PID regulator controls the aft steering wheel [1-3]. In work [1] an example of the Track Control System (Section 8) under conditions of wind exposure is shown, it is provided for keeping the vessel on the route. However, the presence of wind impact does not allow for a simultaneous zero drift angle, which leads to an increase in aerodynamic resistance, a decrease in speed, an increase in transition time and additional fuel consumption. In work [4] a system of automatic control of a ship with an additional bow rudder is described, it provides zero drift angle in the presence of external influences. According to the authors, this decision allows to reduce the overall resistance to movement of the vessel and fuel consumption. However, in the proposed system, the lateral deviation is calculated through the drift angle, which, in the presence of measurement and calculation errors, will lead to the accumulation of the lateral deviation error of the vessel from the trajectory and the need to organize a periodic return to the trajectory, which again is associated with additional fuel consumption. In work [5],

the authors proposed a vessel control system with stern and bow rudders that kept the vessel on the route with a zero drift angle in the presence of external influences, which makes it possible to optimize the movement of the vessel in time and fuel consumption.

The purpose of this article is to check the efficiency of the proposed control scheme for a vessel with a stern and bow rudders, as well as a comparison of the effectiveness of the proposed scheme with a traditional control scheme with one stern rudder under external conditions.

Main part. Figure 1 shows the information management scheme with aft and bow rudders. The angular velocity of the vessel Ω_z from the angular velocity sensor 1 is served on the first input of the adder 9, the angular deviation $\varphi - \varphi_z$ of the yaw angle from the track angle from the adder 5 is served to the second input of the adder 9. On the third input of the adder 9 is served a signal $\int (\varphi - \varphi_z) dt$ from the integrator 7.

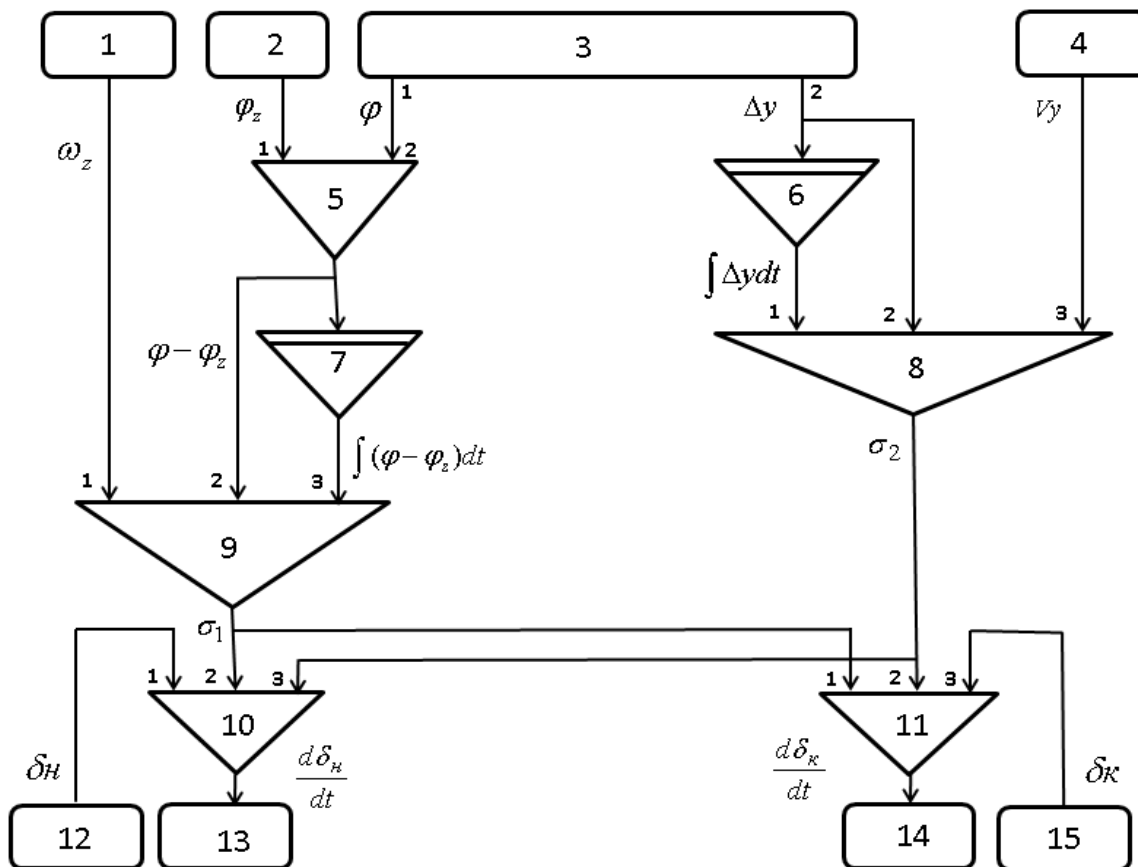


Figure 1 – Information management scheme with aft and bow rudders

Signal $\sigma_1 = k_\Omega * \Omega_z + k_{\Delta\varphi} * (\varphi - \varphi_z) + k_{\int\Delta\varphi} * \int (\varphi - \varphi_z) dt$ is served from the output of the adder 9 to the second input of the adder 10 and to the first input of the adder 11, that ensures a steady reduce of the yaw angle to a predetermined value $\varphi = \varphi_z$ and $\beta = 0$.

On the first input of the adder 8 is served the integral $\int \Delta y dt$ of the lateral deviation of the vessel relatively specified route from the integrator 6, on the second input of the adder 8 and on the integrator 6 is served the lateral deviation Δy of the vessel from the specified route from the second output of the satellite navigation system. To the third input of the adder 8 is served the lateral speed V_y of the vessel from the lateral speed sensor 4. Signal

$\sigma_2 = k_{vy} * V_y + k_{\Delta y} * \Delta y + k_{\int \Delta y dt}$ is served from the adder 8 to the second input of the adder 11 and to the third input of the adder 10, which reduces the deviation to zero $\Delta y = 0$. If a signal $\sigma_k = \sigma_1 - \sigma_2$ is served to the stern-steering actuator 14, and a signal $\sigma_h = -\sigma_1 - \sigma_2$ to the bow-steering actuator 13, joint control of the stern and bow rudders will ensure reduce to $\beta = 0$ and $\Delta y = 0$, that is, the proposed control scheme with aft and bow rudders ensures the location of the vessel on a route with a zero drift angle.

The connection of the adder 10, the bow steering actuator 13 and the bow steering sensor 12, shown in fig. 1, provide filtering of the input signal σ_h .

The connection of the adder 11, the aft steering actuator 14 and the aft steering sensor 15, shown in fig. 1, provide filtering of the input signal σ_k .

$$T \frac{d\delta_h}{dt} = \sigma_h - \delta_h, \quad T \frac{d\delta_k}{dt} + \delta_k = \sigma_k,$$

$$T \frac{d\delta_h}{dt} = \sigma_h - \delta_h, \quad T \frac{d\delta_k}{dt} + \delta_k = \sigma_k,$$

where T is the constant time of the aperiodic link.

This filtering scheme is used to reduce the number of actuations of the aft and bow rudders. In addition, as can be seen from the information scheme, each of the rudders participates in the development of the angular and lateral deviations, which means that the proposed scheme has control redundancy.

Results of research. The effectiveness of the control system proposed in [3] was carried out by mathematical modeling in the MATLAB environment of the control object in a closed circuit with control systems [1] and [3] for different values of side wind. The simulation results are presented in fig. 2–3.

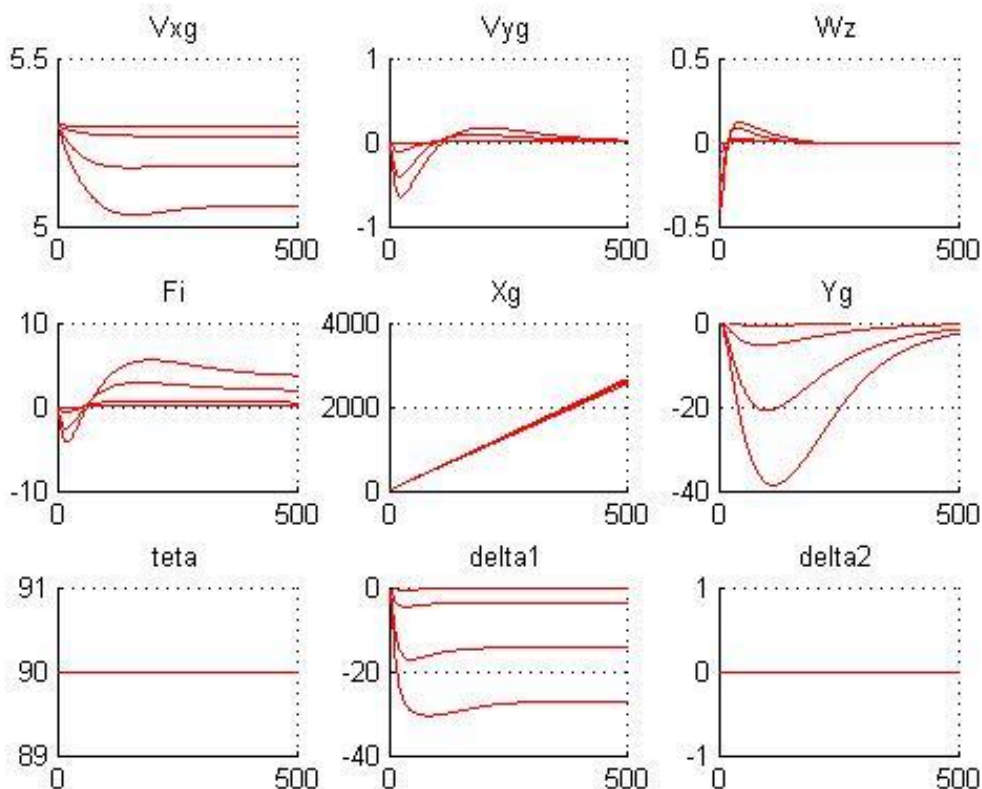


Figure 2 – Changing the parameters of the movement of the vessel when the stern rudder

Fig. 1 shows graphs of the time variation for the traditional control scheme: longitudinal velocity V_{xg} [m/s], the lateral velocity V_{yg} [m/s], the angular velocity W_z [deg/s], the course F_i [deg], the longitudinal displacement X_g [m], the lateral displacement Y_g [m], the angle of deviation of the telegraph $teta$ [deg]] and the angle of deviation of the stern rudder $delta1$ [deg] for the values of side wind $W_{yg} = 1, 2, 3, 3.5$ m/s.

Fig. 2 shows the graphs of the time variation for the proposed control scheme: longitudinal velocity V_{xg} [m/s], the lateral velocity V_{yg} [m/s], the angular velocity W_z [deg/s], the course F_i [deg], the longitudinal displacement X_g [m], the lateral offset Y_g [m], the angle of deviation of the telegraph $teta$ [deg], the angle of deviation of the stern rudder $delta1$ [deg], the angle of deviation of the bow rudder $delta2$ [deg] for the values of side wind $W_{yg} = 1, 2, 3, 3.5, 4.0, 4.5$ m/s.

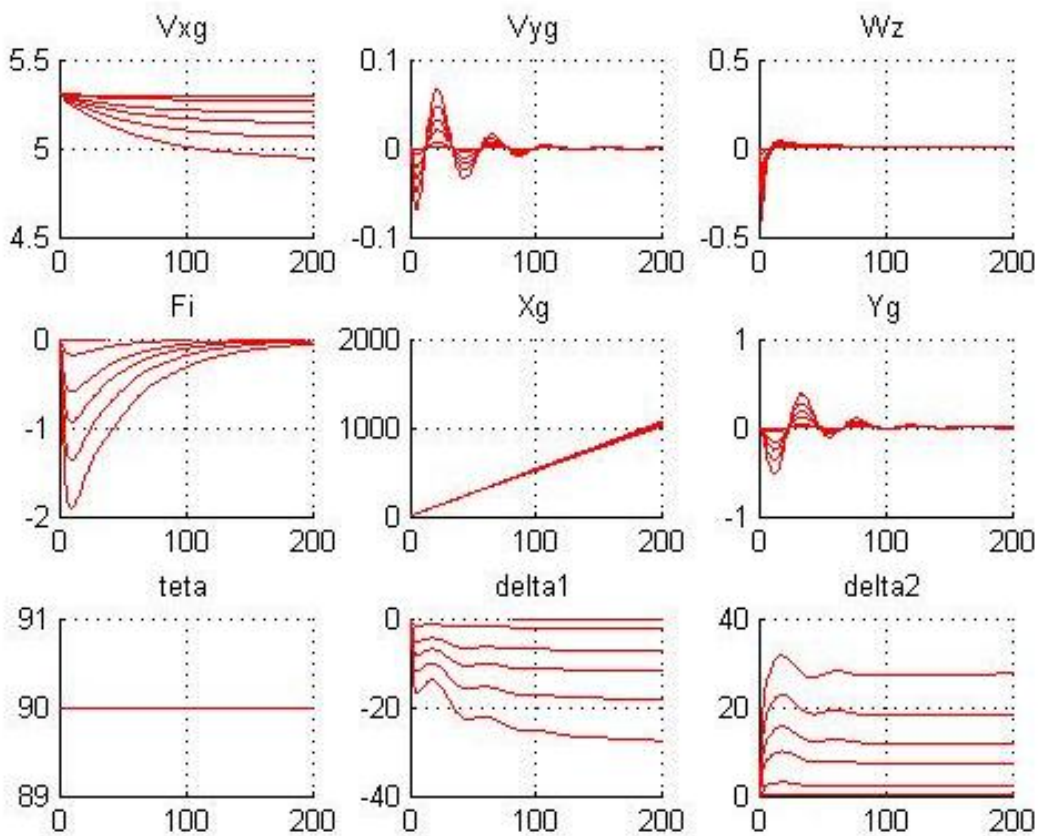


Figure 3 – Changing the parameters of the movement of the vessel in the management of the stern and bow rudders

Table 1 also shows the fuel consumption for the two control schemes: the control scheme using only the stern rudder and the control scheme using the stern and bow rudders for different values of the lateral wind speed W_{yg} .

Table 1 – Fuel consumption [kg] per 5 km for two control schemes

<i>Control scheme</i>	<i>Side wind speed Wyg [m / s]</i>	<i>Fuel consumption [kg] per 5 km</i>
traditional control scheme with only aft rudder	1	63,89
	2	64.227
	3	65.310
	3.5	66.826
	4.0	The system is not manageable
proposed control scheme with aft and bow rudders	1	63.89
	2	64.200
	3	65.012
	3.5	65.716
	4	66.758
	4.5	68.315
	5.0	The system is not manageable

Conclusions. From the above simulation results it can be seen that in the presence of external influences:

- transitional processes in the circuit with the stern and bow rudders flow several times faster than in the circuit with only one stern rudder;
- scheme with one stern rudder holds the vessel on the route, but does not provide a zero angle of drift;
- scheme with aft and bow rudders ensures that the vessel is held on a route with a zero drift angle;
- scheme with aft and bow rudders provides control for higher values of side wind than a circuit with only one aft rudder;
- scheme with aft and bow rudders is more economical compared with the scheme with only one aft rudder; the amount of fuel saved increases with increasing lateral component of the wind speed;
- the scheme with aft and bow rudders is more reliable due to redundancy of control channels.

REFERENCES

1. Vagushenko, L. L. & Cimbал, N. N. *Systemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna*. Odessa : Feniks, 2007.
2. Sharlaj, G.N. *Manevrirovaniye I upravleniye morskim sudnom*. Vladivostok, 2015.
3. Bikov, E. B., Kozlov, A. V. & Turkin, I. I. *Integrirovannyye sistemy upravleniya dvizheniem sudna. Avtomatizatsiya sudostroeniya*. Retrieved from: http://www.remmag.ru/admin/upload_data/remmag/09-3/AMT.pdf
4. Klyachko, L. M., Ostretsov, G. E. & Pamuhin, S. G. *Apparatura avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna*. Patent RF №2223197.
5. Zinchenko S.M., Grosheva O.O., Mateychuk V.M., Mamenko P.P., Pivovarov L.A. *Systema vodinnya po marshrutu*. Zayavka A201903052.

Зінченко С. М., Маменко П. П., Грошева О. О., Матейчук В. М. АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ РУХОМ СУДНА В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ

Розглянуті питання автоматичного керування рухом судна в умовах зовнішніх впливів. Проведено короткої огляд джерел, показані недоліки традиційних схем керування з одним кормовим кермом при наявності зовнішніх впливів. Запропоновано схему керування з додатковим носовим кермом, яка дозволяє зменшити витрату палива, кількість спрацювань виконавчих пристроїв, а також збільшити надійність за рахунок резервування по управлінню. Проведено порівняння запропонованої і традиційної схем керування математичним моделюванням в середовищі MATLAB.

Ключові слова: об'єкт управління, система управління, математична модель, числове інтегрування.

Зинченко С. Н., Маменко П. П., Грошева О. А., Матейчук В. Н. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Розглянуті питання підвищення якості та надійності автоматичного керування рухом судна в умовах зовнішніх впливів вітру і течії. Об'єктом дослідження є процес автоматичного керування рухом судна в умовах зовнішніх впливів вітру і течії. Предметом дослідження є метод і алгоритми підвищення якості та надійності автоматичного керування рухом судна в умовах зовнішніх впливів вітру і течії. Метою дослідження є розробка методу і алгоритмів підвищення якості та надійності автоматичного керування рухом судна в умовах зовнішніх впливів вітру і течії. Поставлена мета досягається за рахунок введення у схему керування рухом судна додаткового носового керма для отримання достатнього управління, формування, з використанням ПІД-регуляторів, сигналів керування бічним і кутовим рухами судна по відхиленню, швидкості відхилення та інтегралу відхилення вимірних значень бокового та кутового положення від програмних значень, розподілу сигналів керування між носовим і кормовим кермом таким чином, щоб забезпечувався рух судна без зміщення відносно маршруту з нульовим кутом дрейфу. Це дозволяє, у порівнянні з традиційною схемою керування, зменшити лобовий опір руху судна, знизити витрати пального, поліпшити перехідні процеси, зменшити кількість спрацювань виконавчих пристроїв, а також підвищити надійність за рахунок резервування (використання носового і кормового керма та подібних сигналів керування носовим і кормовим кермом). Запропонований метод і алгоритми перевірені математичним моделюванням у середовищі MATLAB процесів автоматичного керування рухом судна в умовах зовнішніх впливів вітру і течії. Експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу і алгоритмів, що дозволяє рекомендувати їх для практичного використання при розробці математичного забезпечення бортового контролера систем автоматичного керування рухом судна.

Ключевые слова: *объект управления, система управления, математическая модель, численное интегрирование.*

© Zinchenko S. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O., Mateychuk V. M.

Статтю прийнято
до редакції 10.07.19

ДИНАМІЧНЕ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СУДНА ПРИ ВІДХИЛЕННЯХ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ, ВЕЛИЧИНА ЯКОГО ПОРІВНЯНА З ПОХИБКАМИ ЙОГО ВИЗНАЧЕННЯ

Мальцев А. С., д.т.н., професор Національного університету «Одеська морська академія», e-mail: maltsev-as@nav.onma.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2389-230X

Метою дослідження є вдосконалення методів визначення параметрів зовнішніх збурень від вітру, хвилювання і течії, що викликають зсув осі бура від заданого положення і формування коригуючих зусиль для приведення системи буріння у заданому стані.

Проаналізовано метод математичного моделювання процесу динамічного позиціонування бурового судна. У результаті встановлено, що він займає багато часу для виконання необхідних розрахунків по впливу вітру, хвилюванню і течії, внаслідок чого необхідна інформація запізнюється на час прийняття рішення по управлінню процесом коригування, що ускладнює позиціонування і зменшує його безпеку.

Запропоновано метод експертної оцінки визначення величини зносу бурового судна щодо заданої позиції буріння, яка визначена високоточними геодезичними способами і виміром поточного положення бура шляхом перерахунку координат супутникової антени на вісь бура. Це дозволяє виключити необхідність розрахунку величини зміщення від вітру, хвилювання і течії й істотно підвищує швидкодію системи позиціонування.

Стаття містить розробку оптимального методу оперативного розрахунку величини зміщення осі бура, під дією зовнішніх збурень, методом експертної оцінки і підвищення точності динамічного позиціонування. Результати досліджень можуть застосовуватися при розробці нових навігаційних систем і при навчанні в морських навчальних закладах.

Ключові слова: математичне моделювання; експертна оцінка; зовнішні обурення; бурове судно; зміщення осі бура; система позиціонування.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.016-025

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. При аналізі роботи бурового судна, який позиціонує в заданій точці, головну увагу дослідника викликає вплив на його положення з боку зовнішніх чинників і їх відпрацювання судновою системою динамічного позиціонування (ДП). Вплив зовнішніх факторів специфічно і пов'язане з наявністю на борту бурового обладнання. В першу чергу до нього віднесемо бурову вишку (надводне обладнання) і бурову колону (підводне обладнання). Перша змінює вітровий вплив на судно, друга викликає вплив течії. Робота систем динамічного позиціонування також специфічна і не завжди прозора для судноводія. Досвід роботи з системою досягається не відразу і вимагає вдумливого аналізу експлуатаційних випадків, що вимагають людського втручання, на що здатний не кожен судноводій.

Технічна документація розробників проекту судна з системами ДП зазвичай містить радіальні діаграми швидкостей вітру, при яких можливо утримання судна за допомогою його рушійного-рульового комплексу. Однак, як показує практика експлуатації бурових суден, граничні значення швидкостей вітру, при яких можлива безаварійна робота бурового судна, істотно менше тої, яка встановлюється технічною документацією розробників проекту систем динамічного позиціонування. Тому оцінка безпеки виконання динамічного позиціонування бурового судна є актуальною проблемою.

Свою специфіку мають також рушії, які працюють при утриманні бурового судна на точці: носові допоміжні пристрої (НДП) і поворотні гвинтові колонки (ПГК), які працюють у групі, що істотно змінює умови їх обтікання, створюючи складні скоси потоків на них, і зусилля, що розвиваються ними. Цю специфіку судноводій може освоювати інтуїтивно в робочому режимі, послідовно накопичуючи і вдосконалюючи досвід роботи з системою, що вимагає значного часу і певних практичних навичок.

Альтернативою суб'єктивності в питанні оцінки безпеки виконання динамічного позиціонування бурового судна може бути математичне моделювання системи (моделі судна, бурового обладнання, рушіїв, зовнішніх впливів, моделі спільної роботи) і

комп'ютерне оцінювання безпеки роботи на основі таких моделей. Нагальна потреба такого моделювання гарантує актуальність цього дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У роботі [1] описані принципи побудови, алгоритми експлуатації і правила використання технічних засобів динамічного позиціонування при виконанні бурових робіт. Однак такі дані можуть бути використані тільки для загального ознайомлення з принципами побудови систем позиціонування. У роботі [2] описані принципи організації робіт по використанню систем динамічного позиціонування при виконанні бурових робіт при добуванні газу та правила технічної експлуатації відповідного обладнання.

У роботі [3] приведена методика розрахунку вітрових навантажень на надводну частину бурового судна, значення яких використовується для вибору коригуючих зусиль при виборі величини компенсаційних управляючих дій для утримання бурового пристрою в заданій позиції. Однак величина хвильових сил, яка діє на надводну частину не розглядається, що значно знижує точність отриманих результатів.

У роботі [4] розглянуті способи покращання роботи технічних засобів за рахунок зміни складу їх елементів та удосконалення локальних зв'язків між ними, для оптимізації роботи системи.

У роботі [5] описані питання безпечної експлуатації суден під час бурових робіт та визначення граничних значень зовнішніх впливів для оцінки умов, при яких роботу можливо продовжувати.

У роботі [6] приведено програмне забезпечення для оцінки параметрів стану системи та вибору режиму позиціонування методом математичного моделювання. Однак приведений метод вимагає визначення параметрів зовнішніх впливів та розрахунок величини зсуву для вибору режиму коригування. Це вимагає затрат часу для виконання розрахунків, в результаті чого дані запізнюються до моменту прийняття рішення по коригуванню.

Через вказані причини необхідно прискорити момент отримання даних про недопустимий зсув для оперативного прийняття рішення по коригуванню управляючих впливів.

Формулювання мети статті, постановка задачі. Метою дослідження є оцінка безпеки виконання динамічного позиціонування бурового судна методами експертної оцінки. Для досягнення поставленої мети в дослідженні необхідно вирішити такі завдання:

- визначити геодезичними способами задані координати осі бурового пристрою;
- визначити високоточними способами місце супутникової приймальної антени судна;
- перерахувати координати супутникової антени на координати осі бурового пристрою;
- розробити модель, що описує вектор відхилення осі бурового пристрою від заданого;
- розробити модель, що описує роботу підрулюючих пристроїв, для формування вектора компенсації зсуву, шляхом створення рівнодіючої сили, яка дорівнює за величиною силі збурення і протилежна їй за напрямком;
- на підставі часткових моделей створити комплексну модель системи, що описує поведінку бурового судна в режимі динамічного позиціонування.

Об'єктом дослідження є бурове судно, оснащене системою динамічного позиціонування, яке працює в режимі утримання судна в точці буріння при зміні зовнішніх збурень. **Предметом дослідження** є розробка алгоритму коригування відхилення бурового судна, під дією зовнішніх збурень.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. При виконанні роботи застосовувався експериментально-теоретичний метод дослідження. Експериментальна розрахункова частина полягала в обробці результатів

експериментів по визначенню зміщення бурового пристрою від зовнішніх збурень високоточними способами щодо заданого положення осі бура.

При виконанні процесу коригування зміщення використовується два способи управління роботою керувальних пристроїв: ручний та автоматичний. При ручному способі виникає проблема зайнятості судноводія, який вибирає та реалізує алгоритм використання пультів управління пристроями.

Для вирішення проблеми використання зайнятості робочого часу судноводія, зазвичай [7] вводять критерій залежності ймовірності безпомилкового прийняття рішення по управлінню процесом і коефіцієнта завантаження судноводія рішенням навігаційних завдань. Коефіцієнт K_3 визначається виразом:

$$K_3 = t_p / \Delta t, \tag{1}$$

де t_p – час, необхідний для рішення визначеної задачі, наприклад при оцінці обстановки розходження суден і виконанні потрібних розрахунків з максимально можливою швидкістю; Δt задана дискретність рішення задачі або час, який має судноводій.

Таку залежність характеризують графіком, приведеним на рис. 1.

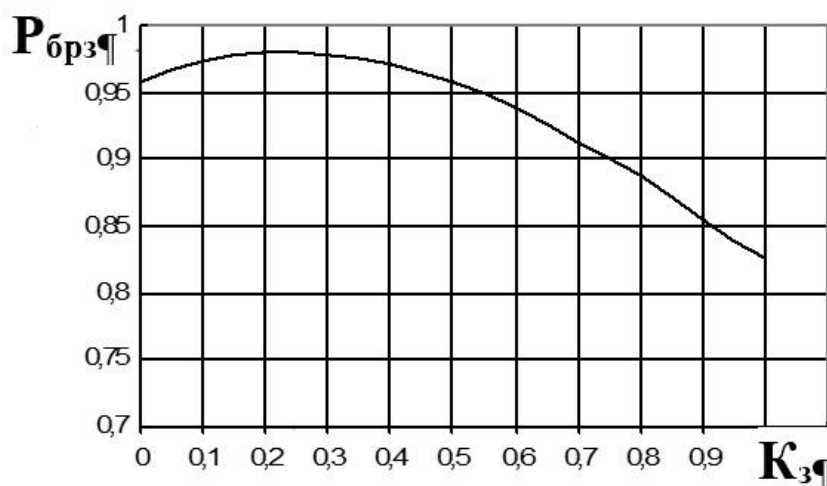


Рисунок 1 – Залежність $P_{брз}$ від коефіцієнту K_3 , $P_{брзmax} = 0,981$, $K_3 = 0,26$.

З графіка видно, що максимальне значення ймовірності безпечного рішення задачі (РБРЗ) рівно 0,981 при оптимальному коефіцієнті зайнятості судноводія $K_{3opt} = 0,26$. Представимо зв'язок цих величин у табл. 1 виведення результатів розрахунку $P_{брз} = f(K_3)$.

При класичному контролі над рухом судна і виконанні операцій зі зняття відліку приладу визначення місця, нанесення на карту і прийняття рішення щодо коригування руху, якщо з'явилось відхилення, займає близько 2-х хвилин.

Таблиця 1 – Залежність безпомилкового прийняття рішення від зайнятості судноводія

$P_{брз}$	0,958	0,973	0,978	0,981	0,978	0,971	0,957	0,939	0,912	0,888	0,855	0,825
K_3	0	0,1	0,2	0,26	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Таким чином, для забезпечення безпомилкового вирішення навігаційних завдань при коригуванні відхилення бура з ймовірністю 0,95, як того вимагається рекомендаціями ММО, то дискретність контролю відхилення на підставі рис. 1 дорівнює коефіцієнту запасу $K_3 = 0,26$. Час на візуальне визначення відхилення буру і прийняття рішення складає 5 с, оптимальний інтервал часу для контролю відхилення – $\Delta t = t_p / K_3 = 0,083 / 0,26 = 19,1$ с.

Скорочення раціонального інтервалу часу Δt призведе до зменшення ймовірності

Р_{брз}. У разі використання ЕКНІС раціональна дискретність контролю обстановки складає $\Delta t \approx 5$ хв. У проміжках між операціями на ЕКНІС вахтовий помічник може виконувати інші свої функції. Однак, перед поворотом або при зближенні з іншими суднами спостереження повинні проводитися частіше, а при виконанні динамічного позиціонування навіть безперервно.

Через ці особливості потрібна висока точність попереднього планування координат осі буру геодезичними методами, автоматизація обробки інформації для забезпечення швидкодії всієї системи управління пристроями утримання судна в позиції буріння.

При виконанні вимірювань параметрів руху кожний із них визначається з певною похибкою, яка, зазвичай, приводиться в паспортних даних навігаційного приладу. Однак при подальшому використанні даних параметрів до них добавляється спадкова похибка процесу розрахунку.

Аналіз спадкових похибок результатів обчислень, які приведені в табл. 2, в роботах [8, 9] були зроблені наступні висновки відносно способів зменшення їх значення. Відомо, що похибки, в залежності від їх походження, розглядають як інструментальні, методичні і спадкові. Інструментальні похибки визначаються точністю приладів, які вимірюють даний параметр. Методичні похибки обумовлені використанням спеціальних чисельних методів при розрахунку різних функцій – тригонометричних, логарифмічних і т.д. Спадкові похибки виникають через їх трансформацію вихідних даних при виконанні обчислень. При цьому розповсюдження спадкових похибок при виконанні обчислюваних процедур здійснюється за певними закономірностями [8, 9], які наведені в табл. 2.

На підставі аналізу закономірностей формування похибок встановлено:

- при складанні чи відніманні довгої послідовності чисел потрібно спочатку оперувати з найменшими по модулю числами;
- потрібно уникати складання чисел, які відрізняються на декілька порядків;
- для зменшення похибок округлення чисел, проміжкові дії рекомендується виконувати, зберігаючи після коми на 1–2 знака більше, чим необхідно в результаті.

Таблиця 2 – Розповсюдження спадкових похибок при обчисленнях

<i>Операція обчислення</i>	<i>Вигляд функції</i>	<i>Абсолютна похибка</i>	<i>Відносна похибка</i>
Складання	x_1+x_2	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$(\Delta x_1+\Delta x_2)/ x_1+x_2 $
Віднімання	x_1-x_2	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$(\Delta x_1+\Delta x_2)/ x_1-x_2 $
Множення	$x_1 \times x_2$	$\Delta x_1 \times x_2 + \Delta x_2 \times x_1 $	$\Delta x_1/ x_1 + \Delta x_2/ x_2 $
Розподіл	x_1/x_2	$(\Delta x_1 \times x_2 + \Delta x_2 \times x_1) / x_2$	$\Delta x_1/ x_1 + \Delta x_2/ x_2 $
Зведення у ступінь	X^n	$\Delta x \times n \times x ^{n-1}$	$ n \times \Delta x/ x $

Це питання важливо тому, що при використанні систем ППР ми зобов'язані призначити допустиму величину параметру, при значенні якого система повинна коригувати фактичне значення до планових значень. Проблема виникає тоді, коли відхилення параметра від планової величини дорівнює чи близько по значенню похибці вимірювань та обчислень.

Тому, перед початком бурових робіт необхідно визначити задані координати точки буріння геодезичними способами, значення яких залишається незмінним протягом всього часу виконання бурових робіт в даній точці.

Для визначення величини відхилення осі бура від потрібного положення необхідно визначити координати місця супутникової антени судна високоточними способами, використовуючи диференційний режим. При цьому точність повинна бути близькою до геодезичних способів.

Після того як визначили місце супутникової антени судна, її координати необхідно перерахувати на вісь бура, як приведено на рис. 2.

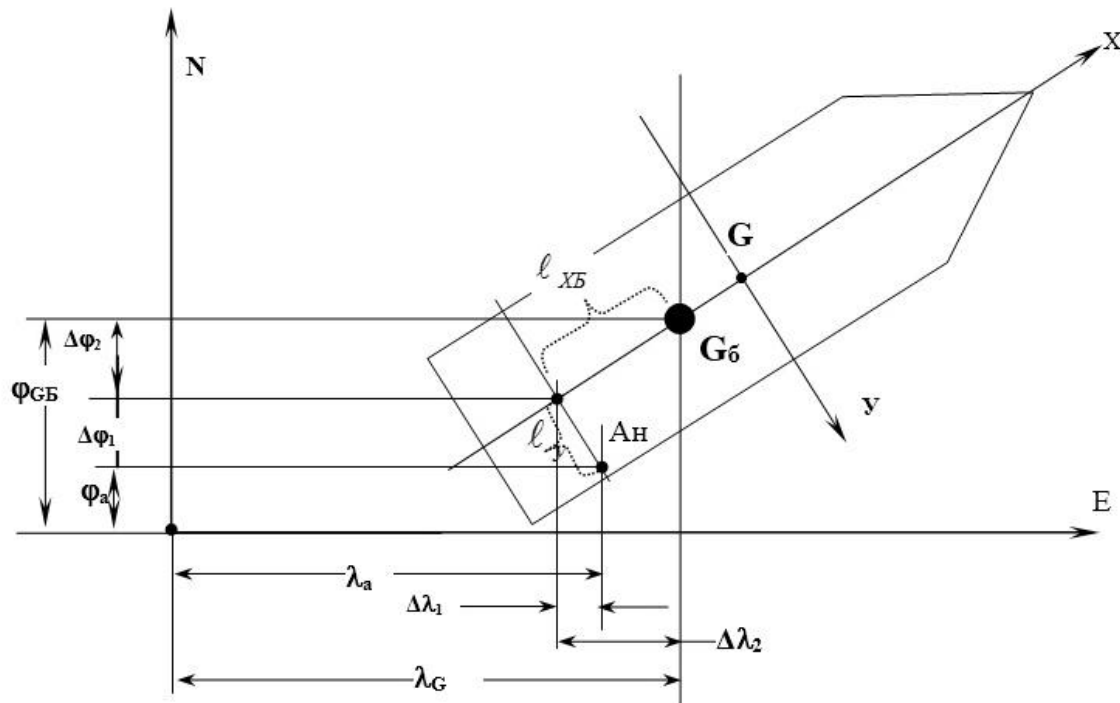


Рисунок 2 – Приведення координат антени до осі бура

Геометричний аналіз алгоритму розрахунку поправок координат при перерахунку показав, що їх величина не являється постійною [10]. Вона міняється в залежності від координат супутникової антени, місця її розташування на судні та текучого значення курсу.

Координати ЦБ φ_{GB} и λ_{GB} розраховуються по φ_a и λ_a при курсі K в діапазоні $0^\circ \leq K \leq 90^\circ$, з урахуванням рис. 2, при умові $\varphi_a \geq 0$, $\lambda_a \geq 0$, за наступними залежностями:

$$\varphi_G = \varphi_a + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \varphi_a + \Delta\varphi_G \text{ і } \lambda_G = \lambda_a - \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 = \lambda_a + \Delta\lambda_G, \quad (2)$$

де $\Delta\lambda_1$ – проекція відстані точки розташування антени Ан від ДП, в милях; $\Delta\lambda_2$ – проекція відстані точки розташування антени від центра бура (ЦБ), у милях; $\Delta\varphi_1$ – проекція відстані точки розташування антени від ДП на вісь φ , у милях; $\Delta\varphi_2$ – проекція відстані точки розташування антени від ЦБ на вісь φ , у милях; $\Delta\lambda_G$ и $\Delta\varphi_G$ – поправки координат ЦБ.

У розвернутому вигляді рівняння (2) можна записати так:

$$\Delta\lambda_1 = l_y \cdot \cos K; \Delta\lambda_2 = l_x \cdot \sin K, \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_1 = l_y \cdot \sin K; \Delta\varphi_2 = l_x \cdot \cos K. \quad (4)$$

Тоді, після підстановки (3) і (4) в (2) отримаємо текучі координати буру:

$$\lambda_{GB} = \lambda_a - l_y \cdot \cos K + l_{xB} \cdot \sin K \quad (5)$$

$$\varphi_{GB} = \varphi_a + l_y \cdot \sin K + l_{xB} \cdot \cos K \quad (6)$$

Після того як текучі координати буру визначені можна приступати до автоматичного розрахунку величини зсуву між заданими геодезичними координатами φ_r, λ_r і текучими $\varphi_{GB}, \lambda_{GB}$ за такими формулами:

$$PД = \lambda_{GB} - \lambda_{Г}. \quad (7)$$

$$PШ = \varphi_{GB} - \varphi_{Г}. \quad (8)$$

Значення меридіональних частин в екваторіальних хвилинах для еліпсоїда Красовського може бути обчислено за формулою:

$$MЧ = 3437,7468 \cdot \ell n \left\{ \operatorname{tg} (45^{\circ} + \varphi / 2) \left(\frac{1 - e \cdot \sin \varphi}{1 + e \cdot \sin \varphi} \right)^{e/2} \right\}, \quad (9)$$

де $MЧ$ – меридіональна частина паралелі φ , екв. хв.; φ – географічна широта; e – ексцентриситет земного еліпсоїда.

Найменування $MЧ$ однаково з найменуванням широти φ . Для отримання різниці меридіональних частин ($PMЧ$) необхідно розрахувати $MЧ_{GB}$, потім $MЧ_{Г}$, і після цього алгебраїчну різницю:

$$PMЧ = MЧ_{GB} - MЧ_{Г}, \quad (10)$$

Найменування $PMЧ$ вказується від $MЧ_{Г}$ до $MЧ_{GB}$, тобто відповідає найменуванню $PШ$. Напрямок знесення IK_3 розраховують за формулою:

$$\operatorname{tg} IK_3 = \frac{\lambda_{GB} - \lambda_{Г}}{PMЧ}. \quad (11)$$

Напрямок знесення отримують у четвертному рахунку і для перерахунку в круговий необхідно враховувати, що перша буква чверті відповідає найменуванню $PШ$, а друга $PД$. Тоді напрям вектора рівнодіючої коригуючих сил IK_{kop} можна розрахувати по залежності:

$$IK_{kop} = IK_3 + 180^{\circ}. \quad (12)$$

Величину зсуву визначають за формулою:

$$d_{\text{тек}} = PШ \cdot \sec IK_3. \quad (13)$$

Розрахунки за наведеними формулами (5)–(13) мають ту особливість, що обчислення відбуваються в районі понад малих відстаней, які вимагають розрахунків до десятитисячних доль хвилини. Цю вимогу необхідно виконувати для того, щоб зменшити обчислювальні похибки до мінімуму після округлення результатів. Оскільки значення $MЧ$ в таблиці МТ 2000 дано з точністю до 0,1 екваторіальної хвилини, то необхідно проводити розрахунок $MЧ$ за формулою (9) з точністю до п'ятого знака, з наступним округленням останньої цифри.

Для полегшення роботи оператора по управлінню коригуванням відхилення бура і підвищення наочності процесу управління необхідно ввести в склад пульта управління індикатор, який зображає відхилення осі бура від геодезичних координат точки буріння. Вісь буде знаходитися в центрі, з характерними колами, радіус яких буде дорівнювати радіальній СКП похибки визначення положення осі бура M_0 та допустимому відхиленню бура за рахунок зовнішніх впливів $d_{\text{дон}}$, при якому буровий пристрій зберігає свою робочу здатність, як показано на рис. 3.

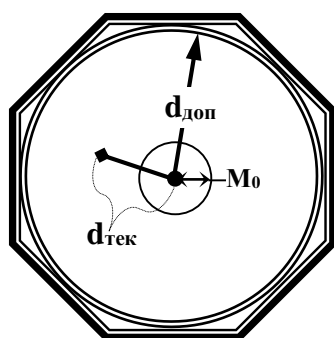


Рисунок 3 – Індикатор зсуву

Для перевірки роботи комп'ютерної програми зробимо розрахунок контрольного прикладу вручну, при значенні $d_{доп} = 10м$.

При роботі судна в координатах $\varphi_{Г}=20^{\circ}14,6000' S$, $\lambda_{Г}=5^{\circ}22,7000' W$ отримали місце з використанням супутникової системи в диференційному режимі з радіальною СКП рівною $\pm 1м$ і $\varphi_{ГБ} = 20^{\circ}14,605' S$, $\lambda_{ГБ} = 5^{\circ}22,703' W$

Для того, щоб показати порядок величин, з якими автоматичному пристрою доведеться працювати, розглянемо контрольний приклад з гранично малим відхиленням. Результати виконаних розрахунків наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахунок малих значень параметрів зносу зовнішніми впливами

$\lambda_{ГБ} = 5^{\circ}22,703' W$		$\varphi_{ГБ} = 20^{\circ}14,605' S$		$МЧ_{ГБ} = 1432,705'$	
$\lambda_{Г} = 5^{\circ}22,7000' W$		$\varphi_{Г} = 20^{\circ}14,6000' S$		$МЧ_{Г} = 1432,7'$	
$\lambda_{ГБ} - \lambda_{Г}$	$0^{\circ}0,003' к W$	РШ	$0^{\circ} 0,005' к S$	РМЧ	$= 0,005' к S$
$\lambda_{ГБ} - \lambda_{Г}$	$0,003' к W$	РШ	$0, 005' к S$		
Напрямок зносу IK_c					
РД	$0,003 к W$	$lg = -2,5229$			
РМЧ	$0,005' к S$	$lg = -2,3010$			
IK_3	$30^{\circ}53'$	$lg tg IK_3$	$-0,2219$		
IK_3	$210^{\circ}53'$	$tg IK_3$	$0,598$		
Розрахунок відстані зносу $d_{тек}$					
РШ	$0, 005' к S$	$lg = -2,3010$		Оскільки $d_{тек} > M_0$ то це означає, що відбулося недопустиме відхилення і коригування потрібне	
IK_c	$210^{\circ}53'$	$lg sec IK_c = -0,0614$			
$d_{тек}$	$0,005' = 9.3м$	$lg d_{тек}$	$-2,3624$		

Безперервний моніторинг зміщення автоматично дозволяє своєчасно оцінити неприпустиме зміщення щодо планових координат буру, визначених високоточним геодезичним способом, та компенсувати вплив зовнішніх збурень для безпечного виконання бурових робіт.

Оскільки потрібне коригування пристроєм динамічного позиціонування, то необхідно виконати розрахунок напрямку і величини вектора компенсуючого впливу. Напрямок вектору сили визначається по формулі (12). Для формування величини сили, необхідної для адекватного реагування на величину впливу зовнішніх факторів, необхідно розробити спеціальний пристрій. Формалізована модель такого пристрою залежить від типу рушійного-рульового комплексу, який установлений на судні, тому заздалегідь синтезувати

його на всі типи силових установок неможливо. Тому це питання потребує окремого розгляду і не являється предметом дослідження в даній роботі.

Висновки і перспектива подальшої роботи в даному напрямку. Розроблені методи оцінки безпечного виконання динамічного позиціонування бурового судна способами експертної оцінки відрізняються від відомих, які використовують математичне моделювання, тим що відпадає необхідність виміряти параметри зовнішніх збурень та розраховувати їх величину. Подальші розрахунки вимагають часу, якого обмаль, у результаті втрачається оперативність і визначення команди на пристрої позиціонування запізнюється до моменту прийняття рішення.

Подальший напрямок досліджень полягає в необхідності підвищення точності визначення текучого місця осі бура, скорочення спадкових похибок обчислень та розробці системи формування коригуючих зусиль для компенсації зовнішніх впливів.

Результати досліджень можуть застосовуватися при розробці нових навігаційних систем і при навчанні в морських навчальних закладах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hubert, Fay (1990). *Dynamic Positioning Systems. Principles. Design and Applications*. Editions OPHRYS.
2. РД 51-10. – 98. Организация службы динамического позиционирования. РАО «Газпром». 2009. 182 с.
3. Барахта А. В., Юдин Ю. И., Пашенцев С. В. Расчет ветровых нагрузок на буровую вышку бурового судна. *Эксплуатация морского транспорта*. 2010. № 3 (61). С. 40–42.
4. Барахта А. В., Юдин Ю. И. Структура и принципы работы систем динамического позиционирования. *Вестник МГТУ : Труды Мурман. гос. техн. ун-та*. 2009. Т. 12, № 2. С. 255–258.
5. Юдин Ю. И., Барахта А. В. Проблемы обеспечения функционирования, безопасности и качества при эксплуатации судов с динамическими системами управления. *Вестн. МГТУ : Труды Мурман. гос. техн. ун-та*. 2009. Т. 12, № 2. С. 259–262.
6. Оценка безопасности функционирования буровых судов на точке : св-во об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2011610166. Рос. Федерация / С.В. Пашенцев, А.В. Барахта, А.Ю. Юдин; правообладатель ФГОУ ВПО «Мурман. гос. техн. ун-т». №2011610166 ; зарег. 11.01.2011.
7. Кушнарв А. Г., Михальский В. А. Проблемы оценки навигационной безопасности плавания кораблей. *Программные продукты и системы*. Санкт-Петербург : Изд-во ГИИНТИ. 2016. № 1 (11). С. 51–55. doi: 10.15827/0236-235X.113.051-055.
8. Пристрій для інформаційного забезпечення лоцманської проводки морського судна : Пат. 78679 Україна, МПК G08G 3/00, B63B 49/00. / А. С. Мальцев, І. І. Ворохобін, В. В. Голюков, В. І. Соколенко. № u 2012 11569; заявл. 08.10.2012 ; опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.
9. Соколенко В. И. Система поддержки принятия решения при движении морского судна в стесненных условиях. *Материалы XX Международной конференции по автоматическому управлению*, 25-27 сентября 2013 г. Николаев : НУК, 2013. С. 256.
10. Maltsev S. E., Maltsev A. S., Sokolenko V. I. The navigation device for converting the coordinates of the satellite antenna of the vessel to the center of gravity. Навигационное устройство пересчета координат спутниковой антенны судна на центр тяжести. *Судовождение : сб. научн. трудов*. Одесса: ИздатИнформ, 2018. Вып. 28. С. 210–221.

REFERENCES

1. Hubert Fay. (1990). *Dynamic Positioning Systems. Principles. Design and Applications*. Editions OPHRYS.
2. RD 51-10. – 98. (2009). Organizaciya sluzhbih dinamicheskogo pozicionirovaniya. RAO «Gazprom».
3. Barakhta, A. V., Yudin, Yu. I. & Pashencev, S. V. (2010). Raschet vetrovihkh nagruzok na burovuyu vihshku burovogo sudna. *Ehkspluatatsiya morskogo transporta*, 3 (61), 40–42.
4. Barakhta, A. V. & Yudin, Yu. I. (2009). Struktura i principih rabotih sistem dinamicheskogo pozicionirovaniya. *Vestnik MGTU : Trudi Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, V.12, № 2, 255–258.
5. Yudin, Yu. I. & Barakhta, A. V. Problemi obespecheniya funkcionirovaniya, bezopasnosti i kachestva pri ehkspluatatsii sudov s dinamicheskimi sistemami upravleniya. *Vestnik MGTU : Trudi Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, V.12, № 2, 259–262.
6. Ocenka bezopasnosti funkcionirovaniya burovihkh sudov na tochke : svidetelstvovo № 2011610166. Ros. Federaciya / С. В. Pashencev, А. V. Barakhta, А. Yu. Yudin; pravoobladatelj FGOU VPO «Murman. gos. tekhn. un-t»b, zareg. 11.01.2011.
7. Kushnarev, A. G. & Mikhaljskiyj, V. A. (2016). Problemih ocenki navigacionnoj bezopasnosti plavaniya korableyj. *Programmnihe produktih i sistemih*. Sankt-Peterburg: Izd-vo GIINTI, 1 (11), 51–55. doi: 10.15827/0236-235X.113.051-055
8. *Prystrij dlia informatsiinoho zabezpechennia lotsmanskoi provodky morskoho sudna* : patent 78679 Ukraina, MPK G08G 3/00, V63V 49/00. ; Maltsev A. S., Vorokhobin I. I., Holikov V. V., Sokolenko V. I. ; # U 2012 11569; zaiavl. 08.10.2012; opubl. 25.03.2013. Biul. # 6.
9. Sokolenko, V. I. (2013). Sistema podderzhki prinyatiya resheniya pri dvizhenii morskogo sudna v stesnennihkh usloviyakh. *Materialih XX Mezhdunarodnoj konferencii po avtomaticheskomu upravleniyu*. Nikolaev : NUK, 256.
10. Maltsev, S. E., Maltsev, A. S. & Sokolenko, V. I. (2018). The navigation device for converting the coordinates of the satellite antenna of the vessel to the center of gravity. *Sudovozhdenie : Sbornik nauchnikh trudov*, V. 28 Odessa : «IzdatInform», 210–221.

Мальцев А. С. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ СУДНА ПРИ ОТКЛОНЕНИЯХ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ, ВЕЛИЧИНА КОТОРЫХ СРАВНИМА С ПОГРЕШНОСТЬЮ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Целью исследования является совершенствование методов определения параметров внешних возмущений от ветра, волнения и течения, вызывающих смещение оси бура от заданного положения и формирования корректирующих усилий для приведения системы бурения в заданное состояние.

Выполнен анализ метода математического моделирования процесса динамического позиционирования бурового судна. В результате установлено, что он занимает много времени для выполнения необходимых расчетов во воздействие ветра, волнения и течения, вследствие чего необходимая информация запаздывает ко времени принятия решения по управлению процессом корректировки, что усложняет позиционирование и уменьшает его безопасность.

Предложен метод экспертной оценки определения величины сноса бурового судна относительно заданной позиции бурения, которая определена высокоточными геодезическими способами и измерение текущего положения бура путем пересчета координат спутниковой антенны на ось бура. Это позволяет исключить необходимость расчета величины смещения от ветра, волнения и течения и существенно повышает быстродействие системы позиционирования.

Статья содержит разработку оптимального метода оперативного расчета величины смещения оси бура, под действием внешних возмущений, методом экспертной оценки и повышение точности динамического позиционирования. Результаты исследований могут применяться при разработке новых навигационных систем и при обучении в морских учебных заведениях.

Ключевые слова: математическое моделирование; экспертная оценка; внешние возмущения; буровое судно; смещение оси бура; система позиционирования.

Maltsev A. S. DYNAMIC SHIP POSITIONING IN DECLINING OF THE CONTROL PARAMETER, THE QUANTITY OF WHICH IS COMPARABLE WITH THE ERRORS OF ITS DETERMINATION

The aim of the study is to improve methods for determining the parameters of external disturbances of wind, waves and currents, causing the drill axis to shift from a given position and to form corrective forces to bring the drilling system to a predetermined state.

The analysis of the method of mathematical modeling of the process of dynamic positioning of a drilling vessel has been carried out. As a result, it has been found that it takes a lot of time to perform the necessary calculations on the effects of wind, waves and currents, as a result of which the necessary information is late by the time the decision is made to manage the adjustment process, which complicates positioning and reduces its safety.

A method for expert evaluation of determining the drift value of a drilling vessel relative to a given drilling position, which is determined by high-precision geodetic methods and measuring the current position of the drill by converting the coordinates of the satellite antenna to the drill axis, is proposed. This eliminates the need to calculate the amount of displacement from the wind, waves and currents and significantly increases the speed of the positioning system.

The methods of estimation of safe performance of dynamic positioning of a drilling vessel by methods of expert estimation differ from the known ones that use mathematical modeling, in that there is no need to measure the parameters of external perturbations and to calculate their magnitude. Further calculations take time, which is not enough, as a result, the efficiency is lost and the determination of the command on the positioning device is delayed until the decision is made.

A further direction of research is the need to improve the accuracy of determining the current location of the storm axis, to reduce hereditary errors of calculations, and to develop a system of forming corrective efforts to compensate for external influences.

The research findings can be applied to the development of new navigation systems and to training in maritime schools.

Keywords: *mathematical modeling; expert review; external disturbances; drilling vessel; drill axis offset; positioning system.*

© Мальцев А. С.

Статтю прийнято
до редакції 30.09.19

MODEL OF ATTENTION DISTRIBUTION OF THE NAVIGATOR WHILE KEEPING A NAVIGATIONAL WATCH

Nosov P. S., Ph.D., Associate Professor of Navigation and Electronic Navigation Systems Department, Kherson State Maritime Academy, e-mail: pason@ukr.net, ORCID:0000-0002-5067-9766;

Ben A. P., Ph.D., Professor, Associate Professor, Deputy Rector for scientific and pedagogical work, Kherson State Maritime Academy, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489;

Nosova H. V., Senior Lecturer, Kherson Polytechnic College of Odessa National Polytechnic University, e-mail: nos.gal77@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1273-5656;

Novikov V. I., Senior Lecturer, Head of Laboratory «Shipbuilding and Power Engineering», Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson Branch, e-mail: vertigogo@i.ua, ORCID: 0000-0002-1823-4919.

The aim of the article is to develop a formal model and its geometric approximation that allows to describe the logic of the distribution of attention of the navigator while maneuvering including the possibility of discrete forecasting. To build this model, an analysis of international maritime regulations and situations was carried out, which allowed to determine the formal structure and logical principles of the model close to real situations while solving navigation problems.

The article provides formal approaches that take into account individual factors of the navigator's predisposition to the perception of navigational situations and the associated dangers. A geometric approximation of the model in the form of a Cartesian cube divided into eight quadrants with local coordinate systems is proposed. This made it possible to combine data on the distribution of attention relative to eight objects according to STCW-78. Formal and logical constructions that allow to separate the conditions of the attention distribution model depending on the stage of the execution of a navigational task within the cycle have been developed. In this regard, the approaches for predicting model states using Markov discrete circuits in the conditions of continuous time have been proposed. Automation of the forecast made it possible in real time to obtain data about the speed of perception and processing of navigational data for transition to subsequent states in order to reduce the likelihood of catastrophic situations related to sea transport.

Keywords: model of attention distribution, human factor, navigator, catastrophe forecasting, maritime safety.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.026-034

Introduction. When keeping a navigational watch, the boatmaster faces a number of tasks that require concentration on certain objects or phenomena. According to convention STCW-78 [1] the navigator has great requirements that imply universal control of many factors affecting the operation of the vessel. The situation becomes even more complicated in the case of complex maneuvers in bad weather conditions and peculiarities of location mapping [2]. Given the high accident rates while watch keeping on sea transport, an important task is to reduce the risk indicators associated with loss of attention at important navigational objects and phenomena.

In order to objectively assess the possible risks associated with missing the necessary information to perform navigation tasks and maneuvering, it is necessary to develop a model for the distribution of attention the navigator. In known scientific literature, classifiers of factors affecting human error in the course of controlling a vessel are presented [3]. However, there is no a description of the mechanism of attention distribution on the basis of a formal model. Along with this, in many literary sources there are descriptive recommendations aimed at reducing the risks associated with the human factor in general [4, 5]. A number of scientific papers are devoted to the analysis of the psychological and physiological components, which significantly complements the idea of this article, but does not allow us to solve the task in full [6–10].

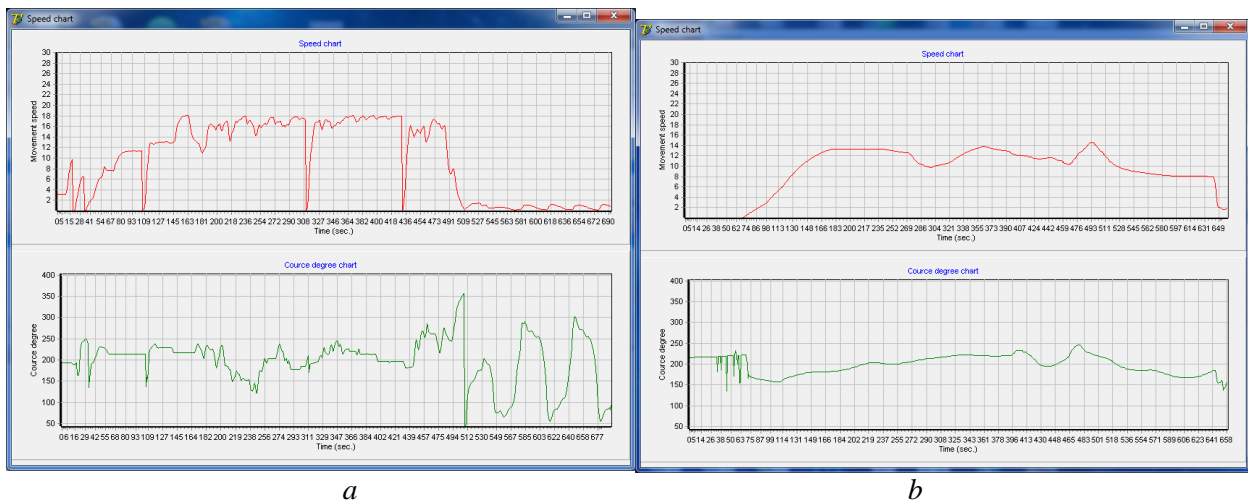


Figure 1 – Differences in the curvature of the trajectory during the passage of the Bosphorus

A series of experiments based on navigation simulator NTPRO 5000 of Kherson State Maritime Academy for two years allowed to identify random fluctuations in the behavior of boatmasters, the nature of which is not fully determined. Figure 1. *a, b*, shows that the passage of a complex turn in the Bosphorus Strait according to the parameter of speed and turn of the rudder of the wheel by watch 1 and watch 2 differs in the curvature of the trajectory.

Three months later, the maneuver of turning the same level of difficulty with the same watch teams in the Hong Kong location resembles the maneuver in the Bosphorus (Fig. 2 *a, b*).

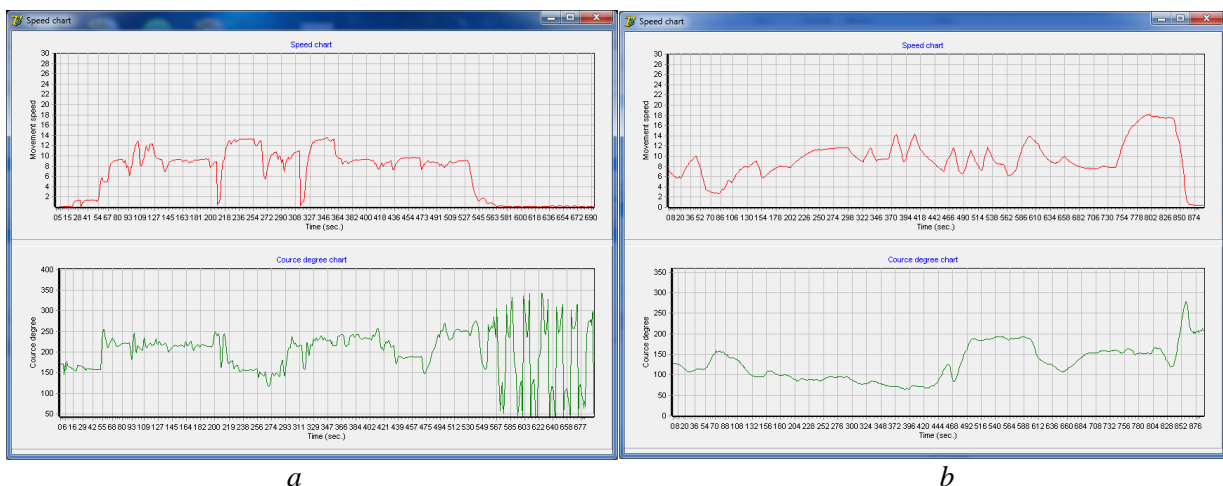


Figure 2 – A typical pattern of behavior in Hong Kong

The question arises, what is the logic of the perception of the situation and the distribution of attention by the navigator while maneuvering? Is it possible to build a formal model that would not only determine the causes of random fluctuations in decision-making, but also determine the mechanisms for predicting such situations at discrete intervals?

After analyzing the experimental data, it should be noted that fluctuations occur both at the micro level and at the macro level, as evidenced by the trajectory of the maneuver in the Bosphorus Strait (Fig. 3 *a, b*).

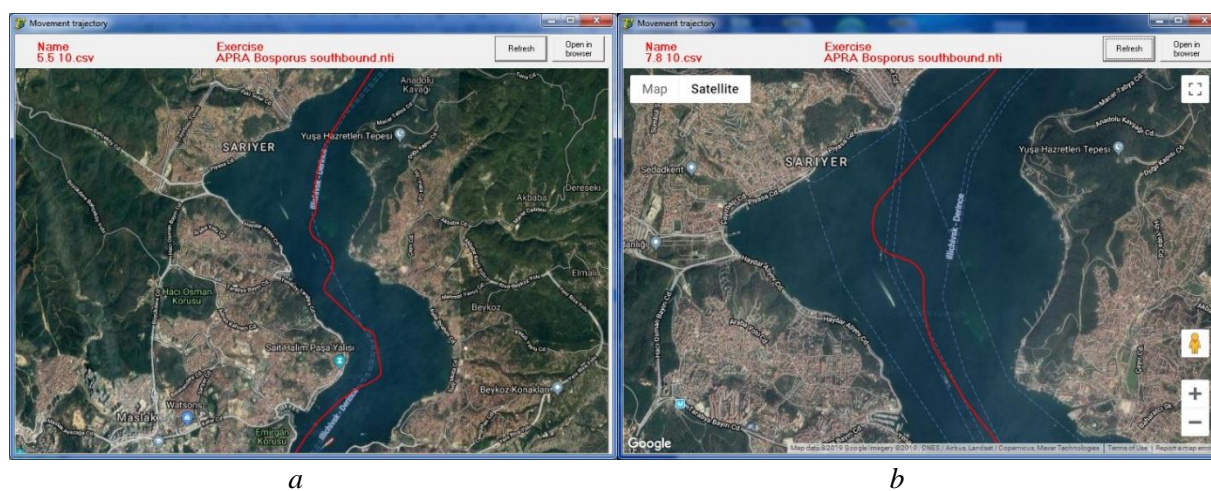


Figure 3 – The trajectory at the macro level (satellite)

Obviously, the difference between the two observed situations consists in the time of manifestations, the time or cycle of analysis-action of the navigator can vary significantly. It should be noted that the nature of the manifestations is identical in both cases; it is important to determine the individual time range that forms the decision-making cycle.

The **purpose** of the article is to develop a formal model and its geometric approximation, which allows to describe the logic of the distribution of attention the navigator while maneuvering including the possibility of discrete forecasting.

The solution of the problem. To solve the main problem of the article, it is necessary to perform a number of steps that can be divided into groups:

- development of a formal-geometric model for the distribution of attention by the navigator while navigating;
- determination of the logic and mechanisms of attention distribution within the framework of the model;
- prediction method selection;
- development of software for automatic execution of the forecast.

During the analysis of situations arising at the time of operation of the vessel and the maintenance of the navigational watch, a feature was found that formed the basis of the developed model for the distribution of attention of the navigator. This feature consists in the fact that attention tied to objects has its own limitations, that is, it cannot be infinite and depends on the number of objects. In the studies of Professor V.A. Krisilov, it is indicated that the maximum number of objects ranges from 7 to 9 [11]. In addition, the amount of attention also has limitations and “fades” or “depletes” over time. So at a certain point in time, the amount of attention is constant and can be unevenly distributed to objects of concentration. If we represent this model in a geometric form, then it will be fair to determine that if some object is given more attention, then in other dimensions - less.

After analyzing the international convention STCW-78, it becomes logical to identify eight objects of attention in real time that form parallel information channels that require constant attention the navigator captain. These objects include:

1. Weather condition, visibility.
2. Attention necessary when navigating traffic separation schemes.
3. Traffic intensity.
4. The proximity of navigational hazards.
5. ECDIS.
6. RADAR.
7. Steering.
8. Machine telegraph.

Of course, the greater the experience of the boatmaster, the greater the filling of the hypercube, while the lack of attention at a particular object indicates an inability to fully assess the navigational situation.

Thus, a geometric model is formed, which in each of the eight 3D quadrants will characterize the concentration of attention of the navigator.

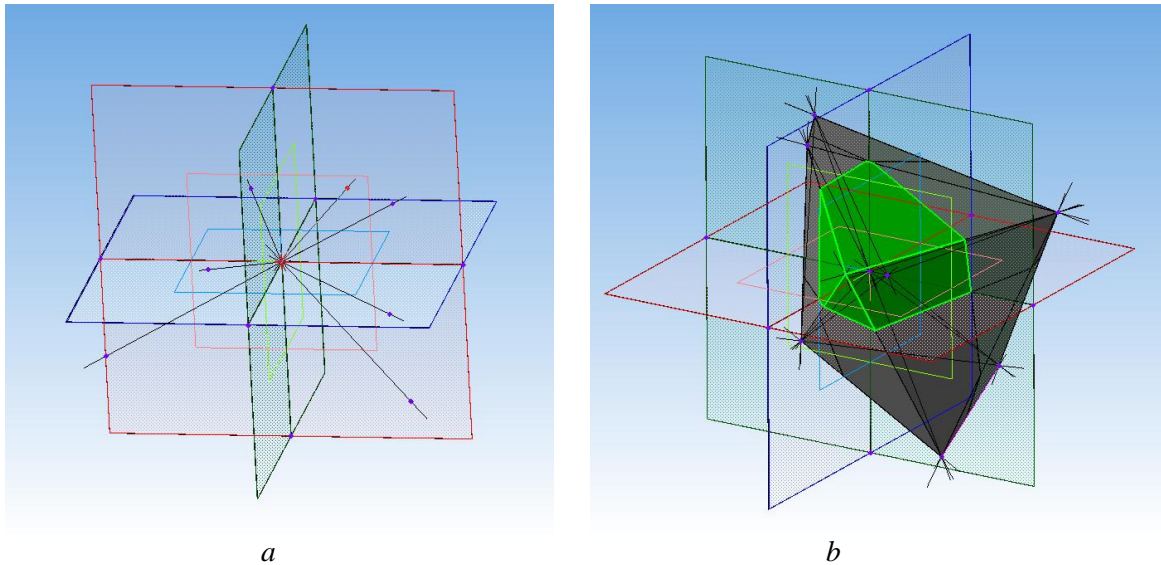


Figure 4 – Geometric approximation of the attention distribution model

The formation of the model involves the determination of a point in each of the 3D quadrants, which represents a vector with a metric dependence on three axes: x – «vision»; y – «hearing»; z – «bridge orientation and motor activity». Such an interpretation of the model allows to obtain its geometric structure in this form (Fig. 4 *a, b*).

As it can be seen in Figure 4a, the points have a different position relative to each of the 3D quadrants, which allows us to judge the individual perception of each navigator during the navigation task. Under the same conditions and input, these two specialists will have their own model of attention distribution, spending its total volume depending on individual preferences, fixed by experience.

Analyzing this model, we can find analogies in the works of A. Einstein and L. D. Landau [12, 13], in which closed space and a bunch of matter in a vacuum are considered. The formation and distribution of the geometry of a given substance are also similar in principle to the proposed model, but its boundaries are more blurred than in this interpretation. Meanwhile, for both cases it is necessary to specify a metric such that it describes the characteristics of the model and determines its adequacy. Approaches in theoretical physics give an initial impetus to the definition of metrics (1):

$$ds^2 = -e^{\alpha} \left[dR^2 + a_0^2 \sin^2 \frac{R}{a_0} (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\psi^2) \right] + e^{\gamma} d\tau^2; \quad (1)$$

$$a = a(\tau), \gamma = \gamma(\tau), R \in (0, \pi a_0).$$

However, it should be noted that this model cannot be fully applied in this study because it is more «smoothed» due to the complexity of determining the coordinates of the forming points. In turn, this approach is applicable from the point of view of local isolation and volume limitation.

We define the logic and mechanisms of attention distribution based on formal models of A.S. Tanguiane [14], in the framework of set theory and probability theory [15, 16].

We set the number of objects of attention $\nu_1, \dots, \nu_n \in V, n=8$ and concentration vectors regarding their P_1, \dots, P_n . Under the conditions that the individual navigator model implies a repetition in a number of similar cases, the following condition will be true:

$$v\{f : f \in F, f(v_1) = P_1, \dots, f(v_n) = P_n\} = \prod_{i=1}^n v\{f : f \in F, f(v_i) = P_i\}. \quad (1)$$

where, the navigation situation is presented as a display $f : V \rightarrow \mathfrak{R}$ и $f(v) \in \mathfrak{R}$.

To determine the model metric, we introduce the dimension:

$$\{v : v \in V, (x, y, z) \in f(v)\} \in \mathfrak{N}, \quad \forall x, y, z \in X,$$

where, X – sets of alternatives limited by V , and F – set of navigation situations.

Observations showed that the most preferred values are along the x axis – “vision”, then:

$$P_{(x,y,z)}(v) = v\{f : f \in F, (x, y, z) \in f(v)\},$$

where, $v(f)$ – the probability of a situation f , such that $v : F \rightarrow [0;1]$.

We denote $\xi_{(x,y,z)}$ – as the significance of predisposition in the 3D space of alternatives.

At the same time, the complexity of the navigation situation lies in the fact that all v_i are independent of each other and cannot be interchangeable:

$$v\{f : f \in F, (x, y, z) \in f(v_1), \dots, (x, y, z) \in f(v_n)\} = \prod_{i=1}^n P_{(x,y,z)}(v_i).$$

The predisposition in the 3D space of alternatives is denoted as P_j , where $j = 1, \dots, |\mathfrak{R}|$, then the x-axis predisposition – “vision” will take the form:

$$X_j(x, y, z) = \begin{cases} \lambda \in [0,5;1], & \text{if } (x, \bar{y}, \bar{z}) \in P_j, \\ 1 - \lambda, & \text{if } (\bar{x}, y, z) \in P_j, \\ 0, & \text{if } (x, y, z) \notin P_j. \end{cases},$$

where is the probability that the object of attention v_i will have a predisposition P_j :

$$P_j(v_i) = v\{f : f \in F, f(v_i) = P_j\}.$$

Then the generalized model for all objects and individual perceptual predispositions will have the form (2):

$$P_{(x,y,z)}(v) = \sum_{j=1}^{|\mathfrak{R}|} X_j(x, y, z) P_j(v) \quad (2)$$

Having received a formal description of the attention distribution model, we consider the situation when an insufficient level of qualification $p_{(x,y,z)}(W)$, and consequently the volume of attention does not allow to cover all eight navigation objects. In this case, the objects become dependent ξ_1, \dots, ξ_k and the distribution is incomplete $w_1, \dots, w_k, i > k$:

$$P\{\xi_i = 1\} = p_{(x,y,z)}(w_i) \Rightarrow P\{\xi_i = 0\} = 1 - p_{(x,y,z)}(w_i).$$

Then the probability of attention of all objects will be equal:

$$P_{(x,y,z)}(W) = v\left\{f : f \in F, \sum_{i=1}^k \xi_i > \frac{k}{2}\right\}$$

From the formal descriptions it follows that the probability of an incomplete model of the distribution of attention is quite high. Adding random distractions can greatly complicate the perception of navigation hazards and even affect their classification by importance.

Thus, it is necessary to provide control over the number of navigation objects of attention. Otherwise, this can lead to a sharp imbalance of the model and, as a result, important navigation risks will be missed, which will lead to a disaster.

Another approach to enhancing safe navigation can be the time factor. It can be assumed that by changing the range of time spent on a certain group of objects relative to the situation, it will be possible to avoid catastrophic consequences. A quick perception of the situation will make it possible to speed up the decision-making process on the captain's bridge and get extra time in unpredictable situations.

Let us single out 5 states in which the navigator may be when performing navigation tasks:

- 1 – assessment of the navigation situation;
- 2 – assessment of risks and opportunities to avoid them;
- 3 – defining a maneuvering strategy;
- 4 – real-time workflow;
- 5 – maneuvers.

Considering that the state data can have a random set of sequences, we make a forecast using the methods of discrete Markov chains with continuous time [17].

Then $S_1, \dots, S_n, n = 5$ – states.

We set that at any time t the system S will be in only one of the states S_1, \dots, S_n , then:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1, \forall t \geq 0.$$

In this case, the transition probability is: $\lambda_{ij}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(t; \Delta t)}{\Delta t}$.

State probabilities $p_i(t), i = 1, \dots, n$ are a solution to a system of differential equations:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = - \left(\sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \right) p_i(t) + \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} p_j(t), i = 1, \dots, n; t \geq 0.$$

To solve the problem of forecasting the values of time ranges, we compose a system of Kolmogorov differential equations [18] based on statistical data from a study of the form (3):

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = p_2(t)\lambda_{21} - p_1(t)\lambda_{12}; \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = p_1(t)\lambda_{12} + p_5(t)\lambda_{52} - p_2(t)(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = p_2(t)\lambda_{23} - p_3(t)\lambda_{35}; \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = p_2(t)\lambda_{24} - p_4(t)\lambda_{45}; \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = p_3(t)\lambda_{35} + p_4(t)\lambda_{45} - p_5(t)\lambda_{52}. \end{cases} \quad (3)$$

The complexity of solving differential systems of equations involves the development of automated tools. The developed software made it possible to obtain a real-time forecast for the next cycle of temporary states (Fig. 5).

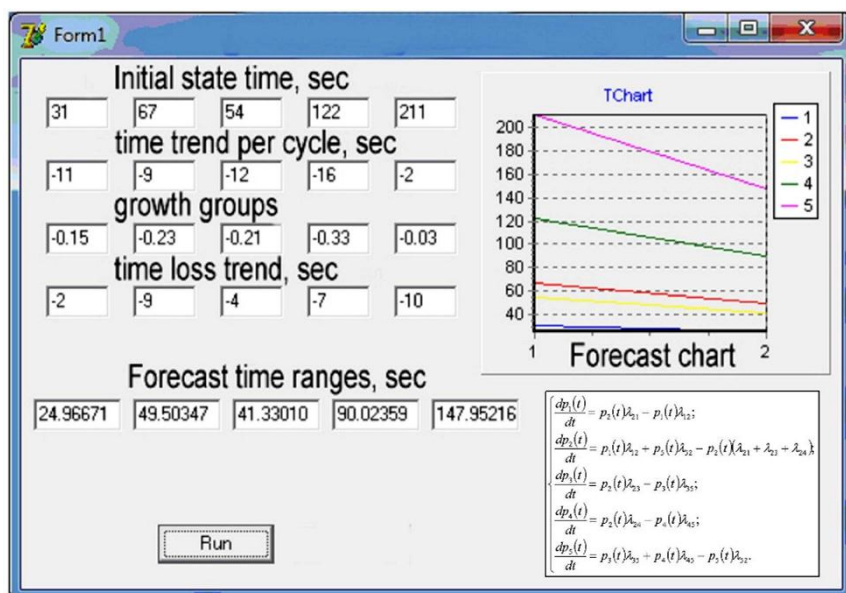


Figure 5 – Forecast System Interface

Synchronization of the developed model and software will make it possible to approach the fulfillment of the main task of the study and increase the level of security in short-distance transport. However, it should be noted that for a full-fledged result, a data extraction mechanism is needed that allows real-time identification of time ranges and growth groups depending on the navigation situation.

Conclusion. Thus, the developed geometric and formal logical model of the distribution of attention of the navigator(navigator) made it possible to determine the variability of the perception of navigation situations in operation of sea transport. The most probable distribution of attention relative to the main sensory organs on the scales of the x , y , z axes is determined. The logical constructions and conditions based on the predispositions of the navigator are described. A method for predicting the time ranges of navigator states in the conditions of navigational watch and ship control. Using discrete Markov chains, prognostic models based on Kalmagorov differential equations for five states were selected. In order to implement these approaches in real time, software has been developed that provides automated prediction of the cycle of navigation tasks, $t + 1$. Thus, the goal of the article has been fulfilled. Further research will be aimed at developing an information model of the navigator that allows with a sufficient degree of accuracy to carry out forecasting of catastrophic situations related to sea transport.

REFERENCES

1. IMO. STCW-78/95 Convention, 1995.
2. Nosov P. S., Ben A. P., Matejchuk V. N., Safonov M. S. (2018) Identification of “Human error” negative manifestation in maritime transport. *Radio Electronics, Computer Science, Control. Zaporizhzhia National Technical University, № 4 (47)*, 204–213. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-20.
3. Popovych, I. S. & Blynova, O. Ye. (2019). The Structure, Variables and Interdependence of the Factors of Mental States of Expectations in Students’ *Academic and Professional Activities. The New Educational Review*, 55(1), 293–306. DOI:10.15804/tner.2019.55.1.24.
4. Berg, H. P. (2013). Human Factors and Safety Culture in Maritime Safety he. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 7, Number 3*, 343-352. DOI: 10.12716/1001.07.03.04.
5. Zinchenko S., Nosov P., Mateichuk V., Mamenko P. & Grosheva O. (2019). Use of navigation simulator for development and testing ship control systems. *MNPK pamiaty profesoriv*

Fomina Yu. Ya. i Semenova V. S. (FS-2019), 24 – 28 kvitnia 2019, Odesa – Stambul – Odesa, 350–355.

6. Nosov, P. S., Palamarchuk, I. V., Safonov, M. S., Novikov, V. I. (2018). Modeling the manifestation of the human factor of the maritime crew. *Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, N. 5 (77), 82–92.* doi: 10.15802/stp2018/147937.

7. Rolf, J., Bye, Asbjørn & L. Aalberg (2018). Maritime navigation accidents and risk indicators: An exploratory statistical analysis using AIS data and accident reports. *Reliability Engineering & System Safety, Vol. 176, 174–186, DOI: 10.1016/j.ress.2018.03.033.*

8. Popovych, I. S. (2014). Social expectations – a basic component of the system of adjusting of social conduct of a person. *Australian Journal of Scientific Research, 2(6), 393–398.* Retrieved from <http://ekhsuir.kspu.edu/handle/123456789/3281>

9. Guidance notes on safety culture and leading indicators of safety (2012). *American Bureau of Shipping (ABS), Houston, 74.*

10. Nosov, P., Ben, A., Safonova, A. & Palamarchuk, I. (2019). Formal going approaches to determination periods of intuitional behavior of navigator during supernumerary situations. *Radio Electronics, Computer Science, Control, Vol. 2 (49), 140–150.* doi: 10.15588/1607-3274-2019-2-15.

11. Krisilov, V. A. (2004). Informacionnaya tekhnologiya prinyatiya resheniy v zadachakh ASU na baze kolichestvennoy integral'noy ocenki slozhnykh objektov. *Candidate's thesis.* Odessa : Odesskiy nacional'nyy politekhnicheskij un-t.

12. Albert Einstein. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik. Vol. 354, N. 7. 769–822.* DOI:10.1002/andp.19163540702.

13. Landau, L. D., Lifshic, E. M. (1967). *Teoriya polya.* Moskva : Nauka.

14. Tanguiane, A. S. (1990). A model of collective representation of a council type. *Math. modeling, 2: 5, 60–103.*

15. Jech, T. (1997). Set theory corr. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Milan; Paris; Santa Clara; Singapore; Tokyo; Springer. 243. DOI: 10.1007/3-540-44761-X.

16. Jaynes, E. T. (2003). Probability theory the logic of science / edited by G. Larry Bretthorst. Published in the United States by Cambridge University Press, New York.

17. Keljbert, M. Ya., Sukhov, Yu. M. (2010). Veroyatnostj i statistika v primerakh i zadachakh : Markovskie cepi kak otravnaya tochka teorii sluchaynykh processov i ikh prilozheniya. Moskva : MCNMO.

18. Kolmogorov, A. N. (1974). Osnovnihe ponyatiya teorii veroyatnosteyj. Teoriya veroyatnosteyj i matematicheskaya statistika. Moskva.

Носов П. С., Бень А. П., Носова Г. В., Новиков В. И. МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВНИМАНИЯ СУДОВОДИТЕЛЯ ВО ВРЕМЯ НЕСЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ВАХТЫ

Целью статьи является разработка формальной модели и ее геометрической аппроксимации позволяющей описать логику распределения внимания старшим помощникам капитана во время выполнения маневров с возможностью дискретного прогнозирования. Для построения данной модели проведен анализ международных морских правил и ситуаций, что позволило определить формальную структуру и логические принципы модели приближенные к реальным ситуациям при решении навигационных задач.

В статье приводятся формальные подходы учитывающие индивидуальные факторы предрасположенности судоводителя к восприятию навигационных ситуаций и связанных с ними опасностей. Предложена геометрическая аппроксимация модели в виде декартового куба разделенного на восемь квадрантов с локальными системами координат что позволило объединить данные по распределению внимания относительно восьми объектам согласно ПДМНВ-78. Разработаны формально-логические конструкции позволяющие отделить состояния модели распределения внимания в зависимости от этапа выполнения навигационной задачи в рамках цикла. В связи с этим, предложены подходы для прогнозирования состояний модели с помощью Марковских дискретных цепей в условиях непрерывного времени. Автоматизация прогноза позволила в режиме реального времени получать данные о скорости восприятия и обработки навигационных данных для

перехода в последующие состояния с целью снижения вероятности возникновения катастрофических ситуаций на морском транспорте.

Ключевые слова: модель распределения внимания, человеческий фактор, штурман, прогнозирование катастроф, безопасность на морском транспорте.

Носов П. С., Бень А. П., Носова Г. В., Новиков В. І. МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ УВАГИ СУДНОВОДІЯ ПІД ЧАС НЕСЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ ВАХТИ

Метою статті є розробка формальної моделі і її геометричної апроксимації, що дозволяє описати логіку розподілу уваги старшим помічникам капітана під час виконання маневрів з можливістю дискретного прогнозування. Аналіз експериментальних та статистичних навігаційних даних дозволяє стверджувати що існує ряд факторів що негативно впливає на результативність виконання маневрів судноводієм у складних умовах. Втрата контролю судноводія визначено фактом як випадковою зміною керуючих впливів при управлінні судном так і траєкторією виконання складних маневрів. Таким чином у статті розглянуто особливості поведінки судноводія із врахуванням макрорівня що відображає індивідуальні стратегії формування його моделі.

Для побудови даної моделі проведено аналіз міжнародних морських правил та ситуацій, що дозволило визначити формальну структуру і логічні принципи моделі, що наближені до реальних ситуацій при вирішенні навігаційних завдань. Зазначено ряд навігаційного обладнання у якості джерел інформації які дозволяють визначити геометричну метрику запропонованої моделі.

Наводяться формальні підходи, що враховують чинники індивідуальної схильності судноводія до сприйняття навігаційних ситуацій і пов'язаних з ними небезпек. Запропоновано просторову апроксимацію моделі у вигляді декартового куба розділеного на вісім квадрантів з локальними системами координат що дозволило об'єднати дані з розподілу уваги щодо восьми об'єктів згідно ПДМНВ-78. Таким чином з'являється можливість визначення центру уваги та частки уваги судноводія відповідно до кожного з квадрантів що значно спростить аналіз його поведінки експертом під час аналізу складних навігаційних обставин на морському транспорті.

Також, розроблені формально-логічні конструкції дозволяють відокремити стани моделі розподілу уваги в залежності від етапу виконання навігаційного завдання в рамках циклу. У зв'язку з цим, запропоновані підходи для прогнозування станів моделі за допомогою Марковських дискретних ланцюгів в умовах безперервного часу. Автоматизація прогнозу дозволила в режимі реального часу отримувати дані про швидкість сприйняття і обробки навігаційних даних для переходу у наступні стани з метою максимального зменшення можливості виникнення катастрофічних ситуацій на морському транспорті.

Ключові слова: модель розподілу уваги, людський фактор, штурман, прогнозування катастроф, безпека на морському транспорті.

© Носов П. С., Бень А. П., Носова Г. В., Новиков В. І.

Статтю прийнято
до редакції 20.08.19

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

ТЯГОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОБУСА

Гнатів А. В., д.т.н., професор кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, e-mail: kalifus76@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0932-8849;

Аргун Ш. В., к.т.н., доцент кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, ORCID: 0000-0001-6098-8661;

Гнатова Г. А., студентка Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Останнім часом все більше застосовуються енергоефективні та енергозберігаючі технології на транспорті. Стимулюється перехід транспорту на екологічно чисті технології, найбільше поширення з яких набули електротехнології. Одним з основних елементів електротранспорту є тягова силова установка. Проведено дослідження основних тягових характеристик силової установки електробуса міського призначення. Представлені графічні залежності тягового зусилля і швидкості електромобіля з трисступеневою, двоступінчастою і одноступінчастою коробкою передач. Визначено, що досліджувані конструкції мають однакове тягове зусилля в залежності від швидкості, це вказує на те, що електричні транспортні засоби будуть мати однакові показники прискорення і однакову здатність долати підйоми. Представлено аналітичні співвідношення, що дозволяють визначити максимальний підйом, який електричний транспортний засіб може подолати на визначеній швидкості. Ефективність прискорення електричного транспортного засобу оцінюється часом, який потрібен для його прискорення від початкової до кінцевої швидкості. Для легкових автомобілів на відміну від електробусів, ефективність прискорення є більш важливою, ніж максимальна крейсерська швидкість і здатність долати підйоми.

Ключові слова: електромобіль, електросилова установка, електродвигун, тяговий електродвигун, електробус, енергоефективні технології.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.036-043

Вступ. Останнім часом все більш популярними і затребуваними стають енергоефективні електричні технології. Особливо велика увага цьому приділяється в сфері транспорту. Для великих міст та мегаполісів проблема забруднення навколишнього середовища є досить гострою. Отже, стимулюється перехід транспорту на екологічно чисті технології, найбільше поширення з яких набули електротехнології, до яких можна віднести перехід на електромобілі та транспортні засоби (ТЗ) на паливних елементах [1, 2].

Також, не слід залишати поза увагою такий чинник, як енергетична ефективність. Цей чинник показує наскільки ефективно використовуються енергоресурси. Сучасні двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) безнадійно далекі від забезпечення енергоефективності, адже лише тільки їх ККД складає близько 30 % і це в найкращому випадку. Найбільш яскраво це проявляється при експлуатації ТЗ у міських умовах, де безперервно змінюються цикли прискорення та гальмування. При цьому, навіть у найбільш сучасних транспортних засобах ДВЗ постійно працює навіть при доволі повільному і довгому процесі гальмування. Все це є причиною втрати енергії, а якщо точніше, витрачення її вдаремно без виконання корисної роботи [3, 4].

Аналіз публікацій. Одним з найбільш важливих елементів тягового електроприводу силової установки ТЗ є електричний двигун (ЕД). Вибір ЕД для електросилової установки та дослідження його тягових характеристик, є важливим складовим елементом при проектуванні електричного ТЗ.

На цей час в якості тягового ЕД в електросилових установках на транспорті знаходять своє застосування [5]:

- колекторні двигуни постійного струму;
- асинхронні двигуни (АД);
- синхронні двигуни (СД);

- вентильні двигуни (ВД) з постійними магнітами;
- реактивно-вентильні електродвигуни з самозбудженням і з незалежним збудженням.

У більшості науково-технічних робіт рекомендується в якості основного тягового електродвигуна використовувати АД [1, 6–11]. Це пов'язано з тим, що сучасні системи управління дозволяють АД не поступатися за регулюючими якостями, як двигунам постійного струму, так і іншим типам електродвигунів. Також АД мають досить непогані масо-габаритні показники при найменшій ціні (якщо порівнювати за потужністю). Але слід зазначити, що такі машини мають гірші масогабаритні показники, ніж СД з постійними магнітами реактивні ВД.

При виборі ЕД для силової установки ТЗ необхідно уявити, які тягові характеристики будуть отримані при використанні конкретного двигуна. Цьому питанню приділяється увага в роботах [1, 7–10, 12]. Отже, питання дослідження тягових характеристик силової установки електробуса є досить актуальним і потребує більш детального розгляду.

Метою роботи є дослідження основних тягових характеристик силової установки електробуса міського призначення.

Електробус міського призначення. Загальна схема конструкції електробуса представлена на рис. 1. Основні технічні та енергетичні параметри даного електробуса були розраховані у авторських публікаціях [1, 11–13]. Даний електробус призначений для міських умов експлуатації, має клас «малої» місткості.

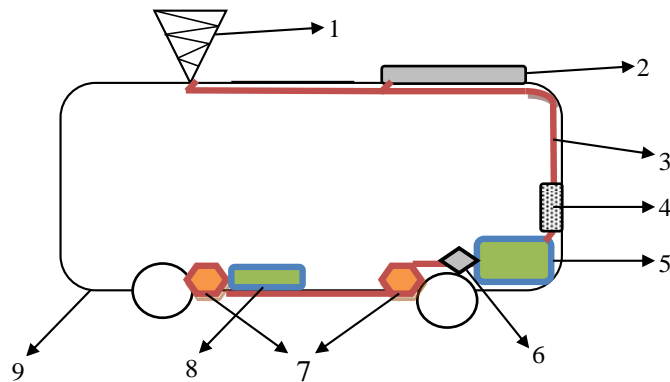


Рисунок 1 – Схема конструкції електробуса:

1 – пантограф для під'єднання до тролейбусної контактної мережі; 2 – зарядний блок від потужних зарядних пристроїв; 3 – струмопроводи; 4 – блок управління; 5 – блок ультраконденсаторів; 6 – інвертор; 7 – тяговий електричний двигун; 8 – блок акумуляторних батарей; 9 – корпус автобуса

Перед тим, як провести дослідження основних тягових характеристик силової установки електробуса міського призначення слід зазначити основні критерії, якими керуються при виборі ЕД.

При виборі ЕД необхідно керуватися декількома основними критеріями [5]:

- вид електричного струму, що живить обладнання;
- потужність електродвигуна;
- режим роботи;
- кліматичні умови та інші зовнішні чинники.

Спираючись на перелічені критерії і маючи технічне завдання досить просто вибрати необхідний тип та клас електродвигуна для тягової силової установки електробуса.

Основні характеристики тягових двигунів. ЕД зі змінною швидкістю обертання зазвичай мають характеристики, представлені на рис. 2 [14].

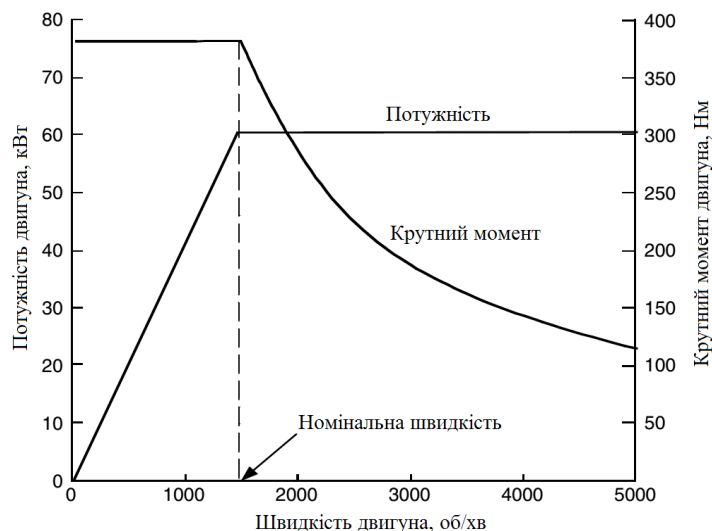


Рисунок 2 – Типові характеристики електродвигуна зі змінною швидкістю

В області низьких швидкостей (нижче базової швидкості, як показано на рис. 3), двигун має постійний крутний момент. У високошвидкісній області (вище базової швидкості) двигун має постійну потужність. Ця характеристика зазвичай представлена відношенням швидкості x , яка визначається як відношення максимальної швидкості двигуна до його базової швидкості. У низькошвидкісних режимах подача напруги на двигун збільшується зі збільшенням швидкості через електронний перетворювач, в той час як магнітний потік підтримується постійним. У точці базової швидкості напруга ЕД досягає напруги джерела. Після базової швидкості напруга ЕД підтримується постійною, а потік слабшає, гіперболічно знижуючись зі збільшенням швидкості. Отже, його крутний момент також падає гіперболічно зі збільшенням швидкості [15].

На рис. 3 представлено графічну залежність крутного моменту від швидкості двигуна потужністю 60 кВт з різними швидкісними коефіцієнтами x ($x=2, 4$ і 6).

Зрозуміло, що з великою областю постійної потужності максимальний крутний момент двигуна може бути значно збільшений, і, отже, можна поліпшити характеристики прискорення та потужність ТЗ, а також спростити передачу. Проте, кожен тип двигуна за своєю природою має свої обмеження максимальної швидкості. Наприклад, двигуни з постійними магнітами мають низьке значення $x < 2$ через труднощі послаблення поля внаслідок наявності постійного магніту. У вентильно-індукторних двигунах швидкісні коефіцієнти x можуть досягти значень більше 6, а в АД близько $x=4$.

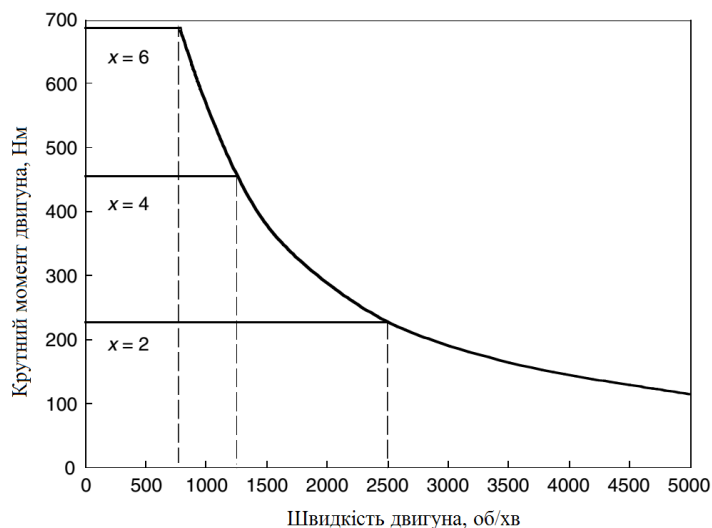


Рисунок 3 – Графічна залежність крутного моменту від швидкості двигуна потужністю 60 кВт зі швидкісними коефіцієнтами $x=2, 4$ і 6

Тягові сили і вимоги до передачі. Тягове зусилля F_T , що розвивається тяговим двигуном на ведучих колесах, і швидкість транспортного засобу V виражаються у вигляді [15]:

$$F_T = \frac{T_d \cdot i_{\pi} \cdot i_0 \cdot \eta_T}{r_b} \quad (1)$$

$$V = \frac{\pi \cdot N_d \cdot r_b}{30 i_{\pi} \cdot i_0}, \quad (2)$$

де T_d , N_d – вихідний момент двигуна і швидкість в об/хв, відповідно; i_{π} – передавальне відношення передачі; i_0 – передавальне число кінцевого приводу; η_T – ефективність всієї трансмісії від двигуна до ведучих коліс; r_b – радіус ведучих коліс.

Використання багатоступінчастої або одноступінчастої коробки передач залежить в основному від швидкості ЕД (характеристик крутного моменту). Тобто при номінальній потужності ЕД, якщо він має велику область постійної потужності, буде достатньо одноступінчастої коробки передач для високого тягового зусилля на низьких швидкостях. В іншому випадку потрібна трансмісія з декількома передачами (більше двох). На рис. 4 показано тягове зусилля електромобіля, а також швидкість ТЗ з тяговим ЕД $x=2$ і триступінчастою коробкою передач. Перша передача охоплює область швидкості a-b-c, друга передача d-e-f, а третя g-f-h [15].

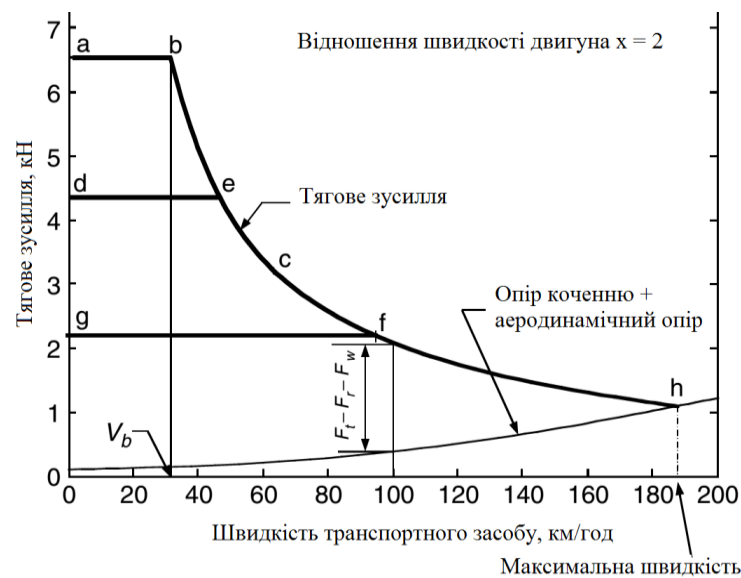


Рисунок 4 – Тягове зусилля і швидкість електромобіля з тяговим двигуном $x=2$ і триступінчастою коробкою передач

На рис. 5 показано тягове зусилля з тяговим двигуном $x=4$ і двоступінчастою коробкою передач. Перша передача покриває область швидкості a-b-c, а друга передача – d-e-f [15].

На рис. 6 показано тягове зусилля з тяговим двигуном $x=6$ і одноступінчастою коробкою передач.

Ці три конструкції мають однакове тягове зусилля в залежності від швидкості ТЗ. Отже, електричні ТЗ будуть мати однакові показники прискорення і здатність долати підйоми.

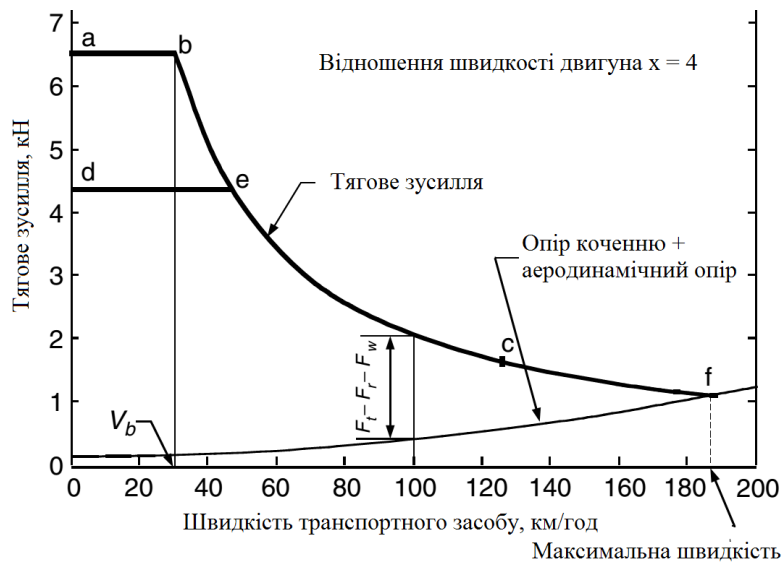


Рисунок 5 – Тягове зусилля і швидкість електромобіля з тяговим двигуном $x=4$ і двоступінчастою коробкою передач

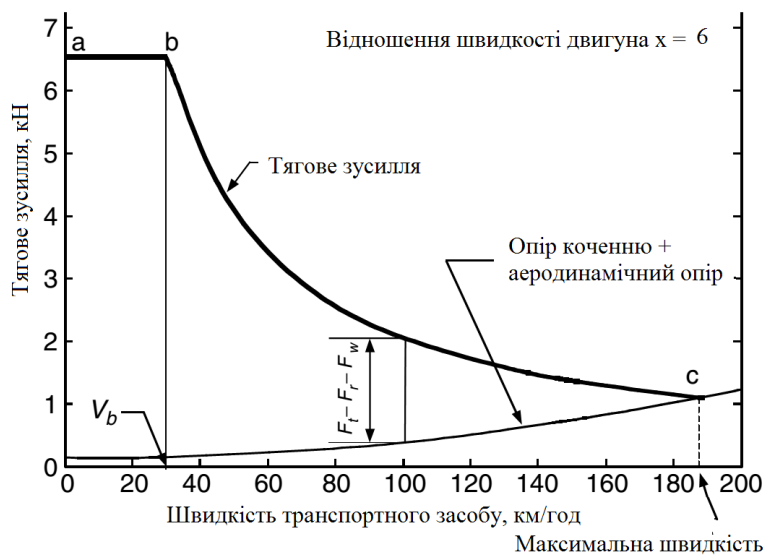


Рисунок 6 – Тягове зусилля і швидкість електромобіля з тяговим двигуном $x=6$ і одноступінчастою коробкою передач

Ефективності додання підйому. Основні характеристики електробуса включають максимальну крейсерську швидкість, здатність долати підйоми і прискорення. Максимальна швидкість ТЗ може бути знайдена, як точка перетину кривої тягового зусилля з кривою опору (опір коченню плюс аеродинамічний опір) на діаграмі тягового зусилля в залежності від швидкості ТЗ, рис. 1–4 [15]. Слід зазначити, що в деяких конструкціях такої точки перетину не існує. Це стосується конструкцій в яких зазвичай використовується великий тяговий двигун або велике передавальне число. У цьому випадку максимальна швидкість електромобіля визначається максимальною швидкістю тягового ЕД [15]:

$$V_{\max} = \frac{\pi \cdot N_{\text{д max}} \cdot r_{\text{в}}}{30 i_{\text{п min}} \cdot i_0}, \quad (3)$$

де V_{\max} – максимальною швидкістю тягового ЕД, м/с; $N_{\text{д max}}$ – максимально допустима швидкість тягового ЕД, об/хв; $i_{\text{п min}}$ – мінімальне передавальне відношення трансмісії (найвища передача).

Похибка визначається чистим тяговим зусиллям ТЗ, $F_{\text{T-net}}$ ($F_{\text{T-net}} = F_{\text{T}} - F_{\text{r}} - F_{\omega}$), як показано на рис. 2–5. На середніх і високих швидкостях здатність долати підйом менша,

ніж на низьких швидкостях. Максимальний підйом, який ТЗ може подолати на даній швидкості, може бути розрахований за допомогою виразу (4) [15]:

$$i = \frac{F_{T-net}}{M_{T.3}g} = \frac{F_T - (F_r + F_w)}{M_{T.3}g}, \quad (4)$$

де F_T – тягове зусилля на ведучих колесах; F_r – опір коченню шини; F_w – аеродинамічний опір; $M_{T.3}$ – загальна маса ТЗ.

Однак на низьких швидкостях здатність долати підйоми набагато вища. Розрахунки, засновані на (4), приведуть до значних відхилень отриманого результату від дійсного стану справ. Замість цього слід використовувати рівняння (5):

$$\sin \alpha = \frac{d - f_r \sqrt{1 - d^2 + f_r^2}}{1 + f_r^2}, \quad (5)$$

де d – коефіцієнт продуктивності транспортного засобу ($d = (F_T - F_w)/M_{T.3}g$); f_r – коефіцієнт опору коченню електробуса.

Ефективність прискорення ТЗ оцінюється часом, який потрібен для його прискорення від початкової до кінцевої швидкості. Для легкових автомобілів на відміну від електробусів, ефективність прискорення є більш важливою, ніж максимальна крейсерська швидкість і здатність долати підйоми, тому що вимога у прискоренні визначає потужність приводу ЕД.

Висновки

1. Проведено дослідження основних тягових характеристик силової установки електробуса міського призначення.
2. Представлені графічні залежності тягового зусилля і швидкості електромобіля з триступінчастою, двоступінчастою і одноступінчастою коробкою передач.
3. Визначено, що досліджувані конструкції мають однакове тягове зусилля в залежності від швидкості, це вказує на те, що електричні транспортні засоби будуть мати однакові показники прискорення і однакову здатність долати підйоми.
4. Представлено аналітичні співвідношення, що дозволяють визначити максимальний підйом, який електричний транспортний засіб може подолати на визначеній швидкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S., Ulyanets O. Ultracapacitors electrobus for urban transport. *IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018)*. April 24–26, 2018. Kyiv, Ukraine. P. 539–543. doi: 10.1109/ELNANO.2018.8477449.
2. Gnatov A., Arhun Shch., Ulyanets O. Joint Innovative Double Degree Master Program «Energy-Saving Technologies in Transport». *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCOEN)*. May 29–June 2 2017. Kyiv, Ukraine. P. 1203–1207.
3. Vehicle Emission Standards. 2016. URL : <https://infrastructure.gov.au/roads/environment/emission> – 03.07.2016.
4. G. Wang. Advanced vehicles: costs, energy use, and macroeconomic impacts. *Journal of Power Sources*, 2011, №1 (196). pp. 530–540.
5. Аргун, Ш. В. Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса. *Автомобільний транспорт*, 43, 36–46. doi: 10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.36.
6. Dost P., Schael M. Constantinos Sourkounis. Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2014. pp. 1–6.
7. Chuanwei Zhang, Nuoting Wang. Research on asynchronous motor control of electric vehicle. *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*, 2017. pp. 165–1693.
8. Ene Lucian-Vasile, Sănătescu Diana-Ramona. Electric drive system for speed adjusting of a three-phase asynchronous motor using a PLC for propelling an electric vehicle. *2017*

10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2017. pp. 597–600.

9. Rogério Paulo de F. Martins, Duarte M. Sousa, V. Fernão Pires, António Roque. Reducing the power losses of a commercial electric vehicle: Analysis based on an asynchronous motor control. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. 2013. pp. 1247–1252.

10. Huang, Wanyou, Wang, Guangcan, Yu, Mingjin. Analysis of the effect of driving motor on electric vehicle dynamic performance. *International Journal Of Electric And Hybrid Vehicles*. 2017, Vol. 9, Issue: 4. pp. 350–360.

11. Hnatov A., Shch. Arhun I., S. Ponikarovska. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. № 14 (4). pp. 4649–4664. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.

12. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Бикова О.В., Підгора О.В. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень. *Вісник ХНАДУ*. 2016. № 72. С. 29–34.

13. Аргун Щ. В., Гнатов А. В., Ульянец О.А. Екологічний та енергоефективний автомобільний транспорт і його інфраструктура. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2016. № 2 (77). С. 18–27.

14. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Трунова І. С. *Теорія електроприводу транспортних засобів : підручник*. Харків : ХНАДУ, 2016. 292 с.

15. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., Ebrahimi, K. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press, 2018.

REFERENCES

1. Hnatov, A., Arhun, Shch., Ponikarovska, S. & Ulyanets, O. (2018). Ultracapacitors electrobus for urban transport. *IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018)*. April 24 – 26. Kyiv, 539–543. doi: 10.1109/ELNANO.2018.8477449.

2. Gnatov, A., Arhun, Shch. & Ulyanets, O. (2017). Joint Innovative Double Degree Master Program «Energy-Saving Technologies in Transport». *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. May 29–June 2 2017. Kyiv, 1203–1207.

3. Vehicle Emission Standards. 2016. Retrived from <https://infrastructure.gov.au/roads/environment/emission> – 03.07.2016.

4. Wang G. (2011). Advanced vehicles: costs, energy use, and macroeconomic impacts. *Journal of Power Sources, Vol. 1 (196)*, 530–540.

5. Arhun, Shch. (2018). Rozraxunok osnovny`x xaraktery`sty`k tyagovogo asy`nxronnogo dvy`guna dlya elektry`chnoyi transmisiyi mis`kogo elektrobusa. *Avtomobil`ny`j transport*, 43, 36–46. doi: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.36>.

6. Dost, P. & Schael M. (2014). Constantinos Sourkounis. Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–6.

7. Chuanwei, Zhang & Nuoting Wang (2017). Research on asynchronous motor control of electric vehicle. *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*, 165–169.

8. Ene, Lucian-Vasile & Sănătescu, Diana-Ramona. (2017). Electric drive system for speed adjusting of a three-phase asynchronous motor using a PLC for propelling an electric vehicle. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 597–600.

9. Rogério Paulo de F. Martins, Duarte M. Sousa, V. Fernão Pires, António Roque.(2013). Reducing the power losses of a commercial electric vehicle: Analysis based on an asynchronous motor control. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 1247–1252.

10. Huang, Wanyou, Wang, Guangcan & Yu, Mingjin. (2017). Analysis of the effect of driving motor on electric vehicle dynamic performance. *International Journal Of Electric And Hybrid Vehicles, Vol. 9, Issue 4*, 350–360.

11. Hnatov, A., Arhun, Shch. & Ponikarovska S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14 (4), 4649-4664. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
12. Hnatov, A., Arhun, Shch., Bykova, O. & Pidgora, O. (2016). Elektrobus na superkondensatorax dlya mis`ky`x perevezen`. *Visnyk KhNADU*, 72, 29–34.
13. Arhun, Shch., Hnatov, A. & Ulyanets, O. (2016). Ekologichny`j ta energoefekty`vny`j automobil`ny`j transporti jogo infrastruktura. *Visnyk Zhy`tomy`rs`kogo derzhavnogo texnologichnogo universy`tetu*, 2 (77), 18–27.
14. Hnatov, A., Arhun, Shch. & Trunova I. (2016). *Teoriia elektropyvodu transportnykh zasobiv : pidruchnyk*. Kharkiv : XNADU.
15. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. & Ebrahimi, K. (2018). Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. CRC press.

Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Гнатова А. В. ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОБУСА

В последнее время все больше применяются энергоэффективные и энергосберегающие технологии на транспорте. Стимулируется переход транспорта на экологически чистые технологии, наибольшее распространение из которых получили электротехнологии. Одним из основных элементов электротранспорта является тяговая силовая установка. Проведено исследование основных тяговых характеристик силовой установки электробуса городского назначения. Представлены графические зависимости тягового усилия и скорости электро Автомобиля с трехступенчатой, двухступенчатой и одноступенчатой коробкой передач. Определено, что исследуемые конструкции имеют одинаковое тяговое усилие в зависимости от скорости, это указывает на то, что электрические транспортные средства будут иметь одинаковые показатели ускорения и одинаковую способность преодолевать подъемы. Представлены аналитические соотношения, позволяющие определить максимальный подъем, который электрическое транспортное средство может преодолеть на определенной скорости. Эффективность ускорения электрического транспортного средства оценивается временем, которое требуется для его ускорения от начальной до конечной скорости. Для легковых автомобилей в отличие от электробусов, эффективность ускорения является более важной, чем максимальная крейсерская скорость и способность преодолевать подъемы.

Ключевые слова: электро Автомобиль, электросиловая установка, электродвигатель, тяговый электродвигатель, электробус, энергоэффективные технологии.

Hnatov A., Arhun S., Hnatova H. TRACTION CHARACTERISTICS OF ELECTRIC BUS POWER PLANT

Energy-efficient and energy-saving technologies have been recently increasingly used in transport industry. The shift to environmentally friendly technologies in transport industry is being promoted, and electric technologies became the most widespread among them. One of the main elements of electric transport is a propulsion power plant. The research on main traction characteristics of power plant of urban assignment electric bus was undertaken. Graphic correlations of propulsive force and speed of electric vehicles with a three-speed, two-speed, and single-speed gearboxes are presented. It is defined that the designs, being investigated, have the same propulsive force in relation to speed, which indicates that electric vehicles will have the same acceleration rates and climbing capacities. The analytical correlations are presented, which enable to determine the maximum driving gradient the electric vehicle is capable of at a certain speed. The acceleration efficiency of an electric vehicle is estimated by the time required to accelerate it from initial to final speed. Unlike electric buses, for light motor vehicles, the acceleration efficiency is more important than the maximum cruising speed and the climbing capability. The study of the main traction characteristics of the power plant of the city bus. The graphical dependences of traction force and speed of electric vehicle with three-stage, two-stage and one-stage gearbox are presented. It is determined that the investigated structures have the same traction force depending on the speed, this indicates that electric vehicles will have the same acceleration and the same ability to overcome the lift. Analytical ratios are presented to determine the maximum lift that an electric vehicle can overcome at a certain speed.

Keywords: electric car, electric power plant, electric motor, traction electric motor, electric bus, energy-efficient technologies.

© Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Гнатова Г. В.

Статтю прийнято
до редакції 21.07.19

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КОНСТРУКЦІЙ ПЛАВУЧИХ КОМПОЗИТНИХ ДОКІВ ЗІ ЗМЕНШЕНОЮ КІЛЬКІСТЮ НАБОРУ У ПОНТОНІ

Кириченко К. В., викладач кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: kostiantynkyrychenko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0974-6904

Розглянуто особливості розрахунку техніко-економічних показників для визначення ефективності спроектованих морських плавучих засобів. Представлено алгоритм визначення економічного ефекту, що одержується при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні при порівнянні з композитним доком традиційної конструкції. Результати розрахунку за представленими залежностями дозволяють стверджувати, що впровадження розробленої конструкції понтону доку та удосконаленої технології побудови композитних плавучих доків дає змогу знизити витрати на матеріали та зменшити трудомісткість при побудові доків. Отримані залежності для оцінки економічних характеристик, з урахуванням специфіки конструкції плавучих доків, дають змогу на етапі конструювання створити якісну математичну модель для визначення параметрів залізобетонних понтонів композитних доків при раціоналізації конструкції плавучих композитних доків.

Ключові слова: композитний плавучий док, залізобетонний понтон, техніко-економічний аналіз.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.044-050

Вступ. Постійні потреби світового судноплавства в судноремонті, обстеженні та контролі стану суден, технічному обслуговуванні їх підводної частини обумовлюють підвищений попит на плавучі доки, виробництво яких стає предметом вигідного бізнесу [1, 2]. Для цього необхідно проводити рентабельну і конкурентоспроможну продукцію, що відповідає світовим вимогам якості в умовах інноваційного розвитку суднобудування [3]. Невід’ємними складовими розвитку докобудування є створення і випуск продукції при постійному пошуку нових прогресивних технічних рішень і технологій її виробництва [4, 5]. Одним з головних критеріїв, що визначають конкурентоспроможність плавучих доків є рівень їх якості, що відповідає вимогам відповідного Класифікаційного Товариства. Великим попитом користуються композитні доки, виготовлені частково із залізобетонних, а частково з металевих конструкцій [6]. Як правило, з залізобетону виготовляють понтон, а повністю металевими роблять бокові вежі.

Останнім часом у практиці проектування морських транспортних засобів намітилася тенденція зростання вимог до економічного обґрунтування новостворених проектів транспортних засобів.

Аналіз стану досліджуваної проблеми. Для адекватної оцінки економічної ефективності проекту на ранніх стадіях проектування необхідно визначити критерій ефективності (цільову функцію). Раніше доцільні конструкції вибирали виходячи з вимог правил класифікаційних товариств, які містили певні рекомендації, отримані на підставі досвіду експлуатації раніше побудованих доків. Вважалося, що таке проектування забезпечувало отримання надійних в роботі конструкцій. У сучасних умовах виконання рекомендацій, що містяться в правилах, виявляється недостатнім через швидку зміну кількісних і якісних характеристик доків, що будуються. Однак розробити таку систему критеріїв непросто: необхідно враховувати велику кількість факторів, вплив яких не завжди може бути встановлено з достатньою достовірністю. Тому на даний момент можливе одночасне урахування тільки обмеженої кількості вимог. Деякі ж вимоги залишаються без уваги і приймаються за другорядні. У результаті такого спрощення спотворюється фізична суть питань, що розглядаються, достовірність отриманих результатів може виявитися недостатньою, а отримані таким шляхом наближені критерії можуть рекомендуватися тільки як деякі умовні вимірники. Враховуючи вищезазначене, необхідно визначити основні критерії, що забезпечують надійність і раціональність конструкцій доку.

При складному взаємозв'язку між сучасними вимогами, що пред'являються до конструкцій, мінімізація маси з технічної та економічної точок зору не завжди веде до раціонального рішення задачі. Прямої пропорційності між масою конструкцій, трудомісткістю виготовлення, експлуатаційною та техніко-економічною ефективністю не спостерігається.

Для вирішення комплексної проблеми проектування конструкцій корпусу доку необхідно мати певну систему критеріїв, що дозволяють виконувати порівняльну об'єктивну оцінку різних варіантів можливих рішень. Вибір раціональних конструкцій доків повинен ґрунтуватися на обов'язковому врахуванні складних взаємозалежностей економічного характеру для знаходження найбільш раціонального рішення. Ця робота представляє великі труднощі, і її слід виконувати одночасно з пошуком теоретичних і практичних рішень на основі врахування досвіду будівництва та експлуатації доків, а також результатів експериментів в найбільш важких умовах докування [7].

Одним з найбільш вживаних методів розв'язання таких багатокритеріальних завдань є зведення багатокритеріального завдання до однокритеріального, шляхом виділення з набору показників одного, який вважають найважливішим [8]. Основна складність вирішення цього завдання полягає в необхідності порівняння критеріїв, що мають різну природу і визначаються в різних шкалах. Якщо ця складність вирішена і всі вихідні критерії виражені в порівнянних одиницях, то з безлічі показників ефективності виділяють один, найбільш важливий і прагнуть отримати раціональне рішення лише за цим єдиним критерієм [9].

При визначенні головних елементів плавучих споруд в якості цільової функції (CF) використовується критерій «вартість-ефективність» у вигляді:

$$CF = \frac{M[P]}{p_0} \rightarrow \max,$$

де $M[P]$ – математичне очікування прибутку; p_0 – ймовірність невиконання плавучим засобом основних функціональних завдань.

Математичне очікування прибутку $M[P]$:

$$M[P] = [П - З - K],$$

де $П$ – сукупний прибуток; $З$ – експлуатаційні витрати, K – величина капіталовкладень (вартість транспортного засобу плюс відсотки по кредиту).

Таким чином, для визначення математичного очікування прибутку $M[P]$ необхідно поряд з сукупним прибутком розрахувати значення експлуатаційних витрат і капіталовкладень. Так як методи техніко-економічного аналізу, що застосовуються для традиційних плавучих засобів не прийнятні для плавучих композитних доків, виникла необхідність у визначенні економічних показників з урахуванням специфіки конструкцій плавучих доків.

У дослідженнях [10, 11] виконано порівняльний техніко-економічний аналіз побудови суцільнометалевих та композитних плавучих доків і обґрунтовано економічну ефективність побудови і експлуатації композитних плавучих доків. Порівняльний аналіз металевих і аналогічних залізобетонних річкових плавучих споруд показав наступні відповідні показники залізобетонних споруд (показники сталевих річкових плавучих споруд прийняті за 100 %), %: вага всієї плавучої споруди 170...250, вага корпусу 280...350, витрати сталі на корпус 30...40, трудомісткість побудови всієї плавучої споруди 110...125, трудомісткість побудови корпусу 140...160, вартість всієї плавучої споруди 75...90, вартість корпусу 60...75, витрати на амортизацію 45...60, витрати на поточний ремонт 6...9.

Проведений аналіз останніх публікацій показав відсутність досліджень оцінки техніко-економічних характеристик плавучих композитних доків зі зменшеною кількістю набору у понтоні. Тому, отримання адекватних залежностей для оцінки економічних

характеристик на етапі конструювання плавучих композитних доків зі зменшеною кількістю набору у понтоні дозволить створити якісну математичну модель для визначення параметрів залізобетонних понтонів композитних доків, яка дасть змогу раціоналізувати конструкції плавучих доків.

Мета дослідження – проаналізувати методики оцінки економічних показників, які використовуються при проектуванні морських плавучих споруд та розробити рекомендації щодо вибору розрахункових залежностей, які враховують специфіку композитних плавучих доків зі зменшеною кількістю набору у понтоні для подальшого використання у математичній моделі.

Рішення задачі. Із метою уніфікації насичення доків системами і обладнанням прийнято ідентичним, при цьому розглядаються тільки ті показники, які в значній мірі впливають на собівартість їх будівництва і експлуатації. До таких показників відносяться: при побудові – витрати на сировину і матеріали; трудомісткість побудови; капітальні вкладення в виробничі фонди.

У конструкції композитного доку, що розглядається у статті, арматура, яка працює на місцеву міцність, встановлюється зовні в напрямку найменшого прольоту, а арматура, що працює на загальну міцність, встановлюється всередині елемента конструкції понтона [12]. Поперечні перегородки між внутрішніми бортами встановлюються через 4 шпациї, тобто через 3 метри, а в конструкції понтона під баштами не встановлюються шпангоути, флори та бімси (рис. 1).

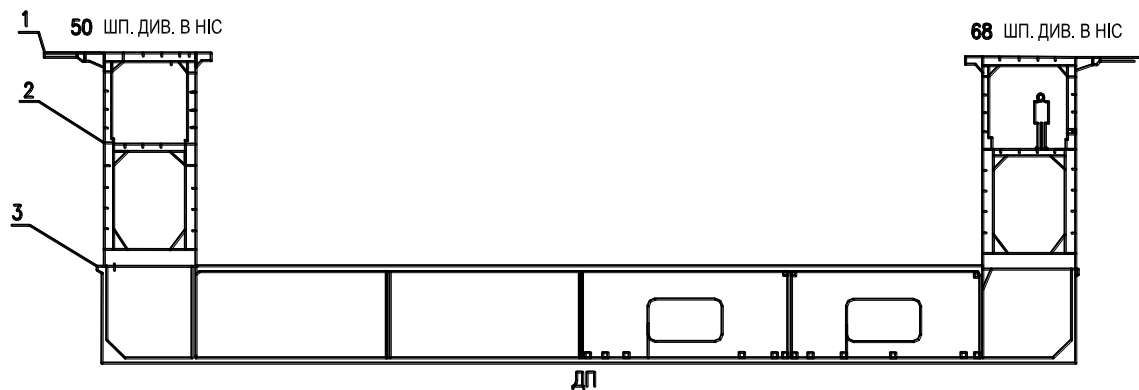


Рисунок 1 – Конструктивний переріз плавучого композитного доку: 1 – топ-палуба, 2 – палуба безпеки, 3 – стапель палуба

Економічний ефект E_p , що одержується при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні визначається за формулою:

$$E_p = C_u^k - (C_j^{3M} \Delta K),$$

де C_u^k – собівартість побудови традиційної конструкції композитного доку, тис. грн.; C_j^{3M} – собівартість побудови композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні, тис. грн.; ΔK – приріст капіталовкладень у виробничі фонди при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні.

Собівартість побудови композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні C_j^{3K} визначається за формулою:

$$C_j^{3K} = \Sigma Z_u + \Sigma Z_j,$$

де ΣZ_u – статті калькуляції, що залишилися незмінними при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні, тис. грн.; ΣZ_j – статті калькуляції, що змінюються при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні, тис. грн.

При розрахунку матеріальних витрат на побудову корпусів композитного доку традиційної конструкції та композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні

прийнятні середньостатистичні витрати на виготовлення 1 тонни суднової металоконструкції:

- зварювальні матеріали: для сталевого прокату – 5 %, для арматурної сталі – 2 %;
- технологічні гази: вуглекислота – 10 % (для сталевого прокату), – 2 % (для арматури);
- кисень: – 3,6 % (для сталевого прокату), – 1,75 % (для арматури);
- пропан-бутан: – 0,9 % (для сталевого прокату), – 0,67 % (для арматури).

Розрахунок окремих статей витрат що змінюються.

Витрати на матеріали при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні $Z_j^{3к}$ визначаються за формулою:

$$Z_j^{3к} = \Sigma Z_k^{3к},$$

де $Z_k^{3к}$ – матеріальні витрати на побудову композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні, тис. грн.

Співвідношення листового і профільного прокату прийнято на основі даних про матеріальні витрати на існуючих доках – 55 % і 45 % відповідно.

Витрати на основну заробітну плату при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні $Z_j^{озп}$ визначаються за формулою:

$$Z_j^{озп} = T_j \cdot N,$$

де T_j – трудомісткість побудови композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні, норма-година; N – вартість 1 норма-години, грн.

Витрати на додаткову заробітну плату при будівництві композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні $Z_j^{доzp}$ визначаються за формулою:

$$Z_j^{доzp} = Z_j^{озп} \cdot Q_{доzp},$$

де $Q_{доzp}$ – відношення витрат на додаткову заробітну плату до основної заробітної плати, %.

Витрати за статтею «Нарахування на заробітну плату» при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні $Z_j^{соц}$ визначаються за формулою:

$$Z_j^{соц} = (Z_j^{озп} + Z_j^{доzp}) \cdot Q_{соц},$$

де $Q_{соц}$ – відношення витрат за статтею «Нарахування на заробітну плату» до основної та додаткової заробітної плати, %.

Загальновиробничі витрати при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні $Z_j^{зв}$ визначаються за формулою:

$$Z_j^{зв} = Z_j^{озп} \cdot Q_{зв},$$

де $Q_{зв}$ – відношення загальновиробничих витрат до основної заробітної плати, %.

Адміністративні витрати і витрати на збут $Z_j^{ад.зб}$ при побудові композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні визначаються за формулою:

$$Z_{jad.зб.} = Z_j^{озп} \cdot Q_{ад.зб.},$$

де $Q_{ад.зб.}$ – відношення адміністративних витрат і витрат на збут до основної заробітної плати, %.

Проведені розрахунки по запропонованим залежностям показали, що впровадження конструкції композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні дає змогу знизити собівартість побудови до 4 % у порівнянні з аналогічною конструкцією композитного доку.

Висновки з перспективами. Розглянуто методи техніко-економічного аналізу для визначення ефективності спроектованих морських плавучих засобів. Результати розрахунку за представленими залежностями дозволяють стверджувати, що впровадження розробленої конструкції понтону доку та технологія побудови композитних плавучих доків дає змогу знизити витрати до 4 %. Отримано залежності для оцінки економічних

характеристик, які дають змогу на етапі конструювання створити якісну математичну модель для визначення параметрів залізобетонних понтонів композитних доків для раціоналізації конструкцій плавучих композитних доків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков / А. С. Рашковский и др. ; под науч. ред. А. С. Рашковского: Монография. Николаев: НУК, 2008. С. 22–38.
2. Щедролов А. В., Кириченко К. В. Анализ состояния строительства плавучих доков. *Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri*. 2018. № 1. С. 48–58.
3. Рашковский А. С., Нейман В. М. Совершенствование подготовки производства для строительства композитных плавучих сооружений. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2017. № 1 (16). С. 192–201.
4. Нейман В. М. Обеспечение качества строительства композитных плавучих доков. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. № 1. С. 3–9.
5. Rashkovskiy A., Ermakov D., Dong Z. Innovative technologies in composite floating docks construction. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. 2014. № 2. P. 93–102.
6. Мишутин Н. В., Мишутин А. В. Железобетонные плавучие сооружения и перспективы их использования. *Вісник ОДАБА*. 2002. №6. С. 181–187.
7. Kyrychenko K., Yahlytskyi Yu., Schedrolosiev O. Methods of improvement of the design and construction technology of composite docks. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. 2019. №2 (10). P. 36–47.
8. Чернецька Ю. А. Методи багатокритеріальної оптимізації структури капіталу підприємства. *Науковий вісник. Одеський національний економічний університет. Всеукраїнська асоціація молодих науковців. Науки: економіка, політологія, історія*. 2012. № 10(162). С. 100–110.
9. Schedrolosiev O., Yahlytskyi Yu., Kyrychenko K. Selection of a generalized efficiency criterion for the designing and technology of composite dock building. *Theoretical and applied questions of mathematics, mechanics and computer science: materials of the international scientific conference*. 2019. P. 165–166.
10. Слущкий Н. Г. Сравнительный технико-экономический анализ строительства цельнометаллических и композитных плавучих доков. *Збірник наукових праць НУК*. 2007. № 2 (413). С. 34–41.
11. Слущкий Н. Г., Рашковский А. С., Ермаков Д. В. Экономическая эффективность строительства и эксплуатации композитных плавучих доков большой подъемной силы. *Збірник наукових праць «Економіка: проблеми теорії та практики»*. 2007. Вип. 232. Т. III. С. 614–621.
12. Schedrolosiev O., Korostylov L., Klymenkov S., Uzlov O., Kyrychenko K. Improvement of the structure of floating docks based on the study into the stressed-deformed state of pontoon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6, No. 7 (96). P. 26–31.

REFERENCES

1. Rashkovskiy, A. S., Slutskiy, N. G., Konnov, V. N., Shchedrolosiev, A. V., & Uzlov, O. N. (2015). Proektirovanie, tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva kompozitnykh plavuchikh dokov: monografiya. Nikolaev, 22–38.
2. Shchedrolosiev, A. V., & Kyrychenko, K. V. (2018). Analiz sostoyaniya stroitel'stva plavuchikh dokov. *Azerbaijan State Marine Academy*, 1, 48–58.
3. Rashkovskiy, A. S., & Neyjman, V. M. (2017). Sovershenstvovanie podgotovki proizvodstva dlja stroitel'stva kompozitnyh plavuchih sooruzhenij. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 1 (16), 192–201.

4. Neyjman, V. M. (2017). (2007). Obespechenie kachestva stroitel'stva kompozitnykh plavuchih dokov. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 1, 3–9.
5. Rashkovskiy, A., Ermakov, D. & Dong, Z. (2014). Innovative technologies in composite floating docks construction. *Shipbuilding and marine infrastructure*, 2, 93–102.
6. Mishutin, N. V., & Mishutin, A. V. (2002). Zhelezobetonnye plavuchie sooruzheniya i perspektivy ih ispol'zovaniya. *Visnyk ODABA*, 6, 181–186.
7. Kyrychenko, K., Yahlytskyi, Yu., Schedrolosiev, O. (2019). Methods of improvement of the design and construction technology of composite docks. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, 2 (10), 36–47.
8. Chernetskaya, Yu.A. (2012). Metody bahatokryterialnoi optymizatsii struktury kapitalu pidpriemstva. *Naukovyi visnyk. Odeskyi natsionalnyi ekonomichnyi universytet. Vseukrainska asotsiatsiia molodykh naukovtsiv. Nauky: ekonomika, politolohiia, istoriia*, 10 (162), 100–110.
9. Schedrolosiev, O., Yahlytskyi, Yu., Kyrychenko, K. (2019). Selection of a generalized efficiency criterion for the designing and technology of composite dock building. *Theoretical and applied questions of mathematics, mechanics and computer science: materials of the international scientific conference. Kazakhstan*, 165–166.
10. Slutskiy, N. G. (2007). Sravnitelnyy tekhniko-ekonomicheskyy analiz stroitelstva tselnometallicheskiykh i kompozitnykh plavuchikh. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 2 (413), 34–41.
11. Slutskiy, N. G. Rashkovskiy, A. S., Ermakov, D. V. (2007). Ekonomicheskaya effektivnost stroitelstva i ekspluatatsii kompozitnykh plavuchikh dokov bolshoy podyemnoy sily. *Zbirnyk naukovykh prats «Ekonomika: problemy teorii ta praktyku»*. 232, 614–621.
12. Schedrolosiev, O., Korostylov, L., Klymenkov, S., Uzlov, O., Kyrychenko, K. (2018). Improvement of the structure of floating docks based on the study into the stressed-deformed state of pontoon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 7 (96), 26–31.

Кириченко К. В. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНСТРУКЦИЙ ПЛАВУЧИХ КОМПОЗИТНЫХ ДОКОВ С УМЕНЬШЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ НАБОРА В ПОНТОНЕ

Рассмотрены особенности расчета технико-экономических показателей для определения эффективности спроектированных морских плавучих средств. Представлен алгоритм определения экономического эффекта, получаемого при постройке композитного дока с уменьшенным количеством набора в понтоне при сравнении с композитным доком традиционной конструкции. Результаты расчета по представленным зависимостям позволяют утверждать, что внедрение разработанной конструкции понтона дока и усовершенствованной технологии постройки композитных плавучих доков позволяет снизить затраты на материалы и уменьшить трудоемкость при постройке доков. Полученные зависимости для оценки экономических характеристик, с учетом специфики конструкций плавучих доков, позволяют на этапе конструирования создать качественную математическую модель для определения параметров железобетонных понтонов композитных доков при рационализации конструкций плавучих композитных доков.

Ключевые слова: композитный плавучий док, железобетонный понтон, технико-экономический анализ.

Kyrychenko K. SPECIAL FEATURES OF CALCULATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF FLOATING COMPOSITE DOCK STRUCTURES WITH REDUCED NUMBER OF PONTOON FRAMES

The advantages of construction and operation of reinforced concrete floating structures are substantiated taking into account such criteria as total weight of the floating structure, weight of the hull, steel spread for the hull, total labour intensity of construction of a floating structure, labour intensity of construction of the hull, total cost of the floating structure, cost of the hull, depreciation expenses, current repair expenses. The structural and technical characteristics of the dock under consideration are rendered. These have been developed with account for the experience in construction and operation of docks, as well as the results of experiments under the most complex docking conditions. Next, the article describes methods of the technical and economic analysis for establishing the efficiency of maritime floating structures being designed. A target function is introduced for a proper assessment of the project's cost-effectiveness in the early design stages. Then, there is presented an algorithm for determining the economic effect obtained by constructing a floating composite dock with a reduced number of pontoon frames when compared with a conventional composite dock. When calculating material costs for construction of the hull of a conventional composite dock and a

composite dock with a reduced number of pontoon frames, the average cost of manufacturing a ton of ship metal structure has been selected. Thus, there have been obtained dependencies to estimate the material costs, basic and additional payroll expenditures, and general production costs for a composite dock with a reduced number of pontoon frames. The results of a calculation using these dependencies demonstrate that introduction of the proposed pontoon design and the improved construction technology allows reducing the material costs and labor intensity of construction of a composite floating dock. The dependencies for estimation of the economic characteristics of a floating dock take into account the special features of its structure. At the design stage, they allow developing a high-quality mathematical model for establishing the parameters of reinforced concrete pontoons of composite docks when rationalizing the design of floating composite docks.

Keywords: *composite floating dock reinforced concrete pontoon, technical and economic analysis.*

© Кириченко К. В.

Статтю прийнято
до редакції 03.10.19

УДК 656.61.052

МОРСЬКИЙ ПЕРЕСУВНИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС «КАСКАД»

Ремізов П. П., капітан далекого плавання, винахідник, e-mail: remizov.pavel@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3087-2972;

Товстокорій, О. М., к.т.н., завідувач кафедри управління судном Херсонської державної морської академії, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028;

Сілеверстов І. А., к.т.н., доцент, декан факультету інженерії та транспорту Херсонського національного технічного університету, e-mail: sia04041972@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6886-4820;

Даньшин М. І., технічний дизайнер ТОВ «Premizlab UA», e-mail: tax.danshin@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3465-5219

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.051-058

В останні кілька десятиліть спостерігається активний розвиток вітроенергетичних проєктів на прибережних шельфах морів. Працюють численні діючі і встановлюються нові вітрові ферми, що генерують «зелену» електроенергію. Почалося освоєння глибоководних ділянок морських районів з інтенсивною вітровою активністю. Динамічно розвиваються два напрямки – установка вітряків на різних плавучих платформах, на якірних системах далеко у відкритому морі. Другий тип – це глибоководні морські вітрові установки з поплавковим принципом утримання «класичних» вітрових генераторів у вертикальному положенні.

Розвиток цих технологій свідчить про те, що освоєння вітрової енергії у відкритій частині морів і океанів з активним вітровим навантаженням вже розпочато і що в майбутньому ця робота буде розвиватися ще більш інтенсивно.

Але в основному вітрові турбіни пропонуються з горизонтальними валами, що вимагає все більше і більше збільшення розмірів для підвищення потужності. Крім цього до уваги береться потенціал гідроенергетики при проєктуванні таких вітрових турбін.

Пропонується проєкт морського пересувного енергетичного комплексу «Каскад». Комплекс, розташований на плавучій платформі, включає в себе активне вітрило, що складається з: поворотної опори (поворотний підшипник великого діаметра) на якій встановлений каркас з ферм під обтічник і двох вертикальних турбін карусельного типу. Установка також має під турбінами на несучих фермах електричні генератори з мультиплікаторами. Електричні генератори по електричним кабелям і через безконтактний пристрій передають вироблену електроенергію на електророзподільний щит і енергосховище.

Особливий вплив на керованість платформи надають активне вітрило і підводні гідротурбіни.

Активне вітрило на поворотній платформі може розташовуватися до вітру під певним заданим кутом, що дозволить платформі рухатися гаслами у напрямку до вітру і утримуватися на генеральному курсі. Підводні гідротурбіни на правому і лівому підводному борту катамарана. Їх розташування може бути по одній з кожного борту як показано на малюнку або симетрично по дві на кожен борт.

Вони служать для вироблення електроенергії від зустрічного потоку води при русі платформи в результаті роботи активного вітрила.

Пропоновані пристрої можуть бути різних розмірів у залежності від призначення і встановленої потужності. Платформи «Каскад» можуть встановлюватися на стаціонарні якірні місця і подавати електроенергію на найближчий берег. Можуть бути океанських розмірів з потужностями турбін у кілька Гігават, з споживанням потужності прямо на борту або з передачею електрики через заряд і транспортування акумуляторів.

Ключові слова: «зелена» енергетика, вітрова турбіна, гідротурбіна, активне вітрило, плавуча платформа.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.?-?

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними задачами. В останні декілька десятиріч спостерігається активний розвиток вітроенергетичних проєктів на прибережних шельфах морів, що омивають Північну Європу. У цьому регіоні працюють багаточисленні діючі та ті, що встановлюються, нові вітрові ферми, які генерують «зелену» електроенергію. Почалось

освоєння глибоководних ділянок морських районів з інтенсивною вітровою активністю. Ряд країн запускає проекти зі встановлення в глибоководних районах (з глибинами більш за 100 м) вітрових ферм з генераторами великої потужності. Динамічно розвиваються два напрями – встановлення вітряків на різноманітних плавучих платформах, та глибоководні морські вітрові установки з поплавковим принципом утримання «класичних» вітрових генераторів у вертикальному положенні. Обидва типи фіксуються на якірних системах у відкритому морі.

Динаміка розвитку даних технологій свідчить про те, що освоєння вітрової енергії у відкритій частині морів і океанів з активним вітровим навантаженням вже розпочато і буде розвиватися ще більш інтенсивно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв’язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Останнім часом вчені та інженери все більше і більше стали звертатися до теми використання сили вітру для отримання як енергії для руху суден, так і для отримання електричної енергії. [2, 3].

Розглянуто принципи дії та методи використання вітроенергетики і гідроенергетики з прив’язкою до конкретних конструкцій [4, 5].

Розвиток офшорного видобутку вуглеводнів дав необхідні технічні інструменти та багатий досвід для розвитку альтернативної енергетики у відкритому океані. Але в той же час сам видобуток і реалізація видобутих вуглеводнів гальмує саму альтернативну енергетику, по суті, будучи її прямим конкурентом.

Проте, як свідчить останній звіт Maritime Strategies International (MSI), розроблений на замовлення Європейського кліматичного фонду, баланс сил поступово змінюється. Відсоток викопного палива у морській галузі стрімко зменшується на користь відновлювальних та екологічних джерел енергії [6].

В останні роки, завдяки отриманому досвіду роботи офшорної індустрії видобутку вуглеводнів, постала нова, незалежна галузь прибережної відновлюваної енергетики. Вона бурхливо розвивається, і їй стає тісно на прибережних шельфах, вона все далі прагне відірватися від берега, далі в море.

Розвиток прибережної вітрової енергетики широко обговорюється [7]. У провідних світових економічних і технічних виданнях активізувалася критика технологій, що використовуються у «традиційній» вітроенергетиці. Так, критикується: велика частка пластика при виготовленні вітрових генераторів, кошовна його переробка, а, в умовах відкритого моря, ці матеріали збільшують ризик забруднення середовища. Другим фактором є технічні обмеження у використанні класичних вітряків – допустима робоча сила вітру складає 25–30 метрів за секунду. При більших швидкостях вітру вітряк зупиняється і переводиться в штормовий режим очікування, іншими словами ставиться на гальмо і розгортається до вітру боком для зменшення опору лопатей. Пікові, або максимальні вітрові навантаження залишаються незадіяними, зважаючи на технічні обмеження, вітрових установок, що прийняті «на озброєння» [8].

Останнім часом вітроенергетичні генеруючі потужності припинили обов’язково прив’язувати до ґрунту. Майже два роки тому, з’явилася перша плавуча вітроелектростанція і результати її роботи перевищили навіть найсміливіші очікування [9, 10]. Але, в основному вітрові турбіни пропонуються з горизонтальними валами, що вимагає все подальшого збільшення розмірів для підвищення потужності. Крім цього до уваги не береться потенціал гідроенергетики при проектуванні таких вітрових турбін.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є пропозиція плавучої вітрогідроелектростанції нового типу.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Авторами проекту «Морський пересувний енергетичний комплекс «Каскад» представлено своє бачення вітроенергетики відкритих морів найближчого майбутнього. Воно засноване на використанні авто-керованих плавучих платформ-катамаранів, що

оснащені сучасним автоматизованим управлінням і навігаційним обладнанням, вітровими і гідродинамічними пристроями з вироблення електроенергії, які здатні впливати на управління плавучою платформою, утримувати її на заданому курсі, і обладнанням, що дозволяє акумулювати і використовувати отриману електроенергію.

Метою проекту «Каскад» є виробництво плавучих морських енергетичних комплексів нового типу. Одним із факторів, що ускладнюють просування вітроенергетики в глибоководні райони відкритого моря є, на думку автора, відсутність різноманітності в вітроенергетичних пристроях, задіяних на глибоководних шельфах. Найчастіше вітрогенератори, які використовуються на суші, просто переносяться в морські умови з адаптацією лише несучих засобів – платформи, поплавкові пристрої і т.ін., а самі ж вітрові генератори не відчувають будь-яких конструктивних змін, хоча в умовах відкритого моря вітрові навантаження бувають набагато інтенсивніше берегових і прибережних, зі швидкостями вітру понад 70 метрів в секунду, що спричиняє підвищення експлуатаційних ризиків для подібних дорогих вітрових комплексів.

На думку автора проекту «Каскад», океанічна вітрова енергетика тільки народжується, відносно інших технологій вона запізнюється в розвитку на кілька десятиліть.

Протягом останніх десяти років автор проекту здійснював пошук технічного рішення максимального використання сил природи у відкритому морі.

Спостерігаючи силу стихії, перетинаючи штормові широти або ухиляючись від зустрічних циклонів і тропічних ураганів, він уявляв можливість створення пристроїв, здатних надійно працювати в штормових умовах, при цьому бути повністю роботизованими. Великий вплив на інтерес до пошуку інноваційних рішень, справила інформація про катастрофічні урагани біля узбережжя Флориди і Сходу США, Індійському океані, на Мадагаскарі і Філіппінах, Індонезії і т.ін.

Вчені Стенфордського університету США [11] з'ясували, що використання вітрових генераторів у районах, схильних до ураганів, можуть істотно зменшити руйнівну дію стихії, допомогти уникнути збитків від неї.

Не менш важливим і очевидним фактором є посилення кліматичних змін, викликаних глобальним потеплінням. Генеральна ідея проекту полягає в тому, що вже сьогодні можливо і далі нарощувати світове споживання енергії – не тільки без негативного впливу на середовище, але і з одночасним виправленням скоєної раніше шкоди.

Постійний інтерес до цієї проблеми допоміг автору в створенні проекту «Каскад», в якому він спробувати об'єднати його з загальною концепцією розвитку прибережної або офшорної вітроенергетики, намалювати перші начерки вітроенергетики відкритих морів і океанів, запропонувати своє бачення використання вітрових пристроїв у морському транспорті недалекого майбутнього.

Відкритий океан є невичерпним ресурсом як вітрової енергії, так і енергії течій.

Технічні можливості країн, що ведуть освоєння прибережних шельфів під вітрові електростанції, значно зросли, напрацьований дуже важливий і значний досвід морського базування і обслуговування вітрових ферм у морі. Прокладаються кабельні траси по морському дну, по яким електроенергія надходить з офшорних ферм на берег до споживача. Вітрова енергетика стоїть на порозі виходу у відкрите море.

Проект «Каскад». Один із варіантів автономного енергетичного комплексу працює на енергії вітру і води, що рухається, представлений у проекті «Каскад» (рис. 1). Експериментальна установка спочатку будувалася як стаціонарний вітряк на катамарані, що стоїть на якорі. Але в процесі експлуатації установки стало зрозуміло, що призначення пристрою можна модифікувати як не тільки плавучий катамаран, з вітровою установкою, що встановлюється на якорі, а й як плавучий засіб, що приводиться до руху за допомогою активного вітрила нового типу. Це активне вітрило типу «Каскад», спроектоване, побудоване і випробуване в Україні, у місті Херсон на річці Дніпро підприємством Premizlab UA.



Рисунок 1 – Загальний вигляд яхти-катамарана, що має електродвигуни як у звичайного судна, але основним рушієм якої є активна енергетична вітрильна установка нового типу

Більш детально конструкцію активного вітрила показано на рис. 2.



Рисунок 2 – Пристрій активного вітрила: поворотна опора (поворотний підшипник великого діаметра) (а), на якій встановлено каркас обтічника (б) і дві вертикальні турбіни (в) карусельного типу, електричні генератори з мультиплікаторами (г)

Електричні генератори по електричним і через безконтактний пристрій передають вироблену електроенергію на електророзподільний щит і енергосховище. Поруч на технічній палубі розташовані пристрої для стиснення і поділу повітря на рідкий азот і кисень – газотурбодетендери. Отримані рідкі компоненти повітря передаються по трубопроводах і накопичуються під водою в накопичувальних підводних транспортних танках. Отримані компоненти можуть транспортуватися підводним буксируванням, або перекачуватися в спеціальні транспортні танкери надводним шляхом або під водою.

Особливий вплив на керованість платформи має активне вітрило і підводні гідротурбіни.

Активне вітрило на поворотній платформі може розташовуватися до вітру під певним заданим кутом, що дозволить платформі рухатися галсами у напрямку до вітру і утримуватися на генеральному курсі.

Підводні гідротурбіни встановлено на правому і лівому підводному борту катамарана. Їх розташування може бути по одній з кожного борту, як показано на рис. 3, 4, або симетрично по дві на кожен борт. Вони служать для вироблення електроенергії від зустрічного потоку води при русі платформи в результаті роботи активного вітрила.

Гідротурбіни також впливають на управління платформи шляхом гальмування правої або лівої гідротурбіни зниженням обертів через збільшення електричного навантаження на електрогенератор гідротурбіни. Також турбіни можуть працювати як активні рушії, при зміні режиму роботи електрогенератора на режим «електромотор». На палубі активного вітрила катамарана під турбінами розташований навігаційний місток управління з круговим автоматичним оглядом, що дозволяє керувати платформою дистанційно. Платформа обладнана усіма необхідними навігаційними вогнями і знаками, які працюють автоматично цілодобово.

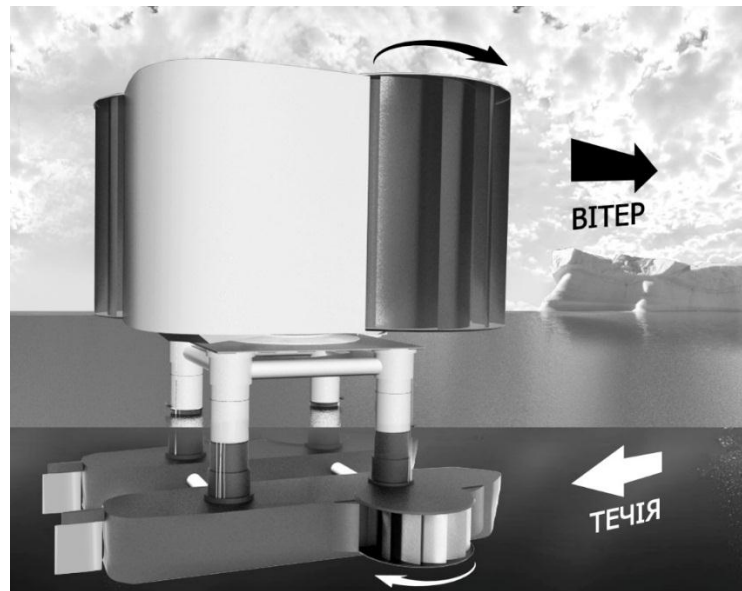


Рисунок 3 – Вигляд морського пересувного енергетичного комплексу «Каскад» у роботі

Як і всі морські платформи дана оснащена вертолітним майданчиком, підводним терміналом, технічними ліфтами, вантажними кранами та лебідками, якірним пристроєм. Для збільшення парусності платформи, можуть використовуватися парашутні пристрої.

Розвиток технологій транспортування електроенергії обіцяє швидкий прогрес, який, наприклад, дозволить транспортувати заряджені акумулятори на берег до споживача. Дані платформи можуть забезпечувати електроживленням або підзарядкою вантажні судна, що проходять повз, або рибальський флот, або станції з видобутку корисних копалин у відкритому морі.

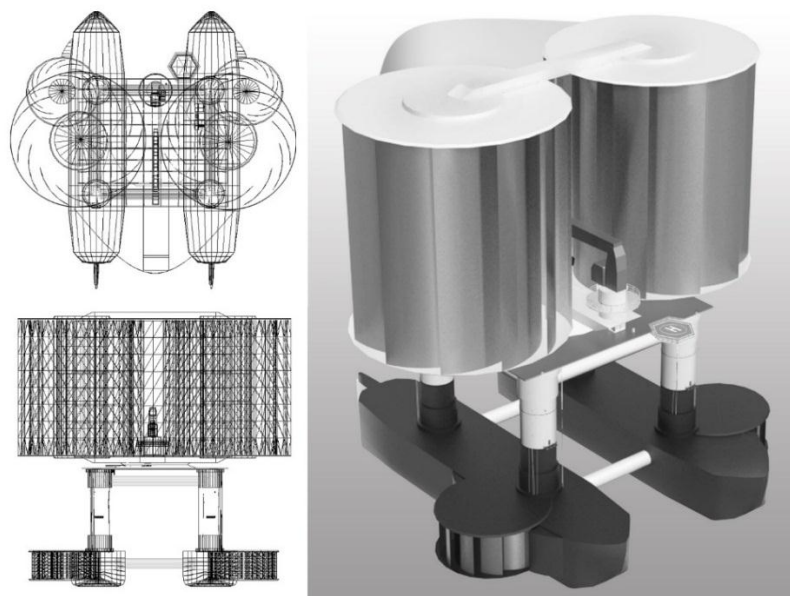


Рисунок 4 – Морський енергетичний комплекс «Каскад» у проєкціях

Висновки. Пропоновані пристрої можуть бути різних розмірів у залежності від призначення і встановленої потужності. Платформи «Каскад» можуть встановлюватися на стаціонарні якірні місця і подавати електроенергію на найближчий берег. Можуть бути океанських розмірів з потужностями турбін у кілька гігават, з споживанням потужності прямо на борту або з передачею електричної енергії через заряд і транспортування акумуляторів, або в недалекому майбутньому бездротовим способом, існування якого довів Нікола Тесла, та який вже робить перші кроки у мобільних пристроях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Энергетичний комплекс «Каскад-3» : патент 91379 Україна : МПК: F03B 3/04, F03D 3/02, F03B 13/08, F03B 13/10. № а 2013 11898; заявл. 9.10.2013; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.
2. Roadmap for Sail Transport: Engineering. URL: http://www.nrsail.eu/wp-content/uploads/2015/11/SAIL_FinalReport_Engineering.pdf
3. Тим Скоренко. То ли мачта, то ли парус. URL: <https://www.popmech.ru/magazine/2011/101-issue/#>
4. Фалеев Д. С. Возобновляемые и ресурсосберегающие источники энергии : учебное пособие. Хабаровск : ДВГУПС, 2001. 175 с.
5. Michael, Shellenberger. (2019). The renewables can't power modern civilization is because they were never meant to. *Der Spiegel*, 19/4.5.
6. Марк Шевченко. Экология прежде всего, или горе перевозчикам. *Порты Украины* : веб-портал. URL: <https://ports.com.ua/articles/ekologiya-prezhde-vsego-ili-gore-perevozhchikam> (дата зверення 09.08.2019)
7. Галина Шмидт, Андрей Конеченков. Оффшорная ветроэнергетика. *Терминал*. 2015. № 28 (770). URL: http://uwea.com.ua/uploads/publications/PUBLIC_13072015.pdf (дата зверення 13.07.2015)
8. Анатолий Ализар. Мегаконструкции. Самые большие ветрогенераторы. URL: <https://habr.com/ru/post/373021/>
9. Владимир Скрипин. Возле берегов Шотландии заработала первая в мире плавучая ветряная электростанция. *Hywind Scotland*. URL: <https://itc.ua/news/vozle-beregov-shotlandii-zarabotala-pervaya-v-mire-plavuchaya-vetryanaya-elektrostantsiya-hywind-scotland/> (дата зверення 20.10.2017)
10. Владимир Сидорович. Первая в мире плавучая ветровая электростанция работает лучше, чем ожидалось. URL: <http://renen.ru/the-world-s-first-floating-wind-power-plant-works-better-than-expected/> (дата зверення 19.02.2018)
11. Offshore wind farms could tame hurricanes before they reach land. *Stanford University*. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2014/02/140226075019.htm> (дата зверення 26.02.2014.)

REFERENCES

1. *Enerhetychnyi kompleks «Kaskad-3»* : patent 91379 Ukraine : MPK: F03B 3/04, F03D 3/02, F03B 13/08, F03B 13/10. # a 2013 11898; zaiavl. 9.10.2013; opubl. 10.07.2014, Biul. # 13.
2. Roadmap for Sail Transport: Engineering. Retrieved from : http://www.nrsail.eu/wp-content/uploads/2015/11/SAIL_FinalReport_Engineering.pdf
3. Tim Skorenko. To li mачта, to li parus. Retrieved from : <https://www.popmech.ru/magazine/2011/101-issue/#>
4. Faleev D. S. (2001). *Vozobnovlyaemihe i resursosberegayuthie istochniki ehnergii* : учебное пособие. Khabarovsk : DVGUPS.
5. Michael, Shellenberger. (2019). The renewables can't power modern civilization is because they were never meant to. *Der Spiegel*, 19/4.5.

6. Mark Shevchenko. (2019). *Ehkologiya prezhdе vsego, ili gore perevozchikam. Portih Ukrainih. ports.com.ua*. Retrieved from : <https://ports.com.ua/articles/ekologiya-prezhde-vsego-ili-gore-perevozchikam>
7. Galina Shmidt, Andrey Konechenkov. (2015). *Offshornaya vetroehnergetika. Terminal, № 28 (770)*. Retrieved from : http://uwea.com.ua/uploads/publications/PUBLIC_13072015.pdf
8. Anatolij Alizar. *Megakonstrukcii. Samihe boljshie vetrogeneratorih*. Retrieved from L: <https://habr.com/ru/post/373021/>
9. Vladimir Skripin. (2017). *Vozle beregov Shotlandii zarabotala pervaya v mire plavuchaya vetryanaya ehlektrostantsiya. Hywind Scotland*. Retrieved from : <https://itc.ua/news/voze-beregov-shotlandii-zarabotala-pervaya-v-mire-plavuchaya-vetryanaya-elektrostantsiya-hywind-scotland/>
10. Vladimir Sidorovich. (2018). *Pervaya v mire plavuchaya vetrovaya ehlektrostantsiya rabotaet luchshe, chem ozhidalosj*. Retrieved from : <http://renen.ru/the-world-s-first-floating-wind-power-plant-works-better-than-expected/>
11. *Offshore wind farms could tame hurricanes before they reach land. Stanford University*. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2014/02/140226075019.htm>

Ремизов П. П., Товстокорый О. Н., Селиверстов И. А., Даньшин М. И. МОРСКОЙ ПЕРЕДВИЖНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «КАСКАД»

В последние несколько десятилетий наблюдается активное развитие ветроэнергетических проектов на прибрежных шельфах морей. Работают многочисленные действующие и устанавливаются новые ветровые фермы, генерирующие «зеленую» электроэнергию. Началось освоение глубоководных участков морских районов с интенсивной ветровой активностью. Динамично развивается два направления – установка ветряков на различных плавучих платформах, на якорных системах далеко в открытом море. Второй тип – это глубоководные морские ветровые установки с поплавковым принципом удержания «классических» ветровых генераторов в вертикальном положении.

Развитие данных технологий свидетельствует о том, что освоение ветровой энергии в открытой части морей и океанов с активной ветровой нагрузкой уже начато и что в будущем эта работа будет развиваться еще более интенсивно.

Но в основном ветровые турбины предлагаются с горизонтальными валами, что требует все большее и большее увеличение размеров для повышения мощности. Кроме этого не учитывается потенциал гидроэнергетики при проектировании таких ветровых турбин.

Предлагается проект морского передвижного энергетического комплекса «Каскад». Комплекс, расположенный на плавучей платформе, включает в себя активный парус, состоящий из: поворотной опоры (поворотный подшипник большого диаметра) на которой установлен каркас из ферм под обтекатель и двух вертикальных турбин карусельного типа. Установка также имеет под турбинами на несущих фермах электрические генераторы с мультипликаторами. Электрические генераторы по электрическим кабелям и через бесконтактное устройство передают выработанную электроэнергию на электрораспределительный щит и энергохранилище.

Особое влияние на управляемость платформы оказывают активный парус и подводные гидротурбины.

Активный парус на поворотной платформе может располагаться к ветру под определенным заданным углом, что позволит платформе двигаться галсами по направлению к ветру и удерживаться на генеральном курсе. Подводные гидротурбины на правом и левом подводном борту катамарана. Их расположение может быть по одной с каждого борта как показано на рисунке либо симметрично по две на каждый борт.

Они служат для выработки электроэнергии от встречного потока воды при движении платформы в результате работы активного паруса.

Предлагаемые устройства могут быть различных размеров в зависимости от назначения и установленной мощности. Платформы «Каскад» могут устанавливаться на стационарные якорные места и подавать электроэнергию на ближайший берег. Могут быть океанских размеров с мощностями турбин в несколько ГигаВатт, с потреблением мощности прямо на борту или с передачей электричества через заряд и транспортировку аккумуляторов.

Ключевые слова: «зеленая» энергетика, ветровая турбина, гидротурбина, активный парус, плавучая платформа.

Remizov P., Tovstokory O., Seliverstov I., Danshin M. MOBILE MARINE ENERGY FACILITY “CASCAD”

In the past few decades, there has been an active development of wind energy projects on the coastal shelves of the seas. Numerous existing wind farms and those under construction, operate, generating “green” electricity. The development of deep-sea sections of marine areas with intense wind activity has begun. Two directions are being developed dynamically - the installation of windmills on various floating platforms, on anchor systems far in the open sea. The second type is the deep-sea offshore wind units with the floating principle of keeping the “classic” wind generators in an upright position.

The development of these technologies indicates that the wind energy utilization in open seas and oceans with active wind load, has already begun and that in the future this work will be further developed.

But mostly, wind turbines are offered with horizontal shafts, which requires size enlargement in order to increase the power being generated. In addition, the hydropower potential is taken into account when designing such wind turbines.

The project of the “Cascad” marine mobile energy facility is being proposed. The facility, located on a floating platform, includes an active sail, consisting of: a rotary support (large diameter rotary bearing) on which a frame of trusses under the fairing and two vertical turbines of a carousel type are mounted. The installation also has electric generators with multipliers mounted under the turbines on the load-bearing trusses. Electric generators transmit electric energy through electric cables and through the contactless device to the switchboard and energy storage.

The active sail and underwater hydraulic turbines have a particular impact on the platform handling.

The active sail on the rotary platform may be positioned at a certain predetermined angle to the wind, which will enable the platform to move in the direction of the wind and remain on the general course. Underwater hydroturbines are located on the starboard and port underwater sides of the catamaran. They can be one on each side or two on each side symmetrically.

Their purpose is to generate electricity of the oncoming water flow while the platform is moved by the active sail.

The devices in question can be of various sizes depending on the purpose and installed capacity. “Cascad” platforms can be installed on stationary anchor places and supply electricity to the nearest shore. They can be of ocean size with turbine capacities of several Gigawatts, with power consumption directly on board or with the transfer of electricity by charging and transporting it by electric power storage units.

Key words: “green” energy, wind turbine, hydraulic turbine, active sail, floating platform.

© Ремізов П. П., Товстокорий О. М., Селіверстов І. А., Даньшин М. І.

Статтю прийнято
до редакції 26.09.19

УДК 62-129.1

ПІДВИЩЕННЯ СТРОКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОРШНЯ КРЕЙЦКОПФНОГО ДИЗЕЛЯ

Самарін О. Є., к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, e-mail: samarin162@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2690-7298;

Білоусов Є. В., к.т.н., декан факультету суднової енергетики Херсонської державної морської академії, e-mail: ewbelousov67@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8185-8209;

Савчук В. П., к.т.н., завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, e-mail: postsavchuk@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5266-850X

Розроблено поршень крейцкопфного двигуна, у якому під компресійними кільцями виконано додаткові кеи у кількості, що дорівнює кількості компресійних кілець. У додаткові кеи встановлено захисні кільця, розміри яких у встановленому вигляді максимально наближені до розмірів додаткових кілець. Виконання додаткових кілець під компресійними кільцями у кількості, що дорівнює кількості компресійних кілець зменшує на них термічні навантаження і дає можливість застосувати додаткові кеи для всієї групи компресійних кілець. Установлення захисних кілець у додаткові кеи, розміри яких у встановленому вигляді максимально наближені до розмірів додаткових кілець, захищає додаткові кеи від потрапляння циліндрового масла й продуктів згоряння. Застосування запропонованого технічного рішення збільшує строк експлуатації поршня удвічі й не вимагає ремонту кілець у спеціалізованій майстерні. Впровадити модернізацію можливо при виготовленні нових поршнів і циліндрових втулок або після узгодження з виробником двигунів, провести доопрацювання вже вироблених елементів циліндро-поршневої групи.

Ключові слова: крейцкопфний дизель, компресійне кільце, кеп, лубрикатор.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.059-066

Вступ. Ущільнювальна дія компресійних кілець забезпечується притисканням їх до дзеркала циліндра й стінок поршневих канавок та лабіринтною дією пакета кілець [1]. Зношування кілець і поршневих кілець призводить до падіння тиску у циліндрах, втрати потужності двигуна й у кінцевому випадку до поломки кілець і виходу двигуна з ладу [2].

Процес відновлення роботоздатності двигуна є трудомістким і вимагає значних матеріальних витрат.

Особливо це стосується відновлення поршнів. Їх ремонт відбувається у спеціалізованих майстернях і вимагає високої кваліфікації технічного персоналу й матеріальних витрат.

Враховуючи масове використання поршневих двигунів внутрішнього згоряння, а також високі витрати на технічне обслуговування та ремонт, проблема підвищення строку експлуатації поршнів і зменшення витрат на їх відновлення набуває практичної значущості.

Аналіз причин зношування компресійних кілець і кілець. Для забезпечення ефективного ущільнення дуже важливо, щоб форма поршневих кілець, канавок і циліндричної втулки була належної конфігурації, а самі кільця щоб були рухливі в канавках.

Досвід показав, що незадовільне функціонування поршневих кілець є одним з головних факторів, що впливає на поганий стан циліндра [3].

Радіальне переміщення поршневих кілець призводить до зносу як самого кільця, так і нижньої поверхні кепа (рис. 1).

При зносі кепа щільність посадки кільця в кепі порушується, гази з потиличної частини кільця виходять і кільце перестає притискатися до дзеркала циліндра. Його ущільнювальна дія втрачається. Відбувається прорив газів і перегрів кільця і кепа.

Зростання температур кепа створює умови для коксування масла в ньому, що в подальшому призводить до заклинювання кільця і повної втрати його ущільнювальних властивостей.

У сучасних форсованих двигунах з метою зменшення зносу кепів їх робоча поверхня хромується.

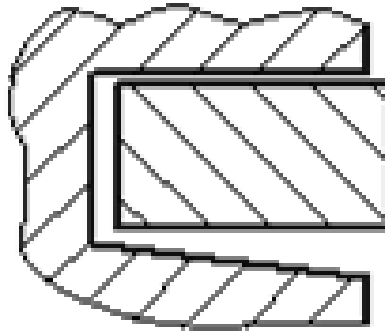


Рисунок 1 – Зношування кепи

Втрата тиску за кільцем викликає явища колапсу, при якому виникає радіальна вібрація – кільце вдаряється об внутрішню стінку поршневої канавки, потім розтискається і входить у контакт зі стінкою циліндра. Змінні удари в підсумку призводять до поломки кільця, що відзначається, зазвичай, у його середній частині (навпроти замка).

Абразивне зношування кільця і кепи може викликатися твердими частинками, які потрапляють у циліндр з паливом, наприклад, частинки каталізатора [4, 5].

Зображення зношених та еродованих поршневих кілець № 1...4 у зношених кепках показано на рис. 2.

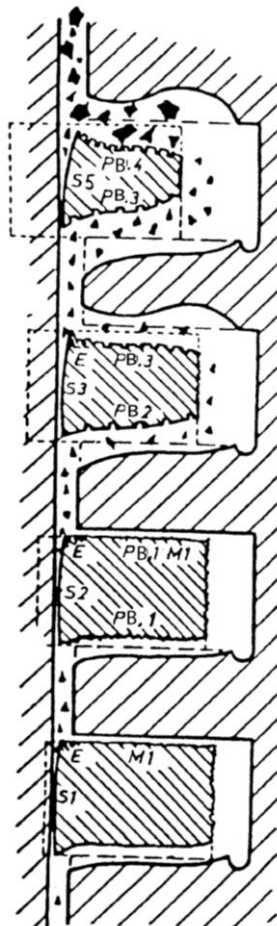


Рисунок 2 – Зношені та еродовані поршневі кільця № 1...4 у зношених кепках:

«Р» – робоча поверхня з рисками; «В» – віспини; «Е» – ерозія. Зовнішня крайка піскоструїться; «М» – механічне оброблення. Числа від 1 до 5 позначають ступінь пошкодження (дефекту), причому 5 – найбільший

Типовим є абразивне зношування верхнього кільця (як робоча, так і горизонтальні поверхні), а також верхнього кепи. Кілька мікротріщин іноді з'являється і в нижніх кільцях, зменшуючись у напрямку вгору. Таке явище протилежне глибині рисок (або шорсткості), яка зменшується від кільця до кільця у напрямку вниз.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Як видно з проведеного аналізу, зношення компресійних кілець і кепів відбувається через їх тертя між собою в умовах недостатнього змащення та потрапляння на поверхні абразивних часток.

Заміна кілець не викликає забруднень і може проводитись силами машинної команди при черговому ремонті циліндро-поршневої групи.

Ремонт поршня можливий тільки в умовах спеціалізованої майстерні й вимагає значних затрат. Збільшення строку служби поршня завдяки підвищенню зносостійкості робочих поверхонь кепів дало певний результат, але воно вже себе вичерпало.

Мета та задачі проведення досліджень. Модернізувати циліндро-поршкову групу крейцкопфного дизеля таким чином, щоб збільшити строк експлуатації поршня удвічі без додаткового ремонту кепів у спеціалізованій майстерні.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз конструкції поршня і поршневих кілець, установити причину передчасного виробітку кепів та запропонувати варіант компенсації цього недоліку.

Рішення поставленої задачі. Для забезпечення рішення поставленої задачі на поршні під компресійними кільцями виконано додаткові кепи у кількості, що дорівнює кількості компресійних кілець [6].

Модель поршня з двома групами кепів показана на рис. 3.

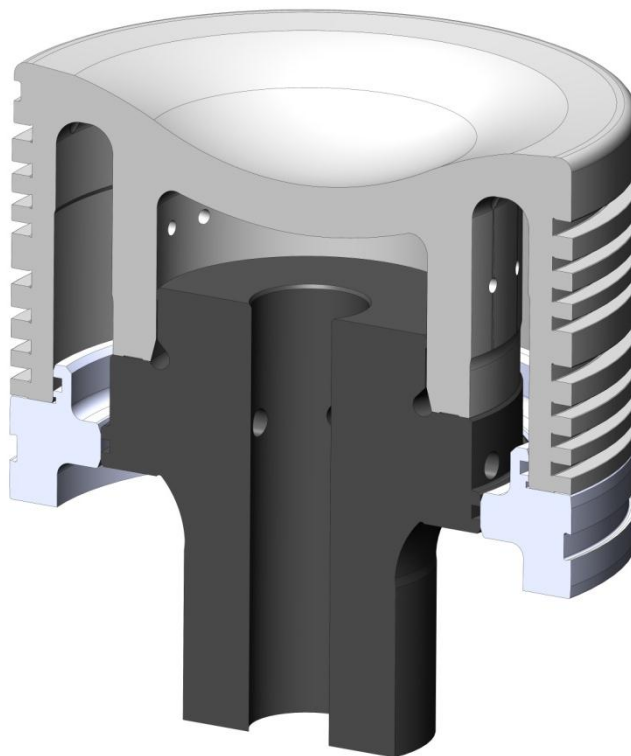


Рисунок 3 – Модель поршня з двома групами кепів

У додаткові кепи встановлено захисні кільця, розміри яких у встановленому вигляді максимально наближені до розмірів додаткових кепів (рис. 4).

Циліндро-поршнева група крейцкопфного дизеля складається з циліндрової втулки 1 з лубрикаторними розпилювачами 2 і поршня 3 з компресійними кільцями 4, встановленими у кепах 5.

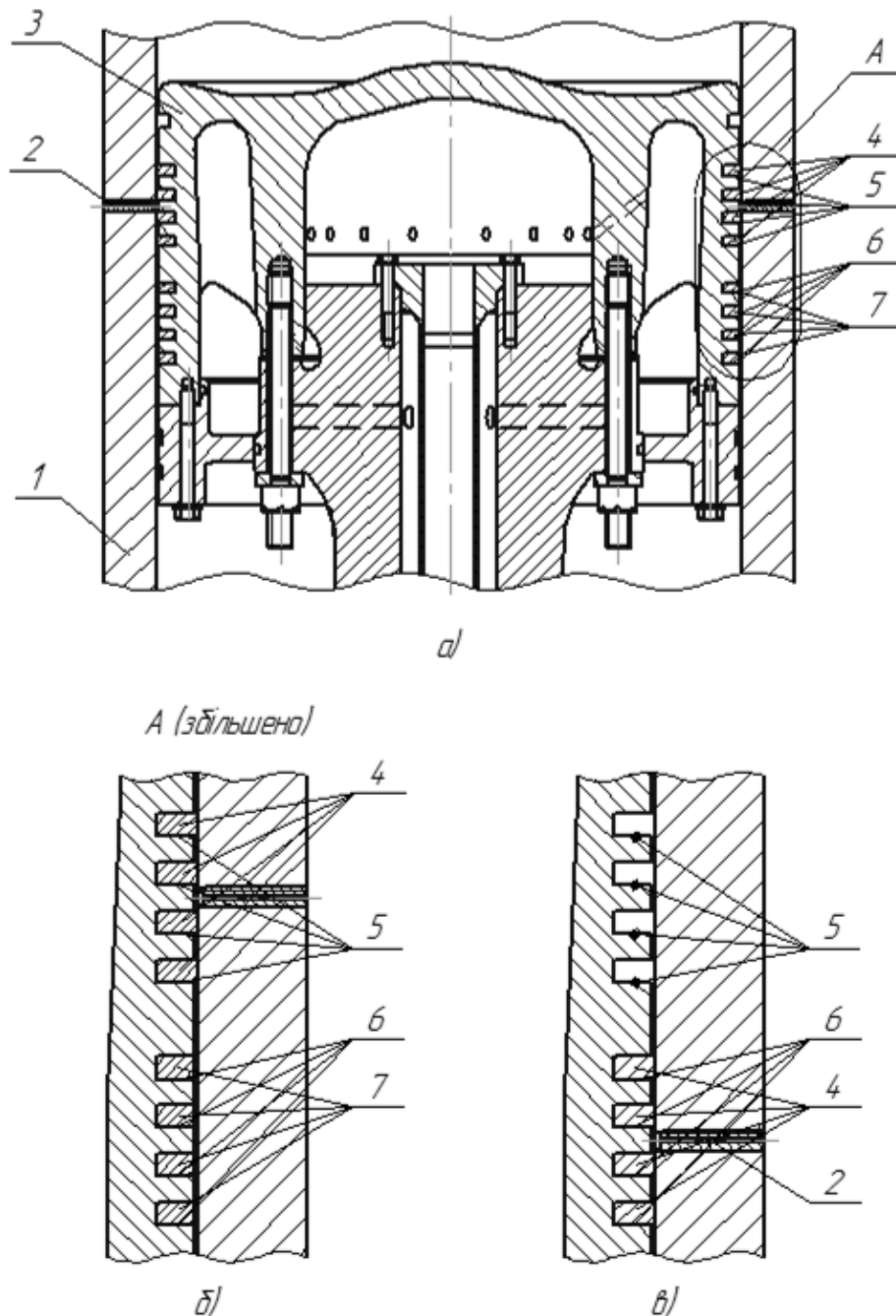


Рисунок 4 – Модернізована циліндро-поршнева група крейцкопфного дизеля:

а – загальний вигляд циліндро-поршневої групи; б – розташування компресійних кілець у кепах та захисних кілець у додаткових кепах у збільшеному масштабі; в – розташування компресійних кілець у додаткових кепах у збільшеному масштабі; 1 – циліндрова втулка; 2 – лубрикаторні розпилювачі; 3 – поршень; 4 – компресійні кільця; 5 – кепи; 6 – додаткові кепи; 7 – захисні кільця

Під компресійними кільцями 4 виконано додаткові кепи 6 у кількості, що дорівнює кількості компресійних кілець 4.

У додаткові кепи 6 встановлено захисні кільця 7, розміри яких у встановленому вигляді максимально наближені до розмірів додаткових кепів 6.

Виконання додаткових кепів під компресійними кільцями у кількості, що дорівнює кількості компресійних кілець зменшує на них термічні навантаження і дає можливість застосувати додаткові кепи для всієї групи компресійних кілець.

Установлення захисних кілець у додаткові кепи, розміри яких у встановленому вигляді максимально наближені до розмірів додаткових кепів, захищає додаткові кепи від потрапляння циліндрового масла й продуктів згоряння.

Циліндро-поршнева група крейцкопфного дизеля працює наступним чином.

При згорянні палива у циліндрі нового дизеля виникає підвищений тиск і температура, які діють на циліндрову втулку 1 і поршень 3 з компресійними кільцями 4, встановленими у кепах 5.

Під дією тиску компресійні кільця 4 переміщуються вертикально і горизонтально й притискаються до кепів 5 та до циліндрової втулки 1.

Із часом тертя компресійних кілець 4 по кепах 5 призводить до їх природнього зношування.

Крім того, у процесі роботи двигуна у циліндрі утворюються тверді частинки у вигляді залишків продуктів згоряння та алюмосилікатів, які потрапляють на компресійні кільця 4 і кепа 5.

Тертя компресійних кілець 4 по кепах 5 в умовах забруднення твердими частинками продуктів згоряння та алюмосилікатами призводить до прискореного абразивного зношування цих елементів.

Водночас додаткові кепа 6 зі встановленими у них захисними кільцями 7, які виконано під компресійними кільцями 4, захищені від надмірного термічного впливу та потрапляння на них твердих частинок у вигляді залишків продуктів згоряння, алюмосилікатів і залишків циліндрового масла, яке впорскується на компресійні кільця 4 лубрикаторними розпилювачами 2 при зворотному русі поршня.

Після зношування компресійних кілець 4 і кепів 5 поршень 3 виймають з дизеля.

З додаткових кепів 6 виймають захисні кільця 7, а на їх місце встановлюють нові компресійні кільця у необхідній кількості і поршень повертають у дизель. Водночас змінюють момент подачі циліндрового масла на лубрикаторні розпилювачі 2 так, щоб воно потрапляло на нові компресійні кільця.

При згорянні палива у циліндрі відремонтованого дизеля виникає підвищений тиск і температура, які діють на циліндрову втулку 1 і поршень 3 з компресійними кільцями, встановленими у додаткові кепа 6.

При зворотному русі поршня лубрикаторні розпилювачі 2 подають циліндрове масло на компресійні кільця, розташовані у додаткових кепах 6.

Заміна повного комплекту компресійних кілець із застосуванням додаткових кепів, як показано вище, можлива на судових малообертових дизелях типу RTA 68T-B (ДКРН 68/272), RTA 84C (ДКРН 84/240), RTA 58T (ДКРН 58/241,6), RTA 72U (ДКРН 72/250), RTA 48T (ДКРН 48/200) фірми Sulzer, 7RT-flex 82T (ДКРН 82/337,5), RT-flex 96C (ДКРН 96/250) фірми Wartsila та інших аналогічних двигунах. Це пов'язано з особливістю конструкції камери згоряння і кришки циліндра.

При положенні поршня у вміст лише незначна його частина входить у кришку циліндра, проходячи стик кришки й циліндра. Більша частина головки поршня знаходиться нижче, що дає можливість розмістити на ній як основну групу кепів з компресійними кільцями, так і додаткові кепа із захисними кільцями.

У дизелях фірми MAN при русі у вміст значна частина поршня проходить стик кришки й циліндрової втулки з очисним кільцем, що унеможливує встановлення додаткової групи компресійних кілець. Крім того, дизелі типу K98MC6 (ДКРН 98/266), S80MC6 (ДКРН 80/306), S60MC6 (ДКРН 60/229,2) та інші мають три компресійні кільця, компактно встановлених на поршні [7, 8].

Така конструкція ускладнює розміщення додаткових кілець і вимагає часткової зміни циліндро-поршневої групи, що можливо лише в умовах виробництва.

Однак значна частина сучасних дизелів фірми MAN, а саме дизелі типу: L35MC6 (ДКРН 35/105), L60MC-C8 (ДКРН 60/202,2), K80MC-C (ДКРН 80/230) та інші мають у своєму складі чотири компресійні кільця [9, 10].

Враховуючи те, що найбільшого зношування зазнає перший збільшений кеп і компресійне кільце, а три кільця повністю забезпечують компресію у двигуні, пропонується другий кеп доопрацювати для можливості встановлення збільшеного компресійного (рис. 5) і на першому етапі експлуатації встановити у нього захисне кільце.

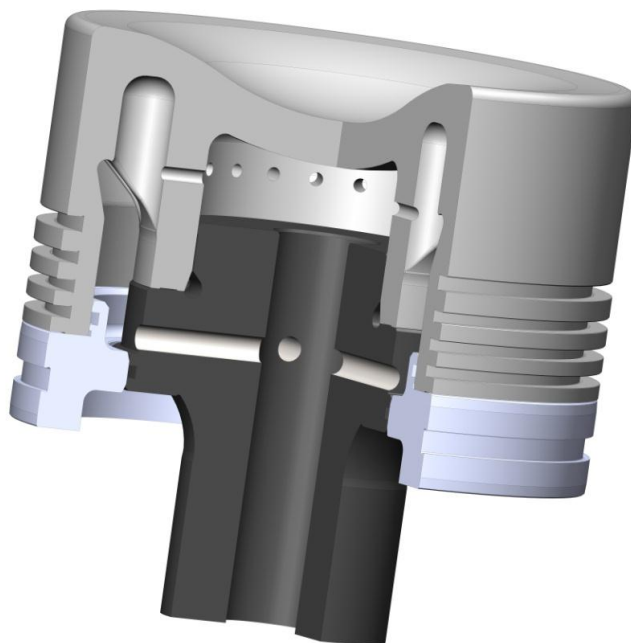


Рисунок 5 – Поршень з чотирма кепами, два верхніх з яких пристосовані для встановлення збільшених компресійних кілець

Після зношення першого кепи, вийняти з другого кепи захисне кільце, встановити на його місце збільшене компресійне кільце й продовжити використання поршня. Така технологічна операція може виконуватись силами машинної команди. Аналогічне доопрацювання можна застосувати й для дизелів фірми Sulzer та Wartsila.

Висновки та рекомендації. При роботі крейцкопфного двигуна поршень зношується рівномірно по колу. Водночас найбільш вузьким місцем, що визначає строк його служби, є кепи, у яких розміщуються компресійні кільця. Їх абразивне зношування призводить до необхідності відновлювати кепи у спеціалізованих майстернях або повністю замінювати поршні.

Такий ремонт є трудомістким та затратним.

Запропоноване технічне рішення дозволить використовувати додаткові кепи, розміщені під основними, і у процесі ремонту замінити тільки компресійні кільця. Така робота може бути виконана силами машинної команди.

Застосування рішення збільшує строк експлуатації поршня удвічі й не вимагає ремонту кепів у спеціалізованій майстерні.

Упровадити модернізацію можливо при виготовленні нових поршнів і циліндрових втулок або після узгодження з виробником двигунів, провести доопрацювання вже вироблених елементів циліндро-поршневої групи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Возніцкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания : учебник. Том 1. Москва : Моркнига, 2007. 284 с.
2. Возніцкий И. В., Пунда А. С. Судовые двигатели внутреннего сгорания : учебник. Том 2. Москва : Моркнига, 2008. 470 с.

3. Возницкий И. В. MAN B&W Двигатели модельного ряда MC 50-98. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание : учебн. пособ. Моркнига, 2008. 263 с.
4. MITSUI-MAN B&W instruction book. Volume 3. Component No.1. Code book. MITSUI ENGINEERING & SHIPBUILDING CO., LTD. 220 p.
5. MITSUI-MAN B&W instruction book. Volume 4. Component No.2. Fittings and accessories. MITSUI ENGINEERING & SHIPBUILDING CO., LTD. 528 p.
6. Циліндро-поршнева група крейцкопфного дизеля : пат. 133135 Україна: МПК F02F 1/100. № u 2018 10243; заявл. 16.10.18; опубл. 25.03.19, Бюл. № 6.
7. Instruction HYUNDAI-MAN B&W Diesel Engine Operation. Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division 1, Jeonha-Dong, Dong-Ku, Ulsan, Korea. 548 p.
8. Instruction HYUNDAI-MAN B&W Diesel Engine, Maintenance. Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division 1, Jeonha-Dong, Dong-Ku, Ulsan, Korea. 615 p.
9. Instruction HYUNDAI-MAN B&W Diesel Engine, Components NO.1 (Code book). Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division 1, Jeonha-Dong, Dong-Ku, Ulsan, Korea. 168 p.
10. Instruction Hyundai-MAN B&W Diesel Operation. Engine 10K98VC-C Mk6. HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO. LTD ULSAN SHIPYARD. KOREA, 2006. 372 p.

REFERENCES

1. Voznitskiy I. V. (2007). *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniy* : uchebnik. Tom 1. Moskva : Morkniga.
2. Voznitskiy I. V. (2008). *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniy* : uchebnik. Tom 2. Moskva : Morkniga.
3. Voznitskiy I. V. (2008). *MAN B&W Dvigateli modelnogo ryada MC-50-98. Konstrukciya, ekspluataciya I tehniceskoe obsluzhivanie*: uchebn. posob. Moskva : Morkniga.
4. MITSUI-MAN B&W instruction book. Volume 3. Component No.1. *Code book*. MITSUI ENGINEERING & SHIPBUILDING CO.,LTD..
5. MITSUI-MAN B&W instruction book. Volume 4. Component No.2. *Fittings and accessories*. MITSUI ENGINEERING & SHIPBUILDING CO.,LTD.
6. *Cylindro-porshneva hrupa krejckopfnogho dyzelja*: pat. 133135 Ukraijina : MPK F02F 1/100. # u 2018 10243; zajavl. 16.10.18; opubl. 25.03.19, Bjul. # 6.
7. Instruction HYUNDAI-MAN B&W Diesel Engine Operation. Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division 1, Jeonha-Dong, Dong-Ku, Ulsan, Korea.
8. Instruction HYUNDAI-MAN B&W Diesel Engine, Maintenance. Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division 1, Jeonha-Dong, Dong-Ku, Ulsan, Korea.
9. Instruction HYUNDAI-MAN B&W Diesel Engine, Components NO.1 (Code book). Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division 1, Jeonha-Dong, Dong-Ku, Ulsan, Korea.
10. Instruction Hyundai-MAN B&W Diesel Operation. Engine 10K98VC-C Mk6. HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO. LTD ULSAN SHIPYARD. KOREA, 2006.

Самарин А. Е., Белоусов Е. В., Савчук В. П. ПОВЫШЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОРШНЯ КРЕЙЦКОПФНОГО ДИЗЕЛЯ

Разработан поршень крейцкопфного двигателя, в котором под компрессионными кольцами выполнены дополнительные кепы в количестве, равном количеству компрессионных колец. В дополнительные кепы установлены защитные кольца, размеры которых в установленном виде максимально приближены к размерам дополнительных кепов. Выполнение дополнительных кепов под компрессионными кольцами в количестве, равном количеству компрессионных колец, уменьшает на них термические нагрузки и дает возможность применить дополнительные кепы для всей группы компрессионных колец. Установка защитных колец в дополнительные кепы, размеры которых в установленном виде максимально приближены к размерам дополнительных кепов, защищает

дополнительные кепы от попадания цилиндрического масла и продуктов сгорания. Применение предложенного технического решения увеличивает срок эксплуатации поршня в два раза и не требует ремонта кепов в специализированной мастерской. Внедрить модернизацию возможно при изготовлении новых поршней и цилиндрических втулок или после согласования с производителем двигателей, провести доработку уже произведенных элементов цилиндрической поршневого группы.

Ключевые слова: крещкопфный дизель, компрессионное кольцо, кеп, лубрикатор.

Samarin O.E., Bilousov E.V., Savchuk V.P. CROSSHEAD DIESEL ENGINE PISTON LIFETIME EXTENTION

The crosshead diesel engine piston is designed, which has additional piston grooves under compression rings. The number of the piston grooves is equal to the number of the compression rings. The safety rings are installed into additional piston grooves. The dimensions of the safety rings match as closely as possible with those of the piston grooves. The design with the number of additional piston grooves under compression rings which equals the number of compression rings, reduces thermal load and enables to make additional piston grooves for the whole group of compression rings. Positioning of safety rings into additional piston grooves, the dimensions of which, when installed, match as close as possible with the dimensions of additional piston grooves, protect the additional piston grooves from cylinder oil and combustion products ingress. Piston grooves and rings wear leads to the drop in cylinder pressure, loss of engine power, and eventually to rings breakage and engine failure. The process of restoring the efficiency of engine performance is time-consuming and requires significant material expenses. This is especially true for the pistons restoration. Pistons repair process is carried out in specialized workshops and requires highly-qualified technical personnel and material expenses. Taking into account the widespread use of piston internal combustion engines, as well as high maintenance and repair costs, the problem of pistons lifetime extention and repair process expenses reduction, is of practical importance. Compression rings and piston grooves wear is due to their friction with each other in conditions of insufficient lubrication and contact with abrasive particles on the surface. Replacement of the rings does not cause contamination and can be carried out by the engine room team during regular repair of the cylinder-piston group. Repair of the piston is possible to be carried out only in a specialised workshop and requires considerable investment. Piston lifetime extention by increasing the wear resistance of the working surfaces of the piston grooves has given a certain result, but it has already outlived its usefulness. The purpose of the research is to modernize the cylinder-piston group of crosshead diesel engine so as to extend piston lifetime twice without conducting additional repair of the piston grooves in a specialized workshop. To achieve this goal, it is necessary to analyze the design of the piston and piston rings, to determine the cause of premature wear of grooves and offer an option to compensate for this deficiency. The crosscut engine piston has been designed, where additional grooves are made under the compression rings and their number equals the number of compression rings. Safety rings are installed into additional grooves so that their dimensions match as close as possible when installed. Application of additional grooves under compression rings in the number equal to the number of compression rings, reduces their thermal loads and makes it possible to make additional grooves for the whole group of compression rings. Safety rings installation into additional grooves, the dimensions of which, when installed, are as close as possible to the dimensions of additional grooves, protect additional grooves from ingress of cylinder oil and combustion products. The application of the proposed technical solution, extends piston's lifetime twice and does not require the repair process of the grooves to be carried out in a specialized workshop. It is possible to implement upgrades in the manufacture of new pistons and cylinder liners or, after consultation with the engine manufacturer, to redesign already manufactured elements of the cylinder-piston group.

Keywords: crosshead diesel, compression ring, piston groove, lubricator.

© Самарін О. Є., Білоусов Є. В., Савчук В. П.

Статтю прийнято
до редакції 29.05.19

УДК 629.5.015.4

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИНЕРЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА ПОДШИПНИКИ ВАЛОПРОВОДА СУДНА ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКЕ НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Урсолов А. И., аспирант Национального университета кораблестроения имени адм. Макарова, e-mail: aleksandr.ursolov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4079-3415;
Некрасов В. А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теории и проектирования судов Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, e-mail: valery.nekrasov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7157-9481

Выполнена статистическая оценка ускорений, вызванных продольной качкой судна, в районе валопровода для ряда режимов встречного нерегулярного волнения. Дана оценка величины экстремальных ускорений с учётом долговременных распределений режимов волнения, а также по рекомендациям, приведенным в Правилах ряда классификационных обществ. Исследовано влияние инерционных сил валопровода во время качки на нагрузки, действующие на подшипники вала. Дана оценка экстремальным нагрузкам на подшипники валопровода за весь срок службы судна. Моделирование качки судна выполнялось в рамках линейной теории качки, а изгиб валопровода рассчитывался методом конечных элементов. Все расчёты выполнены для трёх судов с различной длиной, что позволило сделать выводы о влиянии длины на величину дополнительных инерционных нагрузок на подшипники валопровода.

Ключевые слова: ускорения при качке, статистическая оценка, инерционные силы, нагрузки на подшипники.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.067-076

Вступление. Надёжность и долговечность работы подшипников судового валопровода, особенно наиболее нагруженных кормовых подшипников (дейдвудного или подшипника кронштейна), зависит от того, насколько точно определены нагрузки на подшипники, действующие во время эксплуатации. В результате неправильной оценки нагрузок, возможны две в одинаковой степени неблагоприятные ситуации: перегрузка подшипника или его недостаточная загруженность. В первом случае, нарушается гидродинамическая смазка в подшипнике, что приводит к перегреву или интенсивному износу его вкладышей и, как следствие, к их преждевременному выходу из строя. Во втором случае, гидродинамическая смазка становится неустойчивой, возникают значительные роторные колебания вала в границах зазора подшипника, возможно возникновение биения вала и усталостное разрушение вкладышей.

Валопровод располагается в кормовой части судна, что может приводить к достаточно высоким вертикальным ускорениям при качке на интенсивном волнении. Поскольку гребной винт, валы, соединительные фланцы и муфты имеют большую массу, качка может приводить к значительным инерционным нагрузкам на подшипники валопровода, которые следует учитывать в расчётах центровки в качестве эксплуатационных условий.

Данные тензометрирования гребных валов ряда судов [1] выявило значительные нерегулярные изменения напряжения изгиба в вале при волнении моря с возрастанием амплитуд изгибающих моментов в несколько раз, по сравнению с зарегистрированными при движении на тихой воде, что свидетельствует о необходимости учёта волнения моря и качки судна в расчётах центровки валопровода. К сожалению, в работе [1] влияние качки было исследовано без разделения на факторы влияния (силы инерции масс, гидродинамические нагрузки на винт, деформации днища на волнах), что не позволяет использовать полученные данные для выполнения прогностических расчётов.

В соответствии с действующим руководящим документом [2], расчёт основных параметров центровки валопровода необходимо выполнять с учётом эксплуатационных факторов, в которые входят, в том числе, упругие деформации корпуса судна, вызванные

волнением моря и гидродинамические моменты на гребном винте, однако не упомянуты силы инерции масс, вызванные качкой.

Учёт сил инерции масс от качки является общепринятой практикой при расчёте эксплуатационных нагрузок на перевозимые грузы [3, 4] и закреплён в Правилах классификационных обществ при проектировании связей корпуса судна [5–10]. Следует также заметить, что в работах [11, 12] была показана важность учёта инерционных сил, действующих на валопровод во время качки, вследствие большой массы винта и самого валопровода.

Таким образом, публикаций, связанных с исследованием работы валопровода при эксплуатации на волнении, не хватает для получения комплексной завершенной методики расчёта изгиба вала с учётом данного эксплуатационного фактора. В данной статье предложена методика учёта нагрузок инерции масс гребного винта и валопровода, вызванные качкой судна, на подшипники валопровода и выполнена статистическая оценка для трёх судов с различной длиной.

Метод расчёта ускорений при качке судна. Первым шагом в оценке инерционных нагрузок на валопровод является расчёт ускорений в районе валопровода, вызванный качкой судна. Качка судна на стационарных режимах нерегулярного волнения в работе рассчитывалась по методике [13, 14], которая, в свою очередь, основана на линейной теории качки, спектральной теории морского нерегулярного волнения, теории плоских сечений и методе конформных отображений для расчёта гидродинамических характеристик шпангоутов. В работе [4] было показано, что при малых числах Фруда и (или) небольшой крутизне волн, в первом приближении можно не учитывать нелинейные эффекты качки, что даёт погрешность в безопасную сторону. Также в [4] доказано, что наибольшие ускорения возникают в вертикальном направлении во время продольной качки на встречном волнении, а ускорения в продольном и поперечном направлениях при бортовой качке значительно меньше, поэтому в настоящей работе рассматривалась только продольная качка на встречном волнении.

В качестве спектра нерегулярного волнения использовался спектр JONSWAP [14, 15], который в качестве основных исходных данных использует значительную высоту волны $h_{1/3}$ и средний период волнения \bar{T} . Результатом расчётов качки судна являются вероятностные характеристики колебаний центра тяжести судна: дисперсии вертикальной $D_{\zeta g}$ и килевой качки судна D_{ψ} , дисперсии их скоростей $D_{\zeta g}$, D_{ψ} , ускорений $D_{\zeta g}$, D_{ψ} и кросскорреляционные функции $K_{\zeta g \psi}$, $K_{\zeta g \dot{\psi}}$, $K_{\dot{\zeta} g \dot{\psi}}$.

Дисперсия вертикального ускорения в произвольной точке с координатой x (определённой относительно центра тяжести судна) вычисляется по формуле [16]:

$$D_{\zeta m} = D_{\zeta g} + x^2 D_{\psi} - 2x K_{\zeta g \psi}, \text{ м}^2/\text{с}^4.$$

Важной статистической характеристикой процесса ускорений является «значительные» амплитуды ускорений, соответствующие обеспеченности $Q_{1/3} = 0.14$, которые при линейной постановке расчёта качки имеют одинаковые значения как в положительном направлении, так и в отрицательном. Расчёт «значительных» амплитуд ускорений производится по формуле:

$$a_{1/3} = 2\sqrt{D_{\zeta m}}, \text{ м/с}^2.$$

Для оценки максимальных ускорений a_{\max} , которые могут возникнуть за всё время эксплуатации судна (≈ 24 года), требуется определить амплитуды ускорений с обеспеченностью $Q_{\max} = 10^{-8}$. При этом необходимо учесть все возможные режимы волнения, которые могут иметь место на маршрутах эксплуатации судна, что можно сделать с помощью формулы полной вероятности [17]. В качестве района плавания в

данной работе была принята Северная Атлантика, как область Мирового океана с наиболее суровыми условиями плавания, статистика по режимам волнения для которого приведена в [18]. Таким образом, амплитуды максимальных ускорений a_{\max} от уровня обеспеченности Q_{\max} можно определить с помощью численного или графического решения следующего уравнения полной вероятности [17]:

$$Q_{\max} = \sum_i \sum_j p(h_{1/3i}, \bar{T}_j) \exp\left(-\frac{a_{\max}^2}{2D_{\zeta n}(h_{1/3i}, \bar{T}_j, v_{ij})}\right), \quad (1)$$

где $p(h_{1/3i}, \bar{T}_j)$ – вероятность (частота) появления режима волнения со значительной высотой волны $h_{1/3i}$ и средним периодом \bar{T}_j , v_{ij} – скорость хода судна на этом режиме волнения, $D_{\zeta n}(h_{1/3i}, \bar{T}_j, v_{ij})$ – соответствующая дисперсия ускорений.

Скорость судна на волнении v с учётом естественных и вынужденных потерь, в свою очередь, является сложной функцией режима волнения, формы корпуса, гидродинамических характеристик гребного винта и склонности капитана судна к риску. Было принято следующее аналитическое выражение, позволяющее приближённо определить скорость судна в узлах на всех режимах волнения [11]:

$$v(h_{1/3}, \bar{T}) = \begin{cases} v_{\max}, & h_{1/3} \leq 1 \text{ м}; \\ v_{\min} + \max\left(0, \frac{v_{\max} - v_{\min}}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi(h_{1/3} - 1)}{13}\right)\right] - \Delta v(h_{1/3}, \bar{T})\right), & 1 < h_{1/3} < 14 \text{ м}; \\ v_{\min}, & h_{1/3} \geq 14 \text{ м}, \end{cases} \quad (2)$$

где v_{\max} – максимальная эксплуатационная скорость судна, уз; $v_{\min} = 5$ уз – минимально допустимая скорость судна во время шторма из условий сохранения управляемости судна; $\Delta v(h_{1/3}, \bar{T})$ – дополнительная поправка скорости в случае резонанса судна при качке [11]:

$$\Delta v(h_{1/3}, \bar{T}) = \begin{cases} 0, & |\bar{T} - \bar{T}_0| \geq 3 \text{ с}; \\ \frac{(v_{\max} - v_{\min})(h_{1/3} - 12)}{104} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi(\bar{T} - \bar{T}_0)}{3}\right)\right] \cos\left(\frac{\pi}{13}\left(h_{1/3} - \frac{41}{2}\right)\right), & |\bar{T} - \bar{T}_0| < 3 \text{ с}, \end{cases} \quad (3)$$

где \bar{T}_0 – средний период волнения, соответствующий наступлению резонанса при совпадении частоты максимума спектра и собственной частоты продольной качки. Выражения (2) и (3) получены из условий, что при слабом волнении потерь скорости нет, при любых условиях скорость не будет снижаться ниже, чем 5 узлов, и при резонансе будет иметь место дополнительное снижение скорости тем больше, чем больше высота волны.

Кроме прямого решения уравнения (1), экстремальные ускорения можно также получить с помощью рекомендаций, приведенных в нормативных документах классификационных обществ [5–10], однако применение этих ускорений для расчёта инерционных нагрузок на элементы пропульсивной установки судна не регламентируются.

Метод расчёта изгиба валопровода и нагрузок на подшипники. Расчёт параметров изгиба валопровода выполнялся методом конечных элементов с помощью программного обеспечения ShaftDesigner [19], которое основано на балочной идеализации валопровода и позволяет учитывать зазор в подшипниках валопровода (отрыв вала от поверхности вкладыша подшипника и возможный контакт в верхней его части).

В работе расчёт выполнялся в предположении, что плёнка гидродинамической смазки в подшипниках отсутствует, поскольку данное предположение значительно ускоряет расчёт и не приводит к значительным изменениям в результирующих нагрузках на подшипники. Также в работе рассматривались только гидродинамические нагрузки, действующие на гребном винте на тихой воде, и не учитывались деформации корпуса, вызванные качкой судна. Это вызвано тем, что целью работы было исследование нагрузок инерции масс, которые ранее не исследовались, в отличие от результатов по влиянию качки

на гидродинамические нагрузки на гребном винте [20]. Таким образом, в настоящей работе в качестве внешних сил, действующих на валопровод, приняты следующие нагрузки:

- распределённый собственный вес элементов валопровода $q_{sh}(x) = -gm_{sh}(x)$, где $m_{sh}(x)$ – погонная масса валопровода, кг/м;
- вес гребного винта $P_{pr} = -gM_{pr}$, где M_{pr} – масса гребного винта, кг, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;
- гидродинамические нагрузки на гребном винте на тихой воде, рассчитанные в соответствии с рекомендациями [21], а именно сила P_v и момент M_v в вертикальной плоскости, сила P_h и момент M_h в горизонтальной плоскости;
- силы инерции масс валопровода $q_{in}(x) = -a_{sh}(x)m_{sh}(x)$, где $a_{sh}(x)$ – вертикальные ускорения, действующие на оси валопровода, м/с²;
- силы инерции масс гребного винта $P_{in} = -a_{pr}M_{pr}$, где a_{pr} – вертикальные ускорения, действующие в центре тяжести винта, м/с².

Результаты расчётов и их анализ. В качестве объектов исследования было выбрано три судна с различными характеристиками, в частности длина судов равна 80, 150 и 220 м, а эксплуатационные скорости – 15, 14 и 16 уз. соответственно. Первое судно снабжения с двухвальной силовой установкой и редукторами, второе и третье – балкеры с прямой передачей на малооборотный дизельный двигатель. Для всех судов были найдены допустимые смещения подшипников из условий выполнения всех необходимых требований к технологии центровки.

В табл. 1 приведены значительные ускорения $a_{1/3}$, действующие на валопровод на квазистационарных режимах волнения, максимальные ускорения a_{max} за весь срок службы и ускорения, рассчитанные согласно рекомендаций различных классификационных обществ: Регистр судоходства Украины (PCY) [5], Российский морской регистр судоходства (PMPC) [6], Bureau Veritas (BV) [7], Det Norske Veritas (DNV) [8], Germanischer Lloyd (GL) [9], American Bureau of Shipping (ABS) [10]. Все ускорения в таблице приведены в безразмерном виде относительно ускорения свободного падения g , при этом первое значение в ячейке соответствует ускорениям в носовом, а второе – кормовому концу валопровода. Как видно из табл. 1, как на квазистационарных режимах волнения, так и в случае прямого расчёта на основе долговременных распределений режимов волнения, на судне с длиной 220 м имеют место меньшие ускорения, чем на судах с меньшей длиной.

Таблица 1 – Амплитуды ускорений по длине валопровода

	<i>Режим волнения</i>	<i>L = 80 м</i>	<i>L = 150 м</i>	<i>L = 220 м</i>
Значительные краткосрочные	$h_{1/3} = 0,6$ м, $\bar{T} = 8,5$ с	0,027-0,035	0,027-0,035	0,011-0,014
	$h_{1/3} = 1,8$ м, $\bar{T} = 8,5$ с	0,079-0,10	0,082-0,10	0,033-0,041
	$h_{1/3} = 4,3$ м, $\bar{T} = 9,5$ с	0,14-0,18	0,14-0,18	0,098-0,13
	$h_{1/3} = 7,9$ м, $\bar{T} = 11,5$ с	0,15-0,21	0,15-0,20	0,12-0,16
	$h_{1/3} = 11,6$ м, $\bar{T} = 12,5$ с	0,16-0,24	0,18-0,24	0,15-0,19
	$h_{1/3} = 14,0$ м, $\bar{T} = 13,5$ с	0,16-0,25	0,20-0,26	0,16-0,21
Максимальные долговременные	Прямой расчёт a_{max}	0,51-0,77	0,57-0,76	0,41-0,54
	PCY, PMPC	0,37-0,73	0,38-0,49	0,33-0,41
	Bureau Veritas	0,41-0,47	0,31-0,35	0,26-0,30
	Det Norske Veritas	0,49-1,00	0,60-0,78	0,46-0,60
	Germanischer Lloyd	0,53-0,98	0,74-0,95	0,67-0,83
	American Bureau of Shipping	0,63-1,10	0,57-0,64	0,44-0,50

Значения максимальных вертикальных ускорений, полученных прямым расчётом, близки к приведенным в работе [4], что свидетельствует о достоверности результатов. В свою очередь, рекомендации различных классификационных обществ дают значительно разнящиеся значения ускорений. В общем, рекомендации BV дают заниженные значения ускорений по сравнению с прямым расчётом, а GL наоборот – завышенные. Остальные рекомендации для различных судов дают неоднородное соответствие прямому расчёту. В целом, наиболее близкие к прямому расчёту значения были получены по формулам DNV [8], PCU [5] и PMPC [6], поэтому могут быть рекомендованы авторами статьи для оценки максимальных ускорений в районе валопровода. Приведенные данные могут быть использованы для проектной оценки значительных уровней ускорений на различных режимах волнения и максимальных ускорений в районе валопровода.

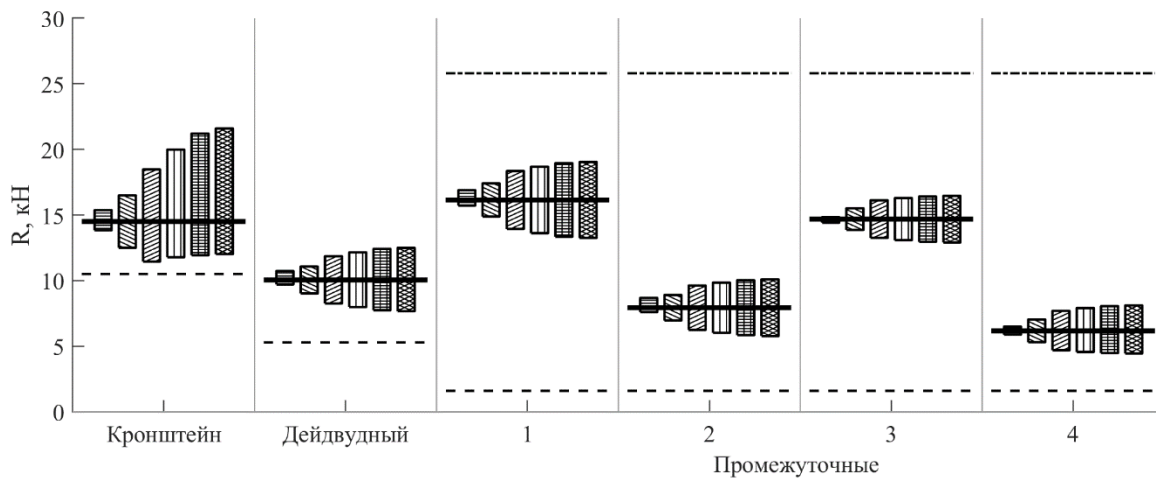
На рис. 1 приведены диаграммы нагрузок на подшипники при действии значительных ускорений вверх и вниз для трёх рассматриваемых судов. На диаграммы также нанесены значения нагрузок на тихой воде и граничные допустимые нагрузки из условия отсутствия отрыва вала от подшипника или перегрузки последнего. Амплитуда переменной составляющей нагрузок на кормовые подшипники во время интенсивного шторма ($h_{1/3} = 14,0$) для трёх исследуемых судов составляет примерно 30 %, 30 % и 25 % от нагрузок на тихой воде соответственно. Можно заметить, что несмотря на то, что инерционные нагрузки прикладывались с одинаковыми значениями и противоположными знаками, инерционные добавки к результирующим нагрузкам на подшипники валопровода имеют несимметричные значения относительно нагрузок на тихой воде. Это вызвано особенностями нелинейного взаимодействия валопровода и подшипников, а именно конечности длины и зазора в подшипнике.

В целом, нагрузки на подшипники находятся в пределах допустимых значений, кроме первого промежуточного подшипника на судне длиной 150 м при интенсивном волнении. В этом случае подшипник разгружается в момент действия ускорений вниз, что может привести к интенсивной вибрации валопровода и биению подшипника. На стадии проектирования следует избегать возможности перегрузки или недостаточной загруженности во время качки, чего можно добиться выбором технологических параметров центровки, которые обеспечивают величины нагрузок, наиболее равноудалённые от их граничных допустимых значений при выполнении всех прочих требований к параметрам центровки.

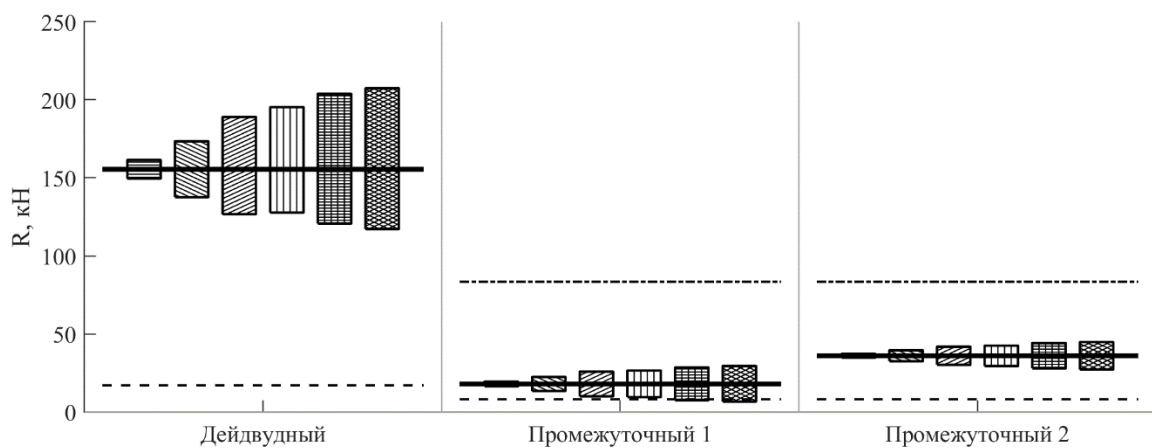
На рис. 2 приведены аналогичные диаграммы нагрузок на подшипники при действии максимальных ускорений, полученных прямым расчётом и по рекомендациям Правил классификационных обществ. Максимальная амплитуда переменной составляющей нагрузок на кормовые подшипники за весь срок эксплуатации трёх исследуемых судов составляет примерно 80 %, 90 % и 60 % от нагрузок на тихой воде соответственно. Результирующие нагрузки на подшипники при действии экстремальных инерционных сил могут приводить к разгрузке или перегрузке действующего подшипника или подшипника кронштейна, что так же следует учитывать при выборе технологических параметров центровки. Учёт присоединённых масс гребного винта [20] ещё больше увеличит изменение нагрузок в обе стороны, а учёт нелинейности качки наоборот, уменьшит значения ускорений [4], поэтому можно считать, что эти два фактора компенсируют друг друга.

Как видно из рис. 2, результаты очень различаются при использовании рекомендаций различных классификационных обществ, однако наиболее близкие результаты к прямому расчёту для судна длиной 80 м были получены с использованием формул PCU (PMPC), а для судов с длиной 150 и 220 м – с использованием формул DNV. Большой разброс ускорений и, как следствие, нагрузок на подшипники можно объяснить тем, что кроме длины судна и скорости на параметры качки также влияют отношения главных размерений судна, которые в рекомендациях классификационных обществ практически не учитываются, но были учтены в прямом расчёте. В частности, на судне

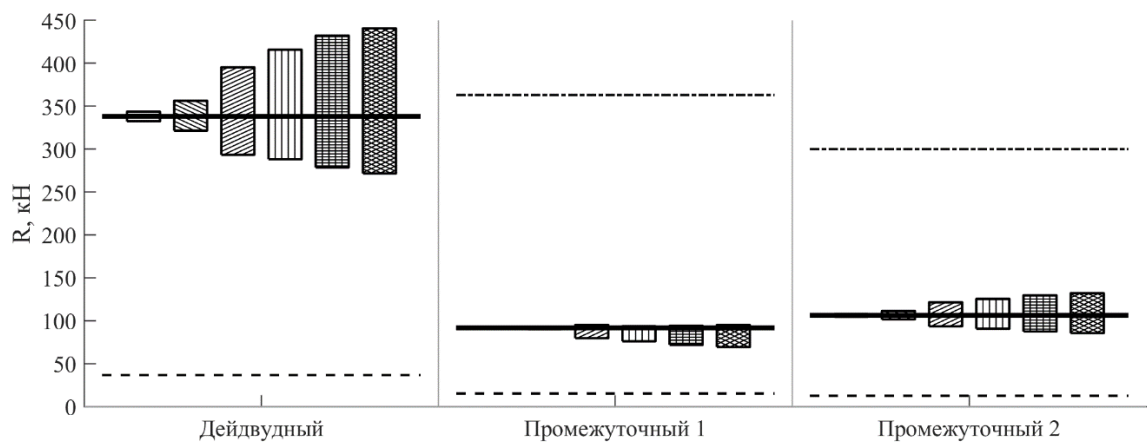
снабжения отношение ширины к длине больше, а отношение осадки к длине меньше, чем на двух других судах.



a



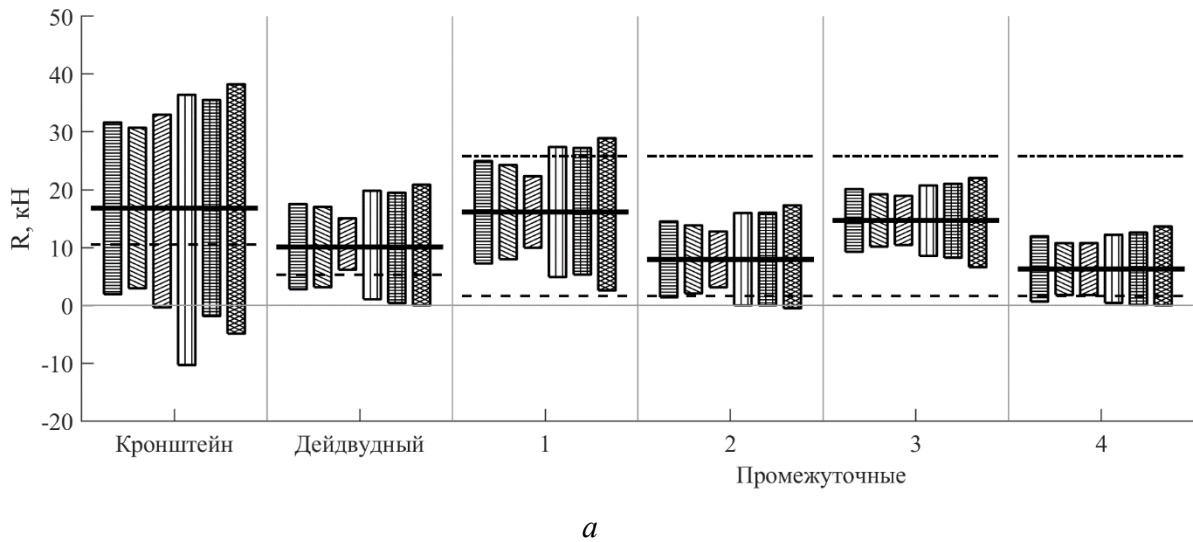
б



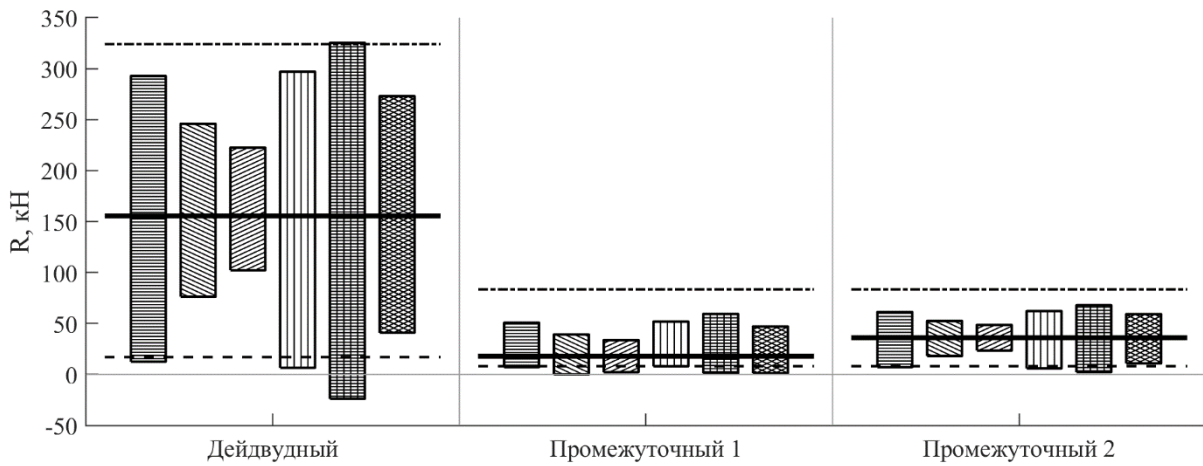
в

Рисунок 1 – Нагрузки на подшипники валопровода при действии значительных вертикальных ускорений:

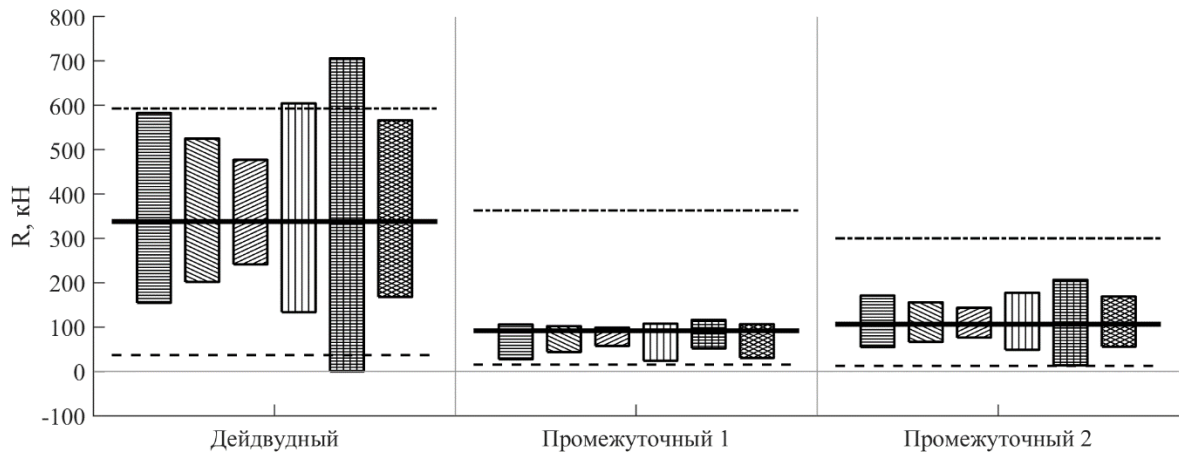
a – $L = 80$ м; б – $L = 150$ м; в – $L = 220$ м; – нагрузка на тихой воде; – максимальная нагрузка; – минимальная нагрузка; – $h_{1/3} = 0,6$ м; – $h_{1/3} = 1,8$ м; – $h_{1/3} = 4,3$ м; – $h_{1/3} = 7,9$ м; – $h_{1/3} = 11,6$ м; – $h_{1/3} = 14,0$ м



a



б



в

Рисунок 2 – Нагрузки на подшипники валопровода при действии максимальных вертикальных ускорений:

a – $L = 80$ м; *б* – $L = 150$ м; *в* – $L = 220$ м; – нагрузка на тихой воде; – максимальная нагрузка; – минимальная нагрузка; – прямой расчёт; – PCY; – BV; – DNV; – GL; – ABS

Выводы

1. Выполнена статистическая оценка значительных уровней ускорений на различных режимах нерегулярного волнения, а также максимальных за срок службы судна ускорений, которые могут быть использованы для расчёта инерционных нагрузок на валопровод при выборе технологических параметров его центровки. Оценка выполнена в рамках линейной качки судна и спектральной теории морского волнения.

2. Рекомендации различных классификационных обществ по выбору расчётных экстремальных ускорений сильно разнятся, однако наиболее близкими к прямому расчёту максимальных ускорений являются рекомендации DNV, PCU и PMPC.

3. Если судно будет эксплуатироваться в районах Мирового океана с интенсивным волнением, то при проектировании валопровода и расчёте центровки необходимо учитывать инерционные нагрузки на подшипники, вызванные качкой. Для этого следует обеспечивать по возможности наиболее отдалённые значения нагрузок на подшипники на тихой воде от граничных допустимых максимальных и минимальных их значений.

4. С увеличением размеров судна, амплитуды переменных инерционных нагрузок на подшипники при качке, отнесённые к нагрузкам на тихой воде, в целом уменьшаются. Для судна длиной 80 м эта относительная амплитуда во время шторма составляет 30 %, а максимальные значения за весь срок службы судна достигают 80 %, для судна длиной 150 м эти амплитуды составляют 30 % и 90 %, а для судна длиной 220 м – 25 % и 60 % соответственно.

5. Кроме инерционных нагрузок следует также учитывать нестационарные гидродинамические нагрузки на гребной винт во время качки, деформацию корпуса судна на волнении и эласто-гидродинамическую смазку в подшипниках. Поскольку различные факторы могут действовать с различной фазой сдвига относительно процесса качки судна, следует решать такую задачу не в частотно-зависимой постановке, а разрабатывать систему имитационного моделирования во времени с учётом всех важных нелинейностей, а затем статистически анализировать полученные реализации нагрузок на подшипники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов В. А., Пасуманский Е. М. Расчет прочности гребных валов с учетом изгибающих усилий, обусловленных качкой судов. *Судостроение*. 1984. № 7. С. 19–22.
2. ОСТ 5.4368-81 Валопроводы судовые движительных установок. Монтаж. Технические требования, правила приемки и методы контроля. Л.: Из-во судостроит. пром-сти, 1981. 143 с.
3. Чепок А. О. Аналитическое определение сил инерции, действующих на груз при качке судна. *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология*. 2014. № 1. С. 43–47.
4. Ушкалов В. Ф., Сердюченко А. Н., Шерстюк А. К. Ускорения, возникающие при морской транспортировке ракет-носителей в условиях волнения и качки судна. *Техническая механика*. 2006. № 2. С. 20-31.
5. Правила класифікації та побудови суден. К.: Регістр судноплавства України, 2010.
6. Правила классификации и постройки морских судов. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015.
7. Rules for the Classification of Steel Ships. – Neuilly-sur-Seine: Bureau Veritas, 2011.
8. Rules for classification of ships. Det Norske Veritas AS, 2015.
9. Rules for Classification and Construction. Hamburg : Germanischer Lloyd SE, 2013.
10. Rules for building and classing steel vessels. Houston : Bureau of Shipping, 2009.
11. Урсолов О. І. Дослідження інерційних навантажень, що діють на валопровід та гребний гвинт під час повздовжньої хитавиці : магістерська робота. Миколаїв : НУК, 2016. 189 с.
12. Батрак Ю. А., Сердюченко А. М., Урсолов О. І. Оцінка навантажень підшипників суднового валопроводу внаслідок дії інерційних сил, викликаних хитавицею на зустрічних нерегулярних хвилях. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*. Миколаїв: НУК, 2015. С. 58–59.

13. Salvesen, N., Tuck, O. E., Faltinsen, O. Ship motions and sea loads. *Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers*. 1970. No. 78. P. 250-287.
14. Maxsurf Motions. Windows Version 20. User Manual. Bentley Systems, Inc. 2013. 181 p.
15. Hesselmann, D. E., Dunkel, M. J., Ewing, A.. Directional spectra observes during JONSWAP 1973. *Journal of Physical Oceanology*. 1980. Vol. 10. P. 1264–1284.
16. Бородай И. К., Нецветаев Ю. А. Мореходность судов. Л. : Судостроение, 1982. 288 с.
17. Короткин Я. И., Ростовцев Д. М., Сиверс Н. Л. Прочность корабля. Л. : Судостроение, 1974. 432 с.
18. Oshi M. K. On long-term statistics for ocean and costal waves. *Coastal engineering*. 1978. P. 59–75.
19. ShaftDesigner – the shaft calculation software by IMT : веб-сайт. URL : <http://shaftsoftware.com/>
20. Липис В. Б. Определение инерционных сил и моментов, действующих на гребном винте при его неравномерном движении в нестационарном потоке. *Труды ЦНИИМФ*. 1963. № 49. С. 115–129.
21. Batrak, Y. A., Shestopal, V. P., Batrak, R. Y. Propeller hydrodynamic loads in relation to propulsion shaft alignment and vibration calculations. *Proceedings of the Propellers. Shafting Symposium*. 2012. P. 10.1–10.14.

REFERENCES

1. Merkulov, V. A., & Pasumanskyi, E. M. (1984). Raschet prochnosti hrebnikh valov s uchetom yzghybaiushchykh usylyi, obuslovlennikh kachkoi sudov. *Sudostroenye*, 7, 19–22.
2. Valoprovodi sudovie dvyzhytelnykh ustanovok. Montazh. Tekhnicheskyye trebovaniya, pravyla pryemky y metodi kontrolya (1981). OST 5.4368-81. Otrasleyvoi standart – Leningrad: Yzdatelstvo sudostroytelnoi promishlenosti.
3. Chepok, A. O. (2014). Analytycheskoe opredelenye syl ynertsyy, deistvuiushchykh na hruz pry kachke sudna. *Vestnyk AHTU. Seriya: Morskaia tekhnika y tekhnolohiya*, 1, 43–47.
4. Ushkalov, V. F., Serdiuchenko, A. N., & Sherstiuk, A. K. (2006). Uskoreniya, voznykaiushchye pry morskoi transportyrovke raket-nosytelei v usloviakh volneniya y kachky sudna. *Tekhnicheskaya mekhanika*, 2, 20-31.
5. Pravyla klasyfikatsii ta pobudovy suden (2010). Kiev : Rehydr Sudnoplavstva Ukrainy.
6. Pravyla klasyfikatsyy y postroyky morskyykh sudov (2015). Saint Petersburg : Rossyiskiy Morskoy Rehydr sudokhodstva.
7. Rules for the Classification of Steel Ships (2011). Neuilly-sur-Seine : Bureau Veritas.
8. Rules for classification of ships (2015). Det Norske Veritas AS.
9. Rules for Classification and Construction (2013). Hamburg: Germanischer Lloyd SE.
10. Rules for building and classing steel vessels (2009). Houston: Bureau of Shipping.
11. Ursolov, O. I. (2016). Doslidzhennia inertsiiynykh navantazhen, shcho diut na valoprovod ta hrebnii hvynt pid chas povzdovzhnoi khytavytsi: mahisterska robota. *Master's diploma*. Mykolaiv : NUOS.
12. Batrak, Yu. A., Serdiuchenko, A. M., & Ursolov, O. I. (2015). Otsinka navantazhen pidshypnykiv sudnovoho valoprovodu vnaslidok dii inertsiiynykh syl, vyklykanykh khytavytseiu na zustrichnykh nerekulirnykh khvyliakh. *Suchasni tekhnolohii proektuvannia, pobudovy, ekspluatatsii i remontu suden, morskyykh tekhnichnykh zasobiv i inzhenernykh sporud*. Mykolaiv: NUOS, 58–59.
13. Salvesen, N., Tuck, O. E., & Faltinsen, O. (1970). Ship motions and sea loads. *Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 78, 250–287.
14. Maxsurf Motions. Windows Version 20. User Manual. (2013). Bentley Systems, Inc.
15. Hesselmann, D. E., Dunkel, M., & Ewing, J. A. (1980). Directional spectra observes during JONSWAP 1973. *Journal of Physical Oceanology*, 10, 1264–1284.
16. Borodai, Y. K., & Netsvetaev, Yu. A. (1982). *Morekhodnost sudov*. Leningrad : Sudostroenye.

17. Korotkyn, Ya. Y., & Syvers, N.L. (1974). *Prochnost korablia*. Leningrad : Sudostroenye.
18. Oshi, M. K. (1978). On long-term statistics for ocean and costal waves. *Coastal engineering*, 59–75.
19. ShaftDesigner – the shaft calculation software by IMT. Retrieved from <http://shaftsoftware.com>
20. Lypys, V. B. (1963). Opredelenye ynertsyonnikh syl y momentov, deistvuiushchikh na hrebnom vynte pry eho neravnomernom dvyzhenyy v nestatsyonarnom potoke. *Trudi TsNYMF*, 49, 115–129.
21. Batrak, Y. A., Shestopal, R. Y. & Batrak, R. Y. (2012). Propeller hydrodynamic loads in relation to propulsion shaft alignment and vibration calculations. Proceedings of the Propellers/Shafting Symposium, 10.1–10.14.

Уролов А. І., Некрасов В. А. СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА ІНЕРЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПІДШИПНИКИ ВАЛОПРОВОДУ СУДНА ПРИ ПОВЗДОВЖНІЙ ХИТАВИЦІ НА НЕРЕГУЛЯРНОМУ ХВИЛЮВАННІ

Виконана статистична оцінка прискорень, спричинених позовжньою хитавицею судна, у районі валопроводу для ряду режимів зустрічного нерегулярного хвилювання. Дана оцінка величини екстремальних прискорень з урахуванням довготермінових розподілів режимів хвилювання, а також за рекомендаціями, наведеними у Правилах ряду класифікаційних товариств. Досліджено вплив інерційних сил валопроводу під час хитавиці на навантаження, що діють на підшипники вала. Дана оцінка екстремальним інерційним навантаженням на підшипники валопроводу за увесь строк служби судна. Моделювання хитавиці судна виконувалося у рамках лінійної теорії хитавиці, а згин валопроводу розраховувався методом скінченних елементів. Усі розрахунки виконувалися для трьох суден з різними довжинами, що дозволило зробити висновки про вплив довжини на величину додаткових інерційних навантажень на підшипники валопроводу.

Ключові слова: прискорення під час хитавиці, статистична оцінка, інерційні сили, навантаження на підшипники.

Ursolov A. I., Nekrasov V. A. STATISTICAL ASSESSMENT OF INERTIA LOADS ONTO SHAFT BEARINGS OF THE SHIP DURING LONGITUDINAL SHIP MOTION IN CONFUSED SEA

Statistical assessment of accelerations in the shaft area, caused by longitudinal ship motions, for a number of head confused sea states has been performed. The assessment of extreme acceleration value has been given considering long-term distribution of waves climate and also according to the recommendations, provided by a number of classification societies. The impact of the shaft inertia forces on the bearing loads during ships motions has been researched. The extreme bearing loads assessment for the whole term of the ship operation has been performed. Ship motions were modelled in terms of theory of linear ship motions, and shaft bending was estimated by the finite element method. All the calculations have been performed for three ships with various length, which enabled drawing a conclusion about the influence of length on the value of additional inertia loads onto shaft bearings.

A statistical assessment of significant levels of acceleration at various irregular wave modes, as well as maximum accelerations for the life of the vessel, which can be used to calculate the inertial loads on the shaft shaft when choosing the technological parameters of its alignment, is performed. The assessment was performed as part of the ship's linear pitching and the spectral theory of sea waves.

The recommendations of various classification societies regarding the choice of calculated extreme accelerations vary greatly, however, the recommendations closest to the direct calculation of maximum accelerations are the recommendations of DNV, DCS and RMRS.

If the vessel will be operated in areas of the oceans with intense waves, then when designing the shafting and calculating the alignment, it is necessary to take into account the inertial loads on the bearings caused by rolling. To this end, it is necessary to ensure, as far as possible, the most distant values of the loads on bearings in quiet water from the boundary permissible maximum and minimum values.

In addition to inertial loads, one should also take into account the non-stationary hydrodynamic loads on the propeller during rolling, deformation of the hull of the vessel during waves and elasto-hydrodynamic lubrication in the bearings. Since various factors can act with a different phase of shift relative to the ship's rolling process, this problem should not be solved in a frequency-dependent setting, but a simulation system should be developed in time taking into account all important nonlinearities, and then a statistical analysis of the resulting bearing loads should be statistically analyzed.

.Keywords: accelerations during ship motions, statistical assessment, inertia forces, bearing loads.

© Уролов А. І., Некрасов В. А.

Статтю прийнято
до редакції 24.04.19

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОФФШОРНОГО СУДНА

Бутаков И. Б., аспирант кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: bib7677@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9014-1856;

Тимофеев К. В., к.т.н, доцент, Херсонская государственная морская академия, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, e-mail: kvtimofeev@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-8668-6159

В статье рассматриваются вопросы моделирования системы динамического позиционирования морского оффшорного судна.

Для удовлетворения требований безопасности при выполнении различных специальных задач на море и обеспечения надлежащего и точного контроля курса и местоположения морского оффшорного судна широко используются системы динамического позиционирования (DP).

Использование систем DP на судах морского оффшорного флота является предпочтительным с экономической точки зрения, поскольку не требуются дополнительных затрат для обеспечения эффективного контроля текущего местоположения и курса морского судна во время выполнения работ. Целью исследования является разработка математической модели системы динамического позиционирования оффшорного судна с четырьмя двигателями, которая позволит определить минимальную мощность судовой электроэнергетической системы. Модели необходимы для обеспечения точности управления при изменении характеристик силовой установки и систем отсчета при различных ситуациях.

Система управления судном моделировалась в программной среде с использованием стандартных библиотечных модулей, которые дополнились необходимыми данными оффшорного судна. Вопросы оптимизации систем управления и методов моделирования рассматривались в исследованиях Thor I. Fossen, Sorensen J.A. и Perez T. O.n. Smogeli с учетом влияния внешних возмущений. В этих исследованиях, используя современные методы управления, рассматривается объект управления (судно) в трехмерном пространстве как объект с тремя или более степенями свободы (DOF).

Учитывая переменные значения внешних возмущений, которые влияют на качество управления объектом, существенную роль в управлении системой DP играют точность прогнозов и скорость обновления модели. Результаты моделирования позволяют описать оффшорное судно как точку массы, учитывая три степени свободы, и использовали для анализа управления курсом систему динамического позиционирования DP.

Ключевые слова: оффшорное судно, моделирование, система динамического позиционирования, возмущение, степень свободы, координаты, курс.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.078-088

Вступление. При выполнении специальных работ технологического или исследовательского характера на море используются специализированные суда и платформы оффшорного флота. В зависимости от локализации и вида выполняемых задач различают следующие типы судов: буровые суда и платформы; трубоукладчики и кабелеукладчики; суда с водолазной специализацией; суда и платформы, предназначенные для установки, демонтажа или обслуживания оборудования над или под водой; вспомогательные суда, предназначенные для снабжения и буксировки; исследовательские суда и др. [1–4]. Для выполнения указанных задач применяют системы динамического позиционирования (DPS, Dynamic Positioning System), которые представляют комплекс технических и программных средств, реализующих процесс управления плавучим объектом в динамическом и статическом режимах. При работе систем DP возникает необходимость в точной стабилизации плавучего объекта (судна) в статическом и динамическом режимах относительно заданной позиции или другого объекта. При этом параметры объекта, относительно которого осуществляется управление судном, тоже могут изменяться, а на судно действуют внешние возмущения (ветер, волнение, течения).

Анализ последних исследований и публикаций. Процесс и алгоритмы управления судном имеют определенные неточности, источником которых являются: изменяющиеся

условия окружающей среды; неточности измерительных средств и математических моделей, описывающих объект и его функции; инерционность и транспортное запаздывание цепей управления, включая исполнительные органы – движители, рули и их приводы [5–10]. Морское судно подвергается воздействиям ветра, волн и течения, а также сил, создаваемых пропульсивной системой. Реакция судна на эти силы измеряется в большинстве случаев с помощью системы определения относительных координат судна, гирокомпасом и системой определения качки судна относительно вертикальной оси. Показания системы определения относительных координат судна корректируются на крен и дифферент, используя показания от датчиков системы определения качки судна (VRU, Vertical Reference Unit или MRU, Motion Reference Unit). Скорость ветра и направление измеряются датчиками ветра (анемометрами), при этом система управления динамическим позиционированием рассчитывает силы, которые пропульсивная установка должна вырабатывать, чтобы управлять движением судна в трех степенях свободы в горизонтальной плоскости – рыскание курса судна, движение вперед/назад, снос вправо или влево.

На рис. 1 показана блок-схема распределителя сил пропульсивной установки, встроенного в систему DP

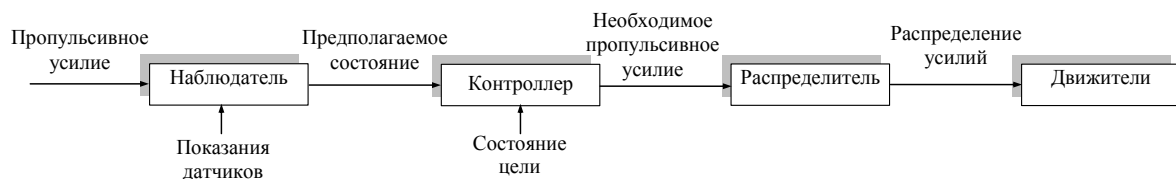


Рисунок 1 – Блок-схема распределителя сил пропульсивной установки, встроенного в систему DP

Обобщенная структура управления системы динамического позиционирования показана на рис. 2 [9, 11].

Модели динамики судов, представляющие реакцию судна на управляющие воздействия в виде переключивания руля и изменения частоты вращения гребного винта фиксированного шага (ВФШ), показаны в работах К. К. Федяевского, А. М. Басина, Г. В. Соболева, Р. Я. Першица, А. Д. Гофмана и др. ученых [3, 4, 6]. Модели динамики судов с трастерными движительно-рулевыми комплексами показаны, например, в работах Perez T., Fossen Thor I. [8–14].

Целью данного исследования является разработка математической модели системы динамического позиционирования оффшорного судна, которая позволит определить минимально мощность судовой электроэнергетической системы.

Основная часть. Обобщенная структура управления системы динамического позиционирования показана на рис. 2 [9, 11].

Работа системы DP основывается на модели судна, которая содержит гидродинамическое описание судна, включая такие характеристики, как коэффициенты сопротивления и данные массы, и описывает движение судна в зависимости от действующих на него внешних сил. При решении многих задач управления совершенные модели не используют, а достаточным условием является использование частных моделей динамики судна, которые отображают связи только между отдельными выходными и входными величинами этого объекта. Однако такой подход при анализе управления оффшорными судами бывает не всегда обоснованным.

В модели судна используется информация, которая описывает силы, действующие на судно. Например, модель ветра использует набор коэффициентов различных углов атаки для расчета силы ветра как функции скорости и направления.

Для расчета силы тяги по параметрам двигателей и винтов в модели пропульсивной установки используют характеристики приложенной силы, шага и скорости вращения

винта. Следовательно, модель судна, как правило, не может быть абсолютно точным представлением реального судна. Для уточнения модели оценки предполагаемого положения и курса используют информацию от датчиков системы определения относительных координат судна и гироскопов об измеренной позиции, которая постоянно обновляется.

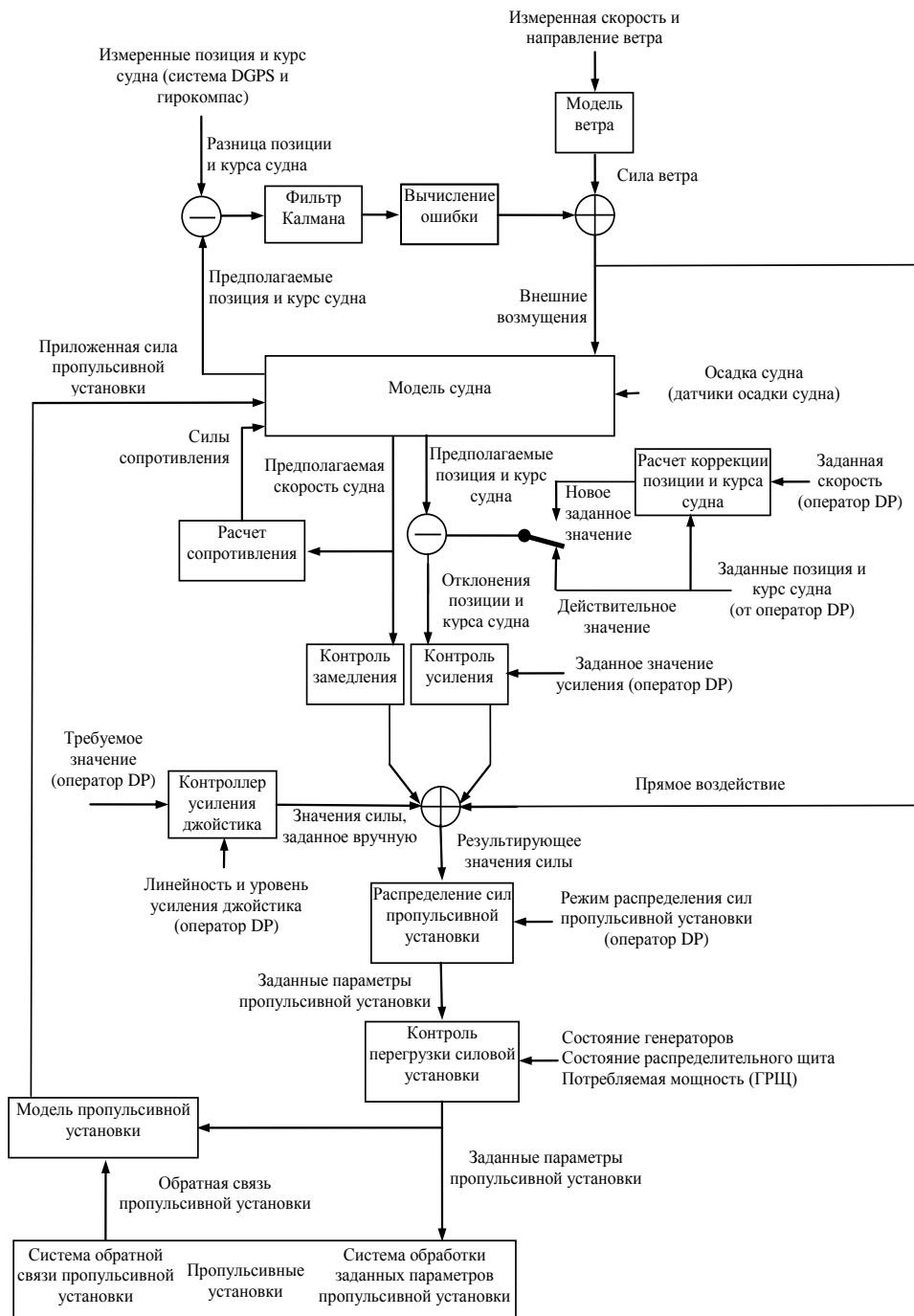


Рисунок 2 – Обобщенная структура управления системы динамического позиционирования (DP)

Прогнозируемая позиция и курс в модели судна сравниваются с измеренной для расчета разницы позиции и курса судна. Поскольку эти различия могут быть вызваны помехами в измеряемых значениях, то перед использованием они фильтруются для обновления модели судна. Такая уточненная модель судна и цифровые методы фильтрации сигналов, например, метод фильтрации Калмана [7, 12, 15], обеспечивают эффективную фильтрацию помех измерений курса, позиции, и оптимальное сочетание данных от датчиков системы определения относительных координат судна.

В случае, если данные датчиков системы определения относительных координат судна и гирокомпаса полностью утрачены (позиции или курса судна), это не окажет немедленного влияния на работоспособность системы позиционирования. Математическая модель судна будет продолжать генерировать оценки позиции и курса, хотя дальнейшего обновления модели судна не будет. В зависимости от изменений погодных условий актуальность модели без обновления составляет в среднем 10–15 минут.

Любое дифференциальное уравнение, описывающее динамику судна, решение которого можно найти с помощью численного метода с одинаковым шагом переменной, приводит к разностному уравнению. При этом основное различие между дифференциальным и разностным уравнениями заключается в величине независимой переменной. Поэтому разностные уравнения процессов можно получить из дифференциальных заменой бесконечно малого прироста dt , соответствующим конечным Δt [7, 9, 16, 17].

Дифференциальная модель динамики судна (1) может быть приведена к разностному уравнению. Обозначим вектор состояния движения судна через \mathbf{Y} , его производную как $d\mathbf{Y}/dt$, вектор управления – \mathbf{U} , вектор возмущений – \mathbf{Q} . Все компоненты этих векторов зависят от времени:

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} V_L \\ V_B \\ \omega \\ \eta \\ \Omega \end{pmatrix}; \quad \frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \begin{pmatrix} \dot{V}_L \\ \dot{V}_B \\ \dot{\omega} \\ \dot{\eta} \\ \dot{\Omega} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} \beta_3 \\ n_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} K_a \\ v_a \\ K_w \\ B_w \end{pmatrix}; \quad (1)$$

где B_w – балл волнения.

Силы и моменты в правой части (1) являются функциями элементов векторов \mathbf{Y} , \mathbf{U} , \mathbf{Q} . Представим систему (1) в матричном виде как:

$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \Phi\{\mathbf{Y}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{Q}(t)\}. \quad (2)$$

Выбирая интервал времени Δt , при котором можно считать $d\mathbf{Y}/dt \approx \Delta\mathbf{Y}/\Delta t$ и обозначив моменты времени, следующие через интервал времени Δt как: 0, 1, 2, ..., J-1, J, J+1, представим $\Delta\mathbf{Y}$ в виде: $\Delta\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_{J+1} - \mathbf{Y}_J$, а значение векторов $\mathbf{Y}(t)$, $\mathbf{U}(t)$, $\mathbf{Q}(t)$ в момент времени J – как \mathbf{Y}_J , \mathbf{U}_J , \mathbf{Q}_J . Подставив эти значения в дифференциальное уравнение (2), получим конечное уравнение (3), вычисления по которому выполняются циклически.

$$\mathbf{Y}_{J+1} = \mathbf{Y}_J + \Phi(\mathbf{Y}_J, \mathbf{U}_J, \mathbf{Q}_J)\Delta t. \quad (3)$$

Значения параметров движения судна, управляющих сигналов, возмущающих воздействий, значения сил и моментов определяют по выражению (3), и далее рассчитывают кинематические параметры судна в последующий момент времени J+1. Для обеспечения достаточной для практических целей точности вычислений при расчете интервал времени Δt был выбран 1 с.

В работе выполнено моделирование системы динамического позиционирования для оффшорного судна, в котором реализовано управление позиционированием с помощью 4-х азимутальных пропульсивных установок. Для моделирования был использован специализированный пакет программ MSS (Marine Simulator Systems, Norwegian university of Science and Technology), где были использованы модельные элементы библиотеки авторов T. Perez, O.n. Smogeli, Thor I. Fossen и A.J. Sorensen [8, 11].

Среди формальных описаний движения надводного судна обычно выделяют полные модели, которые служат для представления всех перемещений судна в 3-х или более степенях свободы. Материальное тело может перемещаться в трех перпендикулярных осях:

перемещение вперед-назад, боковое смещение влево-вправо и вертикальные перемещения – качка (heave). В сочетании с вращением около трех перпендикулярных осей: (рыскания (yaw), килевой крен или тангаж (pitch), бортовой крен (roll) – шесть степеней свободы (Six degrees of freedom, 6DoF).

На рис. 3 показана модель судна, где указаны условные обозначения и параметры системы координат для описания движения судна.

При моделировании были сделаны следующие предположения [2, 18]:

- силы действующих движителей (трастеров) определяются как x -сила и y -сила;
- силы действующих трастеров не максимальны;
- действующие моменты внешних сил отсутствуют;
- штрафа за реверс тяги нет;
- судно представляется как точка с массой;
- вычисляются только расчетные силы, без учета парусности;
- инерция трастеров и судна не определяется.

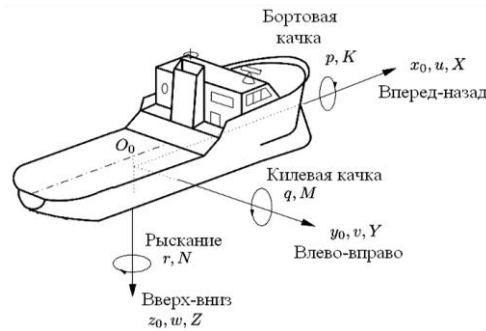


Рисунок 3 – Условные обозначения и параметры для описания движения оффшорного судна

Далее получаем следующие соотношения.

Сила течения:

$$F_c = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \rho V_c^2 C_{Xc}(\alpha_c) A_{TS} \\ \frac{1}{2} \rho V_c^2 C_{Yc}(\alpha_c) A_{LS} \end{pmatrix}, \quad M_c = \frac{1}{2} \rho V_c^2 C_{Mc}(\alpha_c) A_{LS} L, \quad (4)$$

где ρ – плотность воды; V_c – относительная скорость водотока; α_c – относительное направление водотока; A_{TS} – погруженная поперечная проектируемая область корпуса судна; A_{LS} – погруженная продольная проектируемая область корпуса судна; L – длина судна; $C_{*c}(\alpha_c)$ – текущий коэффициент волны.

Сила ветра:

$$F_w = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \rho_{air} V_{rw}^2 C_{Xw}(\alpha_{rw}) A_T \\ \frac{1}{2} \rho_{air} V_{rw}^2 C_{Yw}(\alpha_{rw}) A_L \end{pmatrix}, \quad M_w = \frac{1}{2} \rho_{air} V_{rw}^2 C_{Mw}(\alpha_{rw}) A_L L, \quad (5)$$

где ρ_{air} – плотность воздуха; V_{rw} – относительная скорость ветра; α_{rw} – относительное направление ветра; A_T – поперечная площадь проекции ветра; A_L – продольная площадь проекции ветра; L – длина судна; $C_{*w}(\alpha_{rw})$ – текущий коэффициент ветра.

$$V_w(z) = V_w(z=10m) \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{\frac{1}{8}}, \quad (6)$$

где $V_w(z = 10m)$ скорость за 10 м.

Сила волны:

$$F_{wd} = \begin{pmatrix} C_{xwd}(\alpha_{wd}, f_{wd}) \frac{1}{8} \rho g H^{2/3} L \\ C_{ywd}(\alpha_{wd}, f_{wd}) \frac{1}{8} \rho g H^{2/3} L \end{pmatrix}, \quad M_{wd} = C_{Mwd}(\alpha_{wd}, f_{wd}) \frac{1}{8} \rho g H^{2/3} L, \quad (7)$$

где: ρ – плотность воды; α_{wd} – относительное направление волны; f_{wd} – регулярная частота колебания волны; $C_{*wd}(\alpha_{wd}, f_{wd})$ – коэффициент дрейфа судна; g – коэффициент гравитации; $H_{1/3}$ – высота волны; L – длина судна.

Усилия, создаваемые трастерами, определяются как:

$$T = C_T \rho n^2 D^4, \quad (8)$$

Крутящий момент определяется как:

$$Q = C_Q \rho n^2 D^5, \quad (9)$$

где ρ – плотность воды; n – количество оборотов в минуту; D – диаметр винта; C_T – коэффициент тяги; C_Q – крутящий момент.

Расчет необходимых сил трастера определяется следующим образом:

- силы в направлении оси x : $F_x = F_{x_{demand}} - F_{x_{wind}} - F_{x_{current}} - F_{x_{wave}}$;
- силы в направлении оси y : $F_y = F_{y_{demand}} - F_{y_{wind}} - F_{y_{current}} - F_{y_{wave}}$;
- приложенный момент: $M = M_{demand} - M_{wind} - M_{current} - M_{wave}$.

Исходя из этого, получаем:

$$F_x = \sum_{i=1}^n (F_x)_i; \quad F_y = \sum_{i=1}^n (F_y)_i; \quad M = \sum_{i=1}^n (-y_i \cdot (F_x)_i + x_i \cdot (F_y)_i). \quad (10)$$

$$(F_x)_n = F_x - \sum_{i=1}^{n-1} (F_x)_i; \quad (F_y)_n = F_y - \sum_{i=1}^{n-1} (F_y)_i. \quad (11)$$

Заменив F_{x_n} и F_{y_n} :

$$(F_y)_{n-1} = \frac{M + y_n \cdot F_x - x_n \cdot F_y}{x_{n-1} - x_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{y_i - y_n}{x_{n-1} - x_n} \cdot (F_x)_i \right) + \sum_{i=1}^{n-2} \left(\frac{x_n - x_i}{x_{n-1} - x_n} \cdot (F_y)_i \right), \quad (12)$$

определяется полная мощность:

$$g((F_x)_1, \dots, (F_x)_{n-1}, (F_y)_1, \dots, (F_y)_{n-2}) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(F_x)_i^2 + (F_y)_i^2}. \quad (13)$$

Схемы моделирования системы динамического позиционирования оффшорного судна показаны на рис. 4–7.

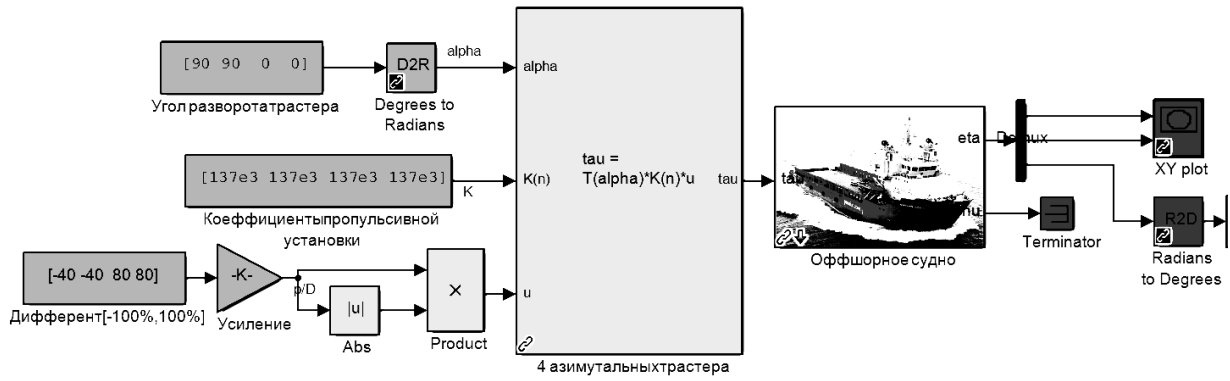


Рисунок 4 – Схема моделювання системи динамічного позиціонування оффшорного судна

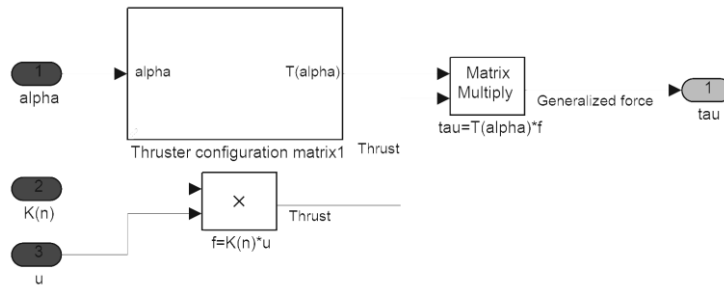


Рисунок 5 – Структура підсистеми з чотирма азимутальними подрулюючими пристроями

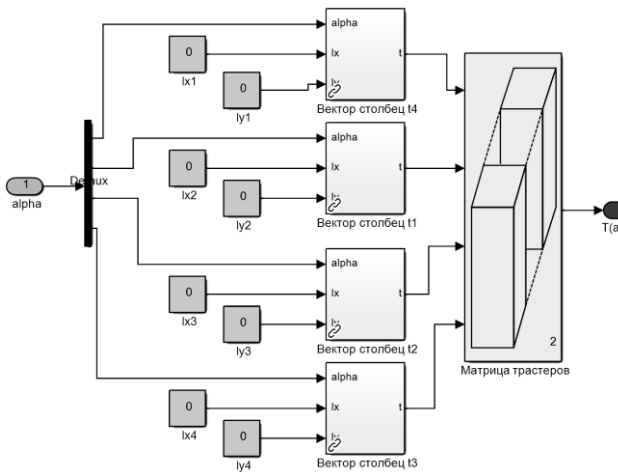


Рисунок 6 – Структура моделі матриці подрулюючого пристрою

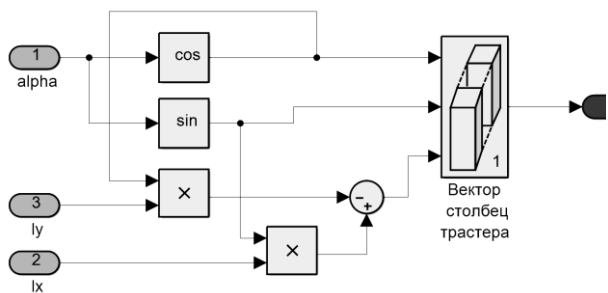


Рисунок 7 – Структура підсистеми управління координатами трастера

Результати моделювання траєкторії руху судна по амплітуді і по фазі показані на рис. 8 а, б.

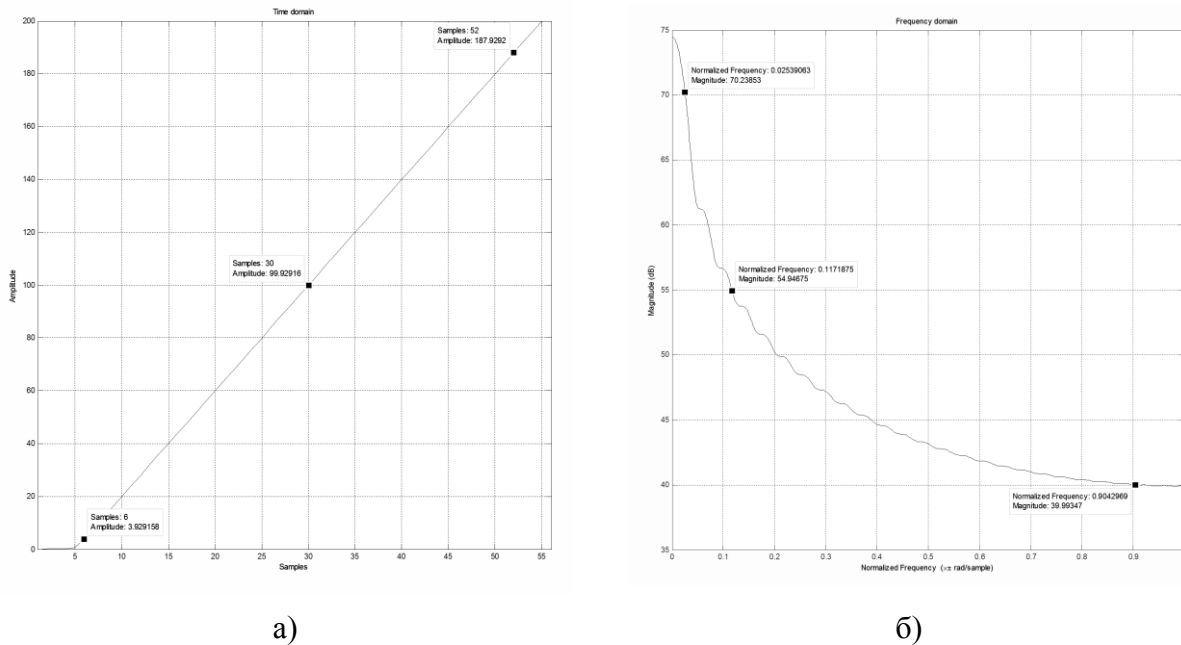


Рисунок 8 – Результати моделювання траєкторії судна: а) по амплитуді; б) по фазі

Выводы. Моделирование системы управления оффшорным судном выполнено в программном комплексе с использованием типовых модулей, которые были дополнены необходимыми данными по судну. При моделировании оффшорного судна в работе показана принципиальная возможность использования модели, которая может быть представлена как материальная точка с 3-мя степенями свободы. Анализ траектории оффшорного судна при моделировании системы динамического позиционирования позволил определить минимальную мощность судовой электроэнергетической системы (СЭЭС), необходимую для управления. В перспективе для моделирования управления оффшорным судном с системой динамического позиционирования следует применять модифицированные модели, где используются более пяти движителей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березин С. Я., Тетюев Б. А. Системы автоматического управления движением судна по курсу. Л. : Судостроение, 1990. 256 с.
2. Васильев А. В. Управляемость судов. Л. : Судостроение, 1989. 328 с.
3. Гофман А. Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. Л. : Судостроение, 1988. 360 с.
4. Шостак В. П. Динамическое позиционирование плавучих объектов : монография. Чикаго : Мегатрон, 2010. 130 с.
5. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. Одесса : Феникс, 2007. 328 с.
6. Вагущенко Л. Л., Кошовий А. А. Автоматизовані комплекси судноводіння : підручник для морських академій. К. : Видавництво КВІЦ, 2000. 292 с.
7. Суевалов Л. Ф. Справочник по расчетам судовых автоматических систем. Л. : Судостроение, 1977. 376 с.
8. Fossen Thor I. Marine Control Systems, Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics, Trondheim, first edition, 2002. URL: : <http://www.marinecybernetics.com>.
8. Fossen Thor I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Hoboken, N.J. : Wiley ; Chichester : John Wiley [distributor], 2011. 575 p.

9. Sorensen Asgeir J. Survey of dynamic positioning control systems. *Annual Reviews in Control*, 35, 2011. pp.123-136.
10. Fossen, T. I., Perez T. Marine Systems Simulator (MSS), 2004. URL: <https://github.com/cybergalactic/MSS>
11. Fossen S., Fossen T. I. eXogenous Kalman filter (XKF) for Visualization and Motion Prediction of Ships using Live Automatic Identification System (AIS) Data. *Modeling, Identification and Control*, Vol. 39, No. 4, 2018, pp. 233-244.
12. Perez T. Ship Motion Control. Monograph. Berlin, Springer, 2005. 300 p.
13. Perez, T., Fossen T. I. A Matlab Tool for Parametric Identification of Radiation-Force Models of Ships and Offshore Structures. *Modelling, Identification and Control*, 2009. MIC-30 (1):1-15.
14. Fossen Thor I., Perez Tristan. Kalman Filtering for Positioning and Heading Control of Ships and Offshore Rigs. *IEEE Control Systems Magazine*, December 2009. pp. 33–46.
15. Будашко В. В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 6. С. 20–25.
16. Рожков С. О. Моделирование системы динамического позиционирования судна-поставщика типа PSV. *Вестник Херсонского национального технического университета*. № 04 (55). 2015. С. 159–166.
17. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л., Заичко С. И. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности. Одесса : Феникс, 2005. 274 с.

REFERENCES

1. Berezin S. YA. & Tetyuyev B. A. (1990). *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniyem sudna po kursu*. Leningrad : Sudostroyeniye.
2. Vasil'yev A. V. (1989). *Upravlyayemost' sudov*. Leningrad : Sudostroyeniye.
3. Gofman A. D. (1988). *Dvizhitel'no-rulevoy kompleks i manevrirovaniye sudna. Spravochnik*. Leningrad : Sudostroyeniye.
4. Shostak V. P. (2010). *Dinamicheskoye pozitsionirovaniye plavuchikh ob'yektov : monografiya*. Chikago : Megatron.
5. Vagushchenko L. L. & Tsymbal N. N. (2007). *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniyem sudna*. Odessa : Feniks.
6. Vagushchenko L. L. & Koshevoy A. A. (2000). *Avtomatizirovannyye komplekсы sudovozhdeniya. Uchebnik dlya morskikh akademiy*. Kiyev: KVITs.
7. Suyevalov L. F. (1977). *Spravochnik po raschetam sudovykh avtomaticheskikh sistem*. Leningrad : Sudostroyeniye.
8. Fossen Thor I. (2002). *Marine Control Systems, Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics, Trondheim, first edition. Retrieved from <http://www.marinecybernetics.com>.
9. Fossen Thor I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Hoboken, N.J. : Wiley ; Chichester : John Wiley [distributor].
10. Sorensen Asgeir J. (2011). Survey of dynamic positioning control systems. *Annual Reviews in Control*, 35, 123–136.
11. Fossen, T. I., Perez T. (2004). Marine Systems Simulator (MSS), 2004. Retrieved from <https://github.com/cybergalactic/MSS>
12. Fossen S., Fossen T. I. (2018). eXogenous Kalman filter (XKF) for Visualization and Motion Prediction of Ships using Live Automatic Identification System (AIS) Data. *Modeling, Identification and Control*, Vol. 39, No. 4, 233–244.
13. Perez T. (2005). *Ship Motion Control* : monograph. Berlin, Springer.

14. Perez, T., Fossen T. I. (2009). A Matlab Tool for Parametric Identification of Radiation-Force Models of Ships and Offshore Structures. *Modelling, Identification and Control*, MIC-30(1):1-15.
15. Fossen Thor I., Perez Tristan. (2009). Kalman Filtering for Positioning and Heading Control of Ships and Offshore Rigs. *IEEE Control Systems Magazine*, December 2009, 33-46.
16. Budashko, V. V. (2015). Implementarnyy podkhod pri modelirovanii energeticheskikh protsessov dinamicheskii pozitsioniruyushchego sudna. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 6, 20–25.
17. Rozhkov S. O. (2015). Modelyuvannya systemy dinamichnoho pozitsiyuvannya sudna-postachal'nyka typu PSV. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 04(55), 159–166.
18. Vagushchenko L. L., Vagushchenko A. L. & Zaichko S.I. (2005). *Bortovyye avtomatizirovannyye sistemy kontrolya morekhodnosti*. Odessa : Feniks.

Бутаков І. Б., Тимофєєв К. В. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОФШОРНОГО СУДНА

У статті розглядаються питання моделювання системи динамічного позиціонування морського офшорного судна.

Для задоволення вимог безпеки при виконанні різних спеціальних завдань на морі і забезпечення належного й точного контролю курсу та розташування морського офшорного судна широко використовуються системи динамічного позиціонування (DP).

Використання систем DP на судах морського офшорного флоту є кращим з економічної точки зору, оскільки не потрібно додаткових витрат для забезпечення ефективного контролю поточного місцезнаходження і курсу морського судна під час виконання робіт. Метою дослідження є розробка математичної моделі системи динамічного позиціонування офшорного судна з чотирма рушіями, яка дозволить визначити мінімальну потужність суднової електроенергетичної системи. Моделі необхідні для забезпечення точності управління при зміні характеристик силової установки і систем відліку у різних ситуаціях.

Система управління судном моделювалася в програмному середовищі з використанням стандартних бібліотечних модулів, які доповнилися необхідними даними офшорного судна. Питання оптимізації систем управління і методів моделювання розглядалися в дослідженнях Thor I. Fossen, Sorensen J.A. і Perez T. O.p. Smogeli з урахуванням впливу зовнішніх збурень. У цих дослідженнях, використовуючи сучасні методи управління, розглядається об'єкт управління (судно) в тривимірному просторі як об'єкт з трьома або більше ступенями свободи (DOF).

З огляду на змінні значення зовнішніх збурень, які впливають на якість управління об'єктом, істотну роль в управлінні системою DP відіграють точність прогнозів і швидкість оновлення моделі. Результати моделювання дозволяють описати офшорне судно як точку маси, з огляду на три ступені свободи, і використовувати для аналізу управління курсом систему динамічного позиціонування DP.

Ключові слова: офшорне судно, моделювання, система динамічного позиціонування, збурення, ступінь свободи, координати, курс.

Butakov I. B., Timofeev K. V. MODELLING OF DYNAMIC POSITIONING SYSTEM OF AN OFFSHORE SHIP

The article discusses the modelling of the dynamic positioning system of a marine offshore vessel.

To meet the safety requirements when performing various special tasks at sea and to ensure proper and accurate control of the course and location of the offshore vessel, dynamic positioning systems (DP) are widely used.

The use of DP systems on ships of the marine offshore fleet is preferable from an economic point of view, since no additional costs are required to ensure effective control of the current location and course of the marine vessel during the performance of work.

The aim of the study is to develop a mathematical model of a dynamic positioning system for an offshore ship with four movers, which will determine the minimum power of the ship's electric power system. Models are necessary to ensure precision control when changing the characteristics of the power plant and reference systems in various situations.

The ship control system was modelled in a software environment using standard library modules, which were supplemented with the necessary data from an offshore ship. The issues of optimization of control systems and modelling methods were considered in the studies of Thor I. Fossen, Sorensen J.A. and Perez T. O.n. Smogeli taking into account the influence of external disturbances. In these studies, using modern control methods, a control object (vessel) in three-dimensional space is considered as an object with three or more degrees of freedom (DOF).

Given the variable values of external perturbations that affect the quality of control of an object, a significant role in controlling the DP system is played by the accuracy of forecasts and the speed of model updating. The simulation results allow us to describe an offshore vessel as a point of mass, taking into account three degrees of freedom, and we used the DP dynamic positioning system for heading analysis.

An analysis of the trajectory of an offshore vessel when modelling a dynamic positioning system made it possible to determine the minimum power of the ship's electric power system necessary for control. In the future, to model the control of an offshore vessel with a dynamic positioning system, modified models should be used, where more than five propulsions are used.

Keywords: *offshore vessel, modelling, dynamic positioning system, disturbance, degree of freedom, coordinates, course.*

© Бутаков І. Б., Тимофєєв К. В.

Статтю прийнято
до редакції 10.09.19

КОНЦЕПЦІЯ ТА АЛГОРИТМИ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОТИДІЇ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ НА ТЕРИТОРІЇ ОСОБЛИВО ВАЖЛИВИХ ОБ'ЄКТІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Васюхін М. І., *д.т.н., провідний науковий співробітник Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, м. Київ, e-mail: vasgeovideo@i.ua;*

Касім А. М., *к.т.н. докторантка Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, м. Київ, e-mail: apees@i.ua;*

Бень А. П., *к.т.н., проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489*

В сучасних умовах підвищення рівня терористичної діяльності в світі досить гостро постає питання захисту особливо важливих об'єктів від актів незаконного втручання в їхню діяльність з метою запобігання виникненню надзвичайних ситуацій. Від ефективності та достовірності роботи автоматизованих систем захисту таких об'єктів залежить не тільки безпека експлуатації самого об'єкта, але безпека й життя людей, держави в цілому. Прикладом особливо важливих об'єктів є президентські палаци, аеродроми, атомні станції, нафтопереробні заводи, військові об'єкти, морські порти тощо. Метою статті є створення концепції та алгоритмів побудови системи виявлення та протидії надзвичайним ситуаціям на території особливо важливих об'єктів у реальному часі. У дослідженні розроблено концепцію побудови та функціонування системи захисту особливо важливих об'єктів, яка включає: алгоритм створення системи комплексного захисту особливо важливих об'єктів та граф процесу розвитку надзвичайних ситуацій та заходів протидії. Ітераційну схему проектування СППР щодо безпеки на рівні особливо важливих об'єктів, яка містить такі етапи системного проектування та однойменні рівні формалізованих описів, а саме: концептуальний, функціональний, забезпечуючий, організаційний та загальносистемний. Процес проектування розглядається як поступове зменшення невизначеності уявлень про систему шляхом проведення декомпозиції процесу проектування на послідовні етапи у напрямку до зростання ступеня детальності і повноти цих уявлень. Такий підхід дозволяє періодично уточнювати і, у разі потреби, коригувати цілі та задачі системи, нарощувати її можливості, координувати взаємодію різнофахових розробників її складових.

Ключові слова: системи захисту, надзвичайні ситуації.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.089-097

Постановка проблеми. В сучасних умовах підвищення рівня терористичної діяльності в світі досить гостро постає питання захисту особливо важливих об'єктів (ОВО) від актів незаконного втручання в їхню діяльність з метою запобігання виникненню надзвичайних ситуацій (НС). Від ефективності та достовірності роботи автоматизованих систем захисту таких об'єктів залежить не тільки безпека експлуатації самого об'єкта, але безпека й життя людей, держави в цілому [1–13].

Прикладом ОВО є президентські палаци, аеродроми, атомні станції, нафтопереробні заводи, військові об'єкти, морські порти тощо.

Аналіз попередніх досліджень. Серед відомих систем охорони ОВО можна виділити наступні: «H-Field» (США), «GEOQUIP» «RAFID» (Великобританія), «RADIOCONTACT» (Північна Ірландія), «ARZENAL» (Угорщина), «MAGAL» (Ізраїль), «Гефест», «Грот», «Уран-М», «Рубеж-3М» (Росія), АС «Центр» (Україна, гол. конструктор М.М. Биченок) та ін. [1, 5–11].

Найбільш привабливим аналогом є система [1], в якій використовується системний підхід до інформатизації управління регіональною безпекою. Автором запропоновано загальну класифікацію НС, принципи створення системи підтримки управлінських рішень із регіональної безпеки, яка спрямована на підвищення ефективності заходів запобігання і реагування на НС природного та техногенного походження, наведено методи розрахунків показників ефективності системи, методи оцінювання ризиків життєдіяльності

і господарювання, інструментально-забезпечуючі засоби, модульно-ієрархічна структура прикладної програмної системи, структура організаційної частини системи.

Ефективність такого підходу підтверджена практичною реалізацією результатів у ряді автоматизованих систем підтримки управлінських рішень із регіональної безпеки, зокрема: АС «Інформ-Чорнобиль» (гол. конструктор С.О. Довгий), «Центр», АС «Урядова інформаційно-аналітична система з питань НС» (гол. конструктор О.Г. Додонов).

У Європі та США подібними є система IRIS (Німеччина), система RIMNET (Великобританія), ARAC (США). Вони забезпечують постійний контроль за радіаційно-небезпечними об'єктами, здійснюють прогнозування й аналіз наслідків можливих чи реальних аварійних ситуацій, забезпечують інформаційну підтримку захисних заходів.

Роботи [16-8] присвячені розв'язанню питань підготовки, прийняття і контролю виконання управлінських рішень із регіональної безпеки щодо ефективної мобілізації ресурсів захисту, раціонального їх використання при ліквідації наслідків НС, запобіжних та рятувальних заходах. Це досягається шляхом системного використання математичних моделей, методів та комп'ютерно-телекомунікаційних засобів і технологій.

Проведений аналіз методів побудови систем захисту ОВО засвідчив присутність наступних недоліків:

- наявні концепції побудови та функціонування систем безпеки ОВО недостатньо враховують специфіку конкретного об'єкта;
- неповна структуризація процесів розвитку і протидії НС;
- одностороння класифікація НС та причин їх виникнення на території ОВО;
- недосконала модель процесу виявлення та уникнення НС, спричинених діями особистості;
- відсутні методи визначення рівня небезпеки суб'єктів погроз виникнення НС на території ОВО;
- існує необхідність в ітераційному проектуванні та програмній реалізації СППР з виявлення та попередження НС на території ОВО.

Рішення задачі. Метою статті є створення концепції та алгоритмів побудови системи виявлення та протидії надзвичайним ситуаціям на території особливо важливих об'єктів у реальному часі. Для цього необхідно вирішити такі задачі:

- створити концепцію побудови та функціонування систем безпеки ОВО з урахуванням специфіки конкретного об'єкта;
- структуризувати процеси розвитку і протидії НС;
- класифікувати НС та причини їх виникнення на території ОВО;
- вдосконалити модель процесу виявлення та уникнення НС, спричинених діями особистості;
- виконати ітераційне проектування СППР з виявлення та попередження НС на території ОВО.

Об'єкт дослідження – процеси побудови автоматизованих систем захисту особливо важливих об'єктів.

Предмет дослідження – концепція та алгоритми побудови системи виявлення та протидії надзвичайним ситуаціям на території особливо важливих об'єктів у реальному часі. Методами дослідження є: системний підхід В.М. Глушкова, методи побудови баз знань при розробці моделей та методів побудови автоматизованої системи виявлення та попередження НС на території ОВО.

Основні результати. Запропоновано концепцію побудови та функціонування системи безпеки, яку представлено на рис. 1. Перелік усіх етапів робіт зі створення системи комплексного захисту ОВО наведено у вигляді послідовного алгоритму, рис. 2. Ця схема дозволяє виділити основні етапи, а саме: передпроектна підготовка; розробка концепції безпеки об'єкту; розробка і оформлення техніко-економічного обґрунтування; робоче проектування; реалізація; впровадження; експлуатація, навчання обслуговуючого персоналу, здача комплексу в експлуатацію.

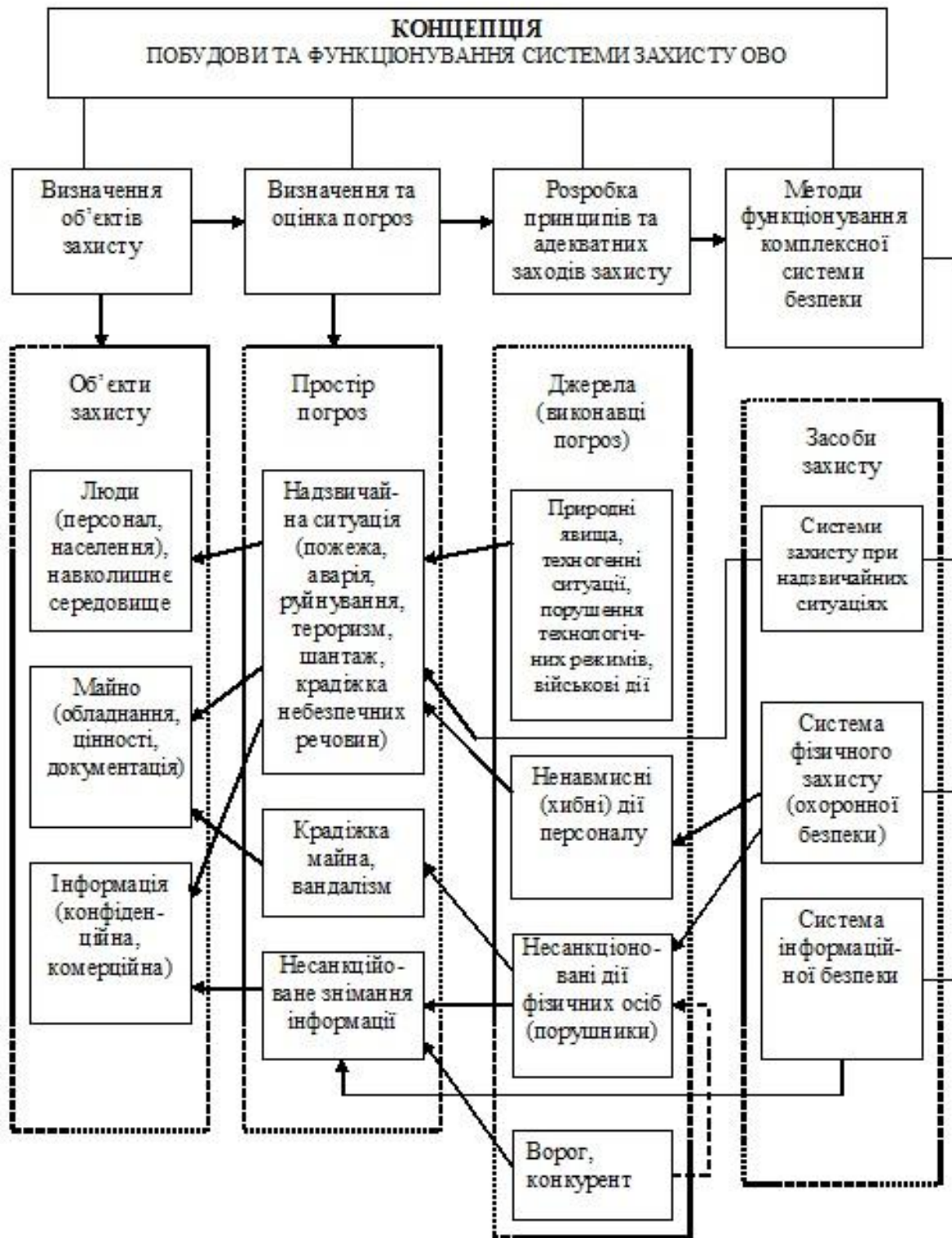


Рисунок 1 – Концепція побудови системи безпеки ОВО

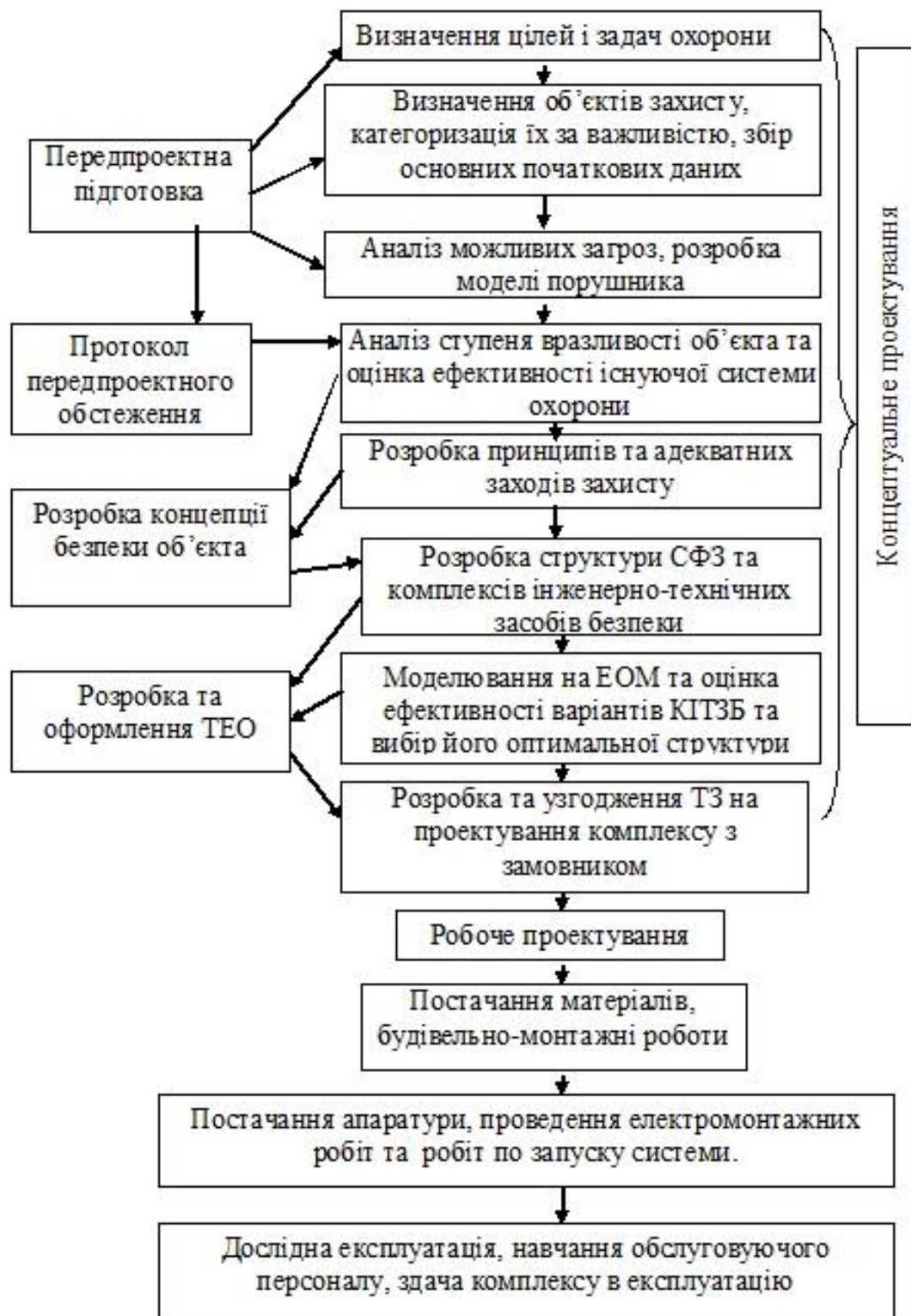


Рисунок 2 – Алгоритм створення системи комплексного захисту ОВО

Процес розвитку НС і заходи протидії представлено у вигляді орієнтованого мультиграфа, що зображений на рис. 3, вершини якого відповідають якісно різним станам складових компонентів НС, а дуги – альтернативним подіям, що відбуваються при зміні цих станів.

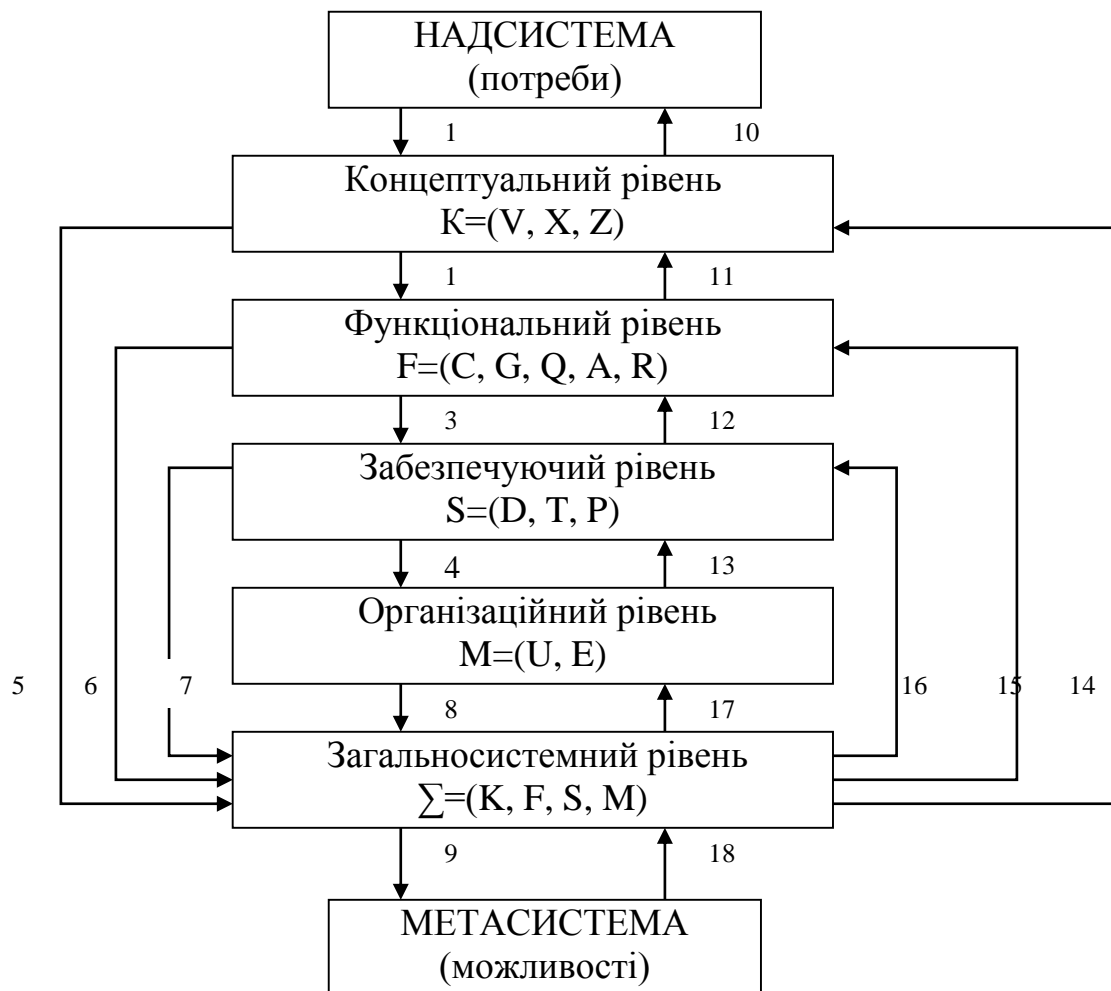


Рисунок 4 – Ітераційна схема проектування системи підтримки управлінських рішень щодо безпеки на рівні ОВО

Процес проектування системи характеризується складністю чіткого визначення місця і часу виникнення НС, різноманітністю та різнотипністю об'єктів, наявністю великої кількості взаємозв'язаних факторів ураження і захисту, зміною станів компонентів, а також підвищенням рівня інформаційних потреб користувачів, удосконаленням інструментарію.

Авторами виділяються такі етапи системного проектування та одноименні рівні формалізованих описів, а саме: концептуальний (K), функціональний (F), забезпечуючий (S), організаційний (M) та загальносистемний (Σ).

На концептуальному рівні визначаються джерела небезпеки (V), об'єкти ураження (X) і ресурси захисту (Z), розробляються сценарії прояву і протидії НС, окреслюються основні задачі управління запобіжними, рятувальними і відновлювальними заходами. На функціональному рівні розробляються математичні моделі і алгоритми контролю (C) і прогнозування (G) обстановки та планування (Q), аналізу (A) і регулювання (R) ресурсів захисту. На забезпечуючому рівні проектується технічний комплекс (T), інформаційна база (D) та програмне забезпечення (P). На організаційному рівні проектується організаційна структура служб управління (U) та експлуатації (E), регламент людино-машинної взаємодії при підготовці, прийнятті та контролі виконання управлінських рішень. На загальносистемному рівні на основі результатів попередніх етапів здійснюється уточнення, доповнення, узагальнення та приведення формалізованих описів системи у цілісну проектну документацію.

За допомогою прямих і зворотних зв'язків між різними рівнями формалізованих описів реалізується ітераційний характер процесу проектування системи. За допомогою

низхідних прямих зв'язків передаються цільові функції: скорочення ймовірних витрат і витрат у НС (1); підвищення якісних показників управління (2); зменшення часу на обробку, збір та видачу даних (3); удосконалення показників організаційно-технологічного рівня процесів підготовки, прийняття і контролю виконання управлінських рішень (4); управління інтерфейсами (5-8); необхідного ресурсного забезпечення проектних робіт (9). За допомогою висхідних зворотних зв'язків передаються пропозиції щодо розширення сфери застосування системи (10), удосконалення модельно-алгоритмічного базису (11), удосконалення та модернізації програмно-технічного комплексу (12), реорганізації служб управління і експлуатації (13), розвитку взаємозв'язків і взаємодії системи (14-17), припустимого ресурсного забезпечення проектних робіт (18).

Висновки з перспективами. Таким чином, у роботі запропоновано:

1. Концепцію побудови та функціонування системи захисту ОВО, яка включає:
 - алгоритм створення системи комплексного захисту ОВО;
 - граф процесу розвитку НС та заходів протидії.
 2. Ітераційну схему проектування СППР щодо безпеки на рівні ОВО, яка містить такі етапи системного проектування та однойменні рівні формалізованих описів, а саме: концептуальний, функціональний, забезпечуючий, організаційний та загальносистемний.
 3. Процес проектування розглядається як поступове зменшення невизначеності уявлень про систему шляхом проведення декомпозиції процесу проектування на послідовні етапи у напрямку до зростання ступеня детальності і повноти цих уявлень.
- За допомогою прямих і зворотних зв'язків між різними рівнями формалізованих описів досягається ітераційний характер процесу проектування системи.
4. Такий підхід дозволяє періодично уточнювати і, у разі потреби, коригувати цілі та задачі системи, нарощувати її можливості, координувати взаємодію різнофахових розробників її складових.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Биченок М. М. Основи інформатизації управління регіональною безпекою. К. : Інститут національної безпеки, 2005. 196 с.
2. Палагин А. В., Опанасенко В. Н. Реконфигурируемые вычислительные системы : основы и приложения. К. : Просвіта, 2006. 280 с.
3. Горбулін В. П., Качинський А. Б. Системно-концептуальні засади стратегії національної безпеки України. К. : ДЦ ВЦ «Євроатлантикінформ», 2007. 592 с.
4. Пюшки Л. Методы и средства построения автоматизированных интегрированных систем защиты особо важных объектов : дис... канд.техн.наук : 05.13.06. К., 2005. 156 с.
5. Vasiukhin M., Tkachenko O., Kasim A., Ivanyk I. Methods and means for building a system of visual images forming in GIS of critical important objects protection. *Securitologia*. 2013. 2 (18). P. 75–83.
6. Ходаков В. Е., Жарикова М. В., Лященко Е. Н. Применение когнитивного подхода для решения задачи поддержки принятия управленческих решений при ликвидации лесных пожаров. *Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи*. 2009. № 1(23). С. 13–17.
7. Васюхін М. І., Касім А. М., Гулевець В. Д., Бойко О. Л., Чукаріна Н. М. Методи створення динамічних графічних образів при вирішенні задач відображення поточної обстановки на території аеропорту та прилеглих до нього зонах. *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. 2010. Вып. 151. С. 112–118.
8. Васюхін М., Касім А., Гулевець В., Бойко О. Геоінформаційні комплекси реального часу для виявлення і попередження надзвичайних ситуацій на особливо важливих об'єктах. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2009. № 1 (17). С. 238–244.
9. Васюхін М. И., Касим А. М., Креденцар С. М., Пономарев С. А. Метод преобразования изображений символов в системах защиты особо важных объектов.

Физическая ядерная безопасность : сборник докладов 1-го Международного форума. К. : «ЛЕКС», 2005. С. 49–55.

10. Васюхін М. І., Запорожець О. І., Гулевець В. Д., Касім А. М., Чукаріна Н. М. Проблеми картографічної підтримки автоматизованої системи комплексного захисту аеропорту. *Проблеми інформатизації та управління.* 2010. № 3 (31). С. 30–38.

11. Васюхин М., Ткаченко А., Касим А., Долынный В., Иванык Ю. Особенности построения и функционирования автоматизированных систем безопасности особо важных объектов. *Securitologia.* 2014. 1 (19). Р. 167–179.

12. Палагін О. В., Касім А. М., Васюхін М. І., Белозьоров Ж. О. Геоінформаційна система визначення координат наземних і надводних цілей. *Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві – освіта, наука, практика (SLA-2018) : збірник матеріалів V Міжнародної науково-практичної конференції (13–15 вересня 2018 р., м. Херсон).* Херсон : Херсонська державна морська академія, 2018. С. 97–104.

13. Васюхін М. І., Бень А. П., Вишинський В. А., Касим А. М., Павленко П. М. Система представлення повітряної та наземної обстановки для ситуаційних центрів оперативного управління антитерористичними операціями. *Nauka i praktyka bezpieczeñstwa.* Kraków : Wydawnictwo EAS, 2019. С. 300–307.

REFERENCES

1. Bichenok M. M. (2005). *Osnovi informatizacii upravlinnya regionalnoyu bezpekoyu.* Kyiv : Institut nacionalnoï bezpeki, 2005.

2. Palagin A. V. & Opanasenko V. N. (2006). *Rekonfiguriruemihе vihchisliteljnihe sistemih: osnovih i prilozheniya.* Kyiv : Prosvita.

3. Gorbulin V. P., Kachinskij A. B. (2007). *Sistemno-konceptualjni zasady strategii nacionalnoï bezpeki Ukraini.* Kyiv : DC NVC Evroatlantinform.

4. Pyushki L. (2005). Metodih i sredstva postroeniya avtomatizirovannihkh integrirovannihkh sistem zashchitih osobo vazhnikhkh objhektov. *Candidate's thesis.* Kyiv.

5. Vasiukhin M., Tkachenko O., Kasim A. & Ivanyk I. (2013). Methods and means for building a system of visual images forming in GIS of critical important objects protection. *Securitologia,* 2 (18), 75–83.

6. Khodakov V. E., Zharikova M. V., Lyathenko E. N. (2009). Primenenie kognitivnogo podkhoda dlya resheniya zadachi podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy pri likvidacii lesnikh požarov. *Avtomatika. Avtrmatizaciya. Elektrotekhnichni kompleksi ta sistemi,* 1(23), 13–17.

7. Vasyukhin M. I., Kasim A. M., Gulevecj V. D., Boyjko O. L., Chukarina N. M. (2010). Metodi stvorenniya dinamichnikh grafichnikh obraziv pri virishenni zadach vidobrazhennya potочноï обстановки на території аеропорту та прілеглих до нього зонакх. *Avtomatizirovannihe sistemih upravleniya i priborih avtomatiki,* 151, 112–118.

8. Vasyukhin M., Kasim A., Gulevecj V. & Boyjko O. (2009). Geoinformacijni kompleksi realnogo chasu dlya viyavleniya i poperedzhennya nadzvichajnikh situacij na osoblivo vazhlivikh ob'ektakh. *Suchasni dosyagnennya geodezichnoï nauki ta virobniictva,* 1 (17), 238–244.

9. Vasyukhin M. I., Kasim A. M., Kredencar S. M. & Ponomarev S. A. (2005). Metod preobrazovaniya izobrazheniy simvolov v sistemakh zashchitih osobo vazhnikhkh objhektov. *Fizicheskaya yadernaya bezopasnostj : sbornik dokladov 1-go Mezhdunarodnogo foruma.* Kyiv : «LEKS». 49–55.

10. Vasyukhin M. I., Zaporozhecj O. I., Gulevecj V. D., Kasim A. M. & Chukarina N. M. (2010). Problemi kartografichnoï pidtrimki avtomatizovanoï sistemi kompleksnogo zakhistu аеропорту. *Problemi informatizacii ta upravlinnya,* 3 (31), 30–38.

11. Vasyukhin M., Tkachenko A., Kasim A., Dolihnnihyj V., Ivanihk Yu. (2014). Osobennosti postroeniya i funkcionirovaniya avtomatizirovannihkh sistem bezopasnosti osobo vazhnikhkh objhektov. *Securitologia,* 1 (19), 167–179.

12. Palagin O. V., Kasim A. M., Vasyukhin M. I., Belozjorov Zh. O. (2018). Geoinformacijna sistema viznachennya koordinat nazemnikh i nadvodnikh cileyj. *Bezpeka*

zhittediyalnosti na transporti i virobnictvi – osvita, nauka, praktika (SLA-2018) : zbirnik materialiv V Mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferencii. Kherson: Khersonsjka derzhavna morskja akademiya. 97–104.

13. Vasyukhin M. I., Ben A. P., Vishinskiy V. A., Kasim A. M., Pavlenko P. M. (2019). Sistema predstavleniya povitryanoi ta nazemnoi obstanovki dlya situaciynikh centriv operativnogo upravlinnya antiteroristichnimi operaciyami. *Nauka i praktyka bezpieczestwa. Krakow :Wydawnictwo EAS, 300–307.*

Васюхин М. И., Касим А. М., Бень А. П. КОНЦЕПЦИЯ И АЛГОРИТМЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ НА ТЕРРИТОРИИ ОСОБО ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

В современных условиях повышение уровня террористической деятельности в мире достаточно остро стоит вопрос защиты особо важных объектов от актов незаконного вмешательства в их деятельность с целью предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций. От эффективности и достоверности работы автоматизированных систем защиты таких объектов зависит не только безопасность эксплуатации самого объекта, но безопасность и жизнь людей, государства в целом. Примером особо важных объектов являются президентские дворцы, аэродромы, атомные станции, нефтеперерабатывающие заводы, военные объекты, морские порты и тому подобное. Целью статьи является создание концепции и алгоритмов построения системы обнаружения и противодействия чрезвычайным ситуациям на территории особо важных объектов в реальном времени. В исследовании разработана концепция построения и функционирования системы защиты особо важных объектов, которая включает: алгоритм создания системы комплексной защиты особо важных объектов и граф процесса развития чрезвычайных ситуаций и мер противодействия. Итерационную схему проектирования СППР безопасности на уровне особо важных объектов, которая содержит следующие этапы системного проектирования и одноименные уровни формализованных описаний, а именно: концептуальный, функциональный, обеспечивающий, организационный и общесистемный. Процесс проектирования рассматривается как постепенное уменьшение неопределенности представлений о системе путем проведения декомпозиции процесса проектирования на последовательные этапы в направлении к росту степени детальности и полноты этих представлений. Такой подход позволяет периодически уточнять и, в случае необходимости, корректировать цели и задачи системы, наращивать ее возможности, координировать взаимодействие разнофаховых разработчиков ее составляющих.

Ключевые слова: системы защиты, чрезвычайные ситуации.

Vasyukhin M. I., Kasim A. M., Ben A. P. CONCEPT AND ALGORITHMS OF CREATION SYSTEMS OF EMERGENCY DETECTION AND RESPONSE IN THE TERRITORY OF PARTICULAR IMPORTANCE REAL-TIME OBJECTS

In the current climate of increasing terrorist activity in the world, the question of protecting particularly important objects from acts of unlawful interference with their activities to prevent emergencies is a pressing issue. The efficiency and reliability of the automated security systems of such objects depends not only on the safety of the operation of the object itself, but also on the safety and life of the people, the state as a whole. Examples of particularly important objects are presidential palaces, airfields, nuclear power plants, oil refineries, military installations, seaports, and more. The purpose of the article is to create a concept and algorithms for building a system of detection and response to emergencies in the territory of particularly important objects in real time. The research has developed the concept of building and functioning of the system of protection of especially important objects, which includes: the algorithm of creation of the system of complex protection of especially important objects and the graph of the process of development of emergency situations and countermeasures. An iterative scheme for designing DSS for security at the level of critical objects, which contains the following stages of system design and levels of formalized descriptions, namely: conceptual, functional, providing, organizational and system-wide. The design process is seen as a gradual reduction of the uncertainty of the system concept by decomposing the design process into successive steps towards increasing the degree of detail and completeness of these representations. This approach allows us to periodically refine and, if necessary, adjust the goals and objectives of the system, increase its capabilities, and coordinate the interaction of various developers of its components.

Keywords: protection systems, emergency situations.

© Васюхін М. І., Касім А. М., Бень А. П.

Статтю прийнято
до редакції 20.08.19

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Голощаров С. С., к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: goloscharov46@gmail.com;

Ищенко И. М., к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии;

Козловский М. И., аспирант кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии

Асинхронные машины используются в основном как двигатели. Благодаря повышенной надежности и простоте конструкции они широко применяются в промышленности и на судах морского флота, являясь основными потребителями электрической энергии. Несмотря на указанные преимущества, им присущ существенный недостаток – плохая регулируемость скорости вращения. Из всех используемых способов регулирования скорости: изменением числа пар полюсов, введением сопротивления в цепь ротора, изменением величины питающего напряжения, изменением частоты питающей сети наиболее приемлемым в настоящее время, благодаря современной силовой электронной базе, следует признать частотный способ регулирования с промежуточным преобразованием напряжения трехфазной цепи в постоянный ток и последующим формированием заданного синусоидального напряжения переменной частоты методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Этот метод хотя и позволяет получить переменное напряжение заданной частоты с синусоидальной формой кривой, однако обладает существенными коммутационными потерями в ключах инвертора, что приводит к необходимости применения сложных жидкостных систем охлаждения. Существенно снизить указанные потери можно, если ключами инвертора формировать напряжение заданной частоты прямоугольной формы, которым непосредственно питать двигатель. Возникающие при этом дополнительные потери и, как следствие этого, дополнительный разогрев от высшей гармонической (ВГ) стали и обмоток двигателя рассчитываются на основании обмоточных коэффициентов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, инвертор, обмоточный коэффициент, коэффициент укорочения, потери в меди, потери в стали.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.098-107

Введение. Трехфазный асинхронный двигатель (АД) в настоящее время является основным типом электродвигателей в промышленности и на судах морского флота. Широкое применение трехфазные АД получили благодаря простоте устройства, удобству обслуживания и высокой надежности в эксплуатации.

Применение асинхронного привода в судовых подъемных механизмах, насосах и вентиляторах с регулируемой производительностью предполагает плавное регулирование скорости в широких пределах. Один из известных способов плавного регулирования скорости АД – введением сопротивления в цепь ротора [1, 2, 3, 4] – обладает неудовлетворительными энергетическими характеристиками и не может быть рекомендован для длительного режима работы. Кроме того, он возможен только для двигателя с фазным ротором, что удорожает двигатель и усложняет его эксплуатацию. Регулирование скорости вращения изменением величины питающего напряжения может применено только для двигателей с мягкой механической характеристикой (АД с массивным ферромагнитным ротором) и не может быть использовано для АД с короткозамкнутой клеткой из-за крайне узкого диапазона регулирования [1, 4, 5].

В настоящее время, в основном, применяют частотное регулирование – наиболее плавный и экономичный способ регулирования скорости асинхронных короткозамкнутых двигателей, обеспечивающий широкий диапазон регулирования (до 12:1 и выше) при достаточно жестких механических характеристиках [1, 2]. Однако осуществление данного способа регулирования требует наличия специальных преобразователей частоты, тип которых определяет схему частотного управления АД.

В настоящее время на судах применяются, главным образом, полупроводниковые преобразователи, формирующие напряжение заданной частоты из источника постоянного тока – инверторы.

Наиболее простым является инвертор, формирующий на выходе трехфазное напряжение прямоугольной формы, сдвинутое друг относительно друга на 120° . На рис. 1 представлена схема такого инвертора со звеном постоянного тока, в котором транзисторы каждого полумоста управляются прямоугольным напряжением (с длительностью открытого состояния транзистора 180°) [6, 7].

В инверторах напряжения синусоидальность выходного напряжения можно также обеспечить с помощью внешних LC-фильтров [7]. Однако им свойственна большая установленная мощность а также то, что степень подавления гармоник зависит от характеристики фильтра и никогда не бывает 100 процентной. Кроме того, при изменении частоты необходимо менять и параметры фильтра, что, зачастую, невозможно.

При векторном способе синтеза синусоидального напряжения выходное напряжение преобразователя формируется из выходных напряжений нескольких инверторов, имеющих соответствующие фазу и частоту и включенных последовательно на стороне переменного тока. Также получить синусоидальное выходное напряжение можно, если складывать прямоугольные напряжения различных частот. Это достигается тем, что инвертор напряжения основной частоты на стороне переменного тока соединяется последовательно с инверторами, работающими на частотах $3f_1, 5f_1, \dots$ и имеющими соответствующие фазу и амплитуду выходного напряжения, так, чтобы результирующее напряжение было близко к синусоидальному. При описанных способах можно получить на выходе синусоидальное напряжение с любой наперед заданной точностью при различных вариантах соединения выходных цепей инверторов [7].

Оба приведенных способа – векторный и с суммированием напряжений с кратными частотами при реализации весьма громоздки и сложны, особенно если выдвигаются повышенные требования к форме выходного напряжения.

В связи с этим из всех перечисленных способов получения синусоидального напряжения с регулируемой частотой наиболее пригодным следует признать способ с промежуточным звеном постоянного тока и инвертором, управляемым ШИМ. Однако для удовлетворительной формы кривой необходимо довольно частая (порядка 10 за полпериода) коммутация ключей инвертора, что приводит к значительным коммутационным потерям в ключах и их разогреву. Для эвакуации тепловых потерь в ключах, как правило, применяют деионизованую воду. Последнее резко снижает эксплуатационную надежность и усложняет конструкцию инвертора.

Актуальность. Поэтому является актуальной попытка запитать АД от источника трехфазного прямоугольного напряжения, реализуемого по схеме рис. 1, в которой коммутационные потери в ключах инвертора по сравнению с ШИМ снижены на порядок. При этом оценить дополнительные потери [8, 9, 10] в двигателе можно, используя данные о разложении в ряд Фурье кривой прямоугольной формы [11, 12].

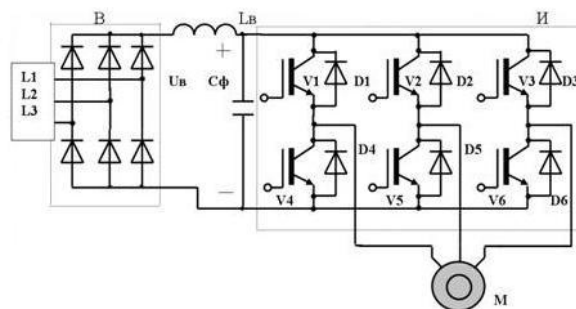


Рисунок 1 – Инвертор со звеном постоянного тока

Целью статьи является разработка методики расчета энергетических характеристик АД при питании прямоугольным напряжением и количественная оценка дополнительных потерь, и перегрева стали, и обмоток АД при различных вариантах исполнения его обмоток.

Основная часть. Расчет дополнительных потерь, вызванных высшими гармоническими (ВГ), может быть сведен к следующему.

Согласно спектрального анализа прямоугольной кривой, в ней содержатся только нечетные гармоники, то есть 1-я, 3-я, 5-я, 7-я и т.д. При разложении в ряд Фурье, кривая такого напряжения представляется в виде [11]:

$$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right). \quad (1)$$

Первая гармоника является полезной, совершает работу и создает основные потери в двигателе. Остальные ВГ создают добавочные моменты, искажающие основную характеристику момента двигателя, и добавочные потери, уменьшающие к.п.д. двигателя и приводящие к нарушению его теплового режима.

При соединении обмоток двигателя звездой исключаются 3-я и кратные ей гармоники, т. е. 9-я, 15-я и т. д. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к схемам включения двигателя является включение обмоток двигателя звездой. Оставшиеся гармонические влияют на работу двигателя в зависимости от коэффициентов членов ряда (1) и от величины обмоточного коэффициента для каждой из гармоник.

Как известно [1, 4], обмоточный коэффициент $k_{об}$ состоит из коэффициента укорочения k_y и коэффициента распределения k_p , т.е.:

$$k_{об} = k_y \cdot k_p.$$

Коэффициент распределения.

Для основной гармоники коэффициент распределения равен:

$$k_{p1} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}},$$

где k_{p1} – коэффициент распределения для первой (основной) гармоники, m – число фаз обмотки, $q = \frac{z_1}{2pm}$ – число пазов на полюс и фазу, z_1 – число пазов статора, p – число пар полюсов обмотки статора.

Для ν -той гармоники:

$$k_{p\nu} = \frac{\sin \frac{\nu\pi}{2m}}{q \sin \frac{\nu\pi}{2mq}}, \quad (2)$$

где $k_{p\nu}$ – коэффициент распределения для ν -той гармоники, ν – порядок гармоники.

Для равномерно распределенной обмотки ($z_1 \rightarrow \infty$) коэффициент распределения для первой гармоники равен $k_{p1\infty} = 0,955$, при $q = 4$ $k_{p1} = 0,958$, при $q = 3$ $k_{p1} = 0,96$.

Как видно из приведенных данных, коэффициент распределения меняется для большинства обмоток очень слабо и с достаточной степенью точности его можно принять постоянным. В дальнейшем примем $k_{p1} = 0,96$.

Коэффициент укорочения.

Обмотки переменного тока чаще всего выполняются с укороченным шагом.

Если τ – величина полюсного деления, y – шаг обмотки, то $\beta = \frac{y}{\tau}$ – величина относительного шага обмотки.

Тогда коэффициент укорочения шага обмотки первой гармонической (рис. 2, а) равен:

$$k_{y1} = \sin \frac{\beta\pi}{2}.$$

Для ν -той гармонической коэффициент укорочения:

$$k_{y\nu} = \sin \frac{\nu\beta\pi}{2}.$$

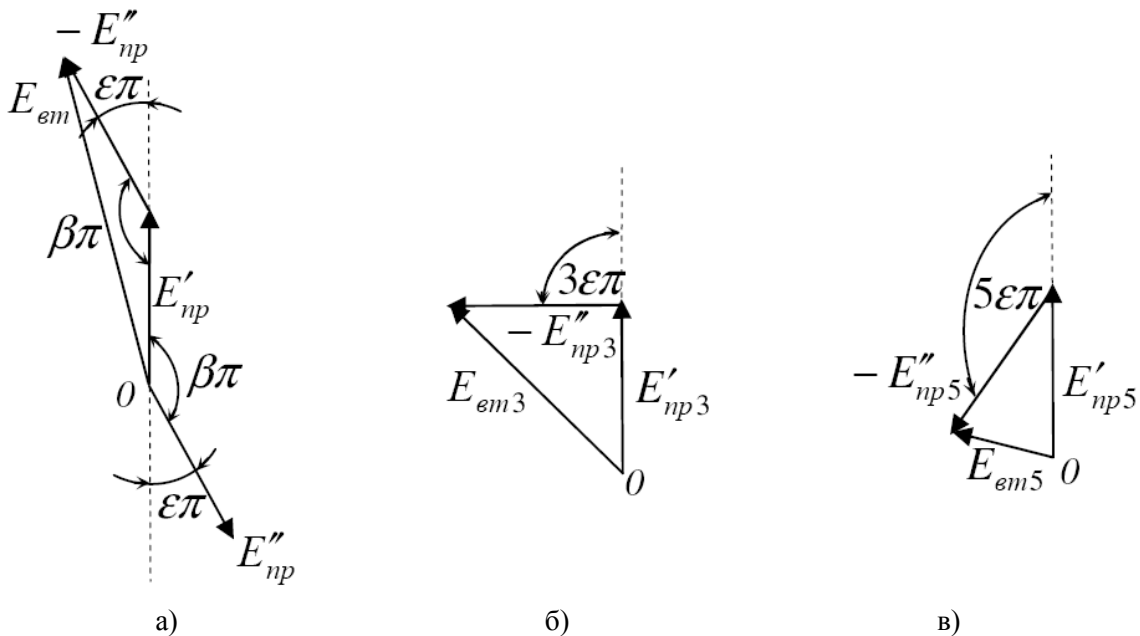


Рисунок 2 – Векторные диаграммы э.д.с. витка:

а) для основной гармонической; б) для третьей гармоники; в) для пятой гармоники

Как видно из рис. 2 в, э.д.с. витка в относительных единицах может принимать любые значения в пределах от 1 до 0 и зависит от начального угла ε и номера гармоники.

Поскольку для первой гармоники по известным обмоточному коэффициенту и коэффициенту распределения можно определить коэффициент укорочения, выведем зависимость коэффициента укорочения для ν -той гармоники от коэффициента укорочения для первой гармоники (рис. 3).

Если же обмотка укладывается так, что ее виток состоит из проводника, уложенного в паз А и проводника, уложенного в паз В, то такая обмотка является укороченной и ее коэффициент укорочения равен:

$$k_{y1} = \frac{AB}{AC}.$$

Из треугольника ABC следует, что:

$$BC = \sqrt{AC^2 - AB^2} = AC\sqrt{1 - k_{y1}^2};$$

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{BC}{OC}}{\frac{AC}{2}} = \frac{\frac{BC}{AC}}{\frac{2}{2}} = \frac{BC}{AC} = \sqrt{1 - k_{y1}^2}.$$

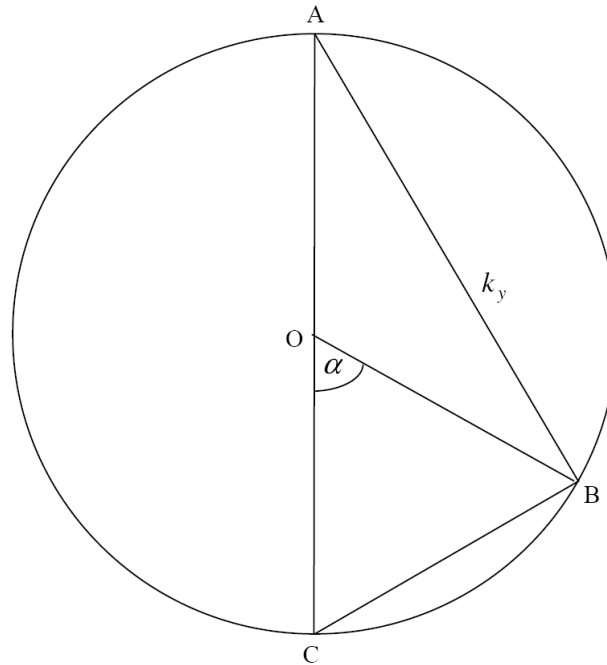


Рисунок 3 – К виводу залежності $k_{yv} = f(k_{y1})$

Следовательно:

$$\alpha = 2 \arcsin \sqrt{1 - k_{y1}^2}.$$

В приведенном выражении k_{y1} – коэффициент укорочения для первой гармоники.

Для ν -той гармоники угол α увеличивается пропорционально порядку гармоники, т.е. для 3-й гармоники он будет равен 3α , для 5-й – 5α и т.д.

Тогда коэффициент укорочения для ν -той гармоники определится как:

$$k_{yv} = \sqrt{1 - \left(\sin \nu \frac{\alpha}{2} \right)^2}$$

или

$$k_{yv} = \sqrt{1 - \left(\sin \nu \arcsin \sqrt{1 - k_{y1}^2} \right)^2}. \quad (3)$$

Полученное выражение позволяет определить коэффициент укорочения для любой гармоники на основании его значения по основной гармонике.

Так, при $\alpha = 60^\circ$ $k_{y1} = 0,866$ и если $\nu = 3$ (третья гармоника), то $k_{y3} = 0$, то есть третья гармоника подавляется полностью.

Если $\alpha = 36^\circ$, $k_{y1} = 0,951$ и $\nu = 5$ $k_{y5} = 0$ – подавляется пятая гармоника.

Таким образом, общий алгоритм расчета обмоточного коэффициента для ν -той гармоники следующий:

1. Задаемся обмоточным коэффициентом $k_{o\delta 1}$ по первой гармонике,
2. Принимаем коэффициент распределения для первой гармоники $k_{p1} = 0,96$,
3. Определяем коэффициент укорочения для первой гармоники как

$$k_{y1} = \frac{k_{o\delta 1}}{k_{p1}} = \frac{k_{o\delta 1}}{0,96}. \quad (3)$$

4. Для ν -той гармоники определяем коэффициент распределения по (2).
5. Определяем коэффициент укорочения для ν -той гармоники по (3).
6. Определяем обмоточный коэффициент для ν -той гармоники как

$$k_{o\delta \nu} = k_{p\nu} k_{y\nu}.$$

Потери в обмотках от ВГ.

Согласно [11], активная мощность несинусоидального тока равна сумме активных мощностей отдельных гармоник. Аналогичное утверждение можно распространить и на мощности потерь отдельных гармоник. Поэтому следует вначале определить эти мощности для каждой гармонической в отдельности, а затем их сложить.

Тогда мощность потерь в меди статора равна [7, 9]:

$$P_{\sigma 1,1} = 3I_{1,1}^2 r_1,$$

где $I_{1,1}$ – номинальный ток статора основной гармоники, r_1 – активное сопротивление обмотки статора.

Считаем, что ток ν -той гармоники пропорционален напряжению этой гармоники.

Тогда мощность потерь в меди статора от токов 5-й гармоники равна:

$$P_{\sigma 1,5} = 3I_{1,5}^2 r_1,$$

где $I_{1,5}$ – составляющая тока статора от 5-й гармоники.

Или с учетом обмоточных коэффициентов и того, что напряжение 5-й гармоники составляет $\frac{1}{5}$ от основной:

$$P_{\sigma 1,5} = 3I_{1,5}^2 \frac{k_{o\delta 5}^2}{k_{o\delta 1}^2} r_1 = 3I_{1,1}^2 \frac{k_{o\delta 5}^2}{5^2 k_{o\delta 1}^2} r_1 = \frac{k_{o\delta 5}^2}{5^2 k_{o\delta 1}^2} P_{\sigma 1,1}.$$

В общем случае для ν -той гармоники электрические потери в меди статора:

$$P_{\sigma 1,\nu} = \frac{k_{o\delta,\nu}^2}{\nu^2 k_{o\delta 1}^2} P_{\sigma 1,1}.$$

Аналогичную формулу можно записать и для потерь в обмотке ротора:

$$P_{\sigma 2,\nu} = \frac{k_{o\delta,\nu}^2}{\nu^2 k_{o\delta 1}^2} P_{\sigma 2,1},$$

где $P_{\sigma 2,\nu}$ – потери в обмотке ротора от ν -той гармонической, $P_{\sigma 2,1}$ – потери в обмотке ротора от основной гармоники.

Потери в стали от ВГ.

Согласно [10], основные потери в стали сердечника статора от основной гармоники определяются по формуле:

$$P_{cm1} = P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \left(k_{\partial a} B_a^2 m_a + k_{z a} B_{zcc}^2 m_z \right), \quad (4)$$

где $P_{1,0/50}$ – удельные потери в стали, приведенные к индукции 1Тл и частоте 50 Гц, определяются из табл. 6.24 [10], β зависит от марки стали, определяется [10], f – частота перемагничивания стали, $k_{\partial a}$, $k_{z a}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов, B_a и B_{zcc} – индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, m_a и m_z – масса стали ярма и зубцов статора.

Считаем, что величина индукции ν -той гармоники обратно пропорциональна номеру этой гармоники (как в питающем напряжении).

Тогда потери в стали от ν -той гармоники определяются как:

$$\begin{aligned} P_{cm\nu} &= P_{1,0/50} \left(\frac{\nu f}{50} \right)^\beta \left(k_{\partial a} B_{a\nu}^2 m_a + k_{\partial z} B_{zcc\nu}^2 m_z \right) = \\ &= P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \nu^\beta \left[k_{\partial a} \left(\frac{B_{a1}}{\nu} \right)^2 m_a + k_{\partial z} \left(\frac{B_{zcc1}}{\nu} \right)^2 m_z \right], \end{aligned}$$

с учетом обмоточного коэффициента

$$\begin{aligned} P_{cm\nu} &= P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \nu^\beta \left[k_{\partial a} \left(\frac{B_{a1} k_{o\partial\nu}}{\nu k_{o\partial 1}} \right)^2 m_a + k_{\partial z} \left(\frac{B_{zcc1} k_{o\partial\nu}}{\nu k_{o\partial 1}} \right)^2 m_z \right] = \\ &= P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \nu^\beta \left(\frac{k_{o\partial\nu}}{\nu k_{o\partial 1}} \right)^2 \left(k_{\partial a} B_{a1}^2 m_a + k_{\partial z} B_{zcc1}^2 m_z \right). \end{aligned}$$

Или с учетом (4):

$$P_{cm\nu} = P_{cm1} \left(\frac{k_{o\partial\nu}}{k_{o\partial 1}} \right)^2 \nu^{\beta-2}.$$

Необходимость введения в формулу потерь в стали обмоточного коэффициента $k_{o\partial 1}$ связана с тем, что реальный двигатель уже имеет этот обмоточный коэффициент, поэтому необходимо вначале привести его (и соответствующие формулы потерь) к условному двигателю, имеющему $k_{o\partial 1} = 1$, то есть к двигателю с сосредоточенной диаметральной обмоткой, а затем уже вводить расчетные обмоточные коэффициенты по ВГ.

Кроме основных потерь в стали $P_{cm.осн}$ (ярме статора и его зубцах) существуют еще поверхностные потери в роторе $P_{по\partial 2}$ и пульсационные $P_{нул2}$ в зубцах ротора. Анализ этих зависимостей показывает, что указанные потери, в конечном счете, пропорциональны, как и основные потери в стали, величине B_δ^2 (B_δ – индукция в воздушном зазоре), то есть, структуры формул основных потерь в стали, поверхностных потерь в роторе и пульсационных потерь в зубцах ротора в отношении индукции схожи. Поэтому в формуле (6) в качестве параметра P_{cm1} следует понимать полные потери в стали [10]

$$P_{cm1} = P_{cm.осн} + P_{по\partial 2} + P_{нул2}$$

По изложенной методике был рассчитан двигатель с номинальной мощностью 30 кВт, напряжением 400 В, частотой 50 Гц. В результате расчета были получены следующие данные:

$$P_{\Sigma 1,1} = 1386 \text{ Вт}, P_{\Sigma 2, \nu} = 716 \text{ Вт}, P_{\text{см1}} = 463 \text{ Вт}, \text{к.п.д. } \eta = 0,907.$$

Тепловой расчет по основной гармонике дал следующие результаты:

– превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды $\Delta \vartheta_1 = 91,3 \text{ }^\circ\text{C}$,

– превышение температуры сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta \vartheta_{\text{носл}} = 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$,

При расчете добавочных потерь от ВГ во внимание принимались дополнительные потери от 5-й, 7-й, 11-й, 13-й, 17-й и 19-й гармоник. Расчет велся для значений обмоточных коэффициентов 0,88, 0,9, 0,92 и 0,94. При этом наибольшие потери от ВГ показал вариант при $k_{\text{об}} = 0,9$. Дополнительные потери в обмотках увеличились на 0,7 % и составили 14,7 Вт, в стали – на 36,4 % (169 Вт). КПД уменьшился до 0,901.

Тепловой расчет с учетом ВГ показал следующее:

– превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды $\Delta \vartheta_1 = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$

– превышение температуры сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta \vartheta_{\text{носл}} = 18,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, анализ энергетических показателей автономных электроприводов на базе АД при питании напряжением прямоугольной формы показывает, что потери, вызываемые высшими гармоническими, крайне незначительны и в общей сумме составляют не более 6 % от основных потерь. Дополнительный перегрев двигателя, вызываемый этими потерями, не превышает 3–4 $^\circ\text{C}$.

Выводы. Расчеты показывают, что дополнительное увеличение потерь в двигателе при питании его прямоугольным напряжением незначительно, опасности нарушения теплового режима нет. В то же время на порядок снижаются коммутационные потери ключей инвертора, что позволяет отказаться от сложных, ненадежных и дорогих систем жидкостного охлаждения и ограничиться дутьем. Изложенная методика анализа энергетических характеристик асинхронного двигателя при питании его прямоугольным напряжением может быть использована и при оценке энергетических параметров асинхронного привода при питании его напряжением произвольной формы, а также при анализе увеличения потерь при соединении обмоток АД треугольником.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 2. Машины переменного тока. Л. : Энергия. 1973. 648 с.
2. Мезин Е. К. Судовые электрические машины. Л. : Судостроение, 1985. 320 с.
3. Головин Ю. К. Судовые электрические приводы. М. : Транспорт, 1991. 327 с.
4. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб : Питер, 2008. 350 с.
5. Кацман М. М. Электрические машины автоматических устройств. М. : ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002. 264 с.
6. Моин В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. М. : Энергоатомиздат, 1986. 376 с.
7. Чиженко И. М. Справочник по преобразовательной технике. К. : Техника. 1978. 447 с.
8. Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин. М. : Энергоатомиздат, 1984. 360 с.

9. Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин / под ред. Гольдберга. М. : Высш. шк., 1984. 431 с.
10. Копылов И. П., Горяинов Ф. А., Клоков Б. К., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин. М. : Энергия. 1980. 496 с.
11. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М. : Высш. школа, 1973. 752 с.
12. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М. : Наука, 1973. 872 с.

REFERENCES

1. Kostenko, M. P. & Piotrovsky, L. M. (1973). *Electric machines*. Ch 2. Accurrent machines. Leningrad : Energy.
2. Mezin, E. K. (1985). *Ship electric machines*. Leningrad : Shipbuilding.
3. Golovin, Y. K. (1991). *Ship electric drives*. Moskva : Transport.
4. Woldek, A. I. & Popov, V. V. (2008). *Electric machines*. St. Petersburg : Peter.
5. Katzman, M. M. (2002). *Electric Machines automatic devices*. Moskva : FORUM, INFRA-M.
6. Moin, V. S. (1986). *Stabilized Transistor Converters*. Moskva: Energoatomydat.
7. Chizhenko, I. M. (1978). *Handbook on Transformative Technology*. Kyev : Technique.
8. Katzman, M. M. (1984). *Calculating and constructing electric machines*. Moskva : Energoatomizdat.
9. Goldberg, O. D. (Ed.) (1984). *Designing electric machines*. Moskva : Vysh. Sk.
10. Kopylov, I. P., Goryainov, F. A., Klovov B. K. & Tokarev, B. F. (1980). *Designing electric machines*. Moskva : Energy.
11. Bessonov, L. A. (1973). *Theoretical basics of electrical engineering*. Moskva : High. school.
12. Vygodsky, M. Y. (1973). *Higher Mathematics Handbook*. Moskva : Science.

Голощачов С. С., Іщенко І. М., Козловський М. І. АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ЖИВЛЕННІ ПРЯМОКУТНОЮ НАПРУГОЮ

Асинхронні машини використовуються в основному як двигуни. Завдяки підвищеній надійності й простоті конструкції вони широко застосовуються в промисловості й на судах морського флоту, будучи основними споживачами електричної енергії. Незважаючи на зазначені переваги, їм властивий істотний недолік – погане регулювання швидкості обертання. Із усіх використовуваних способів регулювання швидкості: зміною числа пар полюсів, введенням опору в ланцюг ротора, зміною величини живлячої напруги, зміною частоти мережі найбільш прийнятним на теперішній час, завдяки сучасній силовій електронній базі, слід визнати частотний спосіб регулювання із проміжним перетворенням напруги трифазного ланцюга в постійний струм і наступним формуванням заданої синусоїдальної напруги змінної частоти методом широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Цей метод хоча й дозволяє одержати змінну напругу заданої частоти із синусоїдальною формою кривої, однак має істотні комутаційні втрати у ключах інвертора, що приводить до необхідності застосування складних рідинних систем охолодження. Суттєво знизити зазначені втрати можна, якщо ключами інвертора формувати напругу заданої частоти прямокутної форми, яку безпосередньо живити двигун. Виникаючі при цьому додаткові втрати й, як наслідок цього, додатковий розігрів від вищих гармонійних (ВГ) стали й обмоток двигуна розраховуються на підставі обмотувальних коефіцієнтів.

Ключові слова: асинхронний двигун, інвертор, обмотувальний коефіцієнт, коефіцієнт укорочення, втрати в міді, втрати в сталі.

Goloshchapov S. S., Ischenko I. M., Kozlovskiy M. I. ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH RECTANGULAR VOLTAGE POWER SUPPLY

Asynchronous machines are used mainly as engines. Due to the increased reliability and simplicity of the design, they are widely used in industry and on ships in the sea fleet, being the main consumers of electric energy. Despite these advantages, they have a significant drawback - poor adjustability of rotation velocity.

Of all the methods being used to regulate speed such as: changing the number of pole pairs, introducing resistance into the rotor circuit, changing the rate of voltage supply, changing the frequency of the power line; the most acceptable one at current, due to modern power electronic base, should be considered the frequency method of adjustment with the intermediate conversion of the voltage of the three-phase circuit into direct current and the subsequent formation of a given sinusoidal voltage of variable frequency by pulse-duration modulation (PDM) method. Although this method allows to obtain alternating voltage of a given frequency with a sinusoidal form of wave, it has significant switching losses in the keys of the inverter, which leads to necessity of liquid cooling systems application with deionized water. This is especially true for powerful high-voltage asynchronous machines used in steering devices. It is possible to reduce these losses significantly by using the keys of the inverter to form the voltage of a given frequency of rectangular form, which will supply the power directly to the engine. Any additional losses generated in this case, and, as a result, additional heating from the higher harmonic (HV) steel and engine windings, are calculated on the basis of winding ratios. At the same time, since the ratio of the winding distribution varies very poorly, in calculations it can be accepted permanent, and by the value of the shortening factor specified for the first harmonica, it is possible to determine the appropriate coefficients of the series of HV, taken into account.

Keywords: asynchronous motor, inverter, winding ratio, shortening factor, copper loss, steel loss.

© Голощупов С. С., Іщенко І. М., Козловський М. І.

Статтю прийнято
до редакції 10.09.19

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТРЕНАЖЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ СУДОВОДИТЕЛЕЙ

Каштальян П. В., аспирант кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: kashtalyanp@gmail.com;

Терновая Т. И., к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: tti.kherson@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1902-6804;

Рожков С. А., д.т.н., заведующий кафедрой эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматик Херсонской государственной морской академии, e-mail: rozhkov_ser@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-1662-004X

Морской транспорт в настоящее время является одним из экономически выгодных видов транспорта. Его сравнительная дешевизна приводит к увеличению объемов перевозок грузов морским путем, но одновременно возрастают требования обеспечения безопасности таких перевозок. Одним из методов повышения безопасности морских перевозок является повышение квалификации судоводителей. На сегодняшний день существует большое количество различных технических и программных средств для обеспечения обучения и закрепления знаний и навыков экипажей судна. Для соответствия требованиям украинского и международного законодательства по отработке взаимодействия членов команды ходового мостика и судовых систем необходимо использовать только полноразмерные тренажерные комплексы, адаптированные к конкретным задачам и максимально приближенные к реальному объекту.

В статье рассмотрена возможность развития и адаптивного использования методов тренажерной подготовки судоводителей с целью повышения безопасности морских перевозок. Проведен анализ модельных курсов IMO и их применимости к задачам тренажерной подготовки судоводителей. Проведена классификация основных задач судовождения, показан их формализованный вид и оптимальное решение. Предложена функция вероятности безаварийного плавания в качестве критерия оценки компетентности судоводителя.

Несмотря на высокий уровень автоматизации, многие задачи по навигации и управлению судном все еще осуществляются вручную. Это требует от штурманского состава знания особенностей своего судна в конкретных условиях и полной осведомленности о его навигационном оборудовании. Использование на практике нестандартной аппаратной и программной части навигационного оборудования, так же как и его эргономические особенности, на разных судах не позволяют последовать опыту авиации и проводить серийное макетирование реального оборудования в целях тренажерной подготовки. Таким образом, представляется целесообразным проводить базовое обучение штурманского состава на индивидуальных «малых» тренажерах/симуляторах с использованием адекватных математических моделей реальных судов.

Ключевые слова: *тренажерная подготовка, оптимальное управление, предыдущая прокладка, оптимальный маршрут, тренажерный комплекс, сценарий упражнения, принятие решения, оптимальное управление.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.108-114

Постановка проблемы. Одним из экономически выгодных видов транспорта в настоящее время является морской транспорт. Его сравнительная дешевизна приводит к увеличению объемов перевозок грузов морским путем, но одновременно возрастают требования обеспечения безопасности таких перевозок. Одним из методов сведения к минимуму вероятности возникновения аварийных ситуаций является повышение квалификации судоводителей. Тренажерная подготовка судоводителей позволяет повысить квалификацию штурманского состава путем ознакомления с функционалом и ограничениями судового оборудования, а также выработки слаженности действий команды.

На сегодняшний день существует большое количество различных технических и программных средств для обеспечения обучения и закрепления знаний и навыков экипажей судна. Основой систем использующих эти средства являются разнообразные тренажеры и

стимуляторы [1], которые различаются по своему предназначению от моделирования работы с отдельным оборудованием до моделирования ходового мостика.

Для соответствия требованиям украинского [2] и международного законодательства по отработке взаимодействия членов команды ходового мостика и судовых систем необходимо использовать только полноразмерные тренажерные комплексы, адаптированные к конкретным задачам и максимально приближенные к реальному объекту.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время используются ряд специализированных курсов по подготовке членов команды ходового мостика, таких как: Maritime Resources Management, Bridge Team Resources Management, Master-Pilot Relations Course, управления крупнотоннажными судами и т.п. Большинство из них базируются на модельных курсах, разработанных Международной морской организацией (ИМО) с целью стандартизации и унификации подготовки плавсостава согласно Международной конвенции по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты 1978/2010. Например, модельный курс 2.07 «Ship Simulator and Bridge Teamwork» [3] выдвигает требования к оборудованию и персоналу, который проводит обучение штурманского состава. Кроме технических навыков управления судном, в цели подготовки также входит умение грамотно организовывать несения вахты и взаимодействие всех задействованных в этом лиц [4–9]. Однако этот и аналогичные модельные курсы не предписывают детальной процедуры оценки компетентности учащегося, а также то, по каким принципам инструктор должен осуществлять генерацию сценариев.

В статье [10] рассмотрена предварительная прокладка маршрута Gdynia –Vallvik универсального сухогруза «НС Веа-Luna», выполненная навигационным помощником капитана. Как видно из анализа статьи, реальная траектория судна не совпадает с линиями генеральных курсов предварительной прокладки. Из этого можно сделать вывод, что предыдущая прокладка была неоптимальной. Или вахтенный помощник капитана сделал промах в расчете маневра. Также вероятно, что расчет был проведен таким образом вследствие дополнительных внешних возмущений (волнение моря, расхождение с другими судами или плавучей навигационной опасностью и т.п.). Функционал ECDIS (electronic chart display and identification system) TRASAS NAVISAILOR 4000™ позволяет записывать траектории и маршруты реальных судов, наличие целей в пределах действия УКВ-частот. При наличии подключения система может дополнительно фиксировать действие ветра, отклонение пера руля, крен судна и другую навигационную информацию. Анализ данной информации позволяет изучать поведение судоводителя при тренажерной подготовке команды ходового мостика.

Таким образом, существует аппаратно-программный комплекс, который позволяет оценивать базовую компетентность судоводителя (инструктора) путем построения оптимального маршрута и проводки судна по нему. Следующий уровень тренажерной подготовки должен проводиться в условиях, максимально приближенных к реальным с использованием полноразмерных симуляторов и взаимодействия обучаемых как команды ходового мостика [5].

Целью исследования является анализ возможности развития методов тренажерной подготовки судоводителей с целью повышения безопасности морских перевозок.

Основная часть. Изложение основного материала исследования. Прежде всего, следует разделить классы задач на задачи базовой подготовки судоводителей, которая используется при несении самостоятельной вахты и задачи коллективного несения вахты в усиленном составе команды мостика (капитан, лоцман, вахтенный помощник, вперёдсмотрящий, рулевой и т.д.). Первая задача может проводиться обучаемым единолично с использованием малых тренажеров/симуляторов под контролем инструктора, и нацелена на приобретение навыков работы с ECDIS, решение задач на маневренном планшете, освоение особенностей поведения конкретной математической модели судна. Вторая задача должна выполняться на тренажерном комплексе с полной визуализацией в

составе команды ходового мостика, и имеет задачей приобретения навыков согласованной работы и ее организации каждым в пределах его должности.

Подготовку на тренажерном комплексе можно рассматривать как модель системы судна, информационно-управляемого с ходового мостика. При этом следует учитывать, что, независимо от уровня автоматизации судна, ответственность за результаты реализации управления несут члены команды ходового мостика, а ответственность за организацию работы остается за капитаном [6]. Поэтому далее будем рассматривать двойную задачу: базовую компетентность штурмана и его способность к слаженной работе в качестве члена команды ходового мостика данного типа судна (рис. 1).

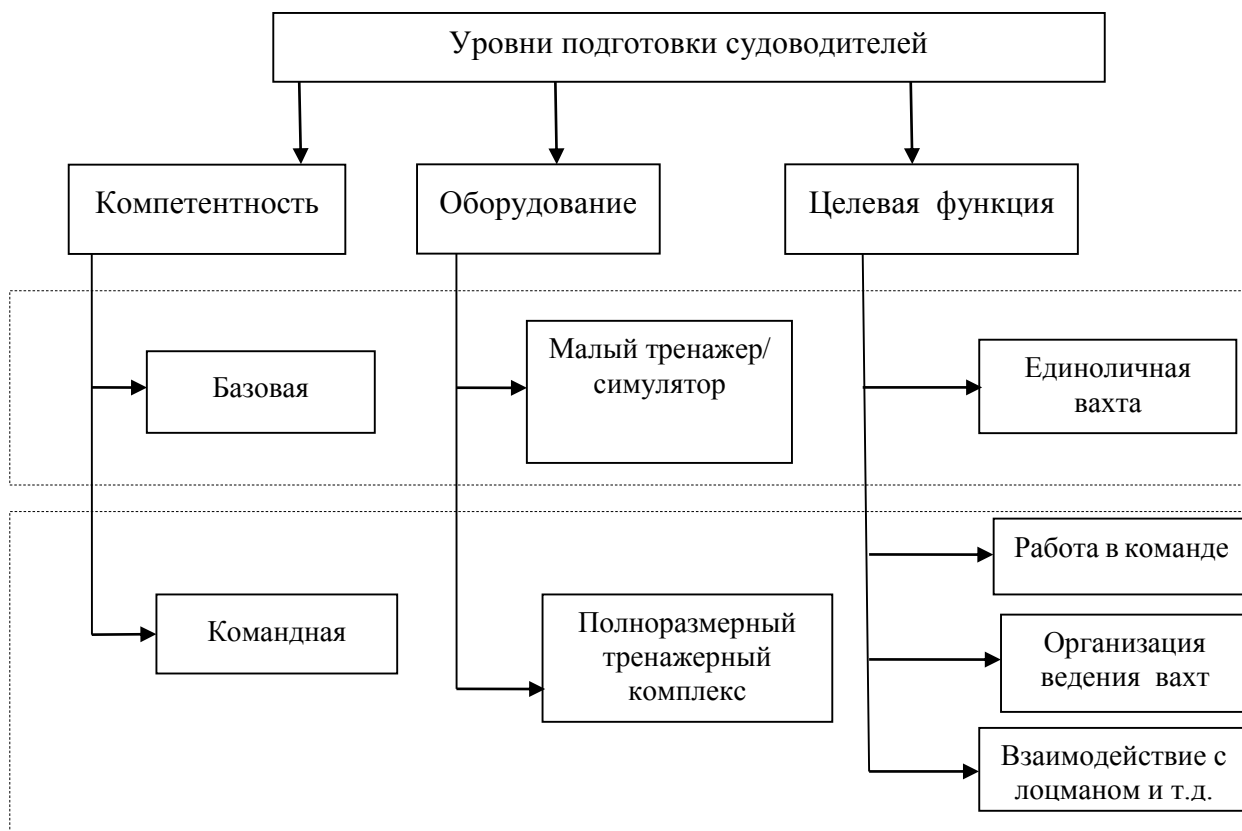


Рисунок 1 – Уровни тренажерной подготовки судоводителей

Модель динамики принятия решения судоводителем как оператором принято описывать динамической системой [10]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{Q}\mathbf{g} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где вектор состояния \mathbf{x} описывает развитие процесса принятия решения. Управление \mathbf{u} и возмущение \mathbf{g} описывают входные воздействия, и вектор \mathbf{y} описывает уровень готовности решения. Матрицы $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{Q}$ описывают линейную динамическую систему в пространстве состояний.

Рассматривая векторную модель, следует учитывать сложные решения, имеющие несколько связанных компонент. Такой подход немного отличается от общепринятого [8–11], но он для решения поставленной задачи является перспективным. При этом следует учитывать, что в модели (1) присутствуют запаздывания. Это, во-первых, задержка восприятия информации τ_u и задержка исполнения решения τ_c . С учетом этого для i -го члена команды ходового мостика получаем модель:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{A}_i\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i\mathbf{u}_i(t + \tau_{ui}) + \mathbf{Q}_i\mathbf{g}_i(t) \\ \mathbf{y}_i(t + \tau_{ci}) &= \mathbf{C}_i\mathbf{x}_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При прийнятті рішення необхідно учити́вати рівень відповідальності приймаемого рішення \mathbf{y}^*_i :

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= A_i \mathbf{x}_i(t) + B_i \mathbf{u}_i(t + \tau_{ui}) + Q_i \mathbf{g}_i(t) \\ \mathbf{y}_i(t + \tau_{ci}) &= C_i \mathbf{x}_i(t) \\ \mathbf{y}_{ir} &= \begin{cases} \mathbf{y}_{ri} & \text{if } a(\mathbf{y}_i, \mathbf{y}^*_i) \geq 0 \\ \mathbf{0} & \text{if } a(\mathbf{y}_i, \mathbf{y}^*_i) < 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Растояние между векторами определяется метрикой $a(y_1, y_2)$, принятой в данном задании. Моделью динамики выполнения шага управления командой ходового мостика есть последовательность операций принятия и исполнения решения:

$$\begin{aligned} &\mathbf{y}_{1r}, \dots, \mathbf{y}_m; \\ &\mathbf{u}_1, \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_n \end{aligned} \quad (4)$$

При этом план формирования управления в j -й ситуации определяется последовательностью коммутации канала передачи информации:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \vdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \vdots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_n \end{bmatrix}; \quad K_{ij} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \vdots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \vdots & k_{2m} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ k_{m1} & k_{m2} & \vdots & k_{mm} \end{pmatrix}; \quad k_{ij} \in \{0,1\}. \quad (5)$$

Задав последовательности принятия решения членами команды ходового мостика можно получить ожидаемое время реакции при заданных уровнях ответственности приймаемого решения. В свою очередь, уровень принятия решения определяется ожидаемыми потерями или средним риском решения. Так, в ситуации расхождения судов могут быть приняты четыре решения: x_1 – руль на левый борт с вероятностью P_1 , x_2 – руль на правый борт с вероятностью P_2 , x_3 – увеличить ход с вероятностью P_3 , x_4 – уменьшить ход с вероятностью P_4 . При этом, решение x_i определяет затраты C_i с вероятностью P_i . С учетом этого, ожидаемые потери получаем как математическое ожидание [12]:

$$\bar{C} = M\{C\} = \sum_{i=1}^4 C_i P_i. \quad (6)$$

Следовательно, мы оцениваем ожидаемый риск выполнения маневра, который не больше максимального, и может служить оценкой качества решений судоводителя.

На рис. 2. [10] показана функция затрат относительно планируемого маршрута, которую предварительно необходимо построить при подготовке задания.

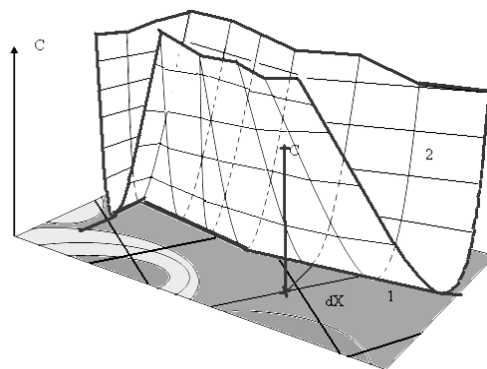


Рисунок 2 – Функция затрат по предварительной прокладке маршрута

Следует учитывать, что при построении функции затрат необходимо соотносить отклонения от предыдущей прокладки и условия плавания. Поэтому отклонения dX будет

вызывать различные расходы на глубокой воде и в узкости. Задача функции издержек свободное, но рационально использовать ветви квадратичных функций, различные для левого отклонения $h > 0$ и правого отклонения $h < 0$:

$$C(h) = \left. \begin{array}{ll} C_0 + r_+ dh^2 & \text{if } h > 0 \\ C_0 + r_- dh^2 & \text{if } h < 0 \end{array} \right\} \dots \quad (10)$$

Оценка риска и вероятность безаварийного плавания P может проводиться на основе анализа статистических данных прохождения судами данной акватории или путем аналитических вычислений [13]:

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{D^2}{M^2}\right), \quad (11)$$

где D – минимальное расстояние от корпуса судна до ближайшей навигационной опасности с учетом траектории движения и положения корпуса судна на ней; M – радиальная среднеквадратическая погрешность места судна при подходе к опасности.

Оценка отклонений от оптимальных траекторий, которые могут быть и несущественными, должна происходить с учетом текущего трафика и внешних возмущений.

Выводы. Несмотря на высокий уровень автоматизации, многие задачи по навигации и управлению судном все еще осуществляются вручную. Это требует от штурманского состава знания особенностей своего судна в конкретных условиях и полной осведомленности о его навигационном оборудовании (до действий «вслепую»). Использование на практике нестандартной аппаратной и программной части навигационного оборудования, так же как, и его эргономические особенности, на разных (часто даже однотипных) судах не позволяют последовать опыту авиации и проводить серийное макетирование реального оборудования в целях тренажерной подготовки. Таким образом, представляется целесообразным проводить базовое обучение штурманского состава на индивидуальных «малых» тренажерах/симуляторах с использованием адекватных математических моделей реальных судов. В перспективе дальнейшего исследования возможности развития методов тренажерной подготовки судоводителей с целью повышения безопасности морских перевозок, следует рассмотреть тренажерную подготовку штурманского состава с учетом особенности работы в команде.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. TRANSAS Navi-Planner 4000. User manual. 2013. 234 p.
2. Про затвердження вимог до тренажерного та іншого обладнання, призначеного для підготовки та перевірки знань осіб командного складу та суднової команди : Наказ Міністерства інфраструктури України № 567 від 07.10.2014 : веб-ресурс. URL : www.zakon3.rada.gov.ua.
3. IMO model course 1.22. Ship Simulator and Bridge Team Work . IMO, London, 2002. 70 p.
4. IMO model course 7.03 Officer in charge of a navigational watch. London : IMO, 2014. 275 p.
5. Вимоги до тренажерного та іншого обладнання, призначеного для підготовки та перевірки знань судоводіїв на повномасштабних навігаційних тренажерах з візуалізацією : наказ Міністерства інфраструктури України №491 від 07.10.2014 : веб-ресурс. URL : www.zakon3.rada.gov.ua].
6. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 долі (консолідований текст з манільськими поправками). К. : ТОВ «ВПК «Експрес-поліграф», 2010, 566 с.

7. Павловська О. О., Кондаков С. В. Алгоритм визначення параметрів математичної моделі механіка-водія, керівника криволінійним рухом швидкохідної гусеничної машини. *Вестник Юургу*. 2012. № 3. С. 43–47.
8. Weir, D. H. & McRuer, D.T. (1968). Models for Steering Control of Motor Vehicles. *Proc. 4th Annual NASA*. 192 p.
9. Устюжанін А. Д., Пупков К. А. Динамічна ідентифікація і оцінювання характеристик людини-оператора в системах «человек–машина». М. : Изд. РУДН, 2011. 180 с.
10. Kashtalyan P. V. and Rozhkov S. O. Mathematical and information provisions of bridge team training control systems. *Electronics and Control Systems : International scientific journal*. 2019. Vol 2, No 60. P. 61–69.
11. Петров Ю. П. Оптимальне управління рухом транспортних засобів. Л. : Енергія, 1969. 96 с.
12. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons Ltd, 2011. 575 p.
13. Красовський Н. Н. Теорія управління рухом. М. : Наука, 1968. 476 с.

REFERENCES

1. TRANSAS Navi-Planner 4000. User manual. 2013. –234 p.
2. Nakaz Ministerstva infrastruktury Ukraini #567 vid 07.10.2014 «Pro zatverdzhennia vymoh do trenazhernoho ta inshoho obladnannia, pryznachenooho dlia pidhotovky ta perevirky znan osib komandnoho skladu ta sudnovoi komandy». Metod dostupu: of. tekst z сайту Verkhovnoi Rady Ukraini [www.zakon3.rada.gov.ua].
3. IMO model course 1.22 Ship Simulator and Bridge Team Work . IMO, London, 2002. –70p.
4. IMO model course 7.03 “Officer in charge of a navigational watch”. IMO, London – 2014. 275p.
5. Nakaz Ministerstva infrastruktury Ukraini #491 vid 07.10.2014 «Vymohy do trenazhernoho ta inshoho obladnannia, pryznachenooho dlia pidhotovky ta perevirky znan sudnovodiiv na povnomashtabnykh navihatsiinykh trenazherakh z vizualizatsiieiu». Metod dostupu: of. tekst z сайту Verkhovnoi Rady Ukraini [www.zakon3.rada.gov.ua].
6. Mizhnarodna konventsiiia pro pidhotovku i dyplomuvannia moriakiv ta nesennia vakhty 1978 doli (konsolidovanyi tekst z manilskymy popravkamy). Naukove vydannia. K.: TOV «VPK «Ekspres-polihraf»» - 2010, 566 s.
7. Pavlovskaiiao O.O. & Kondakov C.V. (2012) Alhorytm vyznachennia parametriv matematychnoi modeli mekhanika-vodiia, kerivnyka kryvoliniinym rukhom shvydkokhidnoi husenychnoi mashyny. *Vestnyk Iuurhu* 3, 43 –47.
8. Weir, D.H. Models for Steering Control of Motor Vehicles / D.H. Weir, D.T. McRuer // *Proc. 4th Annual NASA*, 1968. – 192 с.
9. Ustiuzhanin A.D. Dynamichna identyfikatsiia i otsiniuvannia kharakterystyk liudyny-operatora v systemakh «chelovek–mashyna»/ UstiuzhaninA.D., PupkovK.A. Moskva :Yzd. RUDN, 2011.–180.
10. Kashtalyan P.V. & Rozhkov S. O. (2019) Mathematical and information provisions of bridge team training control systems. *International scientific journal «Electronics and Control Systems»* (ISSN 1990-5548), 60, 61-69.
11. Petrov Yu. P. Optimal'noe upravlenie dvizheniem transportny'x sredstv./ Yu.P. Petrov, «Energiya», L., 1969.– 96 s.
12. T. I. Fossen. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. FirstEdition. JohnWiley&SonsLtd, 2011. 575p. ISBN:978-1-119-99149-6.
13. Krasovskyi N.N. (1968). *Teoriia upravlinnia rukhom*. Moskva: Nauka.

Каштальян П. В., Тернова Т. І., Рожков С. О. РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТРЕНАЖЕРНОЇ ПІДГОТОВКИ СУДНОВОДІІВ

Морський транспорт в даний час є одним із економічно вигідних видів транспорту. Його порівняльна дешевизна призводить до збільшення обсягів перевезень вантажів морським шляхом, але одночасно зростають вимоги забезпечення безпеки таких перевезень. Одним із методів підвищення безпеки морських перевезень є підвищення кваліфікації судноводіїв. На сьогодні існує велика кількість різних технічних і програмних засобів для забезпечення навчання та закріплення знань і навичок екіпажів судна. Основою для систем, які використовують знання є різноманітні тренажери і стимулятори, які розрізняються за своїм призначенням від моделювання роботи з окремим обладнанням до моделювання ходового містка. Для відповідності вимогам українського та міжнародного законодавства з відпрацювання взаємодії членів команди ходового містка і судових систем необхідно використовувати тільки повнорозмірні тренажерні комплекси, адаптовані до конкретних завдань і максимально наближені до реального об'єкту.

У статті розглянута можливість розвитку і адаптивного використання методів тренажерної підготовки судноводіїв з метою підвищення безпеки морських перевезень. Проведено аналіз модельних курсів ІМО і їх застосовності до завдань тренажерної підготовки судноводіїв. Проведено класифікацію основних завдань судноводіння, показано їх формалізований вигляд та оптимальне рішення. Запропоновано функцію ймовірності безаварійного плавання в якості критерію оцінки компетентності судноводія.

Незважаючи на високий рівень автоматизації, багато завдань з навігації і керування судном все ще здійснюються вручну. Це вимагає від штурманського складу знання особливостей свого судна в конкретних умовах і повної поінформованості про його навігаційне обладнання. Використання на практиці нестандартної апаратної і програмної частини навігаційного обладнання, так само як і його ергономічні особливості, на різних судах не дозволяють піти досвідом авіації і проводити серійне макетування реального обладнання з метою тренажерної підготовки. Таким чином, вважаємо за доцільне проводити базове навчання штурманського складу на індивідуальних «малих» тренажерах / симуляторах з використанням адекватних математичних моделей реальних суден.

Ключові слова: *тренажерна підготовка, оптимальне управління, попередня прокладка, оптимальний маршрут, тренажерний комплекс, сценарій вправи, прийняття рішення, оптимальне управління.*

Kashtalyan P. V., Ternova T. I., Rozhkov S. O. DEVELOPMENT OF SIMULATOR TRAINING METHODS FOR NAVIGATORS

Sea transport is currently one of the most cost-effective types of transport. Its comparative cheapness leads to an increase of the volume of cargo transportation by sea, but at the same time, the requirements to ensure the safety of such transportation are increasing as well. One of the methods to improve the safety of transportation by sea is the advanced training of navigators. The article considers the possibility of the development and adaptive use of the simulator training methods for navigators in order to increase the safety of transportation by sea. The analysis of IMO model courses and their applicability to the problems of simulator training for navigators is carried out. The classification of the main navigation tasks is carried out; their formalized form and optimal solution are shown. The probability function of accident-free navigation is proposed as a criterion for assessing the competence of navigators.

Today, there are a large number of various hardware and software tools to provide training and consolidation of knowledge and skills of the ship crew. The basis of the systems using these tools is a variety of simulators and stimulators, which vary in their purpose from modeling robots with separate equipment to modeling the navigation bridge. To comply with the requirements of Ukrainian and international legislation on working out the interaction of the members of the navigation bridge team and ship systems, it is necessary to use only full-sized training complexes adapted to specific tasks and as close as possible to a real object.

Despite the high level of automation, many navigation and ship control tasks are still carried out manually. This requires the navigational staff to know the features of their ship in specific conditions and to be fully aware of its navigation equipment. The use in practice of non-standard hardware and software of navigation equipment, as well as its ergonomic features, on different vessels do not allow us to follow the experience of aviation and carry out serial prototyping of real equipment for training purposes. Thus, it seems appropriate to conduct basic training for the navigational staff on individual "small" simulators using adequate mathematical models of real ships.

Keywords: *simulator training, optimal control, previous laying, optimal route, training complex, exercise scenario, decision making, optimal control.*

© Каштальян П. В., Тернова Т. І., Рожков С. О.

Статтю прийнято
до редакції 10.08.19

КЛАССИФИКАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЙ

Малахова Д. О., аспирантка Одесского национального политехнического университета, e-mail: diana.dizzy.ds@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4833-1485

В статье приведено описание разработанной методики выбора уровня сложности основных уравнений гидродинамики в программных продуктах, которые разрабатываются для использования в информационных технологиях. Показано, за счет реализации каких процессов обработки во время построения образов визуализации, числовые данные могут отражать моделируемый процесс с различным уровнем сложности. Сформулированы основные критерии, на основании которых возможно получение информации для последующего анализа конкретных технологических процессов с участием движущегося потока жидкости или газа. Показано, каким образом возможно контролировать качество построения образа визуализации на основе потоковых данных по отношению к реальной картине течения жидкости или газа.

Ключевые слова: информационные технологии, база данных, система уравнений движения, образ визуализации, поле скорости, градиент изменения параметра.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.115-123

Постановка проблемы. Технологии современных методов визуализации гидродинамических потоков характеризуются различными уровнями качества получаемых результатов [1]. До сих пор отсутствуют надежные способы оценки получаемых результатов [2]. Полноценное воспроизведение характерных особенностей движущегося потока подразумевает использование надежных алгоритмов решения основных уравнений движения, но при этом сами уравнения могут быть записаны в различных формах и соответствовать решению только ограниченного класса задач [3]. Для создания универсального подхода к визуализации гидродинамических потоков необходимо сформулировать общие принципы формирования информационной базы данных исходных характеристик потока.

В настоящее время математический аппарат, который используется для описания гидродинамических процессов может быть условно разделен на четыре уровня. Такое разделение предлагается к дальнейшему использованию исходя из теоретических основ информационных технологий и возможностей современного вычислительного обеспечения процесса их реализации. Под вычислительным обеспечением в данном контексте подразумеваются: мощности современных компьютеров; алгоритмы, определяющие скорость работы с базами численных данных; математические методы решения нестационарных и нелинейных систем дифференциальных уравнений.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ современной литературы по визуализации гидродинамических потоков показывает, что с точки зрения информационных технологий эта проблема остается практически полностью не раскрытой. Наиболее хорошо это подтверждается обзорами методов, которые выполнены в работах [1–2, 4]. Большая часть научных исследований, проводимых в этой области, обычно посвящена архитектуре программных комплексов [5] или процессингу, который в нем используется [6]. При этом не известны работы, которые посвящены методологии отображения численных данных для описания пространственных течений. Также нет публикаций, в которых присутствуют рекомендации по выбору комплексных характеристических параметров для визуализации числовых данных, получаемых при решении основных уравнений гидродинамики. Большая часть методов визуализации гидродинамических потоков основана на аппроксимации обрабатываемых численных данных (расчета, сканирования и т.п.).

Основные публикации в области построения картин гидродинамических течений обычно относятся к применению различных методов обработки экспериментальных

изображений, которые были получены оптическим путем. Больше применение в таком направлении уделяется лазерным методам, а также термографической визуализации. При этом все эти методы обладают самым главным недостатком – отсутствием информативности. Практически все образы визуализации, которые присутствуют в научных публикациях, не предоставляют возможность проводить количественный анализ. Получаемые качественные характеристики обычно могут использоваться только узконаправленными специалистами.

Наибольшей информативностью обладает классический подход с использованием линий тока, однако, кроме визуального отображения двумерного поля течения, такой способ не представляет возможности получения количественных оценок. Преобразованные переменные вида “потенциал ψ – функция тока ϕ ” с точки зрения качества отображения реальной картины характеризуются ограничением по размерности задачи. В случае визуализации распределения гидродинамического параметра на плоскости корректность такого построения подтверждается. В двумерной плоскости отображение “ ψ – ϕ ” является однозначным, однако в случае трехмерного пространства корректность отображения линии тока в силу неоднозначности ее определения является спорной. При пространственной (трехмерной) визуализации движущейся жидкости или газа линии тока построить невозможно.

Формулировка цели, задачи, объекта, предмета и методов исследования. Целью работы является разработка основных принципов структурирования математического аппарата для создания программных продуктов в сфере информационных технологий, которые используются для визуализации картин движения потоков жидкости.

Основной задачей исследования является установление иерархической структуры уравнений, описывающих гидродинамические процессы с целью последующего использования в информационных технологиях при построении картин визуализации течений жидкостей или газов.

Объектом исследования является процесс информационной обработки и визуализации многомерного массива данных, получаемых при моделировании гидродинамических течений.

Предметом исследования является совокупность методов получения данных, модели гидродинамических потоков и информационная технология визуализации их картины течения.

В работе использованы следующие методы исследований: метод численной визуализации, метод сравнительного анализа, метод конечного объема, метод конечных разностей, метод расщепления, численный метод аппроксимации, метод кластеризации.

Основные результаты. С точки зрения разработки различных программных продуктов для последующего использования информационных технологий в различных гидродинамических рабочих процессах очень важным является универсализация подхода к выбору математического аппарата. Уровень сложности уравнений определяет в первую очередь затраты и ресурсы машинного времени, а также влияет на качество анализа получаемых в результате образов визуализации или распределений характерных параметров течений.

С точки зрения информационных технологий современный уровень моделирования течений на основе систем дифференциальных уравнений, которые описывают поведение жидкостей и газов можно разделить на четыре уровня сложности. Различие между этими уровнями заключается в количестве слагаемых, входящих в уравнения, которые описывают перемещение и состояние потока. Каждый уровень отличается от предыдущего качеством воспроизведения физических особенностей движения, а также учетом вязкости в локально выделенной и/или всей области течения и градиента изменения кинематических характеристик потока во времени [7–8]. С точки зрения затрат на реализацию информационных технологий в программных продуктах, виртуально отображающих реальные производственные процессы, эти уровни можно разделить следующим образом:

1 уровень сложности. Он характеризуется тем, что все дифференциальные уравнения, которые могут быть на нем использованы, не содержат слагаемые, содержащие вязкость моделируемого потока. При разработке на их основе программных продуктов следует учитывать, что получаемые в конечном итоге образы визуализации не будут отображать проявление вязкостных эффектов. Такие информационные технологии предоставляют пользователю строить образы визуализации только на качественном уровне. Такой метод получения данных для визуализации не подразумевает проведение на окончательном этапе численного анализа. Визуализация поля течения потока не может быть основой для получения количественных выводов.

К уравнениям первого уровня можно отнести одномерное уравнение Бернулли, которое иногда обозначают термином – интеграл Эйлера. Его записывают в виде:

$$dz + \frac{dP}{\rho g} + d\left(\frac{V^2}{2g}\right) = 0, \quad (1)$$

где z – геометрический, $\frac{P}{\rho g}$ – пьезометрический и $\frac{V^2}{2g}$ – скоростной напоры, м.

Уравнение (1) находит свое применение в простейших инженерных приложениях. При разработке информационной технологии для построения картин визуализации гидродинамических потоков его использование затруднительно.

Качественные результаты, которые в первом приближении могут использоваться для построения поля скорости или давления движущегося потока, позволяет получать система уравнений Эйлера [9]. В тензорной форме записи эта система имеет вид:

$$\left. \frac{dV_i}{dt} + V_j \frac{dV_i}{dx_j} = \frac{1}{\rho} \frac{d\tau_{ij}}{dx_j} + \frac{1}{\rho} F_i \right\}, \quad (2)$$

где V_i, V_j – компоненты скорости, м/с; x_j – текущая координата, м; τ_{ij} – компонента тензора напряжений, Па; F_j – составляющая массовой силы, Н.

При построении образов визуализации движущегося потока с неизменной плотностью ($\rho = const$) система (2) позволяет учитывать произвольный характер действия массовых сил (сил инерции, тяжести и т.п.). Качество получаемого решения и картины его визуализации будет напрямую определяться количеством расчетных узлов (дискретным набором точек), задействованных в программном комплексе.

2 уровень сложности. На втором уровне визуализации гидродинамических потоков нужно использовать две системы уравнений движения потока жидкости или газа. Первая система соответствует пограничному слою. В этом случае считается, что все гидродинамические эффекты порождаются вязкостью движущегося потока и проявляются в очень тонкой области, которая граничит с жесткими поверхностями. Вторая область течения принимается такой, что вся жидкость или газ в ней являются идеальными [7]. Поскольку во второй области моделируемого течения вязкость отсутствует, то она может описываться уравнениями Эйлера с предыдущего первого уровня сложности.

Уравнения пограничного слоя, соответствующие 2 уровню сложности, называют системой приближенных уравнений Прандтля и в декартовой системе координат записывают в виде:

$$\left. \begin{aligned} V_x \frac{dV_x}{dx} + V_y \frac{dV_x}{dy} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{dy} \\ \frac{dP}{dy} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где P – давление, Па.

3 уровень сложности. На этом уровне сложности при построении картины визуализации потока необходимо использовать стационарные многомерные уравнения движения.

С точки зрения информационной технологии визуализации гидродинамических процессов этот уровень соответствует полной картине движения потока. Его рабочие

характеристики принимают установившимися во времени. В этом случае нужно использовать систему уравнений движения Навье-Стокса. В тензорной форме записи три уравнения этой системы имеют вид [7–8]:

$$V_i(\bar{\nabla}V_j) = -g\bar{k} - \bar{\nabla}\left(\frac{P}{\rho}\right) + 2\nu\bar{\nabla}S_v. \quad (4)$$

4 уровень сложности. Этот уровень с точки зрения информационных технологий является самым сложным. При его реализации требуется использование всей вычислительной мощности используемого оборудования [10]. В этом случае информационные потоки и рабочие массивы данных являются максимальными по своим объемам. На этапе реализации программного комплекса при использовании четвертого уровня требуется использование всех доступных ресурсов памяти.

На четвертом уровне используются нестационарные многомерные уравнения движения Навье-Стокса или нестационарные многомерные уравнения движения Рейнольдса, дополняемые моделями турбулентности в виде дополнительных систем дифференциальных уравнений с эмпирическими коэффициентами.

В тензорной форме записи нестационарные уравнения Навье-Стокса с учетом действия из массовых сил только силы тяжести имеют вид:

$$\frac{dV_i}{dt} + V_i(\bar{\nabla}V_j) = -g\bar{k} - \bar{\nabla}\left(\frac{P}{\rho}\right) + 2\nu\bar{\nabla}S_v, \quad (5)$$

где S_v – тензор скоростей деформации, П.

В тензорной форме записи нестационарные уравнения Рейнольдса имеют вид:

$$\frac{dV_i}{dt} + V_i(\bar{\nabla}V_j) = -g\bar{k} - \bar{\nabla}\left(\frac{P}{\rho}\right) + \frac{1}{\rho}\bar{\nabla}(T_{kl} + T_t), \quad (6)$$

где T_{kl} – тензор квазиламинарных напряжений, Па; T_t – тензор турбулентных напряжений, Па.

Форма записи трех тензоров, входящих в системы уравнений (5)–(6) широко представлена в литературе по гидромеханике и при необходимости может взята из работ [3, 7–9].

Записанная система уравнений Рейнольдса (6) содержит три уравнения с десятью неизвестными функциями и является незамкнутой. Для ее замыкания чаще всего используют k - ε модель турбулентности. В этой модели параметр k – это кинетическая энергия турбулентных пульсаций, а параметр ε соответствует скорости диссипации турбулентной энергии.

Дифференциальные уравнения k - ε модели турбулентности имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dk}{dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_e \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{2} \nu_e \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_e}{\delta_\Sigma} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left[\frac{1}{2} C_1 \nu_e \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \varepsilon \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В уравнениях системы (7) коэффициент эффективной вязкости ν_e принимается равным сумме коэффициентов ламинарной ν_l и турбулентной вязкости ν_t :

$$\nu_e = \nu + \nu_t; \quad (8)$$

$$\nu_t = C_D k^2 / \varepsilon. \quad (9)$$

Значения эмпирических постоянных входящих в уравнения системы (7) могут изменяться в зависимости от вида моделируемого течения. Обычно наиболее качественные результаты можно получить со следующими числовыми коэффициентами: $C_D=0.09$, $\delta_\Sigma=1.3$, $C_1=1.44$, $C_2=1.9$.

Во время проведения анализа современного уровня развития математического аппарата был сделан главный акцент на разработку классификационных признаков дифференциальных уравнений движения жидкости и газа с точки зрения применения в информационных технологиях. Не смотря на приведенное выше описание четырех уровней сложности необходимо отметить, что применения в технологии визуализации гидродинамических потоков существует другое научное направление. Оно является очень важным с точки зрения как решения дифференциальных уравнений движения, так и для построения картин визуализации. Второе методологическое направление базируется на применении в информационных технологиях малоизвестного метода расщепления.

В большинстве случаев при решении теоретическим путем дифференциальных уравнений гидродинамики в виде (2) и (4)–(7) или при анализе сложных процессов в силу неоднозначности явления получить решение (окончательный вывод про природу явления) в явном виде довольно сложно или невозможно. По этой причине очень удобным является использование математического метода дробных шагов или метода расщепления [11–12].

Основой этого метода является тот факт, что процесс движения жидкости или систему уравнений, которая его описывает, можно разделить на совокупность более простых процессов или систем уравнений. В большинстве случаев наиболее обоснованным является проведение расщепления по пространству во времени и по физическим процессам. Например, в случае 3-мерного пространства одна выходная система уравнений движения может быть разделена на совокупность трех одномерных систем уравнений. Количество получаемых таких одномерных систем всегда будет соответствовать конечной размерности задачи. При построении картин визуализации поля течения нестационарных гидродинамических потоков такое расщепление системы необходимо выполнять на каждом временном уровне.

В применении к информационной технологии визуализации гидродинамических процессов этот метод необходимо применять на последнем уровне информационного блока, который отвечает уже за получение потоковой базы данных для построения образа визуализации.

Если гидродинамический процесс описывается системой дифференциальных уравнений и изменения его параметров происходят во времени постоянно (т.е. время изменяется в пределах от 0 до T), то можно допустить, что есть функция V , которая непрерывно изменяется в промежутке времени от 0 до T . В этом случае можно записать, что для $0 \ll t_1 \leq t_2 \leq T$ будет использоваться равенство:

$$V(t_2) = S(t_2, t_1) V(t_1), \quad (10)$$

где $S(t_2, t_1)$ – оператор перехода на временном промежутке $[t_2, t_1]$.

Поскольку метод дробных шагов (расщепления) базируется на принципе Гюйгенса-Адамара, то уравнение (10) полностью соответствует его обобщенной формулировке [11]: последовательное решение задачи Коши в промежутках $[t_0, t_1]$, $[t_1, t_2]$, . . . , $[t_{m-1}, t_m]$ эквивалентно решению задачи Коши в промежутке $[t_0, t_m]$. В соответствии с такой формулировкой расщепленная система будет состоять из уравнений с операторами перехода, которые имеют следующие свойства:

$$S_\tau(t + \tau, t) = S_N\left(t + \tau, t + \frac{N-1}{N}\tau\right) \times S_{N-1}\left(t + \frac{N-1}{N}\tau, t + \frac{N-2}{N}\tau\right) \times \dots \times S_1\left(t + \frac{\tau}{N}, t\right), \quad (11)$$

где N – количество разложений, которое обычно определяется размерностью выходной системы уравнений.

Если выходная система уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = P_{\tau} V + f_{\tau}, \quad (12)$$

а продолженная система уравнений записывается как:

$${}^l \frac{\partial V}{\partial t} = {}^l P_{\tau} {}^l V + {}^l f_{\tau}, \quad (13)$$

где l – индекс разложения, то справедливо соотношение, аналогичное равенству (13):

$$S_{\tau}^k(t + \tau, t) = S_N^k\left(t + \tau, t + \frac{N-1}{N}\tau\right) \times S_{N-1}^k\left(t + \frac{N-1}{N}\tau, t + \frac{N-2}{N}\tau\right) \times \dots \times S_1^k\left(t + \frac{\tau}{N}, t\right). \quad (14)$$

Под термином продолженной системы (13), которая фактически представляет собой расщепленную систему, подразумевается система уравнений, записанная с помощью оператора, полученного дифференцированием исходных уравнений.

С точки зрения дальнейшего применения в информационных технологиях уравнение (14) подразумевает, что факторизация продленной системы представляет собой продолжение факторизованной, а операции продолжения и факторизации являются перестановочными, т.е. продленной системе соответствует продолжена задача.

Для дальнейшего использования метода расщепления в информационных технологиях при построении образов визуализации распределения гидромеханических параметров важное значение имеет теорема сходимости. Ее формулировка, следующая: если факторизованная исходная и первая продолжена системы корректные, и решение исходной системы достаточно гладкое, то оно единственное и к нему сходится решение факторизованной системы [11–12]. Рассмотрение теоремы в применении к построению визуализации распределения характерного гидромеханического параметра или при выделении в пространстве характерной изолинии показывает, что:

- если во время визуализации входные потоковые данные получены путем устойчивого численного моделирования и соответствуют корректному решению системы дифференциальных уравнений движения, то образ визуализации будет однозначным и корректным;

- совпадение картины визуализации с реальным образом гидродинамического процесса будет соответствовать погрешности математического блока, задействовано в информационной технологии.

Все записанные выше системы уравнений движения (2)–(6) не могут быть решены в силу своей переопределенности. Для трех составляющих скорости и давления везде присутствует только три уравнения. По этой причине в каждую из этих систем необходимо ввести дополнительное замыкающее четвертое уравнение. Чаще всего в литературе по гидродинамике предлагается использовать уравнение неразрывности

$$\operatorname{div} \bar{V} = 0 \quad \text{або} \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (15)$$

В силу своей простоты и обоснованной физической трактовки такой способ замыкания уравнений является корректным.

С точки зрения информационных технологий использование уравнения (15) является затруднительным. Его нельзя использовать в методе расщепления, поскольку в этом случае будет нарушаться основное условие – требование к неразрывности потока. По этой причине для создания программного комплекса перспективным является использование трансформированного уравнения для давления. Его можно записать в форме, называемой уравнением типа Пуассона, как:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 2\rho \times \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_z}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial z} \right). \quad (16)$$

При построении изолиний, характеризующих гидродинамические процессы, целесообразным является использование аналитических выражений или констант, описывающих эти свойства. В создаваемых программных комплексах они будут формировать необходимые информационные потоки, и в последующем их использование будет выполняться с наименьшими затратами вычислительных мощностей. Примером такого подхода является видоизмененное уравнение Менделеева-Клапейрона для описания плотностной стратификации воздушного потока в зависимости от распределения температуры по его высоте:

$$\rho = \frac{P_B}{R_B T} + \frac{\psi P_{H.п}}{R_H T}, \quad (17)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; P_B – парциальное давление сухого воздуха, Па; $P_{H.п}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па; ψ – относительная влажность, %; R_B – газовая постоянная для сухого воздуха, Дж/(кгК); R_H – газовая постоянная для пара, Дж/(кгК); T – температура, К.

Для повышения качества визуализации гидродинамических течений был предложен подход, который базируется на построении линий, соответствующих равным значениям градиентов интересующих исследователя гидродинамических параметров. Главным требованием в случае построения образа визуализации является условие, что в относительных единицах величина постоянства градиента во всех точках изолинии должна в пределах задаваемой погрешности удовлетворяться полностью. Аппроксимация допустима в случае обработки значений, соответствующих минимум пяти точкам по каждому изометрическому направлению. Во время численных расчетов это может соответствовать второму или третьему порядку точности расчета и отображения интересующих величин.

Выводы

1. С точки зрения разработки различных программных продуктов для последующего использования информационных технологий в различных гидродинамических рабочих процессах очень важным является универсализация подхода к выбору математического аппарата. Уровень сложности уравнений определяет в первую очередь затраты и ресурсы машинного времени, а также влияет на качество анализа получаемых в результате образов визуализации или распределений характерных параметров течений.

2. Математический аппарат, который может быть использован в информационных технологиях для визуализации гидродинамических процессов, может быть условно разделен на четыре уровня. Различие между этими уровнями заключается в качестве воспроизводства образов визуализации реальных течений.

3. При проведении последующих разработок необходимо уделить особое внимание разработке высокоточных алгоритмов, которые используются при построении поля течения потока посредством построения характерных изолиний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков К. Н. (2014). Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 3 (91), 1-10.
2. Знаменская И. А. (2013). Взаимодействие численной и экспериментальной визуализации потоков. *Научная визуализация*. 5 (3), 1-16.
3. Ладыженская О. А. (1970). Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости. Москва: Наука.
4. Bondarev A. E. & Galaktionov V. A. (2013). Parametric Optimizing Analysis of Unsteady Structures and Visualization of Multidimensional Data. *International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing*. 4 (1).
5. Кутин В. А. (2011). Система визуализации программного комплекса FLOWVISION. *Научная визуализация*. 3 (1), 1–18.
6. Афендииков А. Л., Ханхасаева Я. В., Луску А. Е., Меньшов И. С., Меркулов К. Д. (2016). Computation and visualization of flows past bodies in mutual motion. *Scientific Visualization*. 8 (4), 128-138.
7. Лодянский Л. Г. (1973). Механика жидкости и газа. Москва : Наука.
8. Ландау Л. Д., Липшиц Е. М. (1988). Гидродинамика. Москва : Наука.
9. Лаврентев М. А., Шабат Б. В. (1973). Проблемы гидродинамики и их математические модели. Москва: Наука.
10. Пейре Р., Тейлор Д. (1986). Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Ленинград: Гидрометеиздат.
11. Яненко Н. Н. (1967). Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение.
12. Ковеня В. М., Яненко Н. Н. (1981). Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение.

REFERENCES

1. Volkov, K. N. (2014). Metody vizualizacii vixrevykh techenij v vychislitelnoj gazovoj dinamike i ix primenenie pri reshenii prikladnyx zadach. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 3 (91), 1–10.
2. Znamenskaya, I. A. (2013). Vzaimodejstvie chislennoj i eksperimentalnoj vizualizacii potokov. *Nauchnaya vizualizaciya*, 5 (3), 1–16.
3. Ladyzhenskaya, O. A. (1970). *Matematicheskie voprosy dinamiki vyazkoj neszhimaemoj zhidkosti*. Moskva: Nauka.
4. Bondarev, A. E. & Galaktionov, V. A. (2013). Parametric Optimizing Analysis of Unsteady Structures and Visualization of Multidimensional Data. *International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing*, 4 (1).
5. Kutin, V. A. (2011). Sistema vizualizacii programmnoho kompleksa FLOWVISION. *Nauchnaya vizualizaciya*. 3 (1), 1–18.
6. Afendikov, A. L., Khankhasaeva, Ya. V., Lusky, A. E., Menshov, I. S. & Merkulov, K. D. (2016). Computation and visualization of flows past bodies in mutual motion. *Scientific Visualization*, 8(4), 128–138.
7. Lojcyanskij, L. G. (1973). *Mexanika zhidkosti i gaza*. Moskva : Nauka.
8. Landau, L. D. & Lifshic, E. M. (1988). *Gidrodinamika*. Moskva : Nauka.
9. Lavrentev, M. A. & Shabat, B. V. (1973). *Problemy gidrodinamiki i ix matematicheskie modeli*. Moskva: Nauka.
10. Pejre, R. & Tejlor, D. (1986). *Vychislitelnye metody v zadachax mexaniki zhidkosti*. Leningrad: Gidrometeoizdat.

11. Yanenko, N. N. (1967). *Metod drobnix shagov resheniya mnogomernyx zadach matematicheskoy fiziki*. Novosibirsk: Nauka. Sib. Otdelenie.
12. Kovenya, V. M. & Yanenko, N. N. (1981). *Metod rasshhepleniya v zadachax gazovoy dinamiki*. Novosibirsk: Nauka. Sib. Otdelenie.

Малахова Д. О. КЛАСИФІКАЦІЯ РІВНЯНЬ ГІДРОДИНАМІКИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ПРИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ТЕЧІЙ

У статті наведено опис розробленої методики вибору рівня складності основних рівнянь гідродинаміки у програмних продуктах, які розробляються для використання в інформаційних технологіях. Показано, за рахунок реалізації яких процесів обробки під час побудови образів візуалізації, числові дані можуть з різним рівнем складності відображати процес, який моделюється. Сформульовано основні критерії, на підставі яких можливе отримання інформації для подальшого аналізу конкретних технологічних процесів за участю потоку рідини або газу, що рухається. Показано, яким чином можливо контролювати якість побудови образу візуалізації на основі поточкових даних по відношенню до реальної картини течії рідини або газу.

Ключові слова: інформаційні технології, база даних, система рівнянь руху, образ візуалізації, поле швидкості, градієнт зміни параметра.

Malakhova D. A. CLASSIFICATION OF HYDRODYNAMIC EQUATIONS FOR USE IN INFORMATION TECHNOLOGIES UNDER FLOW VISUALIZATION

The article describes the developed methodology for choosing the level of complexity of the basic equations of hydrodynamics in software products that are developed for use in information technology. It is shown due to the implementation of which processing processes during the construction of visualization images, numerical data can reflect the simulated process with various levels of complexity. The main criteria are formulated, on the basis of which it is possible to obtain information for the subsequent analysis of specific technological processes with the participation of a moving stream of liquid or gas. It is shown how it is possible to control the quality of constructing a visualization image based on streaming data in relation to the real picture of the flow of liquid or gas. From the point of view of developing various software products for the subsequent use of information technology in various hydrodynamic work processes, it is very important to universalize the approach to choosing a mathematical apparatus. The level of complexity of the equations primarily determines the costs and resources of machine time, and also affects the quality of the analysis obtained as a result of visualization patterns or distributions of characteristic flow parameters.

From the point of view of developing various software products for the subsequent use of information technology in various hydrodynamic work processes, it is very important to universalize the approach to choosing a mathematical apparatus. The level of complexity of the equations primarily determines the costs and resources of machine time, and also affects the quality of the analysis obtained as a result of visualization patterns or distributions of characteristic flow parameters.

The mathematical apparatus, which can be used in information technology to visualize hydrodynamic processes, can be conditionally divided into four levels. The difference between these levels is in the quality of reproduction of visualization patterns of real flows.

In subsequent developments, it is necessary to pay special attention to the development of high-precision algorithms that are used to construct the flow field by constructing characteristic isolines.

Keywords: information technology, database, system of equations of motion, image of visualization, velocity field, parameter change gradient.

© Малахова Д. О.

Статтю прийнято
до редакції 24.09.19

МЕТОДИ ПЛАНУВАННЯ СУЧАСНИХ МОРСЬКИХ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Федоров. А. І., аспірант кафедри судноводіння та електронних навігаційних систем Херсонської державної морської академії, e-mail: mr.fedorov.anton@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6064-7848

У роботі доведено, що ефективним на сьогодні є використання морських контейнерних перевезень. Аргументовано, що контейнерні перевезення є економічно вигідним і надійним способом транспортування товарів великими партіями за рахунок використання мультимодальних перевезень, що дозволяє скоротити час доставки і знизити фінансові витрати. Це стає можливим завдяки вірному плануванню організаційно-методичних та технологічних процесів перевезення вантажів. Проаналізовано переваги ефективності використання даного виду перевезення та наведено основні недоліки, які потребують усунення. Констатовано зростання контейнеропотоку на поточний момент часу, що потребує здійснення ряд заходів щодо збільшення пропускної і провізної спроможності. Розглянуто основні моделі і алгоритми розміщення контейнерів на судні і терміналі. Наведено аналіз різних підходів (ітераційний локальний пошук, спрямований локальний пошук, пошук зі змінною околицею, імовірнісний жадібний алгоритм, еволюційний алгоритм, генетичний алгоритм, алгоритм оптимізації мурашиної колонії, імітація відпаду, пошук із заборонами) та встановлено, що дані підходи ефективні та широко використовувані. Застосування евристичних методів формування вантажного плану контейнеровозу дозволяє істотно скоротити витрати часу. Підходи, що розглядаються, найбільш ефективні при здійсненні мультипортних перевезень, оскільки в цьому випадку кількість можливих варіантів розміщення вантажу значно зростає. В той же час аргументовано важливість будівництва сучасних терміналів, портів, розвантажувально-вантажної техніки для підвищення ефективності морських контейнерних перевезень. Також у роботі аргументовано, що процес складання вантажного плану контейнерного судна є важливим і створення нових методів дозволить оптимізувати процес та підвищувати ефективність контейнерних перевезень в цілому.

Ключові слова: судно, морські перевезення, контейнерні перевезення, вантажний план, моделі і алгоритми розміщення контейнерів, оптимізація, ефективність морських контейнерних перевезень.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.124-131

Постановка проблеми. Морські контейнерні перевезення – економічний і надійний спосіб транспортування великих партій товарів [1–4]. Контейнери представляють собою стандартні ємності, призначені для перевезення вантажів без тари морськими суднами [3, 4]. Контейнерні вантажоперевезення є одним з найнадійніших способів транспортування вантажу, що дозволяє забезпечити товару високу безпеку. Всі контейнери забезпечені спеціальним механізмом для зручного навантаження і вивантаження, а також для перевантаження з одного виду транспорту на інший [4–5]. Перевезення вантажу контейнером має ряд переваг. Основне з них – відсутність перевантажень товару при зміні транспортного засобу [4, 6, 7]. Товар буде один раз завантажений в контейнер і вивантажений вже на складі одержувача. Завдяки цьому досягається значна економія коштів при можливості гнучкого і ефективного поєднання різних видів транспорту [5, 8]. Водночас, слід зазначити, що на даному етапі розвитку торговельного флоту, виникає актуальна проблема підвищення ефективності та безпечності морських контейнерних перевезень [8–14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Контейнерні перевезення, що здійснюються морським транспортом відрізняються високим рівнем безпеки оскільки сучасні контейнери мають міцну конструкцію і достатню герметичність [6–8]. Очевидний плюс цієї галузі, полягає в можливості перевозити практично всю номенклатуру вантажів в спеціалізованих контейнерах. Універсальність цієї тари дозволила оптимізувати логістику до недосяжного раніше рівня, істотно спростивши вантажно-розвантажувальні операції [8–10]. Проте, розвантаження і завантаження контейнерів – операція, що вимагає використання спеціальної техніки, праці кваліфікованих операторів і на сучасному етапі – інтегрованих комп'ютерних програм і систем [11–12]. Автори [1–18] вважають, що однією з складових

проблеми підвищення ефективності та безпечності морських контейнерних перевезень є навантаження та вивантаження контейнерів у ході якої актуальна проблема розміщення вантажу на судні або терміналі таким чином, щоб він займав точне місце і не піддавався додатковій перестановці (шіфтингу) на судні; з судна на берег, з берега на судно. [1–4].

Мета роботи – проаналізувати основні методи планування сучасних морських контейнерних перевезень

Основна частина. Для освоєння зростаючого контейнеропотоку на поточний момент часу здійснюються різні заходи щодо збільшення пропускної і провізної спроможності: проводиться будівництво нових ультравеликих суден-контейнеровозів, контейнерних терміналів, залізниць, механізуються автоматизуються та комп'ютеризуються всі виробничі процеси. На судні модернізують різні комп'ютерні програми пов'язані з навантаженням та вивантаженням, на терміналі встановлюють більш потужне і досконале устаткування, рухомий склад поповнюється більш потужними і досконалими автомобілями-навантажувачами, локомотивами вагонами і т. д. Це дозволило підвищити ефективність доставки дорогих вантажів і знизити собівартість перевезень. Зниження собівартості перевезень сприяє поліпшенню якісних показників використання всіх елементів транспорту і навантажувально-розвантажувального устаткування. Поліпшення всіх показників призводить до значної економії в експлуатаційних витратах і найголовніше до зниження необхідного часу на дані процеси. Таким чином, необхідність розробки пропозицій, спрямованих на оптимізацію роботи морської контейнерної інфраструктури, є досить актуальною. Переваги контейнерних перевезень в порівнянні з традиційним тарно-штучним способом, коли товари на своєму шляху від виробника до споживача по кілька разів перевантажували, пошкоджувалися, розкрадалися, стали настільки очевидні, що судовласники, морські порти, суміжні види транспорту усього світу вклали в цю справу мільярди доларів. Тривалість стоянки судна в порту скоротилася в 5–8 разів, в 7–10 разів знизилася собівартість вантажних робіт, в 10–15 разів зменшилася кількість вантажників, різко скоротилися терміни доставки вантажів, в 8–10 разів збільшується пропускна здатність портів. Цей процес отримав назву контейнерної революції.

Основними перевагами мультимодальних перевезень, до яких належать контейнерні перевезення, є скорочення часу доставки і зниження фінансових витрат. Це стає можливим завдяки вірному плануванню організаційно-методичних та технологічних процесів перевезення вантажів. Під час проведення дослідження було проведено порівняльний аналіз досліджень в галузі сучасних контейнерних перевезень [5–20], результати яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Системи з оптимізації завантаження контейнеровозів

№	Назва системи або наукової розробки	Автори, рік	Завдання які вирішуються	Опис розробки
1	2	3	4	5
1	Оптимізація дій на контейнерних терміналах: ієрархічний та інтегрований підходи. (Optimization of operations in container terminals: hierarchical vs integrated approaches)	Paaria Vacca, Matteo Salani, Michel Bierlaire. 2010.	Удосконалення портової продуктивності і ефективності	Оптимізація роботи контейнерних терміналів за допомогою ієрархічних та інтегрованих підходів.
2	Суб-оптимальні плани для швидкого створення ефективного вантажного плану великих контейнерних суден. (Fast Generation of Near Optimal Plans for Efficient Stowage of Large Container Vessels)	Dario Pacino, Alberto Delgado, Rune Maller Jensen, Tom Bebbington. 2011.	Генерує оптимальні вантажні плани укладання контейнерів для економії часу.	Новий двофазовий підхід, який генерує оптимальні плани укладання контейнерів для економії часу. Підхід комбінує модель інтегрованого і обмеженого програмування та процедуру локального пошуку оптимального вантажного плану.

1	2	3	4	5
3	Комбінаторна оптимізація і стратегія завантаження судна та графіку завантаження контейнерного терміналу. (Combinatorial Optimization and Strategy for Ship Stowage and Loading Schedule of Container Terminal)	Wenbin Hu, Zheng-bing Hu, Lei Shi, Peng Luo, Wei Song. 2012.	Мета – скоротити конфлікт терміналу, транспортних засобів та причального крану в процесі завантаження. Удосконалити безпеку завантаження, зменшити час перестановки контейнерів.	Модель використовує стратегію завантаження контейнерного судна з використанням евристичного жадібного алгоритму. Евристична інформація в евристичному жадібному алгоритмі це комбінаторний алгоритм для оптимізації і нової стратегії у підході до складання ефективного вантажного плану судна.
4	Керування контейнерним переміщенням на судні, що завантажується з використанням нової програми імітаційного моделювання (Managing container reshuffling in vessel loading by simulation)	Rina Mary Mazza, Pasqual legato, 2013.	Тренажерна програма застосовується для оцінки кількості переміщень; розробляє оптимальний, послідовний план завантаження судна.	Використання тренажерної програми розробленої в середовищі microsoft visual basic 6.0 professional для допомоги у контролюванні проблем пов'язаних з перекладанням контейнерів.
5	Оптимізація послідовності завантаження контейнеровозу що базується на гібридному динамічному програмуванні (Optimization on the container loading sequence based on hybrid dynamic programming)	Zhan Bian, Qianqian Shao, Zhihong Jin 2015 p.	Мета оптимізації – мінімізувати число або кількість дій по переміщенню контейнерів під час процесу завантаження та зробити цей процес більш ефективнішим.	Двоступеневий гібридний динамічний алгоритм, що має за мету здобуття оптимізованої послідовності завантаження контейнерів.
6	Аналіз критеріїв складання вантажного плану морського судна типу контейнеровоз	Устинов Р.Г., Днепровский В.В, 2005.	Аналіз основних критеріїв складання вантажного плану лінійного контейнеровоза і визначення їх залежності від числа шіфтінга контейнерів.	Оптимальність складання вантажних планів, як окремого судна, так і групи суден в цілому. Як математичний інструмент процесу моделювання складання вантажних планів, пропонується використовувати пакет прикладних програм багатокритеріальної оптимізації.

1	2	3	4	5
7	Розробка rfid-системи контролю завантаження-розвантаження контейнерів на судах	Афонін І.Л., Жмур А.А., Турняк Н.А., 2012.	Завдання контролю навантаження контейнерів на судно. Зменшення кількості помилок при навантаженні розвантаженні і позбавляє вантажного помічника від рутинної і важкої роботи.	Розробка науково-обґрунтованих рішень питання контролю за навантаженням-розвантаженням контейнерів за допомогою rfid-системи, інтегрованої в інтегровану систему судна. Аналіз rfid-системи яка прискорює процес моніторингу за навантаженням судна-контейнеровоза та зменшує кількість помилок і позбавляє вантажного помічника від рутинної і напруженої роботи.
8	Система підтримки прийняття рішень по навантаженню великотоннажного контейнеровоза	Нікольський В.В., Нікольський М.В., Накул Ю.А., 2016.	Підвищення рівня контролю за навантаженням контейнерів. Розробка системи підтримки прийняття рішення навантаження контейнерів що дозволить в лічені хвилини капітану судна оцінити ступінь проведених навантажувальних робіт.	Оптимізація процесу навантаження. Система підтримки прийняття рішень щодо завантаження великотоннажного контейнеровозу
9	Комп'ютерні програми з планування розміщення контейнерів на судні типу контейнеровоз	Русинов І.А., Гедрис Е.А., 2016.	Автоматизувати процес складання плану навантаження контейнерів на судно.	Програмне забезпечення, що дозволяє автоматизувати процес складання плану навантаження контейнерів на судно. Особливості комп'ютерних програм-планувальників. Аналіз їх функціонування.

Висновки. В ході аналізу робіт, присвячених створенню моделей і алгоритмів розміщення контейнерів на судні і терміналі було визначено, що для вирішення подібних завдань використовуються, в основному, евристичні підходи, а саме: ітераційний локальний пошук (iterative local search, ils); спрямований локальний пошук (guided local search, gls); пошук зі змінною околицею (variable neighborhood search, vns); імовірнісний жадібний алгоритм (grasp); еволюційний алгоритм (evolutionary algorithm, ea); генетичний алгоритм (genetic algorithms, ga); алгоритм оптимізації мурашиної колонії (ant colony optimization, aco); імітація відпалу (simulated annealing, sa); пошук із заборонами (tabu search, ts).

Застосування евристичних методів формування вантажного плану контейнеровозу дозволяє істотно скоротити витрати часу. Підходи, що розглядаються, найбільш ефективні при здійсненні мультипортових перевезень, оскільки в цьому випадку кількість можливих варіантів розміщення вантажу значно зростає.

В цілому слід зазначити, що на даному етапі контейнерна система вимагає узгодженого розвитку – має бути забезпечене не тільки будівництво нових ультрасучасних суден а й модернізація існуючих, будівництво нових великих спеціалізованих портів і терміналів, створення великовантажних типів розвантажувально-вантажної техніки. Необхідний також контроль за пересуванням контейнерів як в порту так і протягом усього шляху у морі і на суші, узгодженість країн-партнерів з торгівлі, що ще більше ускладнює проблему, перетворюючи її, по суті, в глобальну.

Таким чином, створення нових методів або алгоритмів оптимізації процесу складання вантажного плану судна типу контейнеровоз є одним з найбільш актуальних питань сьогодення. Аналіз, який проведено у даній роботі, у подальших дослідженнях дозволить розробити власну модель і алгоритм розміщення контейнерів на судні, що дозволить оптимізувати процес складання вантажного плану судна та підвищити ефективність контейнерних перевезень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Козырев В. К. Грузоведение : учебник. Одесса : Феникс, 2005. 360 с.
- 2 Николаева Л. Л., Цимбал Н. Н. Морские перевозки : учебник. Одесса : Феникс, 2005. 425 с.
- 3 Снопков В. И. Технология перевозки грузов морем : учебник для вузов. СПб : НПО «Профессионал», 2006. 500 с.
- 4 Zhan Bian, Qianqian Shao, Zhihong Jin (Optimization on the container loading sequence based on hybrid dynamic programming), 2015.
- 5 Wenbin Hu, Zhengbing Hu, Lei Shi, Peng Luo and Wei Song (Combinatorial optimization and strategy for ship stowage and loading schedule of container terminal), 2012.
- 6 Устинов Р. Г., Днепровский В. В. Анализ критериев составления грузового плана морского судна-контейнеровоза. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2005. Вып. № 15.
- 7 Нікольський В. В., Нікольський М. В., Накул Ю. А. Система підтримки прийняття рішення по завантаженню великотоннажного контейнеровоза. 2016.
- 8 Ambrosino, D., Anghinolfi, D., Paolucci, M. and Sciomachen, A. (2010) 'An experimental comparison of different heuristics for the master bay plan problem', *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 6049. P.314–325.
- 9 Avriel, M., Penn, M. and Shpirer, N. (2000) 'Containership stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs', *Discrete Applied Mathematics*. Vol. 103, № 1–3. P.271–279.
- 10 Blum, C. and Roli, A. (2003) 'Metaheuristics in combinatorial optimization overview and conceptual comparison', *ACM Computing Surveys*. Vol. 35, No. 3. Pp.268–308.
- 11 Dubrovsky, O., Levitin, G. and Penn, M. (2002) 'A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem', *Journal of Heuristics*. Vol. 8, No. 6. P. 585–599.
- 12 Fan, L., Low, M.Y.H., Ying, H.S., Jing, H.W., Min, Z. and Aye, W.C. (2010) 'Stowage planning of large containership with tradeoff between crane workload balance and ship stability', *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computers Scientists*. Vol. III. P. 1–7.
- 13 Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E. and Papadimitriou, S. (2006) 'Multi-objctive simultaneous stowage and loading planning for a container ship with container rehandle in yard stacks', *European Journal of Operational Research*. Vol. 171, No. 3. P. 373–389.

- 14 Michalewicz, Z. (1996) *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3rd ed., Springer-Verlag, London, UK.
- 15 Ribeiro, C.M., Azevedo, A.T. and Teixeira, R.F. (2010) 'Problem of assignment cells to switches in a cellular mobile network via beam search method', *WSEAS Transactions on Communications*. Vol. 9, No. 1. Pp.11–21.
- 16 Sciomachen, A. and Tanfani, E. (2007) 'A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity', *European Journal of Operational Research*. Vol. 183, No. 3. P. 1433–1446.
- 17 Vacca, I., Bierlaire, M. and Salani, M. (2007) 'Optimization at container terminals: status, trends and perspectives', *7th Swiss Transportation Research Conference*, September. Pp.1–21.
- 18 Valente, J.M.S. and Alves, R.A.F.S. (2005) 'Filtered and recovering beam search algorithm for the early/tardy scheduling problem with no idle time', *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 48, No. 2. Pp.363–375.
- 19 Wilson, I. and Roach, P.A. (1999) 'Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning', *Journal of Heuristics*. Vol. 5, No. 4. P. 403–418.
- 20 Dyckhoff, H. (1990) 'A typology of cutting and packing problems', *European Journal of Operational Research*. Vol. 44, No. 2. P. 145–159.

REFERENCES

- 1 Kozihrev V.K. *Gruzovedenie: Uchebnik.*— Odessa : Feniks, 2005.
- 2 Nikolaeva L.L., Tsimbal N.N. *Morskie perevozki: Uchebnik.* Odesskaya nacionaljnaya morskaya akademiya. Odessa : Feniks, 2005.
- 3 Snopkov V.I. (2006). *Tekhnologiya perevozki Грузов морем: Uchebnik dlya vuzov.* SPb: NPO «Professional».
- 4 Zhan Bian, Qianqian Shao, Zhihong Jin. (2015). Optimization on the container loading sequence based on hybrid dynamic programming.
- 5 Wenbin Hu, Zhengbing Hu, Lei Shi, Peng Luo and Wei Song. (2012). Combinatorial optimization and strategy for ship stowage and loading schedule of container terminal.
- 6 Ustinov R. G., Dneprovskiy V. V. (2005). Analiz kriteriev sostavleniya Грузового плана морского судна– контейнероюза. *Vestnik Priazovskogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universiteta*, 15.
- 7 Nikoljskiy V. V., Nikoljskiy M. V., Naku Yu. A. (2016). Sistema pidtrimki priyjnnyattya rishennya po zavantazhennyu velikotonnazhnogo контейнероюза.
- 8 Ambrosino, D., Anghinolfi, D., Paolucci, M. and Sciomachen, A. (2010). An experimental comparison of different heuristics for the master bay plan problem. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 6049, 314–325.
- 9 Avriel, M., Penn, M. and Shpirer, N. (2000). Containership stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs. *Discrete Applied Mathematics*. Vol. 103, 1–3, 271–279.
- 10 Blum, C. and Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, Vol. 35, 3, 268–308.
- 11 Dubrovsky, O., Levitin, G. and Penn, M. (2002). A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem. *Journal of Heuristics*, Vol. 8, No. 6, 585–599.
- 12 Fan, L., Low, M.Y.H., Ying, H.S., Jing, H.W., Min, Z. and Aye, W.C. (2010). Stowage planning of large containership with tradeoff between crane workload balance and ship stability. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computers Scientists*. Vol. III, 1–7.
- 13 Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E. and Papadimitriou, S. (2006). Multi-objektive simultaneous stowage and loading planning for a container ship with container rehandle in yard stacks. *European Journal of Operational Research*. Vol. 171, No. 3, 373–389.

- 14 Michalewicz, Z. (1996) *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3rd ed., Springer-Verlag, London, UK.
- 15 Ribeiro, C. M., Azevedo, A. T. and Teixeira, R. F. (2010). Problem of assignment cells to switches in a cellular mobile network via beam search method, *WSEAS Transactions on Communications*, Vol. 9, No. 1, 11–21.
- 16 Sciomachen, A. and Tanfani, E. (2007). A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity. *European Journal of Operational Research*. Vol. 183, No. 3, 1433–1446.
- 17 Vacca, I., Bierlaire, M. and Salani, M. (2007). Optimization at container terminals: status, trends and perspectives. *7th Swiss Transportation Research Conference*, September, Pp. 1–21.
- 18 Valente, J.M.S. and Alves, R.A.F.S. (2005). Filtered and recovering beam search algorithm for the early/tardy scheduling problem with no idle time. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 48, No. 2, 363–375.
- 19 Wilson, I. and Roach, P.A. (1999). Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning. *Journal of Heuristics*, Vol. 5, No. 4, 403–418.
- 20 Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*. Vol. 44, No. 2, 145–159

Федоров А. И. МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МОРСКИХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

В работе доказано, что эффективным на сегодня является использование морских контейнерных перевозок. Аргументировано, что контейнерные перевозки является экономически выгодным и надежным способом транспортировки товаров большими партиями за счет использования мультимодальных перевозок, что позволяет сократить время доставки и снизить финансовые затраты. Это становится возможным благодаря верному планированию организационно-методических и технологических процессов перевозки грузов. Проанализированы преимущества эффективности использования данного вида перевозки и приведены основные недостатки, требующие устранения. Констатировано рост контейнеропотоков на текущий момент времени, что требует осуществления ряд мероприятий по увеличению пропускной и провозной способности. Рассмотрены основные модели и алгоритмы размещения контейнеров на судне и терминале. Приведен анализ различных подходов (итерационный локальный поиск, направленный локальный поиск, поиск с переменной окрاییной, вероятностный жадный алгоритм, эволюционный алгоритм, генетический алгоритм, алгоритм оптимизации муравьиной колонии, имитация отжига, поиск с запретами) и установлено, что данные подходы эффективны и широко используются. Применение эвристических методов формирования грузового плана контейнеровоза позволяет существенно сократить затраты времени. Рассмотренные подходы наиболее эффективны при осуществлении мультипортовых перевозок, поскольку в этом случае количество возможных вариантов размещения груза значительно возрастает. Аргументировано важность строительства современных терминалов, портов, разгрузочно-погрузочной техники для повышения эффективности морских контейнерных перевозок. Также в работе аргументировано, что процесс составления грузового плана контейнерного судна является важным и создание новых методов позволит оптимизировать этот процесс и повысить эффективность контейнерных перевозок в целом.

Ключевые слова: судно, морские перевозки, контейнерные перевозки, грузовой план, модели и алгоритмы размещения контейнеров, оптимизация, эффективность морских контейнерных перевозок.

Fedorov A. I. PLANNING METHODS FOR MODERN CONTAINER TRANSPORTATION

It is proved in the work that the use of sea container transportations is effective today. It is argued that container transportation is a cost-effective and reliable way of transporting goods in large quantities by using multimodal transportation, which reduces shipping time and reduces financial costs. This is possible due to the correct planning of organizational, methodological and technological processes of cargo transportation. The advantages of the efficiency of using this type of transportation are analyzed and the main disadvantages that need to be eliminated are presented. The growth of the container flow at the current moment of time is noted, which requires a number of measures to increase the capacity and capacity. Basic models and algorithms for container and ship container placement are considered. Various approaches are analyzed (iterative local search, directional local search, variable neighborhood search, probabilistic greedy algorithm, evolutionary algorithm, genetic algorithm, ant colony optimization algorithm, annealing

simulation, search with bans) and found that data are widely used and applied. The use of heuristic methods of forming a cargo plan for a container ship can significantly reduce the time spent. The approaches considered are most effective for multi-port transportation, and in this case the number of possible cargo placement options is increasing. At the same time, the importance of the construction of modern terminals, ports, unloading and loading equipment for increasing the efficiency of sea container transportation is argued. The paper also argues that the process of drawing up a cargo plan for a container vessel is important and the creation of new methods will allow optimizing the process and increasing the efficiency of container transportations as a whole.

Keywords: *ship, sea transportation, container transportation, cargo plan, models and algorithms of container placement, optimization, efficiency of sea container transportation.*

© Федоров А. І.

Статтю прийнято
до редакції 3.10.19

КАРТОГРАФУВАННЯ ШУМОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ АВТОМАГІСТРАЛЕЙ М. МИКОЛАЄВА ЗАСОБАМИ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ (З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ ARCGIS)

Яремчук О. М., старший викладач кафедри медичної біології та фізики, мікробіології, гістології, фізіології та патофізіології орноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, e-mail: olga.yaremchuk.77@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5951-1137;

Пулашкін В. Ю., магістрант Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, pulashkin@ukr.net

У статті подано дослідження, яке було спрямоване на вимірювання рівнів шуму у трьох зонах м. Миколаєва з метою створення карт шуму у досліджуваній зоні для виявлення областей високої інтенсивності шумового забруднення. У дослідженні встановлено, що джерела шуму концентруються уздовж транспортних магістралей (у місцях окремих темних плям все-таки перевищуючи норму); усередині мікрорайонів, за стіною одно-, дво- (зони 1 та 2) та багатопверхової забудови (зони 2 та 3) (світлі плями), шум різко знижений. Також дослідження показало, що рівні шуму різняться від 38 дБ до 83 дБ, збільшення показників на Південно-Бузькому мості та Одеському шосе (обидві досліджувані ділянки є частинами міжнародної траси М-14 Одеса-Мелітополь-Новоазовськ) виходить головним чином з великої інтенсивності руху транспортних засобів (особливо вдень) та незадовільним станом дорожнього покриття. Також було виявлено шумову «лінію» у районі Спаського спуску, яка розташована вздовж трамвайної лінії. Зроблено висновок, що, хоча виміри не охоплювали територію всього міста, але показали, що спостерігається досить високий рівень шуму, на який потрібно звернути увагу в подальших дослідженнях та діях стосовно зниження рівня шуму.

Ключові слова: шумове забруднення, урболаншафти, програмний пакет ARCGIS.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.132-139

Актуальність роботи. XXI століття увійде в історію як століття загострення екологічних проблем: енергетичних, забруднення довкілля, проблем питної води тощо. З-поміж них важливе місце посідає проблема шумового забруднення. Її існування пов'язане з тим, що зростання потужностей сучасного устаткування, машин, побутової техніки, швидкий розвиток усіх видів транспорту призвели до того, що люди на виробництві й у побуті постійно піддаються дії шуму високої інтенсивності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На теперішній час у світі працюють сотні тисяч вчених, фахівців в області захисту від шуму, накопичено чимало наукових знань, технічних розробок, цікавих наукових досліджень.

Питання ролі шумового забруднення в розрізі екологічної безпеки вивчали І. Л. Карагодіна, Г. Л. Осіпов, І. О. Шишкін у 1972 р. у праці «Боротьба з шумом у містах», Б. Г. Прутков «Шумозащита в градостроительстве», К. П. Лі, Дж. Х. Девіс, Дз. Маскава, Е. П. Самойлюк і інші вітчизняні та закордонні вчені.

Потрібно зазначити, що нині українські дослідники картографуванням шуму практично не займаються. Особливе місце у розробці цієї наукової проблеми посідають праці доктора технічних наук, доцента кафедри Охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету міського господарства Абракітова В. Е. Автором була розроблена власна методика побудови карт шуму міських територій, здійснено картографування шумового навантаження деяких районів м. Харкова, Києва та Полтави.

Отже, наукові доповіді вітчизняних та зарубіжних авторів показали, що дослідження шумового забруднення на міських територіях – актуальна тема і дослідження в даному напрямку будуть основою для прийняття комплексу заходів щодо оптимізації умов життєдіяльності селітебних зон, зменшення акустошумового навантаження на людину.

Метою роботи є просторово-часова оцінка шумового навантаження на урболандшафти м. Миколаєва та побудова карт шуму обраних ділянок засобами ГІС-технологій (з використанням програмного пакету ArcGIS).

Побудова картографічних моделей обраних об'єктів дослідження. Графічне представлення карти шуму базується на колірній шкалі умовних позначок для рівня шуму, що в свою чергу ґрунтується на типах їх зонування за фактором перебільшення нормативних значень, а розміри точкових значків для позначення контрольних точок на місцевості можуть бути пов'язані з їх рівнями звуку. Конкретних вимог до оформлення карт шуму, (за винятком головної вимоги з'єднувати всі крапки з однаковим значенням ізолініями), на жаль, не існує. Нами було використано методика відображення цих зон в їх колірному оформленні за «принципом світлофора»:

- зони акустичного комфорту з рівнями, що не перевищують нормативні, виділяються зеленим кольором: (тобто з урахуванням особливостей психологічного сприйняття людини – «зелений колір – нормально, цілком допустимо»);
- зони граничних значень (значення за нормою чисельно збігаються з вимірними або обчисленими на території значеннями) виділяються жовтим кольором: («жовтий колір – увага»);
- зони акустичного дискомфорту з рівнями, що перевищують нормативні, виділяються червоним кольором: («червоний колір – символ заборони – небезпека, неприпустимо»).

Така колірна гамма інтуїтивно найбільш оптимальна для адекватного сприйняття поданої інформації.

Як уже зазначалося, карта шуму – це фрагмент генерального плану території, що представляє собою топографічну підоснову з нанесеними на неї зонами акустичного комфорту і акустичного дискомфорту. Графічне відображення точок з однаковими акустичними характеристиками, з'єднаних між собою ізолініями, дозволяє наочно відобразити рівень шумового навантаження на території.

Засоби і методи ГІС дозволяють будувати графічні схеми і карти на базі введених в неї геоінформаційних даних.

Для створення та візуалізації математичної моделі процесів поширення шуму нами було використано програми ArcMap та ArcGIS Pro. Дані вносилися в спеціально створений у програмі ArcMap шейп-файл (шейп-файл – файл спеціального формату для запису ГІС-інформації). Шейп-файл несе інформацію про просторове розташування контрольної точки на території (тобто схему розташування точок вимірювання на місцевості з прив'язкою до геодезичної системи координат), а також (створювані на розсуд експериментатора) поля для запису супутньої інформації. Все це подається у вигляді «таблиці атрибутів». Поле FID відповідає за нумерацію точок. Поле Shape визначає тип об'єкта (тобто означає, що саме це точка вимірювань). Решта полів створені самостійно автором для своїх цілей.



Рисунок 1 – Інтерфейс програми ArcMap

Наступний етап побудови карти шуму проводився в програмі ArcGIS Pro (рис. 2). Слід чітко розуміти, що в обох програмах (ArcGIS Pro та ArcMap) немає спеціальної кнопки «Побудова карт шуму», немає відповідних меню, немає ніяких акустичних формул і готової графі для занесення значень вимірів рівня звукового тиску; а слова «карта шуму», «децибел» і т.п. жодного разу не зустрічаються навіть в його багатотомній технічній документації. Ця програма просто призначена для того, щоб будувати графічні схеми і карти на базі введених в неї геоінформаційних даних (на основі примусово визначеними користувачем закономірностей їх побудови); одним з безлічі окремих випадків таких даних є акустичні, одним з локальних прикладів закономірностей є закономірності поширення шуму в міській забудові, одним з безлічі окремих випадків таких даних є акустичні, одним з локальних прикладів закономірностей є закономірності поширення шуму в міській забудові, а одним з окремих випадків графічних схем є шукана карта шуму.



Рисунок 2 – Інтерфейс програми ArcGIS Pro

Маючи достатньо знань для побудови математичної моделі та беручи до уваги наукові напрацювання доктора технічних наук В. Е. Абракітова, ми змогли визначити, що для побудови карти шуму найдоцільніше використати метод зворотних зважених відстаней (як один із багатьох можливих методів просторової інтерполяції). Метод зворотних зважених відстаней (IDW) однозначно передбачає, що об'єкти, які знаходяться поблизу, більш подібні один одному, ніж об'єкти, віддалені один від одного. Щоб проінтерполювати значення для невиміряного положення, IDW використовує виміряні значення навколо позиції, яка інтерполюється. Найбільш близькі до проінтерпольованої позиції виміряні значення надають більший вплив на прогнозоване значення, ніж віддалені від нього на значну відстань. IDW передбачає, що кожна вимірювана точка надає локальний вплив, яке зменшується зі збільшенням відстані. Це надає більшої ваги точкам, розташованим ближче всього до інтерпольованої розташування. Вага точки зменшується як функція від відстані. Тому метод носить назву зворотних зважених відстаней.

Інтерпретація отриманих результатів дослідження. За отриманими даними ми зробили такі висновки. Дослідження показало, що рівні шуму різняться від 38 дБ до 83 дБ. Дані вимірів шуму в нічний час у більшості розрахункових точок (особливо у зонах 1 та 3), як правило, не перевершують нормативні значення ($\approx 35-55$ дБ).

У денний час зафіксований перехід цих же територій у зону акустичного дискомфорту (рис. 3, 5, 7). Збільшення показників на Південно-Бузькому мості та Одеському шосе (обидві досліджувані ділянки є частинами міжнародної траси М-14 Одеса-Мелітополь-Новоазовськ) виходить головним чином з великої інтенсивності руху транспортних засобів та незадовільним станом дорожнього покриття.

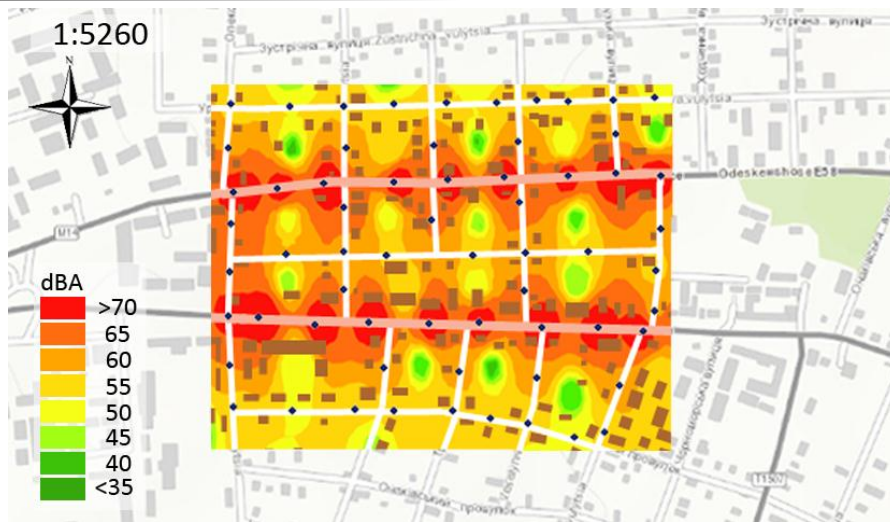


Рисунок 3 – Карта шумового забруднення для зони 1 в денний час



Рисунок 4 – Карта шумового забруднення для зони 1 в нічний час

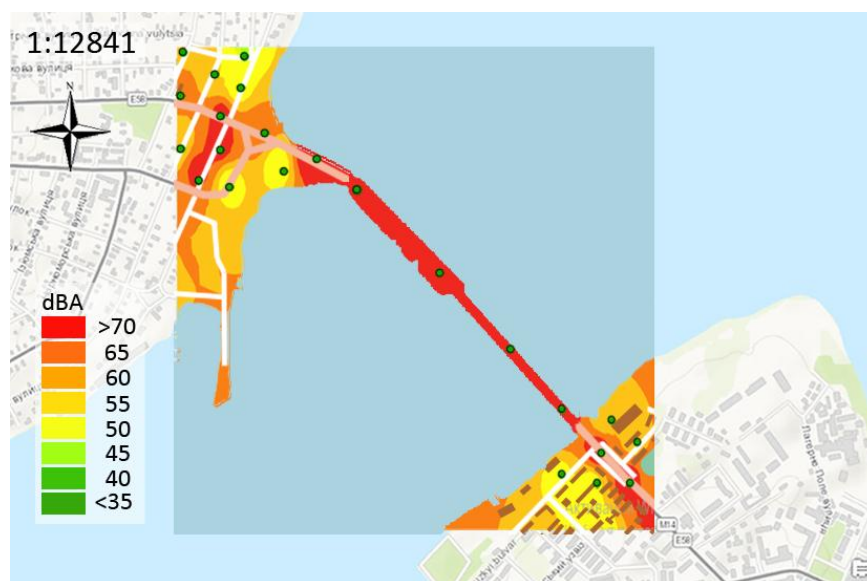


Рисунок 5 – Карта шумового забруднення для зони 2 в денний час

Розшифрування карт шуму досить просте: джерела шуму концентруються уздовж транспортних магістралей (у місцях окремих темних плям все-таки перевищуючи норму);

усередині мікрорайонів, за стіною одно-, дво- (зони 1 та 2) та багатоповерхової забудови (зони 2 та 3) (світлі плями), шум різко знижений.



Рисунок 6 – Карта шумового забруднення для зони 2 в нічний час

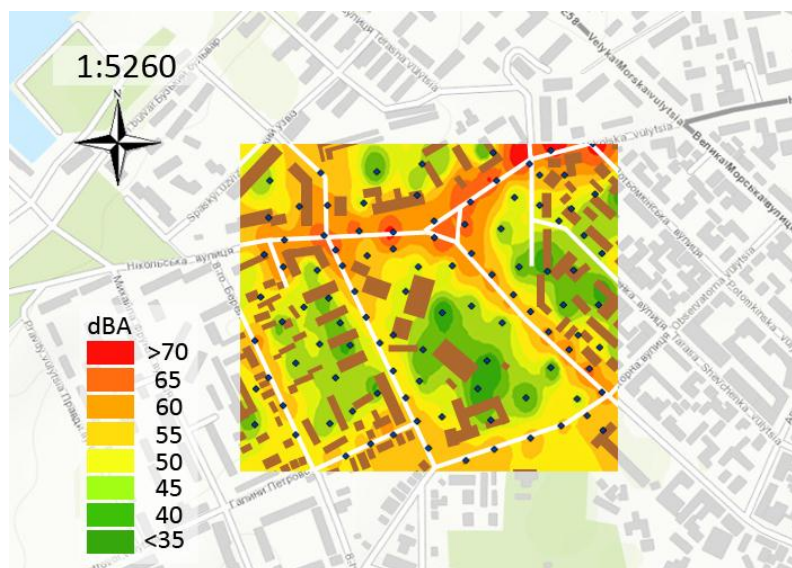


Рисунок 7 – Карта шумового забруднення для зони 3 в денний час і лінії

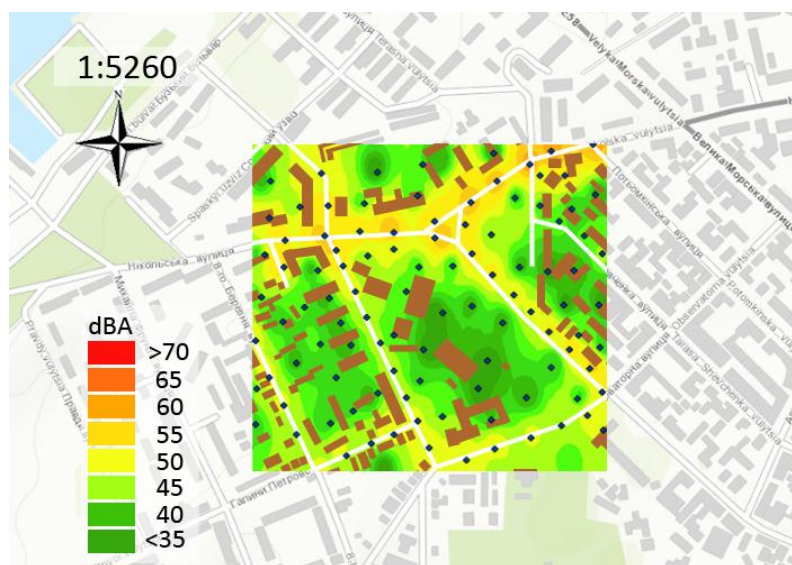


Рисунок 8 – Карта шумового забруднення для зони 3 в нічний час

Отримані результати досліджень наочно показують, що основним джерелом шуму в досліджуваних районах м. Миколаєва є автомобільний транспорт $\approx 70\text{--}78$ дБ вдень і $\approx 60\text{--}70$ дБ вночі. При віддаленні від проїжджої частини до тротуарів або жвавої вулиці рівень шуму спадає приблизно на 5–15 дБ (вдень становить $\approx 54\text{--}65$ дБ, а вночі $\approx 48\text{--}56$ дБ); в спальних районах $\approx 40\text{--}50$ дБ вдень і $\approx 32\text{--}45$ дБ вночі. Мінімальний рівень шуму зафіксований в парковій зоні - близько $\approx 34\text{--}44$ дБ вдень і $\approx 28\text{--}36$ дБ. Максимальний рівень шуму зафіксований на мості від звуку проїжджаючих фур ≈ 85 дБ.

Як вже було зазначено, на динаміку зміни рівня шуму впливає активність автомобільних потоків і скупчення людей. Так, наприклад:

- уздовж доріг вдень (рис. 3, 5, 7) рівень шуму значно вищий, ніж у вночі (рис. 4, 6, 8);
- біля громадських установ (школи) рівень шуму вище, ніж на оточуючих територіях;
- біля магазинів рівень шуму практично не змінюється і т.п.

Умовно розділимо поняття акустичного комфорту і дискомфорту. Зони акустичного комфорту – це території з рівнями звуку і рівнями звукового тиску, що не перевищують нормативних значень. Слід зауважити, що практично на будь-якій території присутній так званий фоновий шум: наприклад, спів птахів, шелест листя, шум вітру. Тому зон з рівнями звуку і звукового тиску, рівними нулю децибел, просто не може бути. Однак цей фоновий шум в ряді випадків не перевищує нормативних значень і не представляє ніяких незручностей, а тим більше – шкоди і небезпеки для людини. Зони акустичного дискомфорту – це території з рівнями звуку і рівнями звукового тиску, що перевищують нормативні значення. Перебуваючи в зазначених зонах, людина відчуває психофізіологічний дискомфорт через надлишкові рівні звуку і рівні звукового тиску. При значному перевищенні нормативних значень шумом наноситься шкода організму.

За формальною ознакою, будь-яке перевищення нормативних значень шуму – неприпустиме, і є порушенням діючих санітарних і технічних норм. Це вимагає застосування шумозахисних заходів. На жаль, саме за фактором шуму дискомфортними є дуже великі площі на території сучасного міста, що ми підтвердили, створивши карти шуму трьох різних зон м. Миколаєва, а ніякі шумозахисні заходи на них не проводяться. Це додатково підкреслює актуальність проведеної науково-дослідної роботи.

Слід зауважити, що створення карт шуму дозволяє здійснювати моніторинг акустичного забруднення навколишнього середовища, вивчити закономірності поширення шуму в міській забудові, коригувати проектні рішення.

Висновки. Дослідження показало, що рівні шуму різняться від 38 дБ до 83 дБ, збільшення показників на Південно-Бузькому мості та Одеському шосе (обидві досліджувані ділянки є частинами міжнародної траси М-14 Одеса-Мелітополь-Новоазовськ) виходить головним чином з великої інтенсивності руху транспортних засобів (особливо вдень) та незадовільним станом дорожнього покриття. Також було виявлено шумову «лінію» у районі Спаського спуску, яка розташована вздовж трамвайної лінії.

Використання при розробці власного приладу нових технологій в галузі комунікацій і високою швидкістю обчислень, може дозволити створювати шумові карти в майже реальному масштабі часу. Співвідношенні з географічним місцем розташування (GPS трекер), вимірювання збираються з мобільних станцій і за допомогою програмного забезпечення для шумового моніторингу (датчик звуку) зберігаються (локальне калібрування). Завдяки розробленому способу, підсумкова карта буде відповідати фактичній ситуації та її створення може займати декілька годин, залежно від складності досліджуваної території.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткач Н. А. Оценка и прогнозирование влияния автомобильного транспорта на состояние шумового загрязнения селитебных территорий: дис...к.т.н : 01.03.15. Дніпропетровськ, 2015. 183 с.
2. Щорічна доповідь про стан здоров'я населення, санітарно-епідемічну ситуацію та результати діяльності системи охорони здоров'я України. 2016 рік / МОЗ України, ДУ «УІСД МОЗ України». Київ, 2017. 516 с.
3. Prasad D. Noize pollution / Debi Prasad : tripathy B. E. (Min.), M. Tech (Mine Planning) PG. Diploma in Ecology and Environment PG. Dip. Personnel Management and Industrial Relations . New Delhi : A.P.H. Publishing Corporation, 2015. 362 p.
4. Kucas, A., Hoej, J., and Frederiksen, R.. Efficient Noise Mapping using ArcGIS and detailed Noise Propagation Simulation. *ESRI European User Conference*, 2017.
5. Мельник С. В., Мельник С. В., Плотнікова О. К., Ткачова О. М. Основи екології: конспект лекцій для студ. інж. фахів. Одеса : Наука і техніка, 2016. 168 с.
6. Абракітов В. Е. Моделювання процесів розповсюдження шуму у 39 міській забудові із застосуванням комп'ютерних технологій. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції, Ч.IV. (MicroCAD-2015, 01-03 червня 2011 р., Харків) Харків, НТУ «ХПІ». С.61. ArcDesktop GIS package. URL: www.esri.com
7. LimA. URL: <http://www.softnoise.com/>
8. SoundPlan. URL: <http://www.soundplan.com/>
9. Проблемы шума в городах и человек. Карта шума : веб-сайт. URL: <http://globalproblems.narod.ru/problemahuma13.html#20>

REFERENCES

1. Tkach N. A. (2015). Ocenka i prognozirovanie vliyaniya avtomobiljnogo transporta na sostoyanie shumovogo zagryazneniya selitebniikh territoriyj. *Candidate's thesis*. Dnipropetrovsk.
2. *Shchorichna dopovid pro stan zdorovia naseleennia, sanitarно-epidemichnu sytuatsiiu ta rezultaty diialnosti systemy okhorony zdorovia Ukrainy.*(2016). Kyiv : DU «UISD MOZ Ukrainy».
3. Prasad D. Noize pollution / Debi Prasad : tripathy B. E. (Min.), M. Tech (Mine Planning) PG. (2015). Diploma in Ecology and Environment PG. Dip. Personnel Management and Industrial Relations . New Delhi : A.P.H. Publishing Corporation.
4. Kucas, A., Hoej, J., and Frederiksen, R. (2017). Efficient Noise Mapping using ArcGIS and detailed Noise Propagation Simulation. *ESRI European User Conference*, 2017.
5. Melnyk, S. V., Plotnikova, O. K., Tkachova, O. M. (2016). Osnovy ekolohii : konspekt lektsii dlia stud. inzh. fakhiv. Odesa : Nauka i tekhnika.
6. Abrakitov, V. E. (2011). Modeliuvannia protsesiv rozpovsiudzhennia shumu u 39 miskii zabudovi iz zastosuvanniam kompiuternykh tekhnolohii. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : tezy dopovidei XIX mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*. Kharkiv : NTU «KhPI». Retrieved from www.esri.com
7. LimA. Retrieved from <http://www.softnoise.com/>
8. SoundPlan. Retrieved from <http://www.soundplan.com/>
9. Problemih shuma v gorodakh i chelovek. Karta shuma. Retrieved from <http://globalproblems.narod.ru/problemahuma13.html#20>

Яремчук А. Н., Пулашкин В. Ю. КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ШУМОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ г. НИКОЛАЕВА СРЕДСТВАМИ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ARCGIS)

В статье представлено исследование, которое было направлено на измерение уровней шума в трех зонах г. Николаева с целью создания карт шума в исследуемой зоне для выявления областей высокой интенсивности шумового загрязнения. В исследовании установлено, что источники шума концентрируются вдоль транспортных магистралей (в местах отдельных темных пятен все-таки

превышая норму) внутри микрорайонов, за стеной одно-, двух- (зоны 1 и 2) и многоэтажной застройки (зоны 2 и 3) (светлые пятна), шум резко снижен. Также исследование показало, что уровни шума отличаются от 38 дБ до 83 дБ, увеличение показателей на Юго-Бугском мосту и Одесском шоссе (обе исследуемые участки являются частями международной трассы М-14 Одесса-Мелитополь-Новоазовск) выходит главным образом с большой интенсивности движения транспортных средств (особенно днем) и неудовлетворительным состоянием дорожного покрытия. Также было обнаружено шумовую «линию» в районе Спасского спуска, которая расположена вдоль трамвайной линии. Сделан вывод, что, хотя измерения не охватывали территорию всего города, но показали, что наблюдается достаточно высокий уровень шума, на который нужно обратить внимание в дальнейших исследованиях и действиях по снижению уровня шума.

Ключевые слова: шумовое загрязнение, урболандшафты, программный пакет ARCGIS.

Yaremchuk O.M., Pulashkin V. Yu. MAPPING OF NOISE POLLUTION OF THE NIKOLAEV HIGHWAYS BY MEANS OF GIS TECHNOLOGIES (USING THE ARCGIS SOFTWARE PACKAGE)

The article presents a study aimed at measuring noise levels in three zones of Mykolayiv in order to create noise maps in the study area to identify areas of high intensity of noise pollution. The study found that noise sources are concentrated along transport routes (in places of some dark spots still exceeding the norm); In the neighborhoods, one-, two- (zones 1 and 2) and multi-storey buildings (zones 2 and 3) (light spots) on the wall, noise is dramatically reduced. Also, The study found that noise levels vary from 38 dB to 83 dB, and the increase in indicators on the South-Buza Bridge and the Odessa Highway (both study areas are part of the international route M-14 Odessa-Melitopol-Novozovsk) is mainly due to the high traffic intensity (especially in the afternoon) and poor road conditions. A noise line was also found in the area of the Spassky Descent, which is located along the tram line.

The use of new communications technologies and high-speed computing capabilities in your device can allow you to create noise cards in almost real time. Relative to geographical location (GPS tracker), measurements are collected from mobile stations and stored (local calibration) using software for noise monitoring (sound sensor). Thanks to the developed method, the final map will be appropriate to the actual situation and its creation may take several hours, depending on the complexity of the studied area.

Keywords: noise pollution, urban landscapes, ARCGIS software package

© Яремчук О. М., Пулашкін В. Ю.

Статтю прийнято
до редакції 4.09.19

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИНТЕЗОВАНОЇ ВИСОКОВОЛЬТНИМ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДОМ ПОРОШКОВОЇ ШИХТИ НА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ РЕМОНТУ СУДЕН

Букетов А. В., д.т.н., завідувач кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

Сизоненко О. М., д.т.н., головний науковий співробітник відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, e-mail: sizonenko43@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-8449-2481;

Безбах О. М., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0002-8086-328;

Букетова Н. М., докторант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0002-7670-6590;

Липян Є. В., к.т.н., старший науковий співробітник відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, ORCID: 0000-0001-9483-1793

У роботі показано перспективи використання нових матеріалів на полімерній основі. Враховуючи, що розроблені композити досить ефективно використовувати для захисту устаткування, яке експлуатують за підвищених температур, проведено дослідження стосовно визначення впливу природи і вмісту синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової шихти на теплофізичні властивості епоксидних композитів. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні композитів вибрано епоксидний діановий олігомер. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін, що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Обґрунтовано вибір синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової шихти для поліпшення теплофізичних властивостей розроблених матеріалів. Досліджено термічний коефіцієнт лінійного розширення і теплостійкість епоксикомпозитів. На основі проведених випробувань теплофізичних властивостей матеріалів, наповнених синтезованою високовольтним електророзрядом порошковою шихтою, встановлено допустимі межі температури, при яких можливо використовувати розроблені композити.

Ключові слова: епоксидний композит, теплостійкість, термічний коефіцієнт лінійного розширення, усадка.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.142-153

Постановка проблеми. Сучасні судна флоту мають велику автономність плавання, високі ходові і морехідні якості. Енергоємність і насиченість суден численним та складним промисловим і технологічним обладнанням дозволяють успішно вирішувати завдання з видобутку та переробки морепродуктів, а також перевезення вантажів.

Виробнича діяльність промислових суден найчастіше відбувається в складних метеорологічних умовах при необхідності їх швартування у відкритому морі. Тому тільки добре організоване технічне обслуговування та ремонт суден промислового флоту можуть забезпечити планову тривалість їх перебування в експлуатації і виконання планових завдань.

Технічне обслуговування та ремонт суден необхідно виконувати для підтримки працездатності та технічного їх стану на необхідному рівні упродовж усього терміну експлуатації у міру зношування деталей чи елементів механізмів. Технічне обслуговування входить в прямі обов'язки судового екіпажу і виконується під час експлуатації судна.

Ремонти різних видів можуть виконувати як із виведенням судна з експлуатації, так і поєднувати з міжрейсовими стоянками та іншими видами планових простоїв судна. При цьому ремонт відрізняється від технічного обслуговування не тільки великим обсягом відновлювальних робіт, але й джерелами їх фінансування. Ремонти можуть виконуватися судноремонтними підприємствами (СПП), береговими ремонтними бригадами (БРБ),

судновими ремонтними бригадами (СРБ), базами технічного обслуговування (БТО) і судновим екіпажем (СЕ).

Під ремонтом судна розуміється комплекс операцій з відновлення справного або працездатного стану судна на певний період. Метою ремонту суден є усунення дефектів матеріальної частини судна, що виникли в результаті природного зносу, порушень правил технічної експлуатації або недостатньої надійності і проектних недоробок при виробництві судна.

Збільшення обсягів судноремонтного виробництва обумовлене наявністю в експлуатації різних типів як вітчизняних, так закордонних суден. У цих умовах скорочення тривалості заводських ремонтів і зниження їх вартості мають першорядне значення як фактори, які безпосередньо і суттєво впливають на ефективність і рентабельність експлуатації суден [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перспективним при капітальному чи поточному ремонті є застосування полімеркомпозитів [1-8]. Це дозволяє суттєво поліпшити фізико-механічні, теплофізичні, антикорозійні та інші експлуатаційні характеристики комплексів та механізмів під впливом статичних і динамічних навантажень. Актуальним є використання полімерних композитних матеріалів (КМ) на основі епоксидних зв'язувачів, дисперсних і волокнистих наповнювачів. Такі матеріали відзначаються доброю технологічністю при нанесенні на деталі зі складним профілем поверхні та підвищеними експлуатаційними, у тому числі і теплофізичними характеристиками, при вказаних критичних умовах роботи. Розроблення нових матеріалів з поліпшеними теплофізичними властивостями не можливе без наукових досліджень їх експлуатаційних характеристик. На жаль, не достатньо уваги приділено дослідженню впливу міжфазових явищ при структуроутворенні композитів на їхні властивості, особливо при науково-обґрунтованому введенні мікродисперсних наповнювачів. Фізичні і хімічні процеси при формуванні матеріалів на межі поділу фаз охоплюють увесь комплекс реакцій взаємодії макромолекул олігомеру з активними центрами на поверхні наповнювача. Це зумовлює формування матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками, які регулюються технологічними режимами формування композитів.

Мета роботи – дослідити вплив вмісту синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової шихти на теплофізичні властивості епоксидних композитів для ремонту суден.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як мікродисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано синтезовану порошкову шихту (СПШ). Формування наповнювача проводили високовольтним електророзрядним (ВЕР) синтезом. Для високовольтного електророзрядного синтезу наповнювача використовували дослідний стенд, детально описаний у роботі [9]. У вигляді вихідного матеріалу використовували суміш порошків наступного вихідного складу: Fe (75 %) + Ti (25 %). При дослідженні накопичена енергія одиничного розряду (W_1) становила 1 кДж, а інтегральна питома енергія оброки ($W_{пит}$) становила 25 МДж/кг.

У процесі досліджень виконували варіювання розподілом електричного поля та плазмових утворень у об'ємі розрядної камери шляхом використання різних типів

електродних систем (табл. 1 та рис. 1) [9–11]. У даній роботі використано 1-вістрійну конструкцію електронної системи.

Таблиця 1 – Результати ВЕР-синтезу наповнювача

Вихідний склад	Склад після обробки	Електродна система	Діаметр після обробки, d , мкм		
			d_{\min}	d_{\max}	$d_{\text{сєр}}$
Fe (75 %) + Ti (25 %)	Fe (70 %) + Ti (10 %) + TiC (15 %) + Fe ₃ C (5 %)	1	~1	112	11,5



Рисунок 1 – 1-вістрійна конструкція електродних систем

Використання різних електродних систем дозволило керувати розподілом інтенсивності впливу основних факторів ВЕР [9, 10]. Так, якщо у випадку використання 1-вістрійної системи більша частка накопиченої енергії трансформувалась у ударні хвилі, то використання 15-вістрійної системи дозволяє підвищити інтенсивність впливу термічних та струмових факторів.

Результати досліджень показали, що у результаті ВЕР-обробки відбулось подрібнення усіх оброблених часток та зміна їх фазового складу із синтезом високомодульних сполук TiC та Fe₃C (табл. 1).

Епоксидні композити формували за такою технологією [1–4]: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і часток наповнювача впродовж часу $\tau = 10 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у композиті зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) і теплостійкість (T) КМ. Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно з ГОСТ 21341-75. Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури (ГОСТ 15173-70).

Результати досліджень та їх обговорення. Експериментально встановлено (рис. 2), що теплостійкість вихідної немодифікованої епоксидної матриці становить $T = 341$ К. Доведено (рис. 2), що наповнення епоксидного зв'язувача добавкою у вигляді мікродисперсного наповнювача СПШ навіть за незначного вмісту (у кількості

$q = 0,05$ мас.ч.) приводить до суттєвого підвищення теплостійкості КМ (від $T = 341$ К (для епоксидної матриці) до $T = 353$ К). У першу чергу це зумовлено міжфазовою взаємодією активних центрів на поверхні дисперсних часток із сегментами та боковими групами макромолекул епоксидного олігомеру. Методом ІЧ-спектроскопії підтверджено, що у процесі структуроутворення полімерних композитів виникають нові зв'язки між карбідами заліза і титану та гідроксильними і карбонільними групами епоксидної смоли. Це забезпечує поліпшення когезійної міцності епоксикомпозитів, що передбачає підвищення показників їх теплостійкості.

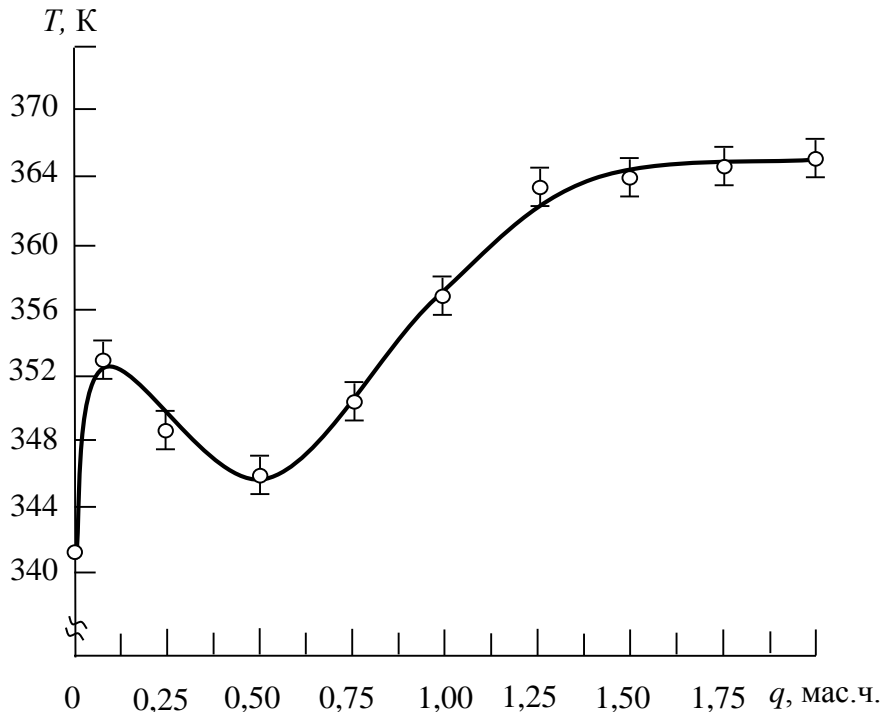


Рисунок 2 – Залежність теплостійкості (за Мартенсом) КМ від вмісту наповнювача СПШ

Встановлено (рис. 2), що введення добавки у діапазоні $q = 0,25 \dots 0,75$ мас.ч. призводить до зменшення показників теплостійкості матеріалів від $T = 353$ К (для КМ із вмістом часток у кількості $q = 0,05$ мас.ч.) до $T = 347 \dots 350$ К. На наш погляд, це зумовлено пластифікуючою дією добавки за даного вмісту, що позначається на когезійних властивостях матеріалів. При поясненні цього ефекту слід розглядати перебіг процесів міжфазової взаємодії на мезорівні. Тобто, при зшиванні епоксидних композитів навколо часток наповнювача формуються зовнішні поверхневі шари, ступінь гелеутворення у яких є більшим порівняно з аналогічною густиною полімеру у об'ємі. Однак, об'єм таких шарів є недостатнім виходячи з критичного вмісту наповнювача. При цьому формуються матеріали із невисоким вмістом гель-фракції, що зумовлює зменшення показників теплостійкості розроблених КМ.

У роботі експериментально встановлено критичний вміст мікродисперсного наповнювача СПШ у епоксидному зв'язувачі при формуванні КМ з поліпшеними теплофізичними властивостями. Показано (рис. 2), що введення часток за вмісту $q = 1,50 \dots 2,00$ мас.ч. забезпечує підвищення теплостійкості КМ від $T = 341$ К (для епоксидної матриці) до $T = 367 \dots 369$ К. При цьому максимум показників теплостійкості ($T = 369$ К) КМ на кривій залежності « $T - q$ » спостерігали за вмісту наповнювача у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Надалі збільшення вмісту часток у КМ призводить до зменшення показників теплостійкості матеріалів. Можна стверджувати, що за критичного вмісту наповнювача у композиті ($q = 2,00$ мас.ч.) формується міцнозшита структура полімеру зі значною кількістю хімічних зв'язків як у поверхневих шарах навколо часток, так і у об'ємі полімеру.

Це приводить до суттєвого підвищення теплостійкості композитів від $T = 341$ К (для епоксидної матриці) до $T = 369$ К.

Дослідженням усадки підтверджено результати наведених вище випробувань. Показано (рис. 3), що усадка вихідної матриці (при дослідженні у діапазоні температур $\Delta T = 303 \dots 473$ К) становить $\delta = 0,32$ %. Введення часток мікродисперсного наповнювача приводить до зменшення усадки КМ до значень $\delta = 0,02$ %. Тобто, наявність добавки незалежно від її вмісту забезпечує суттєве зменшення усадки, що свідчить про суттєвий вплив наповнювача СПШ на формування структурної сітки композитів. А це, відповідно, поліпшує теплофізичні властивості розроблених матеріалів.

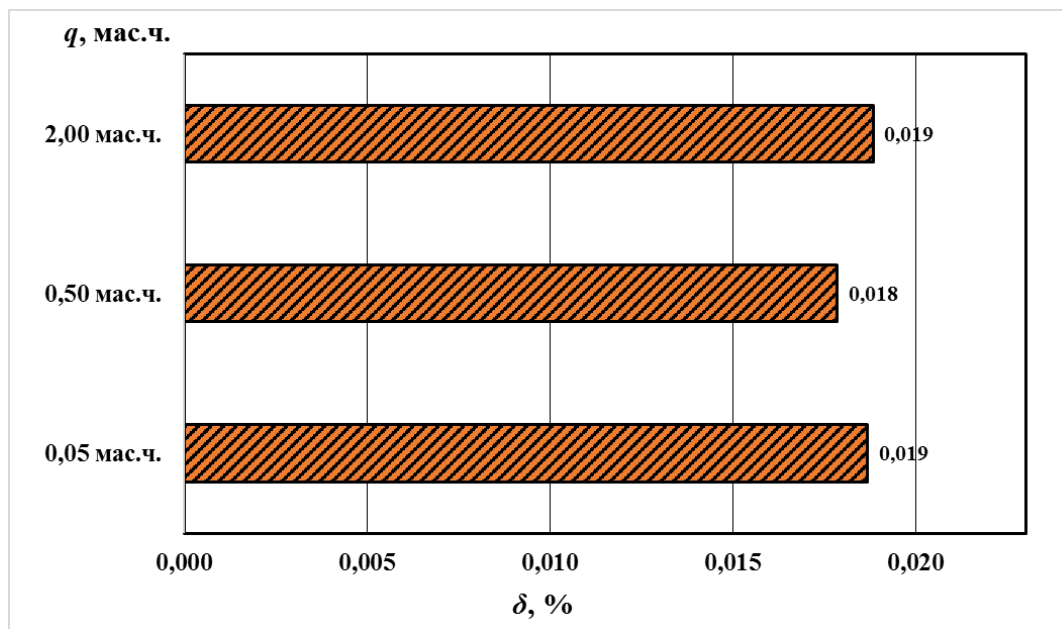


Рисунок 3 – Залежність усадки КМ від вмісту наповнювача СПШ

На наступному етапі досліджували термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) розроблених композитів (рис. 4). Доведено (табл. 2), що у діапазоні температурних випробувань $\Delta T = 303 \dots 323$ К ТКЛР вихідної матриці становить $\alpha = 6,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Введення наповнювача СПШ за незначної кількості забезпечує суттєве зменшення ТКЛР композиту (у 2,3 рази). Це свідчить про суттєвий вплив наповнювача на перебіг процесів зшивання і, як наслідок, на теплофізичні властивості розроблених матеріалів. Надалі збільшення вмісту часток добавки приводить до додаткового зменшення значень ТКЛР КМ. Зокрема показано (табл. 2), що наповнення КМ порошком СПШ у кількості $q = 0,50 \dots 2,00$ мас.ч. приводить до зменшення ТКЛР у вибраному температурному діапазоні дослідження від $\alpha = 6,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ до $\alpha = (2,0 \dots 2,2) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Можна стверджувати, що даний діапазон вмісту часток наповнювача є оптимальним для формування КМ з поліпшеними теплофізичними властивостями.

У діапазоні температурних випробувань $\Delta T = 303 \dots 373$ К спостерігали наступне. Введення часток незалежно від їх вмісту приводить також до суттєвого зменшення ТКЛР композитів (від $\alpha = 6,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ до $\alpha = (2,8 \dots 3,0) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) (табл. 2). Вважали, що у діапазоні температур, близьких до температури склування, важливе значення має поведінка полімеру як у поверхневих шарах навколо часток наповнювача, так і у об'ємі. У даному випадку, на наш погляд, вирішальне значення мають релаксаційні процеси і рухливість сегментів та бокових груп макромолекул при підвищенні температури. Наявність наповнювача у КМ має також важливе значення, адже ТКЛР КМ порівняно з матрицею зменшується у 2,3...2,5 разів, однак релаксаційні процеси у полімері значно нівелюють вплив кількості добавки на поведінку композитів в умовах впливу теплового поля.

Виходячи з наведеного вище, цікавим було провести аналіз зміни ТКЛР КМ у діапазоні температур, які вищі з температури склування розроблених матеріалів. Показано

(табл. 2), що у діапазоні температур $\Delta T = 303 \dots 423$ К ТКЛР КМ зменшується від $\alpha = 9,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ до $\alpha = 5,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ за вмісту наповнювача в композиті у кількості $q = 0,05$ мас.ч. Найменшим значенням ТКЛР з усього діапазону досліджуваних матеріалів спостерігали для КМ із вмістом часток у кількості $q = 2,00$ мас.ч. При цьому формується матеріал, ТКЛР якого майже у 2 рази менший порівняно з епоксидною матрицею (ТКЛР зменшується від $\alpha = 9,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ до $\alpha = 5,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$).

У найбільшому діапазоні досліджуваних температур ($\Delta T = 303 \dots 473$ К) спостерігали наступне. ТКЛР матеріалів суттєво не відрізняється від аналогічного показника епоксидної матриці, позаяк відхилення значень складає $\Delta\alpha = (0,1 \dots 0,6) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Можна констатувати, що за даної температури починаються процеси деструкції, а це, у свою чергу, призводить до суттєвого збільшення ТКЛР композитів незалежно від вмісту у них мікродисперсного наповнювача.

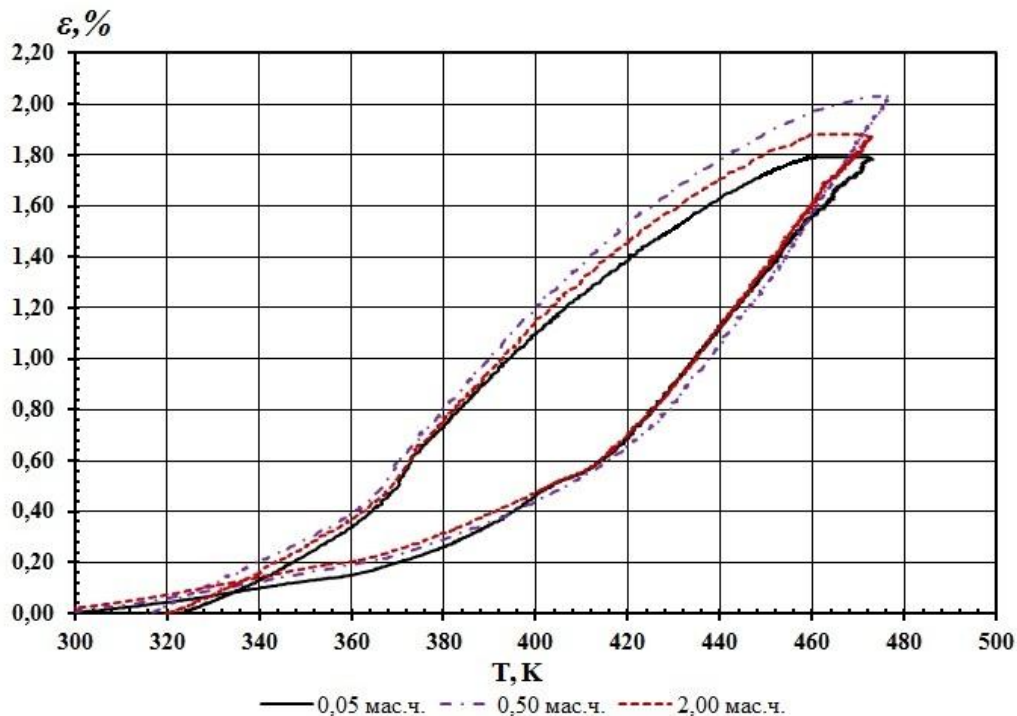


Рисунок 4 – Дилатометричні криві КМ із різним вмістом мікродисперсного наповнювача СПШ

Таблиця 2 – Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) КМ при різних температурних діапазонах дослідження

№	Вміст наповнювача СПШ, q , мас.ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}, \text{ K}^{-1}$			
		Температурні діапазони дослідження, $\Delta T, \text{ K}$			
		303...323	303...373	303...423	303...473
1	—	6,3	6,8	9,9	10,9
2	0,05	2,8	3,0	5,8	11,0
3	0,50	2,2	2,8	5,1	10,5
4	2,00	2,0	2,9	5,0	10,3

На основі дилатометричних кривих (рис. 4) розраховували температуру склування розроблених композитів. Попередньо встановлено [7], що температура склування епоксидної матриці становить $T_c = 327$ К. Ведення мікрочасток у кількості $q = 0,05$ мас.ч. забезпечує підвищення температури склування матеріалу до $T_c = 335$ К, що свідчить про поліпшення когезійної міцності композиту порівняно з ненаповненим полімером. Композит, що містить частки СПШ у кількості $q = 0,50$ мас.ч., характеризується дещо меншою температурою склування ($T_c = 330$ К), хоча вона є вищою від аналогічного показника для полімерної матриці. При цьому встановлено, що найвищою температурою

склування ($T_c = 336$ К) відзначається матеріал, який містить наповнювач у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Отримані дані добре узгоджуються з динамікою теплостійкості КМ залежно від вмісту наповнювача, що свідчить про достовірність отриманих результатів випробувань.

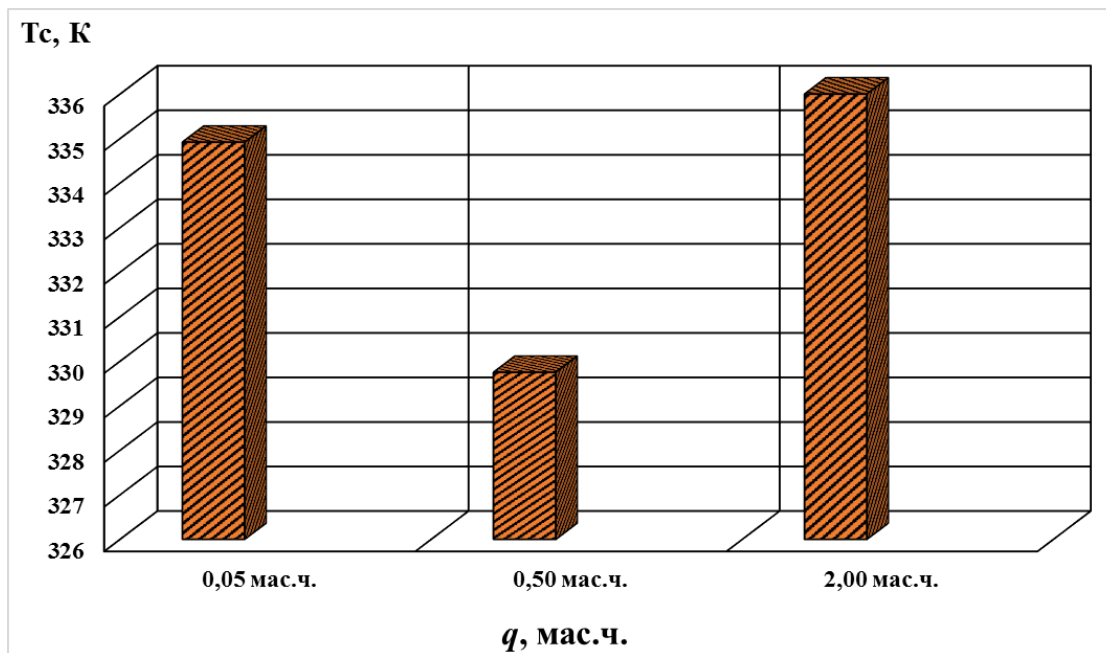
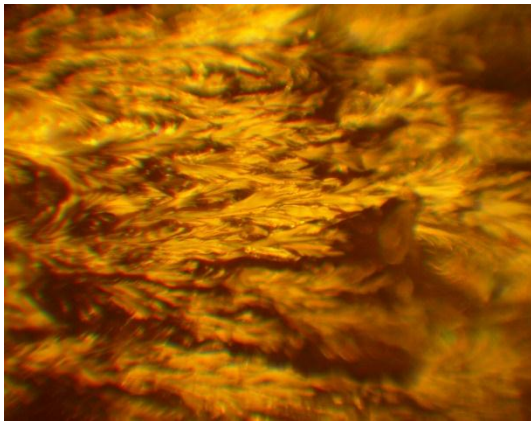


Рисунок 5 – Залежність температури склування КМ від вмісту наповнювача СПШ

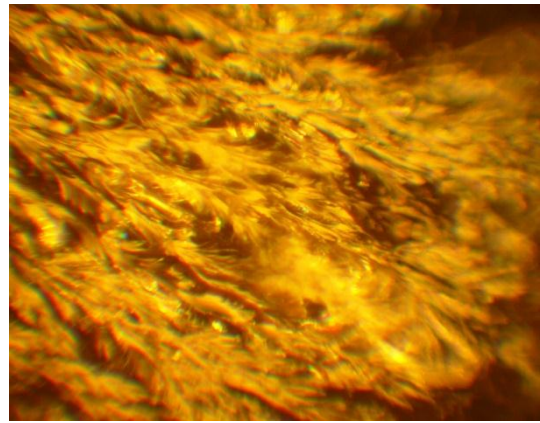
На завершальному етапі з метою додаткового підтвердження достовірності отриманих результатів досліджували фрактограми зламу розроблених композитів. Методом оптичної мікроскопії експериментально встановлено нерівномірність поверхні сколювання, наявність кратерів і заглиблень у зразках композитів, що містять наповнювач у кількості $q = 0,05$ мас.ч. (рис. 6, а-г). Це свідчить про формування напруженого стану у таких гетерогенних системах, що приводить до передчасного руйнування фізичних і хімічних зв'язків у структурі розроблених композитів в умовах впливу теплового поля.

Для КМ з частками СПШ у кількості $q = 0,50$ мас.ч. (рис. 6, д-ж) спостерігали наступне. Поверхня зламу таких зразків є розрихленою, відзначаються пелюсткові утворення, що свідчить про нерівномірність макроструктури у композитах. Відповідно, можна стверджувати про наявність градієнту напружень у КМ, що пришвидшує їх старіння, особливі під дією зовнішніх теплових навантажень.

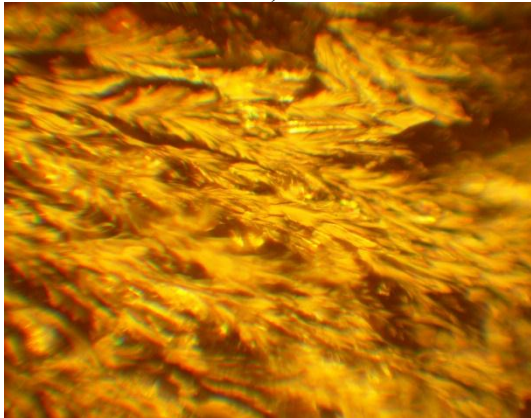
Навпаки, композит, який містить частки мікронаповнювача за критичного вмісту характеризується пологою поверхнею зламу (рис. 6, з-й). При цьому слід виокремити в'язкий характер руйнування матеріалу, що опосередковано свідчить про поліпшену його когезійну міцність. Отримані дані добре узгоджуються з результатами наведених вище експериментальних досліджень. Тобто, якісний аналіз фрактограм зламу підтверджує динаміку залежностей теплофізичних властивостей у комплексі від вмісту активної мікродисперсної добавки у епоксидній матриці.



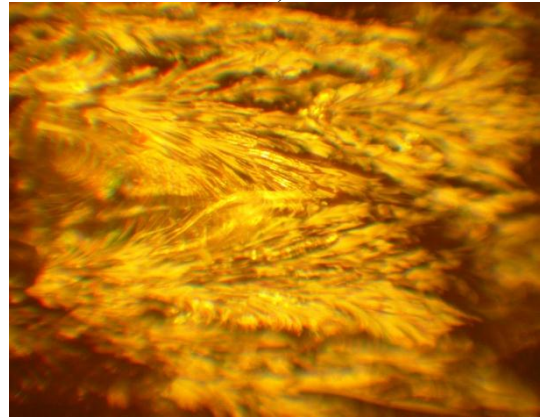
а)



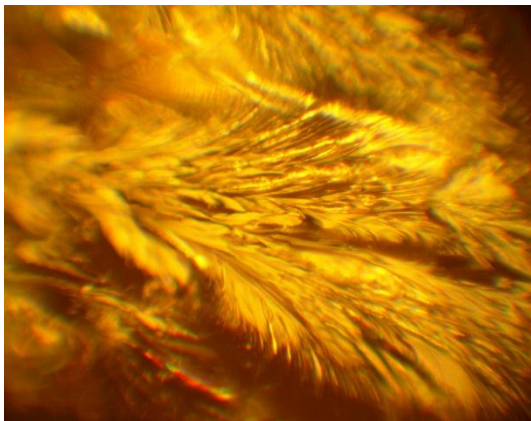
б)



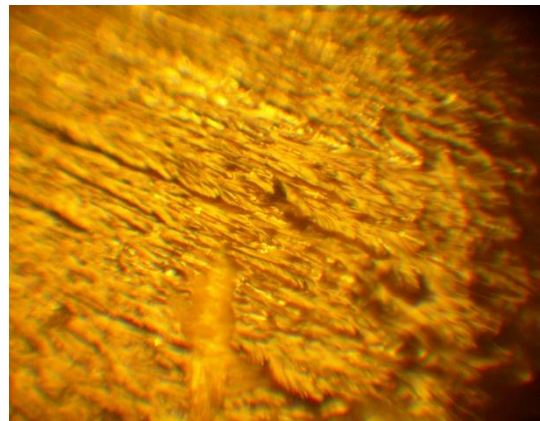
в)



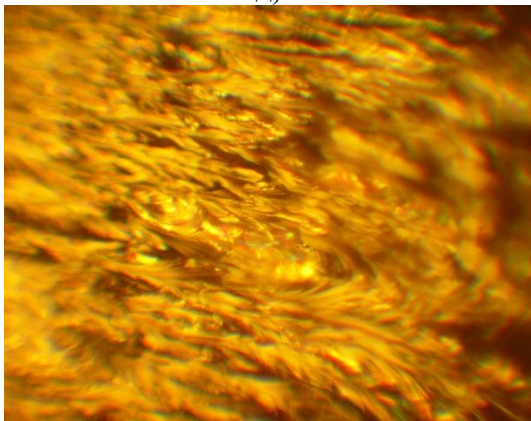
г)



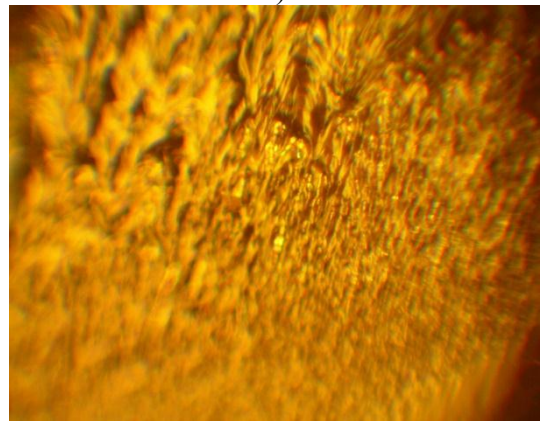
д)



е)



є)



ж)

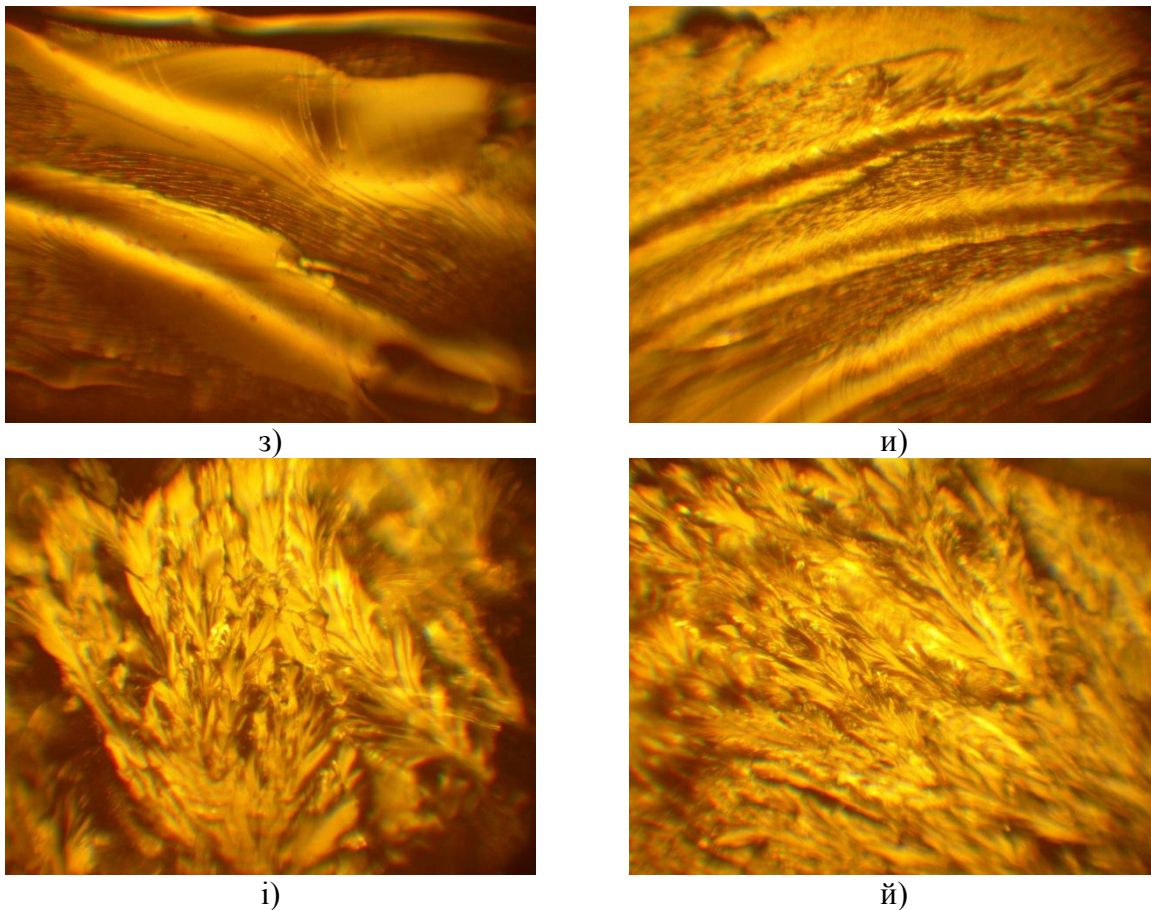


Рисунок 6 – Фрактограми зламу КМ із різним вмістом мікродисперсного наповнювача СПШ, q , мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 ($\times 50$): а-г) 0,05; д-ж) 0,50; з-й) 2,00

Висновки. На основі результатів дослідження теплофізичних властивостей композитів залежно від вмісту мікродисперсного наповнювача синтезованої порошкової шихти можна констатувати наступне.

1. Експериментально встановлено критичний вміст мікродисперсного наповнювача синтезованої порошкової шихти у епоксидному зв'язувачі при формуванні композитів з поліпшеними теплофізичними властивостями. Доведено, що максимум показників теплостійкості ($T = 369$ К) композитів на кривій залежності « $T - q$ » спостерігали за вмісту наповнювача у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Можна стверджувати, що за такого критичного вмісту наповнювача у композиті формується міцнозшита структура полімеру зі значною кількістю хімічних зв'язків як у поверхневих шарах навколо часток, так і у об'ємі полімеру.

2. За результатами дослідження термічного коефіцієнту лінійного розширення (ТКЛР) розроблених композитів доведено, що у діапазоні температурних випробувань $\Delta T = 303 \dots 323$ К введення наповнювача синтезованої порошкової шихти у кількості $q = 0,50 \dots 2,00$ мас.ч. приводить до зменшення ТКЛР від $\alpha = 6,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ до $\alpha = (2,0 \dots 2,2) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Можна стверджувати, що такий вміст часток є оптимальним для формування композитів з поліпшеними теплофізичними властивостями. Додатково встановлено, що у діапазоні температур $\Delta T = 303 \dots 423$ К, які вищі за температуру склування матеріалів, найменшим значенням ТКЛР характеризуються композити із вмістом часток у кількості $q = 2,00$ мас.ч. При цьому формується матеріал, ТКЛР якого майже у 2 рази менший порівняно з епоксидною матрицею (ТКЛР зменшується від $\alpha = 9,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ до $\alpha = 5,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$).

3. На основі дилатометричних кривих розраховували температуру склування розроблених композитів. Встановлено, що найвищою температурою склування відзначається матеріал, який містить наповнювач у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Формування такого композиту забезпечує збільшення температури склування від $T_c = 327$ К (для

епоксидної матриці) до $T_c = 336$ К. Отримані дані добре узгоджуються з динамікою теплостійкості композитів залежно від вмісту наповнювача, що свідчить про достовірність отриманих результатів випробувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Букетов А. В., Негруца Р. Ю., Яцюк В. М. Вплив модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'- карбонової кислоти на адгезійні властивості та залишкові напруження захисних полімерних покриттів. *Наукові нотатки*. Луцьк : ЛНТУ, 2019. Вип. 65. С. 30-38.
2. Buketov A. V., Saprionova A. V., Brailo M. V., Sotsenko V. V., Yurenin K. Yu., Antonio B. Polymer composites for improving the resource of pipeline transport. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2018. Vol. 5, Issue 2. P. 63–68.
3. Buketov A. V., Bezbakh O. M., Yatsyuk V. M., Negrutza R. Yu. The study of the impact of 4,4'-methylenebis (2-methoxyaniline) on adhesive properties of the epoxy matrix for protective coatings of transport means. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2018. Vol. 5, Issue 2. P. 45–51.
4. Букетов А. В., Сметанкин С. А. Влияние модификатора 4,4-сульфонилбис (4,1-фенилен)бис(п,п-диэтилдитиокарбамата) на адгезионные свойства эпоксидной матрицы. *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2018. Т.24. № 2. С. 242–265.
5. Букетов А. В., Браїло М. В., Якущенко С. В., Яцюк В. М. Розроблення епоксиполіефірної матриці з поліпшеними адгезійними та фізико-механічними властивостями зі застосуванням ізоціанатного модифікатора. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2019. 55, № 2. С. 31–36.
6. Buketov A., Brailo M., Yakushchenko S., Saprionov O., Vynar V., Bezbakh O., Negrutza R. Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 63. N. 3. P. 171–182. <https://doi.org/10.3311/PPme.13161>.
7. Buketov A. V., Smetankin S. A., Akimov A. V., Kulinich A. G. Epoxy composite modifications influence on the energy activation's of thermal destruction. *Funct. Mater.* 2019; 26 (2), 403-411. doi.org/10.15407/fm26.02.403.
8. Buketov A., Saprionov O., Brailo M., Stukhlyak D., Yakushchenko S., Buketova N., Saprionova A., Sotsenko V. The use of complex additives for the formation of corrosion- and wear-resistant epoxy composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2019, Article ID 8183761, 5 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8183761>.
9. Sizonenko O., Baglyuk G., Torpakov A. and other. Variation in the particle size of Fe-Ti-B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. Vol 51, Issue 3. P. 129–136.
10. Syzonenko O., Sheregii E., Prokhorenko S. and other. Method of preparation of blend for aluminium matrix. *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials*. 2017. Vol. 11, Issue 4. P. 171–173.
11. Сизоненко О. Н., Трегуб В. А., Тафтай Э. И. и др. Моделирование и анализ электроразрядных процессов в слое порошка Ti в керосине. *Вісник українського матеріалознавчого товариства*. Київ, 2014. Вип. 7. С. 55–61.

REFERENCES

1. Buketov, A. V., Negrutza, R. Yu. & Yatsiuk, V. M. (2019). Vplyv modyfikatora 2,4-dyaminoazobenzol-4- karbonovoi kysloty na adheziini vlastyvosti ta zalyshkovi napruzhennia zakhysnykh polimernykh pokryttiv. *Naukovi notatky*. Lutsk : LNTU, 65, 30–38.
2. Buketov, A. V., Saprionova, A. V., Brailo, M. V., Sotsenko, V. V., Yurenin, K. Yu., & Antonio B. (2018). Polymer composites for improving the resource of pipeline transport. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, Vol. 5, Issue 2, 63–68.

3. Buketov, A. V., Bezbakh, O. M., Yatsyuk, V. M. & Negrutza, R. Yu. (2018). The study of the impact of 4,4'-methylenebis (2-methoxyaniline) on adhesive properties of the epoxy matrix for protective coatings of transport means. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, Vol. 5, Issue 2, 45–51.
4. Buketov, A. V. & Smetankyn, S. A. (2018). Vliyanie modifikatora 4,4-sul'fonilbis (4,1-fenilen)bis(n,n-diehtilditiokarbamata) na adgezionnihe svoystva ehpoksidnoy matricih. *Mekhanika kompozicionnykh materialov i konstrukciy*, 24, Is. 2, 242–265.
5. Buketov, A. V., Brailo, M. V., Yakushchenko, S. V. & Yatsiuk, V. M. (2019). Rozroblennia epokspoliefirnoi matrytsi z polipshenymy adheziinymy ta fizyko-mekhanichnymy vlastyvoistamy zi zastosuvanniam izotsianatnoho modyfikatora. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, 55, # 2, 31–36.
6. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S., Saprnov, O., Vynar, V., Bezbakh, O. & Negrutza R. (2019). Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, Vol. 63. N. 3, 171–182. doi.10.3311/PPme.13161.
7. Buketov A. V., Smetankin S. A., Akimov A. V., Kulinich A. G. (2019). Epoxy composite modifications influence on the energy activation's of thermal destruction. *Funct. Mater*; 26 (2), 403–411. doi.org/10.15407/fm26.02.403.
8. Buketov A., Saprnov O., Brailo M., Stukhlyak D., Yakushchenko S., Buketova N., Saprnova A., Sotsenko V. (2019). The use of complex additives for the formation of corrosion- and wear-resistant epoxy composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2019, Article ID 8183761, 5 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/8183761>.
9. Sizonenko O., Baglyuk G., Torpakov A. et al. (2012). Variation in the particle size of Fe-Ti-B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. Vol 51, Issue 3. P. 129–136.
10. Syzonenko O., Sheregii E., Prokhorenko S. et al. (2017). Method of preparation of blend for aluminium matrix. *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials*. Vol. 11, Issue 4. P. 171–173.
11. Sizonenko O. N, Tregub V. A., Taftayj Eh. I. et al. (2014). Modelirovanie i analiz ehlektrozryadnykh processov v sloe poroshka Ti v kerosine. *Visnik ukrains'kogo materialoznavchogo tovaristva*. Kyiv, Vip. 7, 55–61.

Букетов А.В., Сизоненко О. Н., Безбах О. М., Букетова Н. Н., Лыпян Е. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИНТЕЗИРОВАННОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДОМ ПОРОШКОВОЙ ШИХТЫ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ РЕМОНТА СУДОВ

В работе показаны перспективы использования новых материалов на полимерной основе. Учитывая, что разработанные композиты достаточно эффективно использовать для защиты оборудования, которое эксплуатируют при повышенных температурах, проведено исследование по определению влияния природы и содержания синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой шихты на теплофизические свойства эпоксидных композитов. В качестве основного компонента для связующего при формировании композитов выбран эпоксидный диановый олигомер. Для сшивания эпоксидных композиций использован отвердитель полиэтиленполиамин, что позволяет отверждать материалы при комнатных температурах. Обоснован выбор синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой шихты для улучшения теплофизических свойств разработанных материалов. Исследован термический коэффициент линейного расширения и теплостойкость эпоксидных композитов. На основе проведенных испытаний теплофизических свойств, наполненных синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой шихтой, установлены допустимые пределы температуры, при которых возможно использовать разработанные композиты.

Ключевые слова: эпоксидный композит, теплостойкость, термический коэффициент линейного расширения, усадка.

Buketov A. V., Sizonenko O. M., Bezbakh O. M., Buketova N. M., Lypian Ye. V. RESEARCH OF THE IMPACT OF SYNTHESIZED BY HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL DISCHARGE POWDER CHARGE ON HEAT-TRANSFER PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES USED FOR SHIP REPAIR

The prospects of polymer composites utilization for major overhaul or current repairs have been proven. This enables considerable improvement of stress-related, heat-transfer, anticorrosive and other operational properties of complexes and mechanisms under static and dynamic loads stress. The utilization of polymer composite materials (CM) based on epoxy binders, dispersed and fibrous fillers is of great importance. Such materials possess good handling properties, when applied to parts with intricate shape of surface, and high operational properties, including heat-transfer properties, under the specified operating contingencies. It proves to be impossible to develop new materials with improved heat-transfer properties without carrying out research of their operational characteristics. Unfortunately, insufficient attention has been paid to study the impact of interfacial phenomena in formation of composites on their properties, especially with microdispersed fillers introduction. Physical and chemical processes happening during formation of materials at the interface, cover the entire complex of reactions of interaction of oligomer macromolecules with the specific sites on the surface of the filler. This gives places to the formation of materials with high operational characteristics, which are controlled by technological modes of composites formation.

The prospects of polymer-based materials utilization have been proved in the current study. Taking into account the fact, that developed composites are quite effective when used for protection of equipment, which is operated at elevated temperatures, the research has been conducted in order to determine the impact of nature and content of synthesized by high-voltage electrical discharge powder charge on heat-transfer properties of epoxy composites. Epoxy dian oligomer has been selected to be the main component for the binder during composites formation. Polyethylenepolyamine hardener was used for crosslinking of epoxy compositions, which allows materials to be hardened at room temperatures. The selection of synthesized by high-voltage electrical discharge powder charge for improving the heat-transfer properties of developed materials has been proved. Thermal linear expansion coefficient and heat resistance of epoxy composites have been investigated.

The critical filler concentration has been established, the introduction of which reduces the thermal linear expansion coefficient of the developed composites when compared to the parent epoxy matrix. Thermal range analysis is of scientific and practical interest, which covers the glass transition area of polymer composites. It has been shown that at the given temperature range, the thermal linear expansion coefficient of the materials is also considerably lower when compared to the parent matrix.

In terms of conducted tests of heat-transfer properties of materials filled with the synthesized by high-voltage electrical discharge powder charge, the permissible temperature limits for developed composites utilization have been established.

Key words: epoxy composite, heat resistance, thermal linear expansion coefficient, shrinkage.

© Букетов А. В., Сизоненко О. М., Безбах О. М., Букетова Н. М., Липян Є. В.

Статтю прийнято
до редакції 3.09.19

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОРГАНОПЛАСТИКІВ, АРМОВАНИХ ХІМІЧНИМИ ВОЛОКНАМИ, МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Єрєміна К. А., с.н.с. кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету

Томіна А.-М. В., н.с. кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету

Буря О. І., к.т.н., проф., професор кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету

Томін С. В., магістр кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету

Методом математичного планування експерименту - ортогональним центральним композиційним плануванням 2-го порядку типу 3^2 - досліджено вплив режимів експлуатації на трибологічні властивості органопластиків на основі ароматичного поліаміду фенілон марки С-1, армованих поліакрилонітрильним (Лола), поліоксидіазольним (Оксалон), полісульфонамідним (Танлон) волокнами. Визначено чинники, які впливають на інтенсивність лінійного зношування та коефіцієнт тертя розроблених матеріалів. Встановлено, що найбільший вплив на зносостійкість та коефіцієнт тертя органопластиків чинить навантаження, при цьому розроблені матеріали залишаються працездатними при факторі $Pv = 3$ МПа·м²/с. Знайдено математичні моделі, у вигляді поліномів другого порядку, що адекватно описують залежність параметрів оптимізації розроблених матеріалів від швидкості ковзання та навантаження, а також дозволяють оптимізувати роботу вузлів, укомплектованих органопластиками.

Ключові слова: органопластики, режим експлуатації, методи математичного планування експерименту, зносостійкість, коефіцієнт тертя.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.154-162

Постановка проблеми. У процесі експлуатації основною причиною виходу з ладу обладнання сільськогосподарської, текстильної, металургійної техніки є зношування їхніх трибовузлів [1]. Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) натомість традиційним матеріалам, використовуваним у трибовузлах (бронзи, сталі, чавуну тощо) дозволяє вирішити дану проблему: підвищити зносостійкість (у 10-20 разів) та надійність (у 1,5 рази) системи. Ароматичний поліамід фенілон є одним із перспективних полімерів для створення композитів триботехнічного призначення на його основі. Проте недостатня визначеність впливу навантаження та швидкості ковзання на трибологічні показники ПКМ [2] стримує їхнє широке впровадження як деталей рухомих з'єднань обладнання та механізмів.

Вирішення задачі. Використання методів математичного планування для визначення впливу режимів експлуатації на триботехнічні характеристики дозволить вирішити дану проблему. Але, як правило, прогнозування роботи вузлів тертя машин та механізмів, укомплектованих деталями з ПКМ, у реальних умовах експлуатації не вдається в повній мірі описати лінійними регресійними закономірностями. Для підвищення точності опису необхідно використовувати математичні моделі більш високого порядку. З цією метою використовують [3] ортогональне центральне композиційне планування, застосування якого дозволить визначити ті екстремальні умови роботи при яких запропоновані склади ПКМ будуть ефективно працювати [4].

Формулювання мети дослідження. Враховуючи зазначене, мета даної роботи полягала у розробці математичних моделей процесів зношування рухомих з'єднань техніки, при використанні статистичних методів планування експерименту на основі результатів проведеного комплексу трибологічних досліджень в умовах тертя без змащення за схемою «диск-колодка». Отримані математичні моделі дозволять визначити екстремальні умови

роботи (критичну швидкість (v , м/с) та навантаження (P , МПа)) для ефективної працездатності розроблених ПКМ.

Викладення основного матеріалу дослідження. Як полімерну матрицю для створення органопластиків триботехнічного призначення використовували ароматичний поліамід марки С-1. ПКМ на його основі, зазвичай, характеризуються високими показниками твердості, міцності та жорсткості, стабільністю фізико-механічних показників при підвищених температурах (до 523 К) [4]. Як наповнювач обрали органічні волокна: поліоксидазольне (Оксалон, виробництво «Світлогорськ Хімволокно», Білорусь), поліакрилонітрильне (Лола, Всеросійський науково-дослідний інститут полімерних волокон (ВНДПВ), Росія) та полісульфонамідне (Танлон Т700, Шанхай).

Приготування органопластиків (ОП) на основі фенілону, що містять 5–20 мас. % волокна (довжина 3-7 мм), здійснювали методом сухого змішування в апараті з обертальним електромагнітним полем (0,12 Тл) за допомогою феромагнітних часток. В подальшому, частки вилучали з приготовлених сумішей методом магнітної сепарації. Формування готових виробів проводили методом компресійного пресування.

Триботехнічні характеристики в умовах тертя без змащення за схемою «диск-колодка» вивчали на машині тертя СМЦ-2 у діапазоні навантажень 0,5-1,5 МПа, швидкості ковзання 0,5-1,5 м/с. Як контртіло використовували сталь 45 (45-48 HRC, $R_a=0,32$ мкм).

Для постановки математичного експерименту необхідно визначитися з вибором цільової функції параметрів, що оптимізуються. З [1] відомо, що на процеси тертя та зношування вузлів машин і механізмів найбільше впливають швидкість та шлях ковзання, навантаженість трибовузла. Враховуючи, що як параметри оптимізації розглядали інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя, які характеризують матеріали незалежно від шляху тертя, у ході досліджень останнім знехтували. Таким чином, вирішальними факторами впливу на триботехнічні характеристики органопластиків обрані: швидкість ковзання (X_1) та навантаження (X_2).

Для спрощення розрахунків значення дозувань досліджуваних факторів перетворювали в умовні одиниці і встановлювали таким чином, щоб при перекладі в умовний масштаб вони відповідали -1; 0; +1 за формулою:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{h}$$

де x_i – кодоване значення фактору, X_i та X_{i0} – верхній і основний рівні варіювання факторів, відповідно, h – крок варіювання факторів.

Обґрунтований вибір параметрів, які впливають на досліджуваний процес, а також інтервалів їх варіювання – запорука успішно проведеної роботи. При цьому необхідно враховувати, що при занадто малому кроці варіювання змінних значення деяких коефіцієнтів рівняння можуть виявитись незначущими, тобто збігтися з похибками вимірювань. Тому крок варіювання становив 0,5 одиниць. Результати розрахунків дозувань подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для планування експерименту

Параметр	Символ	Крок варіювання	Рівні варіювання					
			+а	+1	0	-1	-а	
Швидкість ковзання	X_1	v , м/с ²	0,5	1,5	1,5	1	0,5	0,5
Навантаження	X_2	P , МПа	0,5	2	2	1,5	1	1

Виходячи з постановки завдання, з метою економії часу дослідження, прийнято ортогональне центральне композиційне планування експерименту 2-го порядку типу 3^2 , яке дозволяє отримати роздільні оцінки для коефіцієнтів рівняння регресії [3]. Вимірювання проводили на п'яти рівнях кожного з параметрів (табл. 2) для ОП, що містять 15 мас.% органічного волокна (Оксалон, Танлон чи Лола).

Таблиця 2 – Матриця планування ортогонального центрального композиційного планування експерименту

Номер досліджу		Умовний масштаб						Натуральний масштаб	
		x_0	x_1	x_2	x_1x_2	x_1'	x_2'	$\nu, \text{м/с}^2$	$P, \text{МПа}$
Ядро плану	1	1	1	1	1	0,333	0,333	1,5	2
	2	1	-1	1	-1	0,333	0,333	0,5	2
	3	1	1	-1	-1	0,333	0,333	1,5	1
	4	1	-1	-1	1	0,333	0,333	0,5	1
	5	1	1	0	0	0,333	-0,667	1,5	1,5
Зоряні точки	6	1	-1	0	0	0,333	-0,667	0,5	1,5
	7	1	0	1	0	-0,667	0,333	1	2
	8	1	0	-1	0	-0,667	0,333	1	1
Центр плану	9	1	0	0	0	-0,667	-0,667	1	1,5

Згідно до прийнятого плану експерименту всього було проведено $N = N_{я} + 2n + 1 = 9$ дослідів, де $N_{я}$ – кількість дослідів у ядрі плану, n – кількість факторів. Кожний дослід повторювали двічі ($k = 2$) у рандомізованому порядку для виключення системних похибок. Експериментальні дані дослідів подано в табл. 3 у вигляді параметрів оптимізації (y_1, y_2).

Таблиця 3 – Дослідні значення параметрів оптимізації

№	Інтенсивність зношування, 10^7						Коефіцієнт тертя					
	Лола		Оксалон		Танлон		Лола		Оксалон		Танлон	
	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2
1	0,64	0,65	1,79	1,60	9,11	9,30	0,48	0,46	0,42	0,44	0,42	0,44
2	0,55	0,53	0,27	0,37	3,20	3,39	0,34	0,34	0,41	0,39	0,33	0,33
3	0,32	0,32	0,18	0,23	2,89	2,40	0,20	0,20	0,38	0,40	0,36	0,38
4	0,08	0,07	0,09	0,09	0,41	0,30	0,12	0,14	0,26	0,30	0,19	0,17
5	0,51	0,53	0,75	0,67	7,12	7,42	0,31	0,29	0,41	0,43	0,36	0,40
6	0,41	0,42	0,22	0,06	1,80	1,39	0,19	0,19	0,37	0,39	0,28	0,26
7	0,59	0,59	0,69	0,77	7,95	7,42	0,39	0,41	0,42	0,42	0,40	0,40
8	0,12	0,12	0,29	0,12	0,62	0,32	0,18	0,18	0,31	0,29	0,34	0,32
9	0,44	0,42	0,34	0,58	6,11	6,40	0,26	0,24	0,40	0,40	0,33	0,35

Математичний опис даних процесів пропонувалось шукати у вигляді рівнянь регресії, які визначають залежність досліджуваних процесів від ν і P та подані у вигляді поліному другого порядку:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=j}^n b_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii}^2 x_i^2.$$

де: y – розрахункове значення параметру оптимізації, b_i, b_{ij} і b_{ii} – коефіцієнти рівняння регресії.

На підставі отриманих експериментальних даних розраховували середнє значення функції відгуку \bar{y}_j за формулою:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{ji}, \quad j = 1, 2, \dots, N.$$

Середні значення експериментальних даних подано в табл. 4

Таблиця 4 – Середнє та розрахункове значення параметрів оптимізації

№	Інтенсивність зношування, 10^7						Коефіцієнт тертя					
	Лола		Оксалон		Танлон		Лола		Оксалон		Танлон	
	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p	\bar{y}_j	y_j^p
1	0,64	0,65	1,69	1,54	9,21	10,36	0,47	0,46	0,43	0,43	0,43	0,43
2	0,54	0,57	0,32	0,22	3,29	3,92	0,34	0,33	0,40	0,41	0,33	0,34
3	0,32	0,30	0,21	0,16	2,64	2,97	0,20	0,20	0,39	0,38	0,37	0,38
4	0,08	0,08	0,09	0,10	0,35	0,16	0,13	0,12	0,28	0,28	0,18	0,20
5	0,52	0,55	0,71	0,74	7,27	7,76	0,30	0,29	0,42	0,44	0,38	0,39
6	0,41	0,40	0,14	0,06	1,59	3,14	0,19	0,19	0,38	0,38	0,27	0,26
7	0,59	0,57	0,73	0,88	7,69	7,14	0,40	0,40	0,42	0,41	0,40	0,41
8	0,12	0,15	0,21	0,13	0,47	1,56	0,18	0,17	0,30	0,32	0,33	0,32
9	0,43	0,44	0,46	0,40	6,25	5,45	0,25	0,24	0,40	0,40	0,34	0,36

Дисперсії відтворюваності розраховували за формулою:

$$S_b^2 = \frac{1}{N(k-1)} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N (y_{ji} - \bar{y}_j)^2,$$

а дисперсії паралельних дослідів S_j^2 за формулами:

$$S_{bi}^2 = \frac{1}{6} S_b^2; \quad S_{bij}^2 = \frac{1}{4} S_b^2; \quad S_{bii}^2 = \frac{1}{2} S_b^2;$$

$$S_{b'0}^2 = \frac{1}{9} S_b^2; \quad S_{b0}^2 = S_{b'0}^2 + \frac{4}{9} S_{bii}^2.$$

Перевірку однорідності отриманих дисперсій паралельних дослідів проводили за критерієм Кохрена [5]:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{i=1}^k S_j^2}.$$

Розрахункові значення порівнювали з табличними ($G_{табл.}$) для ступеня свободи $f_1 = k - 1 = 2$ та $N = 9$ при довірчій вірогідності $P = 0,95$.

Для отриманих дисперсій паралельних дослідів G_p менші (див. табл. 5) за $G_{табл.} = 0,47$ [6]. Таким чином, дисперсії паралельних дослідів однорідні.

На підставі ортогонального композиційного планування експерименту були обчислені коефіцієнти регресії у відповідності до формул:

$$b_i = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i, \quad b_{ij} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N x_{ij} \bar{y}_i, \quad b_{ii} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_i')^2 \bar{y}_i,$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_0 \bar{y}_i - \frac{2}{3} (b_{11} + b_{22}).$$

Таблиця 5 – Розрахункові значення для оцінки адекватності рівнянь за критеріями Кохрена та Фішера

Рівняння	G_p	S_b^2	$S_{ад}^2$	F_p
(1) / (7)	0,2000	0,0008	0,00024	3,375
(2) / (8)	0,3181	0,0005	0,00145	3,008
(3) / (9)	0,4000	0,0020	0,00037	5,400
(4) / (10)	0,2092	0,0561	0,01924	2,916
(5) / (11)	0,3831	0,0019	0,00044	4,277
(6) / (12)	0,2721	0,4741	1,65577	3,493

Примітка: рівняння (1, 2, 7, 8) отримані для ОП, армованих волокном Лола, (3, 4, 9, 10) – Оксалон, (5, 6, 11, 12) – Танлон.

Після розрахунку всіх коефіцієнтів рівняння прийняли вигляд:

$$f = 0,266 + 0,052 x_1 + 0,117 x_2 + 0,015 x_1x_2 - 0,005 x_1x_1 + 0,04 x_2x_2; \quad (1)$$

$$I_h = 0,414 + 0,075 x_1 + 0,210 x_2 - 0,036 x_1x_2 + 0,038 x_1x_1 - 0,074 x_2x_2; \quad (2)$$

$$f = 0,384 + 0,030 x_1 + 0,047 x_2 - 0,020 x_1x_2 + 0,010 x_1x_1 - 0,030 x_2x_2; \quad (3)$$

$$I_h = 0,470 + 0,343 x_1 + 0,374 x_2 + 0,313 x_1x_2 + 0,061 x_1x_1 + 0,106 x_2x_2; \quad (4)$$

$$f = 0,341 + 0,067 x_1 + 0,047 x_2 - 0,023 x_1x_2 - 0,031 x_1x_1 + 0,010 x_2x_2; \quad (5)$$

$$I_h = 4,717 + 2,313 x_1 + 2,787 x_2 + 0,905 x_1x_2 - 0,742 x_1x_1 - 1,098 x_2x_2. \quad (6)$$

Перевірку статичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії оцінювали на основі розрахунку довірчих інтервалів з урахуванням дисперсії, яка характеризує похибки визначення коефіцієнтів рівняння. Довірчий інтервал розраховували за критерієм Стьюдента, який обрано згідно до прийнятих ступенів свободи (f_1, f_2) та рівня значущості (0,95). Для ортогонального центрального композиційного планування експерименту похибки коефіцієнтів розраховуються за формулою:

$$t = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}.$$

Довірчий інтервал:

$$\Delta b_i = t_{кр} \cdot S_{b_i}.$$

Критичне значення $t_{кр}$ обирали для числа ступенів свободи $N(k-1) = 9$ та прийнятого рівня значущості 0,95 [6]. Прийнято вважати, що коефіцієнт регресії значущий, якщо виконується умова: $t_{кр} < t$.

Коефіцієнти рівнянь (1–6), окрім b_{11} при коефіцієнтах x_1x_1 рівнянь (4, 6), статистично значущі, тому рівняння набудуть остаточного вигляду:

$$f = 0,266 + 0,052 x_1 + 0,117 x_2 + 0,015 x_1x_2 - 0,005 x_1x_1 + 0,04 x_2x_2; \quad (7)$$

$$I_h = 0,414 + 0,075 x_1 + 0,210 x_2 - 0,036 x_1x_2 + 0,038 x_1x_1 - 0,074 x_2x_2; \quad (8)$$

$$f = 0,384 + 0,030 x_1 + 0,047 x_2 - 0,020 x_1x_2 + 0,010 x_1x_1 - 0,030 x_2x_2; \quad (9)$$

$$I_h = 0,470 + 0,343 x_1 + 0,374 x_2 + 0,313 x_1x_2 + 0,106 x_2x_2; \quad (10)$$

$$f = 0,341 + 0,067 x_1 + 0,047 x_2 - 0,023 x_1x_2 - 0,031 x_1x_1 + 0,010 x_2x_2; \quad (11)$$

$$I_h = 4,717 + 2,313 x_1 + 2,787 x_2 + 0,905 x_1x_2 - 1,098 x_2x_2. \quad (12)$$

Отримані рівняння перевіряли на адекватність. Для цього оцінювали відхилення значень параметру оптимізації y_j^p , розрахованого за рівняннями (7–12), від експериментальних $\overline{y_j}$ для кожного з дослідів експерименту. Це дало змогу визначити дисперсію адекватності для рівного числа паралельних дослідів за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{j=1}^k (\overline{y_j} - y_j^p)^2,$$

де B – кількість значущих коефіцієнтів рівняння.

Розрахункові значення параметра оптимізації подано в табл. 5.

Для визначення адекватності математичних описів (7–12), після розрахунку коефіцієнтів регресії, перевіряли ступінь відповідності отриманих моделей теоретичній формі зв'язку між досліджуваними та вихідними параметрами. З цією метою використовували критерій Фішера (F_p), який являє собою відношення дисперсії адекватності $s_{a\partial}^2$ до дисперсії відтворюваності досліджуваного s_b^2 (табл. 5) та розраховується за формулою:

$$F_p = \frac{S_{a\partial}^2}{S_b^2}.$$

Слід зазначити, що при розрахунку критерію Фішера повинна виконуватися умова $s_{a\partial}^2 > s_b^2$. Оскільки, для рівнянь (7, 9–11), ця вимога не задовольняється, для них необхідно поміняти місцями дисперсії [7]. Тоді критерій Фішера буде розраховуватись за формулою:

$$F_p = \frac{S_b^2}{S_{a\partial}^2}.$$

Оскільки при рівні значущості 0,95 для рівнянь, що розглядаються, F_p менші за табличне $F_{табл.}$ [6], то вони адекватно описують досліджуваний процес.

Кодовані значення факторів пов'язані з натуральними наступними залежностями:

$$x_1 = \frac{v-1}{0,5} = 2v - 2,$$

$$x_2 = \frac{P-1,5}{0,5} = 2P - 3.$$

Переходячи від кодованих значень факторів (x_1, x_2) до натуральних (v і P), одержимо залежність інтенсивності зношування та коефіцієнту тертя від швидкості ковзання та навантаження:

$$f = -0,02 v^2 + 0,16 P^2 + 0,06 Pv + 0,054 v - 0,306 P + 0,241; \quad (13)$$

$$I_h = 0,152 v^2 - 0,296 P^2 - 0,144 Pv + 0,062 v + 1,452 P - 1,096; \quad (14)$$

$$f = 0,04 v^2 - 0,12 P^2 - 0,08 Pv + 0,1 v + 0,534 P - 0,167; \quad (15)$$

$$I_h = 0,424 P^2 + 1,252 Pv - 1,192 v - 1,776 P + 1,494; \quad (16)$$

$$f = -0,124 v^2 + 0,04 P^2 - 0,092 Pv + 0,52 v + 0,066 P - 0,106; \quad (17)$$

$$I_h = -4,392 P^2 + 3,62 Pv - 0,804 v + 15,13 P - 12,722. \quad (18)$$

Примітка: рівняння (13, 14) отримані для ОП, армованих волокном Лола, (15, 16) – Оксалон, (17, 18) – Танлон.

Отримані математичні моделі, для наочності та подальшого аналізу, подані у вигляді поверхневої відгуку. В нашому випадку вони ілюструються поверхнями у тривимірному просторі (рис. 1).

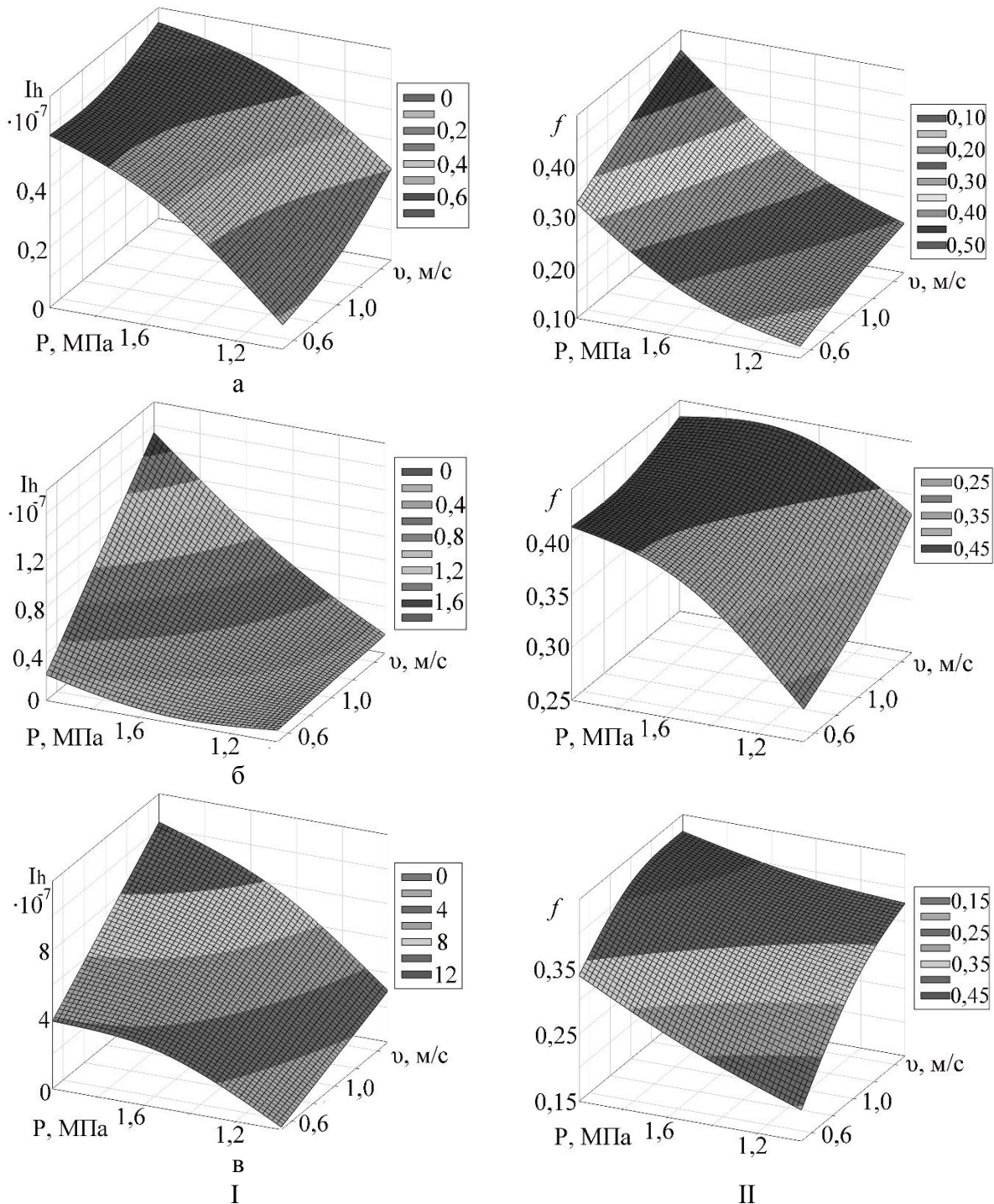


Рисунок 1 – Залежність інтенсивності зношування (I) і коефіцієнту тертя (II) органопластиків, армованих волокном Лола (а), Оксалон (б) та Танлон (в) від швидкості ковзання (v) і навантаження (P)

Як видно з рис. 1, розроблені ОП залишаються працездатними навіть при факторі $Pv = 3 \text{ МПа м}^2/\text{с}$. Аналіз отриманих математичних моделей в досліджуваному діапазоні варіювання факторів свідчить, що навантаження чинить найбільший вплив на зносостійкість та коефіцієнт тертя.

Висновки. Методом математичного планування експерименту досліджено вплив режимів експлуатації (швидкості ковзання та навантаження) на трибологічні властивості органопластиків, армованих волокнами Лола, Оксалон, Танлон. Знайдено математичні моделі, що дозволяють оптимізувати роботу вузлів, укомплектованих органопластиками, армованими поліариленовим волокном Лола:

$$f = -0,02 v^2 + 0,16 P^2 + 0,06 Pv + 0,054 v - 0,306 P + 0,241,$$

$$I_h = 0,152 v^2 - 0,296 P^2 - 0,144 Pv + 0,062 v + 1,452 P - 1,096,$$

поліоксидіазольним волокном Оксалон:

$$f = 0,04 v^2 - 0,12 P^2 - 0,08 Pv + 0,1 v + 0,534 P - 0,167,$$

$$I_h = 0,424 P^2 + 1,252 Pv - 1,192 v - 1,776 P + 1,494,$$

полісульфонамідним волокном Танлон:

$$f = -0,124 v^2 + 0,04 P^2 - 0,092 Pv + 0,52 v + 0,066 P - 0,106,$$

$$I_h = -4,392 P^2 + 3,62 Pv - 0,804 v + 15,13 P - 12,722.$$

Встановлено, що навантаження чинить найбільший вплив на зносостійкість та коефіцієнт тертя розроблених матеріалів. При цьому, органопластики залишаються працездатними навіть при факторі $Pv = 3$ МПа м²/с.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технология изготовления деталей узлов трения из полимерных композиционных материалов [Текст] / Д.А. Негров, В.Ю. Путинцев, О.А. Передельская, А.В. Наумова // Вестник ЮУрГУ. – 2015. – № 2 (15). – С. 13 – 19.
2. Исследование антифрикционных свойств армированного полиамида [Текст] / В.С. Кох-Татаренко, Н.Ф. Майникова, О.И. Кладовщикова и др. // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – №10. – С. 46 – 48.
3. Ахназарова, С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии [Текст] / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – Москва: Высшая школа, 1978. – 213 с.
4. Гайдадин, А.Н. Использование метода композиционного планирования эксперимента для описания технологических процессов: метод. указания [Текст] / А.Н. Гайдадин, С.А. Ефремова. – Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – 16 с.
5. Спиридонов, А.А. [Текст] Планирование эксперимента / А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев / Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1975. – 149 с.
6. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики [Текст] / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.
7. Блохин, В.Г. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов [Текст] / В.Г. Блохин, О.П. Глудкин, А.И. Гуров, М.Л. Ханин; ред. О.П. Глудкина // Москва: Радио и связь, 1997. – 232 с.

REFERENCES

1. Negrov, D.A., & Putincev, V.Yu., & Peredelskaya, & O.A., Naumova, A.V. (2015). Tehnologiya izgotovleniya detalej uzlov treniya iz polimernyh kompozicionnyh materialov [The manufacturing technology of parts of friction units from polymer composite materials]. *Vestnik YuUrGU. – Bulletin of the SUrSU*, 2, 13-19 [in Russian].
2. Koh-Tatarenko, V.S., Majnikova, N.F., Kladovshikova, O.I. (2016). Issledovanie antifrikcionnyh svojstv armirovannogo poliamida [Investigation of the antifriction properties of reinforced polyamide]. *Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii. Advances in – Chemistry and Chemical Technology*, 10, 46-48 [in Russian].
3. Ahnazarova, S.L., & Kafarov V.V. (1978). [Optimizaciya eksperimenta v himii i himicheskoy tehnologii] *Optimization of an experiment in chemistry and chemical technology*. Moskva: Vysshaya shkola [in Russian].
4. Gajdadin, A.N., & Efremova, S.A. (2008). *Ispolzovanie metoda kompozicionnogo planirovaniya eksperimenta dlya opisaniya tehnologicheskikh processov: metod. ukazaniya* [Using

the method of compositional planning of an experiment to describe technological processes]. Moskva: Vysshaya shkola [in Russian].

5. Spiridonov, A.A., & Vasilev N.G. (1975). *Planirovanie eksperimenta [Planning an experiment]*. Sverdlovsk: UPI im. S.M. Kirova [in Russian].

6. Bolshev, L.N., & Smirnov, N.V. (1983). *Tablicy matematicheskoy statistiki [Math Statistics Tables]*. Moskva: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury [in Russian].

7. Blohin, V.G., Gludkin, O.P., Gurov, A.I., Hanin, M.L. (1997). *Sovremennyy eksperiment: podgotovka, provedenie, analiz rezultatov [Modern experiment: preparation, conduct, analysis of the results]*. Moskva: Radio i svyaz [in Russian].

Ерёмина Е.А., Томина А.-М.В., Буря А.И., Томин С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРГАНОПЛАСТИКОВ, АРМИРОВАННЫХ ХИМИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ, МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Методом математического планирования эксперимента - ортогональным центральным композиционным планированием 2-го порядка типа 3^2 - исследовано влияние режимов эксплуатации на трибологические свойства органоластиков на основе ароматического полиамида фенилон марки С-1, армированных полиакрилонитрильным (Лола), полиоксидиазольным (Оксалон), полисульфонамидным (Танлон) волокнами. Определены факторы, которые влияют на интенсивность линейного износа и коэффициент трения разработанных материалов. Установлено, что наибольшее влияние на износостойкость и коэффициент трения органоластиков оказывает нагрузка, при этом разработанные материалы остаются работоспособными при факторе $Pv=3$ МПа·м²/с. Найдены математические модели в виде полиномов второго порядка, адекватно описывающие зависимость параметров оптимизации разработанных материалов от скорости скольжения и нагрузки, а также позволят оптимизировать работу узлов, укомплектованных органоластиком.

Ключевые слова: органоластики, режим эксплуатации, методы математического планирования эксперимента, износостойкость, коэффициент трения.

Yeriomina Ye. A., Tomina A.-M. V., Burya A.I., Tomin S. V. RESEARCH OF THE INFLUENCE OF OPERATIONAL MODES ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ORGANIC PLASTICS REINFORCED WITH CHEMICAL FIBERS BY UTILIZING THE METHOD OF MATHEMATICAL PLANNING OF THE EXPERIMENT

During operation, the main reason for the failure of agricultural, textile, metallurgical equipment is the wear of their tribotribes. The use of polymer composite materials (PCM) instead of the traditional materials used in tribotribes (bronze, steel, cast iron, etc.) can solve this problem: to increase the durability (10-20 times) and reliability (1.5 times) of the system. Aromatic polyamide phenylon is one of the most promising polymers for the creation of tribotechnical composites based on it. However, the lack of certainty of the effect of loading and sliding speed on the tribological indices of PCMs hinders their widespread introduction as parts of moving joints of equipment and mechanisms. The method of mathematical planning of the experiment - orthogonal central composite planning of the 2nd order of type 3^2 - investigated the influence of modes of operation on tribological properties of organoplastics based on aromatic polyamide phenylone brand C-1, reinforced with polyacrylonitrile (Lola), polyoxidesulfonamide (polyoxides). The factors that most influence the intensity of linear wear and the coefficient of friction of the developed materials are identified. It is established that the greatest influence on the wear resistance and friction coefficient of the organoplastics has a load, while the developed materials remain viable at the factor $Pv = 3$ MPa m²/s. Mathematical models have been found, in the form of second order polynomials, which adequately describe the dependence of the optimization parameters of the developed materials on the sliding and loading velocity, and will also allow to optimize the work of nodes, equipped with organoplastics. The influence of the operating modes (sliding and loading speed) on the tribological properties of organo-plastics reinforced with Lola, Oxalon, and Tanlon fibers was investigated by the method of mathematical planning of the experiment. Mathematical models have been found that will allow optimizing the operation of nodes, equipped with organo-plastics reinforced with Lola polyarylene fiber.

Keywords: organoplastics, mode of operation, methods of mathematical planning of the experiment, wear resistance, coefficient of friction.

© Єрьоміна К. А., Томіна А.-М. В., Буря О. І., Томін С. В.

Статтю прийнято
до редакції 25.09.19

УДК 519.6

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ КОНСТАНТ ВКЛАДИШУ ДЕЙДВУДНОГО ПІДШИПНИКА

Мотайло А. П., старший викладач кафедри природничо-наукової підготовки
Херсонська державна морська академія, ORCID: 0000-0002-4517-9580

Для вирішення задачі покращення службових характеристик складових дейдвудного пристрою використовують матеріали, зокрема, полімери, фізико-механічні властивості яких потребують додаткового вивчення. Дана робота присвячена визначенню механічних констант у вигляді модуля Юнга та коефіцієнту Пуассона вкладишу дейдвудного підшипника, який виготовлено з полімерного матеріалу Thordon cotrac. Модуль поздовжньої пружності матеріалу вкладишу отримано аналітично-експериментальним способом і випробуванням на осьове стиснення. Аналітично-експериментальний спосіб визначення модуля Юнга оснований на розрахунку місцевих деформацій, які виникають у матеріалі вкладишу під дією індентора на ділянці малих розмірів, методом скінченних елементів та шляхом механічного випробування вкладишу. Коефіцієнт Пуассона обчислено експериментально. Знайдено статистичні оцінки непрямих вимірювань механічних констант матеріалу вкладишу. Побудовано довірчі інтервали для оцінки випадкових величин значень модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона. Проведено порівняльний аналіз даних про пружні характеристики матеріалу випробуваного вкладишу дейдвудного підшипника, які надано виробником, та результатів експериментів.

Ключові слова: вкладиш дейдвудного підшипника, полімерний матеріал, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, метод скінченних елементів.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.163-171

Вступ. Полімерні матеріали (ПМ) достатньо широко використовують у суднобудуванні при створенні функціональних покриттів і виготовленні технологічного обладнання. Основними перевагами ПМ є антикорозійна стійкість, звукопоглинання, мала теплопровідність, немагнітність. Для забезпечення якості готової продукції з полімерів і надійності роботи судових конструкцій, що їх використовують, проєктні компанії, що обслуговують суднобудівну галузь, мають перевіряти інформацію про механічні властивості ПМ, яка міститься у супровідній документації готових виробів.

Одним з основних судових обладнань є дейдвудний пристрій, який складається з дейдвудної труби, кормового та носового підшипників й ущільнень. Довговічність, безпека, ремонтпридатність та екологічна чистота дейдвудних пристроїв суден залежить від використання ПМ вкладишів дейдвудних підшипників (ДП), а також з'єднань ущільнень. Отже, актуальною є задача дослідження механічних властивостей матеріалів складових дейдвудного пристрою з метою покращення їх службових характеристик.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. У роботі [1] проведено аналіз та алгоритмізацію визначення технологічних, міцнісних та експлуатаційних параметрів високополімерів, що використовують при виробництві дейдвудних пристроїв, в результаті якого якість ДП підвищено шляхом уточнення розрахункових параметрів та контролю якості ПМ.

У роботі [2] на основі аналізу умов експлуатації та конструкцій дейдвудних пристроїв різних типів, а також матеріалів вкладишів ДП, їх механіко-фізичних та механіко-хімічних властивостей проблему збільшення строків служби дейдвудних пристроїв у рамках програми захисту моря вирішено шляхом розробки оптимальних конструкцій поліамідних ДП та технології їх виробництва.

У роботі [3] вивчається залежність працездатності судового валопроводу від значення коефіцієнта жорсткості матеріалу вкладишу ДП, який характеризує механічні властивості матеріалу ДП. При цьому точність визначення коефіцієнту жорсткості безпосередньо впливає на розрахунок статичних та динамічних навантажень на судовий валопровід.

У даній роботі пропонується визначення пружних характеристик у вигляді модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона матеріалу вкладишу ДП, виготовленого з ПМ Thordon

сopмас. За даними компанії виробника Thordon Bearings Inc. [4] результати механічних випробувань усереднюються для партій готових виробів кожні 5–10 років для матеріалів, серед яких не вказаний Thordon сopмас.

Мета роботи – уточнення даних про значення механічних констант технічної документації виробника Thordon Bearings Inc., які використовують для розрахунку контактного тиску між гребним валом та вкладишем ДП, що визначає знос останнього.

Викладення основного матеріалу. Для проведення серії експериментів даного дослідження використано вкладиш ДП Thordon Compac гребного вала (рис.1), який виготовлено з еластомірного полімерного сплаву. Випробування вкладишу проведено двома способами: аналітично-експериментальним [5] та випробуванням на осьове стиснення.

Аналітично-експериментальний спосіб. Модель випробуваного вкладишу (рис. 2) піддається навантаженню P у напрямку, нормальному до поверхні, яке є результатом дії індентора на ділянці Ω , що є проекцією круга діаметра d на поверхню виробу.

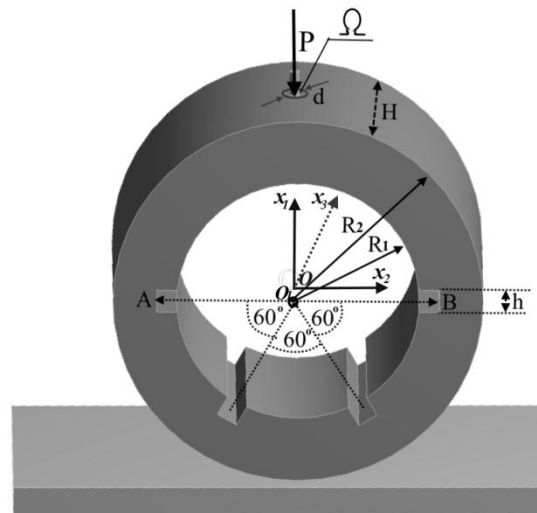


Рисунок 1 – Вкладиши ДП Thordon сopмас

Рисунок 2 – Модель випробуваного вкладишу

Лінійні переміщення u_i у ізотропному пружному матеріалі, яким є еластомір Thordon сopмас, задовольняють системі рівнянь Ламе [6]:

$$\nabla^2 u_i + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial x_i} = 0, \quad i = \overline{1,3}, \quad (1)$$

де $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x_1^2 + \partial^2 / \partial x_2^2 + \partial^2 / \partial x_3^2$ – оператор Лапласа, u_i – переміщення вздовж координатної осі Ox_i ; x_i – прямокутні декартові координати; ν – коефіцієнт Пуассона; $\Theta = \partial u_1 / \partial x_1 + \partial u_2 / \partial x_2 + \partial u_3 / \partial x_3$.

Позначимо $S_1 = \{(x_1, x_2, x_3): x_1^2 + x_2^2 = R_2^2, 0 \leq x_3 \leq H\}$,

$$l = \begin{cases} x_1 = -R_2; \\ x_2 = 0; \\ 0 \leq x_3 \leq H; \end{cases}$$

$$\Omega = \left\{ (x_1, x_2, x_3): x_1^2 + x_2^2 = R_2^2, x_2^2 + \left(x_3 - \frac{H}{2}\right)^2 \leq \frac{d^2}{4}, x_1 > R_1 \right\}.$$

Сформулюємо граничні умови:

$$\sigma_{ii}|_{\Omega} = 0 \quad (i = 2,3), \quad \sigma_{ij}|_{\Omega} = 0 \quad (i, j = \overline{1,3}, i \neq j), \quad \sigma_{11}|_{\Omega} = P/A \quad (2)$$

де σ_{ij} – механічні напруження; A – площа області $\Omega \in S_1$ прикладеного навантаження;

$$u_i|_l = 0 \quad (i = \overline{1,3}); \quad (3)$$

$$\sigma_{ij}|_{S(\Omega \cup l)} = 0 \quad (i, j = \overline{1,3}), \quad (4)$$

де S – повна поверхня моделі вкладишу.

Розв'язок задачі (1)–(4) знайдемо методом скінченних елементів (МСЕ), використовуючи авторське програмно-методичне забезпечення та засобами універсальної програмної системи скінченно-елементного аналізу (СЕА) ANSYS.

У табл. 1 представлено результати розрахунків переміщень u_1 , що виникають у матеріалі випробуваного вкладишу на площадці Ω при статичному навантаженні $P = 78,32$ Н та відповідають геометричним розмірам моделі: $R_1 = 25,425$ мм, $R_2 = 37,835$ мм, $H = 50,8$ мм, $h = 4,4$ мм, $AB = 59,57$ мм, $d = 2$ мм.

Таблиця 1 – Локальні переміщення u_1 (мм)

Матеріал	Характеристики пружності		Види скінченно-елементних решіток		
			Тетраедр, октаедр	ANSYS	
	E (ГПа)	ν		гексаедр	тетраедр
Thordon compac	1	0,33	0,11432	0,11511	0,11151
		0,37	0,11138	0,11286	0,10930
		0,41	0,10925	0,11026	0,10674
		0,45	0,10578	0,10726	0,10375
		0,49	0,10212	0,10376	0,09994

Для проведення механічного випробування вкладиш дейдвудного підшипника встановлюється на жорстку основу та навантажується у напрямку, нормальному до поверхні (рис. 3).

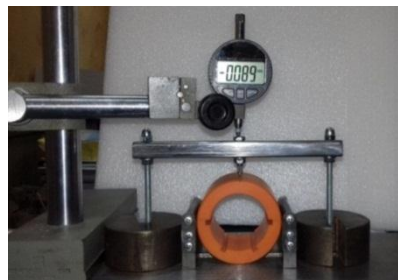


Рисунок 3 – Випробування вкладишу на стиснення за допомогою індентора

Діаграму навантажень зображено на рис. 4.

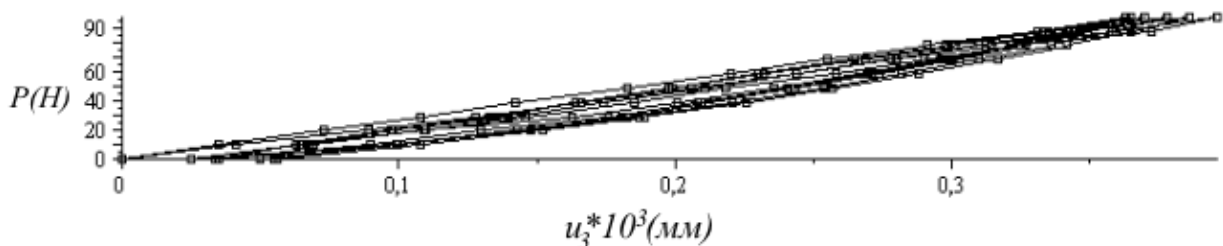


Рисунок 4 – Діаграма навантажень вкладишу

Для лінійного участку залежності нормальних деформацій матеріалу виробу від навантаження знаходимо середнє значення вертикальних переміщень за формулою:

$$u_{сер} = \frac{P}{n} \sum_{i=1}^n \frac{u_i - u_{i-1}}{P_i - P_{i-1}} \quad (i, j = \overline{1,3}),$$

де n – кількість грузів; u_i – деформації, що відповідають навантаженням P_i ($i = \overline{1, n}$), причому $P = \sum_{i=1}^n P_i$.

При $n = 8$ маємо $u_{\text{сеп}} \approx 0,274$ мм.

Для розрахунку модуля Юнга скористаємось формулою [7]:

$$E_e = \frac{E_m \cdot u_m}{u_e}, \quad (5)$$

де E_e – шуканий модуль Юнга вкладишу; E_m – модуль Юнга, обраний для розрахунку переміщень МСЕ; u_e – переміщення, знайдені експериментально; u_m – переміщення, знайдені МСЕ.

Результати розрахунку модуля поздовжньої пружності аналітично-експериментальним способом представлені в табл. 2.

Таблиця 2 - Розрахунок модуля Юнга для $E_m = 1$ (ГПа), $u_e = 0,274$ (мм)

Матеріал	Види скінченно-елементних решіток	ν	u_m (мм)	E_e (МПа)
Thordon compac	Тетраedr, октаedr	0,33	0,11432	417
	ANSYS (гексаedr)		0,11511	420
	ANSYS (тетраedr)		0,11151	407
	Тетраedr, октаedr	0,35	0,11234	410
	ANSYS (гексаedr)		0,11363	415
	ANSYS (тетраedr)		0,11021	402
	Тетраedr, октаedr	0,41	0,10925	399
	ANSYS (гексаedr)		0,11026	402
	ANSYS (тетраedr)		0,10674	390
	Тетраedr, октаedr	0,45	0,10578	386
	ANSYS (гексаedr)		0,10726	391
	ANSYS (тетраedr)		0,10375	379
	Тетраedr, октаedr	0,49	0,10212	373
	ANSYS (гексаedr)		0,10376	379
	ANSYS (тетраedr)		0,09994	365

За даними розрахунків очевидно, що значенням коефіцієнту Пуассона у припустимому для еластичних матеріалів інтервалі $\nu \in [0,3; 0,5]$, до яких відноситься полімер Thordon compac, відповідають значення модуля Юнга в інтервалі $E \in [365 \text{ МПа}; 420 \text{ МПа}]$.

Експериментальний спосіб. Для визначення коефіцієнту Пуассона та модуля поздовжньої пружності матеріалу вкладишу проводяться стандартні випробування на стиснення вздовж поздовжньої осі на універсальній машині УМ-5 (рис. 5).

Зразок вкладишу у вигляді готового виробу встановлюється між захватами випробувальної машини. Поздовжні деформації зразка вимірюються чотирма мікрометричними головками МИГ 1 ГОСТ 9696-82, які розміщено симетрично у двох ортогональних площинах, а зміни розміру зовнішнього діаметра вкладишу – електронним штангенциркулем № 5к 150 мм $\pm 0,01$ мм.

Розрахунок модуля Юнга матеріалу вкладишу виконується за формулою лінійної теорії пружності $E = \frac{\sigma_3}{\varepsilon_3}$, де ε_3 – відносне стиснення висоти H вкладишу, що відповідає напруженню σ_3 у напрямку, перпендикулярному перерізу моделі виробу площиною Ox_1x_2 [8].



Рисунок 5 – Випробування вкладишу на УМ-5

Нормальне напруження визначається формулою $\sigma_3 = \frac{F}{A}$, де F – навантаження, розподілене по площині A перерізу вкладишу (рис. 6).

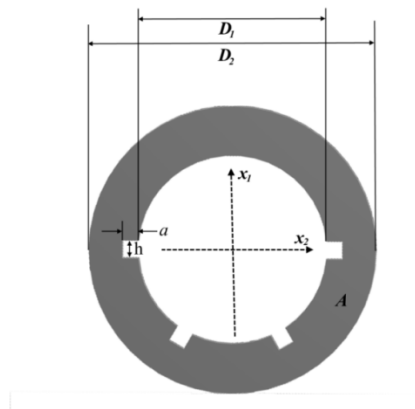


Рисунок 6 – Переріз моделі вкладишу

Відповідні деформації $\varepsilon_3 = \frac{\Delta u_{3,сеп}}{H}$, де H – висота виробу.

Величина $\Delta u_{3,сеп}$ обчислюється за формулою:

$$\Delta u_{3,сеп} = \frac{F}{2mnk} \sum_{i=1}^{2mnk} \frac{u_{3,i} - u_{3,i-1}}{F_i - F_{i-1}}, \quad (5)$$

де m – кількість циклів навантажень/розвантажень, n – кількість випробувань в одному циклі, k – кількість датчиків вимірювання деформацій матеріалу, F_i – навантаження у i -ому випробуванні, $u_{3,i}$ – переміщення, що відповідають навантаженню F_i , причому

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - F_{i-1}).$$

Для вкладишу геометричних розмірів $D_i = 2R_i$ ($i = \overline{1, 2}$), $a = 4,36$ мм площа перерізу становить $A = \pi(R_2^2 - R_1^2) - 4ah \approx 2382,61$ мм.

За двома циклами випробувань при $n = 7$, $k = 4$ та $F = 200$ кгс маємо:

$$\sigma_3 = \frac{F}{A} \approx 0,82263 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta u_{3, \text{сер}}}{H} \approx 2,0324 \cdot 10^{-3};$$

$$E \approx 405 \text{ МПа}.$$

Коефіцієнт Пуассона обчислюємо за формулою:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_3},$$

де $\varepsilon_D = \frac{\Delta D_{\text{сер}}}{D}$ – відносна деформація у радіальному напрямку перерізу, причому

$$\Delta D_{\text{сер}} = \frac{1}{2mn} \sum_{i=1}^{2mn} \Delta D, \text{ де } D \in [D_1, D_2].$$

Для $D = D_2$ маємо:

$$\nu = \frac{5,3275 \cdot 10^{-2} / 75,67}{2,0324 \cdot 10^{-3}} \approx 0,35.$$

Оцінка погрішності експерименту. Для рівняння (5) у якості оцінки \hat{E}_e істинного значення модуля Юнга прийнято величину $\hat{E}_e = \frac{E_m \cdot \hat{u}_m}{\hat{u}_e}$, де \hat{u}_m , \hat{u}_e – оцінки відповідних деформацій. Погрішність оцінки \hat{E}_e визначено за допомогою стандартних вибірових відхилень S_{E_e} випадкових та σ_{E_e} систематичних похибок [9, 10]:

$$S_{E_e} = E_m \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\hat{u}_e}\right)^2 \cdot S_{\hat{u}_m}^2 + \left(\frac{\hat{u}_m}{\hat{u}_e^2}\right)^2 \cdot S_{\hat{u}_e}^2};$$

$$\sigma_{E_e} = E_m \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\hat{u}_e}\right)^2 \cdot \sigma_{u_m}^2 + \left(\frac{\hat{u}_m}{\hat{u}_e^2}\right)^2 \cdot \sigma_{u_e}^2};$$

де $S_{\hat{u}_m}$, $S_{\hat{u}_e}$ – вибірові стандартні відхилення середніх арифметичних, σ_{u_m} , σ_{u_e} – систематичні похибки значень деформацій, розрахованих теоретично та експериментально.

Довірчий інтервал визначається за формулою

$$\Delta = t_{\alpha, n} \cdot \sigma,$$

де $t_{\alpha, n}$ – коефіцієнт Стюдента, $\sigma = \sqrt{S_{E_e}^2 + \sigma_{E_e}^2}$ – сумарна погрішність непрямого вимірювання модуля Юнга аналітично-експериментальним способом.

Для об'єму вибірки $n = 120$ із коефіцієнтом довіри $\alpha = 0.95$ маємо: $\hat{E}_e = 415$ МПа, $\Delta = 33$ МПа, тобто $E_e = 415 \pm 33$ МПа при $\nu = 0.35$.

Відносна похибка розрахунку модуля поздовжньої пружності аналітично-експериментальним способом становить 3,8 %.

Для оцінки погрішності визначення модуля Юнга за формулою $E = \frac{\sigma_3}{\varepsilon_3}$, де $\sigma_3 = \sigma_3(D_1, D_2, F)$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_3(u_3, H)$ застосовано формулу випадкової похибки [10, 11]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial D_1} \Delta D_1\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial D_2} \Delta D_2\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial F} \Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial u_3} \Delta u_3\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial H} \Delta H\right)^2},$$

де ΔD_1 , ΔD_2 , ΔH , ΔF , Δu_3 – приладові похибки.

Для середніх значень вимірюваних величин D_1 , D_2 , H , F , u_3 при об'ємі вибірки $n=100$ з коефіцієнтом довіри 0.95 маємо: $\hat{E} = 405$ МПа, $\Delta E = 35$ МПа, тобто $E = 405 \pm 35$ МПа при $\nu = 0.35 \pm 0.01$. Відносна похибка розрахунку модуля Юнга випробуванням на осьове стиснення становить 4,4 %, коефіцієнту Пуассона – 2 %.

Висновки. 1. У даній роботі двома способами: аналітично-експериментальним та випробуванням на осьове стиснення готового виробу, – отримані значення механічних констант у вигляді модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона матеріалу вкладишу ДП Thordon comras. Модуль поздовжньої пружності матеріалу вкладишу визначений із відносними похибками 3,8 % при застосуванні аналітично-експериментального способу та 4,4 % при випробуванні на УМ-5. Коефіцієнт Пуассона розраховано із відносною похибкою 2 %. При цьому отримані значення механічних характеристик суттєво відрізняються від наданих компанією виробником Thordon Bearings Inc. Згідно документації модуль Юнга $E = 605$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.45$. Такі відхилення можуть бути результатом одиночного випробування з визначення механічних констант матеріалу випадково обраного зразка з партії готової продукції у вигляді вкладишів ДП Thordon comras.

2. Отримані результати можуть бути використані для розрахунків дейдвудних пристроїв транспортних суден, валів нафто та газовидобувних платформ, гідроенергетичних турбін, насосів.

3. Дослідження механічних властивостей вкладишу ДП Thordon comras проведено у лабораторії ХДМА «Полімерні композитні матеріали в суднобудуванні» за запитом приватного підприємства «Інтелектуальні морські технології» (м. Миколаїв). Одержані результати використовуються у розрахунках рухово-рушійних комплексів морських транспортних суден.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Одиноква О.А. Теоретические основы использования полимерных материалов в технологии судостроения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.04 / Хабаровск, 1999. 318 с.
2. Бузков В. А. Підвищення службових властивостей матеріалів для розвитку суднових дейдвудних обладнань та захисту моря / автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ, 1999. 46 с.
3. Мамонтов В. А., Халявкин А. А., Кушнер Г. А., Разов И. О. Оценка влияния жесткости материала кормового дейдвудного подшипника на работоспособность судового валопровода. *Вестник АГТУ*. Сер.: Морская техника и технология. Астрахань, 2017. № 4. С. 80–85.
4. Смазываются морской водой подшипники гребного вала. Thordon Engineering Manual Version E2006.1. Ontario. 2006. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/THORDON%20Engineering_Manual_A4-1_copy.pdf (дата звернення: 13.11.2019).
5. Мотайло А.П. Аналітично-експериментальний спосіб визначення модуля Юнга. *Вісник ХНТУ*. Херсон, 2018. №4 (67). С. 98–104.
6. Демидов С. П. Теория упругости. Москва, 1979. 432 с.
7. Пат. КМ 130254 Україна. Спосіб визначення модуля поздовжньої пружності зразків матеріалів та готових виробів. Опубл. 26.11.2018.
8. Самуль В.И., Русаков В.С. Основы теории упругости и пластичности. Москва, 1970. 288 с.
9. Митин И.В. Анализ и обработка экспериментальных данных. Учебно-методическое пособие для студентов младших курсов Москва, 1998. 48 с.
10. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Ленинград, 1968. 96 с.
11. Ефимова А.И., Зотеев А.В., Склянкин А.А. Общий физический практикум физического факультета МГУ. Погрешности эксперимента: Учебно-методическое пособие. Москва, 2012. 39 с.

REFERENCES

1. Odinkova O.A. Teoreticheskie osnovy ispolzovaniya polimernykh materialov v tehnologii sudostroeniya: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.08.04 / Habarovsk, 1999. 318 s.
2. Buzkov V. A. Pidvyschennia sluzhbovykh vlastyvostei materialiv dlia rozvytku sudnovykh deidvudnykh obladnan ta zakhystu moria / avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk. Kyiv, 1999. 46 s.
3. Mamontov V. A., Halyavkin A. A., Kushner G. A., Razov I. O. Otsenka vliyaniya zhestkosti materiala kormovogo deydvudnogo podshipnika na rabotosposobnost sudovogo valoprovoda. Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tehnika i tehnologiya. Astrahan, 2017. №4. S. 80–85.
4. Smazyivayuschiesya morskoy vodoy podshipniki grebnogo vala. Thordon Engineering Manual Version E2006.1. Ontario. 2006. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/THORDON%20Engineering_Manual_A4-1_copy.pdf (last accessed: 13.11.2019).
5. Motailo A.P. Analitychno-eksperymentalnyi sposib vyznachennia modulia Yunha. Visnyk KhNTU. Kherson, 2018. №4 (67). S. 98–104.
6. Demidov S. P. Teoriya uprugosti. Moskva, 1979. 432 s.
7. Pat. KM 130254 Ukraina. Sposib vyznachennia modulia pozdovzhnoi pruzhnosti zrazkiv materialiv ta hotovykh vyrobiv. Opubl. 26.11.2018.
8. Samul V.I., Rusakov V.S. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti. Moskva, 1970. 288 s.
9. Mitin I.V. Analiz i obrabotka eksperimentalnykh dannykh. Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov mladshih kursov Moskva, 1998. 48 s.
10. Zaydel A.N. Elementarnyie otsenki oshibok izmereniy. Leningrad, 1968. 96 s.
11. Efimova A.I., Zoteev A.V., Sklyankin A.A. Obschiy fizicheskiiy praktikum fizicheskogo fakulteta MGU. Pogreshnosti eksperimenta: Uchebno-metodicheskoe posobie. Moskva, 2012. 39 s.

Мотайло А. П. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ВКЛАДЫША ДЕЙДВУДНОГО ПОДШИПНИКА

Для решения задачи улучшения служебных характеристик составляющих дейдвудного устройства используют материалы, в частности, полимеры, физико-механические свойства которых требуют дополнительного изучения. Данная работа посвящена определению механических констант в виде модуля Юнга и коэффициента Пуассона вкладыша дейдвудного подшипника, изготовленного из полимерного материала Thordon comras. Модуль продольной упругости материала вкладыша получен аналитически-экспериментальным способом, а также испытанием на осевое сжатие. Аналитически-экспериментальный способ определения модуля Юнга основан на расчете локальных деформаций, которые возникают в материале вкладыша под действием индентора на площадке малых размеров, методом конечных элементов и путем механических испытаний. Коэффициент Пуассона определен экспериментально. Найдены статистические оценки непрямых измерений механических констант материала вкладыша. Получены достоверные интервалы для оценки случайных величин значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Проведен сравнительный анализ упругих характеристик материала, предоставленных производителем, и найденных экспериментально.

Ключевые слова: вкладыш дейдвудного подшипника, полимерный материал, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, метод конечных элементов.

Motailo A. P. DETERMINATION OF MECHANICAL CONSTANTS OF THE STERN TUBE BEARING

To solve the problem of improving the service characteristics of the components of a stern tube device, materials are used, in particular, polymers, the physical and mechanical properties of which require further study. This paper is devoted to the determination of mechanical constants as a Young's modulus and Poisson's ratio of a stern tube bearing made of a Thordon compac polymer material. The modulus of the longitudinal elasticity of the material was obtained by an analytical and experimental method, as well as by testing for axial compression. Analytical and experimental method for determining the Young's modulus is based on calculation of local deformations that occur in the stern tube bearing material under the action of an indenter on a small area by the finite element method and by mechanical tests. Poisson's ratio is determined experimentally. Statistical estimates of indirect measurements of mechanical constants of the stern tube bearing material are found. Trust intervals for estimating random variables of Young modulus and Poisson's ratios were obtained. In this work, in two ways: analytical-experimental and axial compression test of the finished product, - obtained values of mechanical constants in the form of Young's modulus and Poisson's coefficient of the material of the insert of DP Thordon compac. The modulus of longitudinal elasticity of the liner material is determined with a relative error of 3.8% when using the analytical-experimental method and 4.4 % when tested for UM-5. Poisson's ratio is calculated with a relative error of 2 %. The obtained mechanical characteristics are significantly different from those provided by the manufacturer Thordon Bearings Inc. According to the documentation, the Young's module MPa, Poisson's ratio. Such deviations can be the result of a single test to determine the mechanical constants of a material of a randomly selected sample from a batch of finished products in the form of inserts of SE Thordon compac. The obtained results can be used for calculations of the deudwood devices of transport vessels, shafts of oil and gas platforms, hydropower turbines, and pumps. Investigation of mechanical properties of the Thordon compac SE liner was carried out at the request of a private enterprise Intelligent Marine Technologies (Mykolayiv) at the CDMA Laboratory "Polymeric Composite Materials in Shipbuilding". The obtained results are used in the calculations of the motor-propulsion complexes of sea transport vessels.

Keywords: stern tube bearing, polymer material, Young's modulus, Poisson's ratio, finite element method.

© Мотайло А. П.

Статтю прийнято
до редакції 3.08.19

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

До друку приймаються статті з результатами власних оригінальних досліджень, що мають наукову і практичну значущість і не публікувалися досі. До друку **не приймаються суто оглядові статті**. Відповідальність за зміст статті несе автор.

Згідно з вимогами п. 3 Постанови Президії Вищої Атестаційної Комісії України № 7-05/1 від 15.01.2003 р., наукові статті, що надаються до друку, повинні містити наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які посилається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки щодо даного дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку.

Обсяг статей – до 10 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути не більше 30% обсягу основної частини.

Оформлення статті. На першій сторінці рукопису зазначається код УДК, назва роботи, прізвище, ініціали та науковий ступінь (звання) автора(ів).

Код УДК – по лівому краю, розмір шрифту – 10.

Назва – по центру друкованими літерами (шрифт жирний, розмір шрифту – 14).

Інформація про автора(ів): прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, повна назва установи або громадської організації, посада, держава, ORCID автора – курсивом, по лівому краю, розміром шрифту 12.

Текст надається у форматі редактора MS Word шрифтом Times New Roman, розмір шрифту – 12, інтервал – 1.

Параметри сторінки (опція меню ФАЙЛ, Параметри сторінки):

розмір паперу – А4: 210*297 мм;

орієнтація аркуша – книжна (альбомна не допускається);

поля – 2 см;

палітурка – 0 см;

колонтитули – 1,3 см;

абзацний відступ – 1,25 см, вирівнювання за шириною, сторінки без нумерації.

Формули повинні бути набрані за допомогою вбудованого редактора формул Equation Editor. Всі формули вставляються в таблицю з неокресленим контуром, що складається з двох колонок: у першій знаходиться формула без абзацу і вирівняна по центру, у другій – номер формули (якщо такий є) теж без абзацу і з вирівнюванням по центру. Межа між колонками таблиці встановлюється на позначці 14 см.

Це стосується також формул і символів формул, які стоять по тексту. Параметри в редакторі формул повинні в точності відповідати наведеним

нижче. Розміри (опція меню редактора Equation Editor: РОЗМІР, Визначити ...):

- Звичайний 12 пт.
- Крупний індекс 7 пт.
- Дрібний індекс 5 пт.
- Крупний символ 18 пт.
- Дрібний символ 12 пт.

Таблиці набираються у Microsoft Word.

Рисунки повинні бути чорно-білими, бажано прозорими, і вставлені у файл і роздруківку статті. Формат рисунків (tif, psx, bmp тощо) повинен бути сумісний з редактором тексту Microsoft Word. Роздільна здатність рисунків – не менше 300 dpi.

Структура статті: вступ (постановка задачі або проблеми); рішення задачі (мета, задачі, об'єкти, предмети, методи дослідження); основні результати та висновки з перспективами; список використаних літературних джерел. Основні розділи можуть мати назви, відмінні від приведених вище найменувань.

Список використаної літератури подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування по тексту) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. У списку повинно бути не менше 10 джерел, у списку посилань неприпустимо використання ГОСТів та загальнонаціональних стандартів, відсоткове співвідношення самоцитування – не більше 30 % (тобто якщо Ви використали 10 посилань, з них може бути не більше 3 на роботи автора).

До статті також наводиться перелік літератури латиницею (*References*), для його оформлення використовувати АРА-стиль. Список літератури транслітерується або перекладається англійською мовою. Транслітерувати інформацію необхідно відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (транслітерацію української мови можна здійснити за посиланням <http://translit.kh.ua> [обрати стандарт: Паспортний (КМУ 2010)]). Транслітерувати джерела, які пишуться латиницею не потрібно.

Структуровані анотації українською, російською та англійською мовами обсягом від 1800 знаків без пробілів надаються: на мові оригіналу статті перед вступом, на двох інших мовах – після тексту статті. У кінці анотацій наводяться ключові слова.

Документи, що подаються до редакції.

Для публікації автор повинен надати до відділу технічної інформації ХДМА:

- Комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft Word;
- файл кожного рисунка, включеного в статтю, окремо;
- рукопис статті (на паперовому носії), підписаний автором(ами) – 2 примірники.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

- структурована анотація та ключові слова українською, англійською і російською мовами, включаючи назву статті та прізвища авторів трьома мовами – на окремій сторінці;
- ліцензійний договір;
- відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, наукові інтереси авторів, ORCID автора(ів)) – на окремій сторінці.

Редакційна колегія залишає за собою право як не публікувати роботи у разі їх відхилення, так і приймати рішення щодо їх відповідності напрямом журналу. Рукописи авторам не повертаються.

ЗМІСТ

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

- Габрук Р. А.** 4
БЕЗПЕКА ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ
В УМОВАХ ПОГІРШЕНОЇ РОБОТИ СУПУТНИКОВОЇ
РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ
- Zinchenko S. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O., Mateychuk V. M.** 10
AUTOMATIC CONTROL OF THE VESSEL'S MOVEMENT
UNDER EXTERNAL CONDITIONS
- Мальцев А. С.** 16
ДИНАМІЧНЕ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СУДНА ПРИ
ВІДХИЛЕННЯХ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ, ВЕЛИЧИНА ЯКОГО
ПОРІВНЯНА З ПОХИБКАМИ ЙОГО ВИЗНАЧЕННЯ
- Nosov P. S., Ben A. P., Nosova H. V., Novikov V. I.** 26
MODEL OF ATTENTION DISTRIBUTION OF THE NAVIGATOR
WHILE KEEPING A NAVIGATIONAL WATCH

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

- Гнатюк А. В., Аргун Щ. В., Гнатова Г. А.,** 36
ТЯГОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВОЇ
УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОБУСА
- Кириченко К. В.** 44
ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ
ПОКАЗНИКІВ КОНСТРУКЦІЙ ПЛАВУЧИХ КОМПОЗИТНИХ
ДОКІВ ЗІ ЗМЕНШЕНОЮ КІЛЬКІСТЮ НАБОРУ У ПОНТОНІ
- Ремізов П. П., Товстокорий, О. М., Сілеверстов І. А., Даньшин М. І.** 51
МОРСЬКИЙ ПЕРЕСУВНИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ
КОМПЛЕКС «КАСКАД»
- Самарін О. Є., Білоусов Є. В., Савчук В. П.** 59
ПІДВИЩЕННЯ СТРОКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОРШНЯ
КРЕЙЦКОПФНОГО ДИЗЕЛЯ
- Урсолов А. И., Некрасов В. А.** 67
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИНЕРЦИОННЫХ НАГРУЗОК
НА ПОДШИПНИКИ ВАЛОПРОВОДА СУДНА
ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКЕ НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Бугаков И. Б., Тимофеев К. В.** 78
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОФФШОРНОГО СУДНА

Васюхін М. І., Касім А. М., Бень А. П. КОНЦЕПЦІЯ ТА АЛГОРИТМИ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОТИДІЇ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ НА ТЕРИТОРІЇ ОСОБЛИВО ВАЖЛИВИХ ОБ'ЄКТІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ	89
Голощанов С. С., Ищенко И. М., Козловський М. И. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ	98
Каштальян П. В., Терновая Т. И., Рожков С. А. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТРЕНАЖЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ СУДОВОДИТЕЛЕЙ	108
Малахова Д. О. КЛАССИФИКАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЙ	115
Федоров А. І. МЕТОДИ ПЛАНУВАННЯ СУЧАСНИХ МОРСЬКИХ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ	124
Яремчук О. М., Пулашкін В. Ю. КАРТОГРАФУВАННЯ ШУМОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ АВТОМАГІСТРАЛЕЙ м. МИКОЛАЄВА ЗАСОБАМИ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ (З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ ARCGIS)	132
<i>МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО</i>	
Букетов А. В., Сизоненко О. М., Безбах О. М., Букетова Н. М., Липян Є. В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИНТЕЗОВАНОЇ ВИСОКОВОЛЬТНИМ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДОМ ПОРОШКОВОЇ ШИХТИ НА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ РЕМОНТУ СУДЕН	142
Єрємїна К. А., Томїна А.-М. В., Буря О. І., Томін С. В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОРГАНОПЛАСТИКІВ, АРМОВАНИХ ХІМІЧНИМИ ВОЛОКНАМИ, МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	154
Мотайло А. П. ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ КОНСТАНТ ВКЛАДИШУ ДЕЙДВУДНОГО ПІДШИПНИКА	163
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ	172

CONTENTS

SEA AND RIVER TRANSPORT

- Gabruk R.** 4
SAFETY OF DYNAMIC POSITIONING DURING DEGRADED
CONDITION OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEM
- Zinchenko S., Mamenko P., Grosheva O., Mateychuk V.** 10
AUTOMATIC CONTROL OF THE VESSEL'S MOVEMENT
UNDER EXTERNAL CONDITIONS
- Maltsev A.** 16
DYNAMIC SHIP POSITIONING IN DECLINING OF THE CONTROL
PARAMETER, THE QUANTITY OF WHICH IS COMPARABLE WITH THE
ERRORS OF ITS DETERMINATION
- Nosov P., Ben A., Nosova H., Novikov V.** 26
MODEL OF ATTENTION DISTRIBUTION OF THE NAVIGATOR
WHILE KEEPING A NAVIGATIONAL WATCH

ENGINEERING IN THE TRANSPORT INDUSTRY

- Hnatov A., Arhun S., Hnatova H.** 36
TRACTION CHARACTERISTICS OF ELECTRIC BUS POWER PLANT
- Kyrychenko K.** 44
SPECIAL FEATURES OF CALCULATION OF TECHNICAL AND
ECONOMIC INDICATORS OF FLOATING COMPOSITE DOCK
STRUCTURES WITH REDUCED NUMBER OF PONTOON FRAMES
- Remizov P., Tovstokory O., Sileverstov I., Danshin M.** 51
MOBILE MARINE ENERGY FACILITY «CASCAD»
- Samarin O., Bilousov E., Savchuk V.** 59
CROSSHEAD DIESEL ENGINE PISTON LIFETIME EXTENSION
- Ursolov A., Nekrasov V.** 67
STATISTICAL ASSESSMENT OF INERTIA LOADS ONTO
SHAFT BEARINGS OF THE SHIP DURING LONGITUDINAL SHIP
MOTION IN CONFUSED SEA

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

- Butakov I., Timofeev K.** 78
MODELLING OF DYNAMIC POSITIONING SYSTEM
OF AN OFFSHORE SHIP
- Vasyukhin M., Kasim A., Ben A.** 89
CONCEPT AND ALGORITHMS OF CREATION SYSTEMS OF
EMERGENCY DETECTION AND RESPONSE IN THE TERRITORY OF
PARTICULAR IMPORTANCE REAL-TIME OBJECTS

Goloshchapov S., Ischenko I., Kozlovskiy M. ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH RECTANGULAR VOLTAGE POWER SUPPLY	98
Kashtalyan P., Ternova T., Rozhkov S. DEVELOPMENT OF SIMULATOR TRAINING METHODS FOR NAVIGATORS	108
Malakhova D. CLASSIFICATION OF HYDRODYNAMIC EQUATIONS FOR USE IN INFORMATION TECHNOLOGIES UNDER FLOW VISUALIZATION	115
Fedorov A. PLANNING METHODS FOR MODERN CONTAINER TRANSPORTATION	124
Yaremchuk O., Pulashkin V. MAPPING OF NOISE POLLUTION OF THE NIKOLAEV HIGHWAYS BY MEANS OF GIS TECHNOLOGIES (USING THE ARCGIS SOFTWARE PACKAGE)	132
<i>MATERIAL SCIENCE</i>	
Buketov A., Sizonenko O., Bezbakh O., Buketova N., Lypian Ye. RESEARCH OF THE IMPACT OF SYNTHESIZED BY HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL DISCHARGE POWDER CHARGE ON HEAT-TRANSFER PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES USED FOR SHIP REPAIR	142
Yeriomina K., Tomina A.-M., <u>Burya A.</u>, Tomin S. RESEARCH OF THE INFLUENCE OF OPERATIONAL MODES ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ORGANIC PLASTICS REINFORCED WITH CHEMICAL FIBERS BY UTILIZING THE METHOD OF MATHEMATICAL PLANNING OF THE EXPERIMENT	154
Motailo A. DETERMINATION OF MECHANICAL CONSTANTS OF THE STERN TUBE BEARING	163
APPLICATION REQUIREMENTS	172

Науковий журнал

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

№ 2 (21), 2019

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*
Технічний редактор *О. Ю. Клементьєва*
Коректор *Н. Грем*
Коректура англійської мови *А. С. Волкова, Л. В. Ліпиць*
Друк, фальцювальні-палітурні роботи *В. Г. Удов*

Підписано до друку 5.12.2019. Формат 84×108/32.
Папір офсетний.
Ум. др. арк. 11,25. Наклад 100 прим.

Видавець і виготовлювач ХДМА
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012
73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20