

УДК 65.011.56

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.187286

РОЗРОБКА МЕТОДУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ МОРЕПЛАВСТВА БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

Надточій В. А., Надточий А. В.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ БЕЗЭКИПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

Надточий В. А., Надточий А. В.

METHODS FOR ENSURING THE NAVIGATION SAFETY OF UNMANNED SURFACE VESSEL

Nadtochii V., Nadtoshyi A..

При створенні безекіпажних надводних суден (БНС), особливу увагу приділяють безпеці мореплавства. Однією з основних загроз на морі є загроза зіткнення. Можна виділити два основних напрямки забезпечення безпеки мореплавства. Перший – це юридичне регулювання і низка міжнародних документів, які є обов'язковими для виконання усіма судовласниками. Другий – це технічні системи керування та програмне забезпечення, призначенням яких є забезпечення безпеки мореплавства. Дана робота присвячена питанню визначення рівня небезпеки зіткнення та реакції на цю небезпеку зі сторони системи автоматичного керування курсом та швидкістю БНС, яка виступає у ролі об'єкта дослідження. Предметом дослідження є процеси та алгоритми керування. Зважаючи на суттєву небезпеку, яку можуть представляти автоматичні рухомі системи на морі, питання безпеки мореплавства мають пріоритетне значення.

Аналіз ефективних систем керування автономними рухомими засобами показує, що їх створення ґрунтується на відносно простих, але достатньо точних абстрактних моделях взаємодіючих середовищ (фізичних та інформаційних). Такі моделі є відправною точкою створення автоматизованих та автоматичних систем, до яких у тому числі відносяться і БНС. Звертаючи увагу на технічну сторону проблеми необхідно зазначити, що визначення рівня небезпеки та реакція на неї зі сторони системи керування БНС також вимагає певної формалізації.

В даній роботі запропоновано спосіб визначення небезпеки зіткнення БНС з іншими рухомими та нерухомими морськими об'єктами. Визначено узагальнений алгоритм роботи системи керування курсом та швидкістю БНС. Визначено реакція рушійної (пропульсивної) системи та необхідний склад бортового обладнання для забезпечення безпеки мореплавства. Необхідно зазначити, що в роботі під БНС маються на увазі малотоннажні (до 1 т) надводні самохідні плавзасоби типу човен або катер.

Результати дослідження стануть у нагоді при побудові систем керування на основі нечітких або нейро-нечітких контролерів.

Ключові слова: *безпека мореплавства, безекіпажне надводне судно, рушійно-кермовий комплекс, керування курсом судна, керування швидкістю судна, автокермовий.*

При создании безэкипажных надводных судов (БНС), особое внимание уделяется безопасности мореплавания. Одной из основных угроз на море является угроза столкновения. Можно выделить два основных направления обеспечения безопасности мореплавания. Первый – это юридическое регулирование и ряд международных документов, которые являются обязательными для выполнения всеми судовладельцами. Второй – это технические системы управления и программное обеспечение, назначением которых является обеспечение безопасности мореплавания. Данная работа посвящена вопросу определения уровня опасности столкновения и реакции на эту опасность со стороны системы автоматического управления курсом и скоростью БНС, которая выступает в качестве объекта исследования. Предметом исследования являются процессы и алгоритмы управления. Учитывая существенную опасность, которую могут представлять автоматические подвижные системы на море, вопросы безопасности мореплавания имеют приоритетное значение.

Анализ эффективных систем управления автономными подвижными средствами показывает, что их создание основывается на относительно простых, но достаточно точных абстрактных моделях взаимодействующих сред (физических и информационных). Такие модели являются отправной точкой создания автоматизированных и автоматических систем, к которым в том числе относятся и БНС. Обращая внимание на техническую сторону проблемы необходимо отметить, что определение уровня опасности и реакция на нее со стороны системы управления БНС также требует определенной формализации.

В данной работе предложен способ определения опасности столкновения БНС с другими подвижными и неподвижными морскими объектами. Определен обобщенный алгоритм работы системы управления курсом и скоростью БНС. Определены реакция движущей (пропульсивной) системы и необходимый состав бортового оборудования для обеспечения безопасности мореплавания. Необходимо отметить, что в работе под БНС имеются в виду малотоннажные (до 1 т) надводные самоходные плавсредства типа лодка или катер.

Результаты исследования будут полезны при построении систем управления на основе нечетких или нейро-нечетких контроллеров.

Ключевые слова: *безопасность мореплавания, безэкипажное надводное судно, движительно-рулевой комплекс, управление курсом судна, управление скоростью судна, авторулевой.*

1. Вступ

Метою створення безекіпажних надводних суден (БНС) є підвищення ефективності державного регулювання в такій важливій сфері як охорона природного середовища і моніторинг екологічної безпеки акваторій та берегових зон. Крім того БНС можуть використовуватись для охорони захищених акваторій, гідротехнічних споруд та комунікацій, а також затонулих пам'яток історії. За допомоги БНС можуть виконуватись роботи з гідрографії (складання карт донної поверхні, контроль глибини фарватерів, проток) пошуково-рятувальні роботи, розвідка природних ресурсів тощо. Але при застосуванні БНС у будь-якому з перелічених вище випадків, необхідно забезпечити їх безпечну та безаварійну експлуатацію. Головну небезпеку на морі представляє загроза зіткнення з іншими об'єктами. Це можуть бути інші плавзасоби, гідротехнічні споруди (опори мостів, хвилерізи, маяки), засоби навігації (буї), природні утворення (скелі, мілини), берегова лінія. Для запобігання ризику зіткнення важливе значення має визначення ступеня небезпеки і способів його зменшення.

Як свідчать численні інформаційні джерела, дана проблема активно обговорюється всіма зацікавленими сторонами у всьому світі. Існує багато підходів та варіантів її вирішення. У роботі [1] наведений сучасний огляд різних підходів до запобігання зіткнень з декількома безпілотними літальними апаратами, а також дана класифікація по використовуваним алгоритмам і структурам, обговорюються їх основні особливості. У роботі [2] розглядається варіант встановлення на всіх судах світу спеціалізованої радіонавігаційної системи для попередження про зіткнення. В роботі [3] наголошується, що розробка високорівневої автономної системи запобігання зіткнень суден, які працюють в неструктурованому і непередбачуваному середовищі, є складним завданням. Автори пропонують вирішення цієї проблеми встановленням інтелектуалізованих систем керування на основі нейронних мереж, які попередньо навчаються в складних ситуаціях і проходять перевірку в реальних умовах експлуатації. В роботі [4] для системи SACAS (shipborne autonomous collision avoidance system) пропонується архітектура паралельного планування траєкторії. Така система включає в себе планувальник, заснований на модифікованому алгоритмі RRT (A rapidly exploring random tree), розроблений для пошуку оптимальної глобальної траєкторії при низькій частоті повторного планування. Також система містить планувальник, заснований на модифікованому алгоритмі DW (Dynamic Window). Останній використовується для паралельного планування траєкторії, щоб генерувати оптимальну локальну траєкторію на високій частоті перепланування і протидіяти несподіваній поведінці динамічних перешкод в безпосередній близькості від судна. Численні дослідження безпеки мореплавства пов'язані з вирішення конкретних завдань [5, 6], де вирішуються проблеми створення автоматичних систем керування рухом безекіпажних катерів, та інших самохідних надводних засобів (USV – Unmanned surface vehicle). В окремих дослідженнях [7] доводиться, що люди можуть бути ключовим фактором для успішного запобігання зіткнень в майбутніх операціях з використанням MASS (maritime surface autonomous

ships). Таким чином, на даний момент не існує єдиного підходу до вирішення проблеми безпеки мореплавства. Пошук та розробка ефективних систем запобігання зіткненню суден на морі також входить в тематику таких наукових розробок [8]. Необхідність створення таких систем обумовлена постійним зростанням числа автономних суден на просторах світового океану [9].

Тому актуальним є розробка методу забезпечення безпеки мореплавства для безекіпажних надводних суден.

Таким чином, *об'єктом дослідження* є безекіпажне надводне судно. *А мета роботи* полягає у встановленні методу визначення рівня небезпеки зіткнення безекіпажного надводного судна з іншими рухомими та нерухомими морськими об'єктами, інженерними спорудами і природними формуваннями.

2. Методика проведення дослідження

Очевидно, що для безпеки мореплавства БНС необхідно наділити систему керування (СК) здатністю заздалегідь виявляти перешкоди, які знаходяться або можуть виникнути на траєкторії його руху та активно від них ухилятися. Важливо, щоб процес ухилення від перешкод завершувався відновленням виконання основного завдання. Для цього необхідно оснастити СК БНС:

- системою сенсорів для ефективного виявлення надводних/підводних перешкод;
- надійною та продуктивною обчислювальною технікою та периферією;
- програмним забезпеченням з алгоритмами, які на основі інформації від сенсорів про оточуючу обстановку та мети місії, здатні генерувати адекватні команди виконавчим пристроям.

Найбільш ефективними на даний час сенсорними системами вважаються радіолокаційні станції (РЛС) для освітлення надводної обстановки та гідроакустичні станції (ГАС) для освітлення підводного середовища. Можливо використання також лідарів (лазерних сканерів) і систем технічного зору у різних оптичних діапазонах. Ці сенсорні системи повинні задовольняти низці умов, але головними є дальність виявлення, роздільна здатність по дальності та роздільна здатність по куту на перешкоду.

Головним виконавчим пристроєм є рушійно-кермовий комплекс (РКК), який повинен забезпечити переміщення БНС із текучої просторової координати до заданої просторової координати по заданій траєкторії і заданий проміжок часу з врахуванням зовнішніх збурень.

Вибір типу рушія для БНС складна науково-технічна та інженерна задача, вирішення якої повинно забезпечити необхідну швидкість руху БНС та його маневреність. Вказані характеристики напряму впливають на безпеку мореплавства, але крім того також визначають економічність (автономність), надійність, керованість та компактність всієї системи в цілому (рис. 1).

Важливим питанням при створенні БНС з гребними електричними установками (ГЕУ) є вибір джерела живлення (ДЖ). На даний час основними джерелами електроенергії для автономних транспортних засобів є хімічні акумуляторні батареї різних типів (кислотні, лугові, срібно-цинкові, нікель-вмісні, літій-вмісні). Можливим є застосування паливних (воднево-кисневих)

елементів. Як додаткові джерела, можуть бути застосовані малогабаритні електромеханічні перетворювачі (наприклад, поршнева машина - генератор), вітрові, хвильові або фотоелектричні перетворювачі.



Рис. 1. Типи рушійно-кермовий комплексів (РКК), що можуть бути застосовані в безекіпажних надводних суднах (БНС)

Доцільним є використання комбінованих РКК, в яких використовується декілька енергетичних установок з різними принципами дії і незалежними джерелами енергії. Такі комбіновані РКК є привабливими з точки зору забезпечення високої надійності, що також на пряму впливає на безпеку мореплавства.

3. Результати дослідження та обговорення

Загальний алгоритм роботи системи автоматичного керування рухом БНС з врахуванням необхідності забезпечення безпеки мореплавства приведений на рис. 2. В даному алгоритмі в логічній умові виконується оперування з абстрактною величиною «небезпечна зона». Це величина, яку можна визначити, враховуючи швидкість руху об'єкта, що знаходиться поряд з БНС, так і швидкість самого БНС. Необхідними складовими для врахування також являються дистанція та пеленг до об'єкта або перешкоди. Таким чином, під поняттям «небезпечна зона» розуміється площа акваторії, в якій знаходиться потенційна загроза зіткнення.

Показаний на рис. 2 алгоритм можна спростити, якщо вважати, що загрози можуть бути тільки рухомі. Нерухомі морські об'єкти (наприклад, буї, скелі, опори) можуть створювати небезпеку, якщо БНС само рухається на них. Тому в алгоритмі на рис. 2 можна виключити блоки, що виділені кольором.

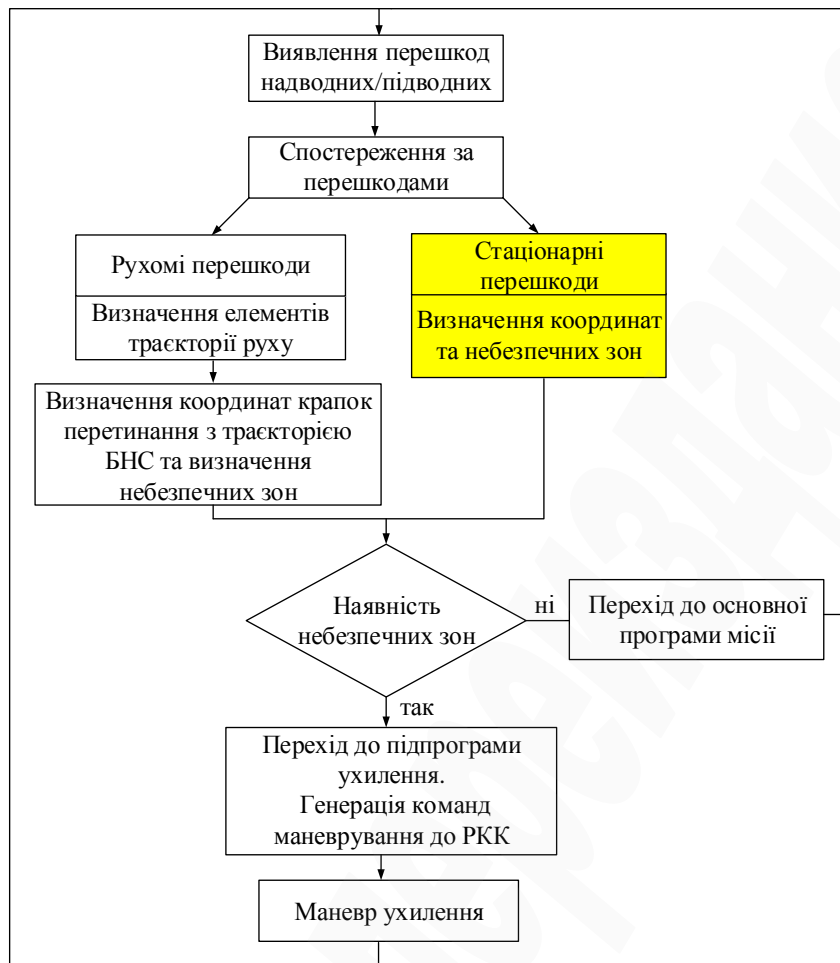


Рис. 2. Варіант алгоритму забезпечення безпеки мореплавства в безекіпажних надводних суднах (БНС)

На рис. 3 представлено діаграму визначення рівня небезпеки при русі (дрейфі, позиціюванні) БНС. На діаграмі, концентричними пунктирними кільцями відображені дистанції виявлення перешкод «Д-1» – дальня, «Д-2» – середня та «Д-3» – ближня відносно БНС. Також на діаграмі задані сектори (напрямки) виявлення перешкод відносно БНС – «прямо по курсу» або «за кормою», які на діаграмі позначені відповідно «0» і «К». Сектор «прямо по курсу» розбито ще на два підсектори з кутом розкриття 10° «ЛО» та «ПО». З бокових проєкцій виділено по два підсектора: зліва по курсу – «Л1», зліва по борту – «Л2», праворуч по курсу – «П1» та праворуч по борту – «П2». Сектори «Л1», «П1» мають кут розкриття 65° , «Л2», «П2», мають кут розкриття 70° , «КЛ» і «КП» мають кут розкриття 35° . Рівень загрози зіткнення (рівень небезпечності) має три градації, які на діаграмі позначені рожевим, жовтим та зеленим кольорами. Рівень небезпеки вважаємо таким, що збільшується від зеленого до рожевого.

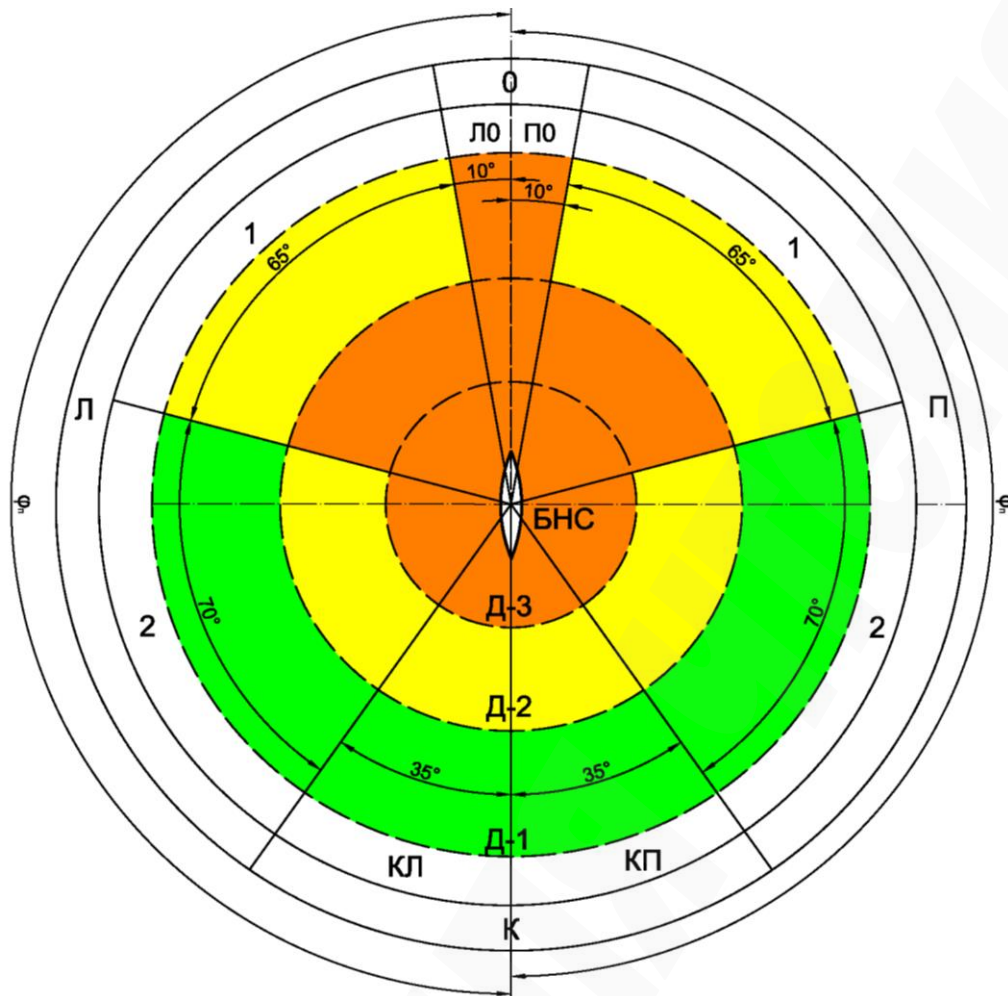


Рис. 3. Визначення рівня небезпеки перешкод навколо безкіпажного надводного судна (БНС)

Діаграма, що показана на рис. 3, може мати інший вигляд в залежності від режиму роботи БНС, його швидкості або інших параметрів (стан погоди, хвилювання моря, наявність течії та інше). Тобто,

$$R_j = f(V, G, W, \dots), \quad (1)$$

де R_j – радіус виявлення перешкод (Д-1, Д-2, Д-3);

V – швидкість БНС;

G – сила хвилювання (наприклад, за шкалою, розробленою Всесвітньою метеорологічною організацією).

W – сила вітру (наприклад, по шкалаі Бофорта).

Крім того, положення БНС на діаграмі рис. 3 також може регулюватись.

У відповідності до рис. 3 можна визначити поведінку СК, яка б вважалась відповідною рівню небезпеки. При цьому справедливі наступні залежності при русі БНС по відношенню до перешкоди:

$$\Delta l = l_{i-1} - l_i, \quad (2)$$

де Δl – відхилення радіус-вектору (дистанції) до перешкоди в проміжок часу,
 $\Delta t = t_{i-1} - t_i$;

l_{i-1} – радіус-вектор (дистанція) до перешкоди – попереднє значення;

l_i – радіус-вектор (дистанція) до перешкоди – поточне значення.

Швидкість зміни дистанції (табл. 1):

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{l_{i-1} - l_i}{t_{i-1} - t_i}. \quad (3)$$

Таблиця 1

Умови визначення положення перешкоди відносно безекіпажного надводного судна (БНС) по даним відхилення дистанції

Якщо	$\Delta l > 0, \frac{\Delta l}{\Delta t} \geq 0,$	то перешкода наближається з постійною швидкістю або прискорено
Якщо	$\Delta l = 0, \frac{\Delta l}{\Delta t} = 0,$	то перешкода рухається паралельно або як сателіт
Якщо	$\Delta l < 0, \frac{\Delta l}{\Delta t} \leq 0,$	то перешкода віддаляється з постійною швидкістю або прискорено

Необхідно також враховувати пеленг на перешкоду відносно власного курсу:

$$\Delta \varphi = \varphi_{i-1} - \varphi_i, \quad (4)$$

де $\Delta \varphi$ – зміна кута утвореного вектором руху БНС \vec{v} та радіус-вектором \vec{l} (дистанцією) на перешкоду в проміжок часу $\Delta t = t_{i-1} - t_i$;

φ_{i-1} – попереднє значення кута утвореного вектором руху БНС \vec{v} та радіус-вектором \vec{l} на перешкоду;

φ_i – поточне значення кута утвореного вектором руху БНС \vec{v} та радіус-вектором \vec{l} на перешкоду.

Кутова швидкість зміни напрямку на перешкоду (табл. 2):

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi_{i-1} - \varphi_i}{t_{i-1} - t_i}. \quad (5)$$

Таблиця 2

Умови визначення положення перешкоди відносно безекіпажного надводного судна (БНС) по даним відхилення кута напрямку на перешкоду

Якщо	$\Delta \varphi > 0, \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \geq 0,$	то перешкода випереджає БНС і рухається з постійною швидкістю або прискорено
Якщо	$\Delta \varphi = 0, \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = 0,$	то перешкода рухається паралельним курсом
Якщо	$\Delta \varphi < 0, \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \leq 0,$	то перешкода відстає від БНС і рухається з постійною швидкістю або уповільнюється

Відповідне графічне уявлення по даним табл. 1, 2 про переміщення перешкоди відносно БСН приведено на рис. 4.

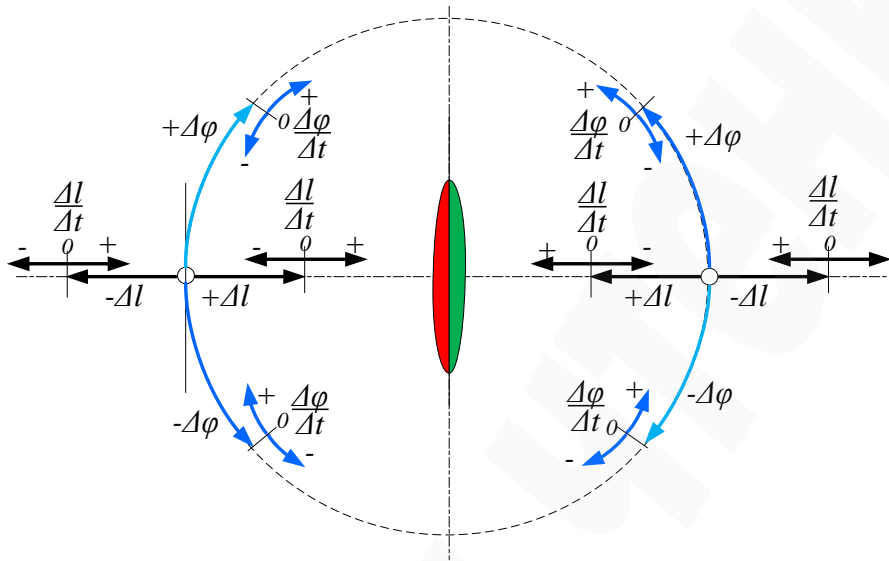


Рис. 4. Графічна інтерпретація визначення напрямку руху перешкоди відносно безекіпажного надводного судна (БНС) по відхиленню дистанції та кута напрямку на перешкоду

Основним критерієм визначення реакції СК на рівень небезпеки з визначеними параметрами її руху є маневр БНС в протилежну сторону з відповідною швидкістю. Реакція СК може бути визначена експертним методом з їх уточненням на математичних моделях СК, БСН, навколишнього середовища та моделей перешкод. Найбільш придатними СК для обчислення представлених положень є системи на основі нечітких або нейро-нечітких контролерів [10].

Інтенсивність судноплавства на морських шляхах, поблизу портів та морських баз, як і у фарватерах річок, каналах, протоках досить висока. Тому необхідною умовою забезпечення безпеки мореплавства є здатність СК виявляти, супроводжувати та реагувати одночасно на декілька перешкод, як надводних, так і підводних.

4. Висновки

У ході дослідження встановлено, що комбіновані рушійно-кермові пристрої для безекіпажних суден сприяють підвищенню безпеки мореплавства завдяки дублюванню пропульсивної функції однієї рушійної системи другою. Іншими словами комбіновані РКК мають підвищену надійність. Також отримано діаграму небезпеки, яка дозволяє формально визначити рівень небезпеки виявлених перешкод. Діаграма небезпеки дозволяє коригувати рівень небезпеки з врахуванням таких факторів, як хвилювання моря, сила вітру, швидкість БНС тощо. Крім того, положення БНС на діаграмі також може змінюватись.

Встановлено, що на основі вимірів сенсорних систем можна формально визначити положення, напрямок та швидкість переміщення небезпечних зон, та ступінь їх небезпеки відносно БНС. На основі отриманої інформації, у

відповідності до закладеної підпрограми ухилення від зіткнення, можна генерувати команди керування рушійно-кермовим комплексом.

Результати дослідження стануть у нагоді при побудові систем керування на основі нечітких або нейро-нечітких контролерів.

Література

1. Huang, S., Teo, R. S. H., Tan, K. K. (2019). Collision avoidance of multi unmanned aerial vehicles: A review. *Annual Reviews in Control*, 48, 147–164. doi: <http://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.10.001>
2. Xie, S., Chu, X., Zheng, M., Liu, C. (2019). Ship predictive collision avoidance method based on an improved beetle antennae search algorithm. *Ocean Engineering*, 192, 106542. doi: <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106542>
3. Zhao, L., Roh, M.-I. (2019). COLREGs-compliant multiship collision avoidance based on deep reinforcement learning. *Ocean Engineering*, 191, 106436. doi: <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106436>
4. Yang, R., Xu, J., Wang, X., Zhou, Q. (2019). Parallel trajectory planning for shipborne Autonomous collision avoidance system. *Applied Ocean Research*, 91, 101875. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101875>
5. Oh, H. N. H., Tsourdos, A., Savvaris, A. (2014). Development of Collision Avoidance Algorithms for the C-Enduro USV. *IFAC Proceedings Volumes*, 47 (3), 12174–12181. doi: <http://doi.org/10.3182/20140824-6-za-1003.02362>
6. Zhao, Y., Li, W., Shi, P. (2016). A real-time collision avoidance learning system for Unmanned Surface Vessels. *Neurocomputing*, 182, 255–266. doi: <http://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.028>
7. Abilio Ramos, M., Utne, I. B., Mosleh, A. (2019). Collision avoidance on maritime autonomous surface ships: Operators' tasks and human failure events. *Safety Science*, 116, 33–44. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.038>
8. Blincov, V. S. (2007). Sovremennye problemy sozdaniia elektrooborudovaniia i avtomatiki podvodnykh apparatov. *Radioelektronni i komp'iuterni sistemi*, 5 (24), 90–98.
9. *Unmanned Systems Integrated Roadmap 2009–2034* (2009). Department Of Defence United States Of America. Washington, 195. doi: <http://doi.org/10.21236/ada522247>
10. Leonenkov, A. V. (2005). *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyNECH*. Saint-Peterburg: BVKH-Pererburg, 736.

When creating unmanned surface vehicles (USV), special attention is paid to the safety of navigation. One of the main threats at sea is the threat of collision. Two main directions of ensuring the safety of navigation can be distinguished. The first is legal regulation and a number of international documents that are binding on all ship-owners. The second is technical control systems and software, the purpose of which is ensuring the safety of navigation. This work is devoted to the issue of determining the level of collision danger and reaction to this danger from the system of automatic control of the course and speed of the USV, which acts as the object of study. The subject of research is management processes and algorithms. Given the significant danger that automatic mobile systems at sea can pose, maritime safety

issues are a priority.

The analysis of effective control systems for autonomous mobile vehicles shows that their creation is based on relatively simple, but fairly accurate abstract models of interacting media (physical and informational). Such models are the starting point for the creation of automated and automatic systems, which include USV as well. Paying attention to the technical side of the problem, it should be noted that determining the level of danger and the reaction to it from the side of the USV control system also requires some formalization.

In this paper, a method is proposed for determining the danger of USV collision with other moving and stationary marine objects. The generalized algorithm of the control system for the course and speed of the USV is determined. The reaction of the propulsion (propulsive) system and the necessary composition of on-board equipment to ensure the safety of navigation are determined. It should be noted that in the work under the USV let's mean small-tonnage (up to 1 t) surface self-propelled floating craft of the boat or boat type.

The research results will be useful in constructing control systems based on fuzzy or neuro-fuzzy controllers.

Keywords: *navigation safety, unmanned surface vessel, propulsion and steering complex, vessel heading control, vessel speed control, autopilot.*