

РОЗДІЛ 4. ДЕЯКІ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНИМ НАДВОДНИМ СУДНОМ ЯК НОСІЄМ ГРУПИ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

CHAPTER 4. SOME TASKS OF CONTROL AUTOMATION OF AN UNMANNED SURFACE VESSEL AS A CARRIER OF A GROUP OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES

4.1. Огляд безекіпажних надводних суден як перспективних носіїв АНПА

4.1. Overview of unmanned surface vessels as promising AUV carriers

Безекіпажні надводні судна (БНС) або морські автономні надводні кораблі (МАНК) знаходять все більше застосування при виконанні завдань з морських транспортних перевезень, дослідження ресурсів океанів та наукових досліджень, природоохоронних робіт та робіт із забезпечення морського права на морі у провідних морських країнах світу [132].

Створення та впровадження у морську практику такого виду морських суден на сьогодні оцінюється як магістральний напрямок розвитку водного транспорту [133].

Виділяють наступні переваги БНС у порівнянні з традиційними суднами з екіпажами [134; 135]:

- БНС можуть виконувати більш тривалі й небезпечні місії;
- БНС мають нижчі витрати на технічне обслуговування та екіпажі для керування;
- мала вага й компактні розміри БНС забезпечують їм підвищену маневреність і можливості розгортання на мілководних акваторіях (річкових й прибережних районах), де більші кораблі не можуть ефективно діяти;
- БНС також мають більшу потенційну вантажопідйомність і можливість дистанційно виконувати типові морські операції.

Як було показано вище, такий вид морської робототехніки, як складова морського безекіпажного комплексу (МБК), може бути успішно використаний у якості носія для групи АНПА, які мають виконувати підводні місії на близьких і на віддалених акваторіях.

Unmanned Surface Vehicles – USVs or Maritime Autonomous Surface Ships – MASS) are increasingly used in maritime transportation, ocean resource exploration and scientific research, environmental protection and maritime law enforcement in the world's leading maritime countries [132].

The creation and introduction of this type of sea vessels into maritime practice is currently considered to be the main direction of the development of water transport [133].

The following advantages of USV compared to traditional ships with crews are highlighted [134; 135]:

- USVs can perform longer and more dangerous missions;
- USVs have lower maintenance costs and crews to manage;
- the light weight and compact dimensions of USVs provide them with increased maneuverability and deployment capabilities in shallow water areas (river and coastal areas), where larger ships cannot operate effectively;
- USVs also have a greater potential carrying capacity and the ability to remotely perform typical maritime operations.

As shown above, such a type of marine robotics as a component of a marine unmanned complex (MUC) can be successfully used as a carrier for a group of AUVs that are supposed to carry out underwater missions in close and distant water areas. USV designs and their application technologies have gone through several developmental stages, closely related

Конструкції БНС та технології їхнього застосування пройшли декілька стадій розвитку, тісно пов'язаних з прогресом технічних наук та поточних потреб морських держав.

Історично першим патентом щодо БНС був патент Ніколо Тесли у 1898 року [136] (рис. 4.1, а). Крім доставки вантажів і зв'язку з важкодоступними місцевостями, автор згадує про військові цілі свого винаходу: «Гарантована і безмежна руйнівність мого винаходу дозволить встановити і підтримувати вічний мир між народами».

Однак перші реально створені БНС з'явилися у Німеччині на початку ХХ сторіччя. Ці судна були керованими по спеціальному кабелю. Проте наприкінці Першої світової війни в німецькому флоті з'явилися також бездротові радіокеровані катери [137].

Радянська Росія також розробляла радіокеровані катери для потреб оборони портів на Балтиці. Так, у 1924 році було створено два типи радіокерованих катерів – «Піонер» і «Оса», які передбачали радіокерування я берегового поста керування та з літака [138]. А на військових навчаннях 1937 року у Фінському заливі вже приймали участь біля 50 радіокерованих катерів.

Одним з перших напрямків практичного застосування БНС було їх використання Італією у Другій світовій війні як засобу доставки вибухівки для знищення надводних військових кораблів Великобританії на Середземному морі [139]. Тоді було успішно застосовано малорозмірні швидкісні катери МТМ та МТР. На стадії підходу до цілі такий катер керувались людиною, яка після прицілювання катера залишала його на рятувальному плоту, а катер на прикінцевій стадії атаки керувався автоматично (рис. 4.1, б).

Після Другої світової війни в США БНС були розроблені та використані для двох основних цілей: протимінної боротьби на морі та для оцінки бойових пошкоджень надводних кораблів під час випробувань атомних бомб [140] (рис. 4.2, а).

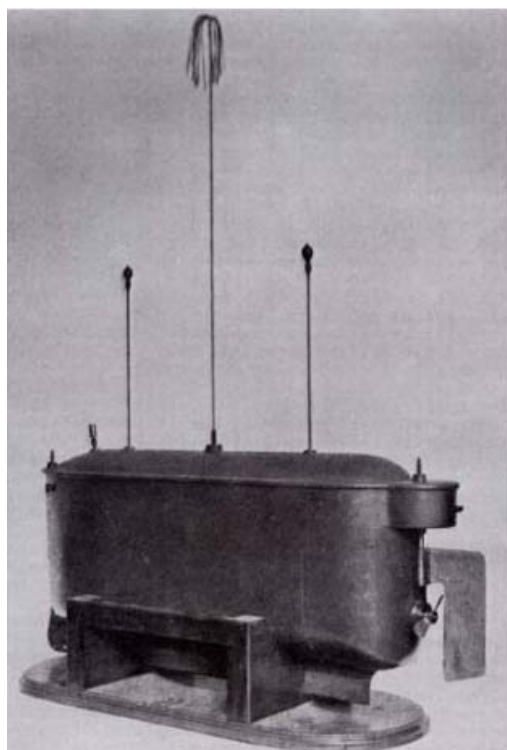
to the progress of technical sciences and the current needs of maritime states.

Historically, the first patent regarding USVs was the patent of Nicolo Tesli in 1898 [136] (Fig. 4.1, a). In addition to the delivery of goods and communication with hard-to-reach areas, the author mentions the military purposes of his invention: «The guaranteed and unlimited destruction of my invention will allow establishing and maintaining eternal peace between peoples».

However, the first actually created USVs appeared in Germany at the beginning of the 20th century. These vessels were controlled by a special cable. However, at the end of the First World War, wireless radio-controlled boats also appeared in the German fleet [137]. Soviet Russia also developed radio-controlled boats for the needed ports defense in the Baltic. So, in 1924, two types of radio-controlled boats, were created, which provided for radio control of the coastal control post and from the aircraft [138]. About 50 radio-controlled boats already took part in the military exercises of 1937 in the Gulf of Finland.

One of the first areas of practical application of BNS was their use by Italy in World War II as a means of delivering explosives to destroy British surface warships in the Mediterranean [139]. At that time, small speed boats MTM and MTR were successfully used. At the stage of approach to the target, such a boat was controlled by a person who, after targeting the boat, left it on the life raft, and the boat was controlled automatically at the attack final stage (Fig. 4.1, b).

After the Second World War, USVs were developed in the United States and used for two main purposes: mine countermeasures at sea and the assessment of combat damage to surface ships during atomic bomb tests [140] (Fig. 4.2, a).



а (a)



б (b)

**Рисунок 4.1 – Прототипи БНС минулих століть:
а – радіокерована модель судна Ніколи Тесла (1898 р.);
б – стадії застосування швидкісних катерів MTM та MTR
(40-ві роки XX-го сторіччя)**

**Figure 4.1 – Prototypes of the USVof past centuries:
а – radio-controlled model of Nikola Tesla's ship (1898);
b – stages of the application of high-speed boats MTM and MTR (40s of the XX century)**

Наприкінці XX сторіччя інтерес до застосування БНС з'явився в Ізраїлі з-за необхідності автоматизувати операції з охорони морського узбережжя та акваторій портів.

Як результат, з 2004 року було успішно застосовано у складі військово-морських сил декілька типів малорозмірних безкіпажних катерів: «Protector», «Seagull», «Katana», «Stingray» та «Silver Marlin» [141; 142].

Головне їх призначення – протистояння терористичним загрозам з моря, розвідка, спостереження та ведення протимінної війни (рис. 4.2, б-в).

At the end of the 20th century, interest in the use of USV appeared in Israel due to the need for operations automation to protect the sea coast and port waters.

As a result, since 2004, several types of small unmanned boats have been successfully used in the naval forces: «Protector», «Seagull», «Katana», «Stingray» and «Silver Marlin» [141; 142].

Their main purpose is to counter terrorist threats from the sea, reconnaissance, surveillance and mine warfare (Fig. 4.2, b-c).

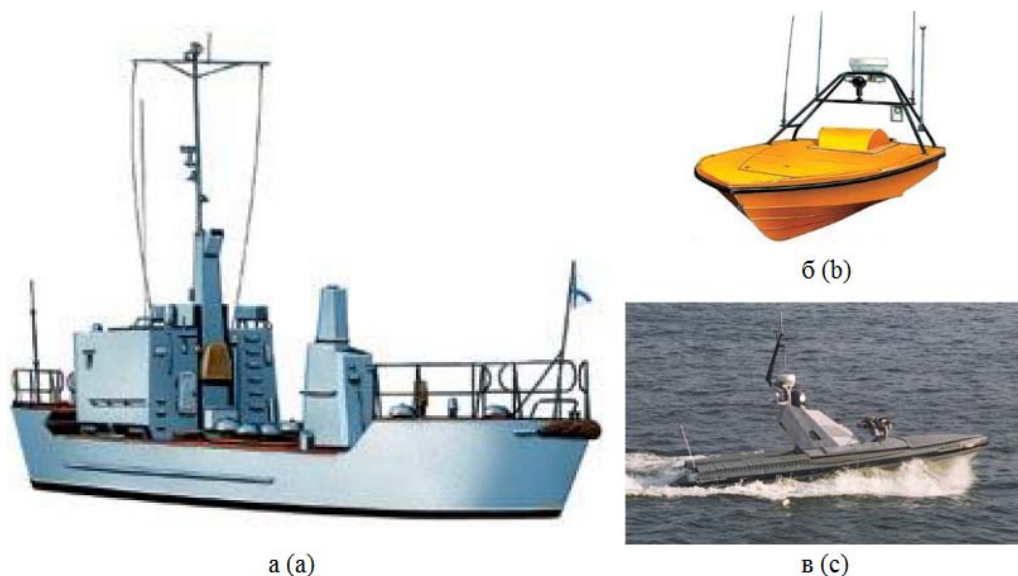


Рисунок 4.2 – Розробки БНС ХХ-го сторіччя: а – проривач мінних загороджень проекту 1300 (СРСР). Водотоннажність – 90 т, довжина – 25 м, ширина – 5 м, осадка – 1,5 м, енергоустановка – дизельний двигун (300 к.с.), швидкість ходу – 18 вузлів; б – «Гауст гард», виробництво компанії «МРВ Інтернешнл».

Довжина – 19 футів (5,79 м), корпус із армованого склопластику, двигун – дизель (266 к.с.); в – безекіпажний патрульний катер «Протектор» (Ізраїль). Довжина – 9,11 м, енергоустановка – дизельний двигун, рушій – малогабаритний водомет, швидкість ходу – 40 уз., автономність – 10–35 годин, система навігації – радар, GPS-приймач, інерційна навігаційна система

Figure 4.2 – USV developments of the 20th century: a – project 1300 (USSR) mine breaker. Displacement – 90 tons, length – 25 m, width – 5 m, draft – 1.5 m, power plant – diesel engine (300 hp), speed – 18 knots; b – "Gaustr Guard", "MRV International") company production. Length – 19 feet (5.79 m), hull made of reinforced fiberglass, engine – diesel (266 hp); c – Israeli Navy's Protector "unmanned patrol boat". Length – 9.11 m, power plant – diesel engine, propulsion – small-sized water cannon, speed – 40 knots, autonomy – 10-35 hours, navigation system – radar, GPS receiver, inertial navigation system

Одночасно розвивали свої БНС США, де у 2006 році було розроблено генеральний план створення БНС для потреб військово-морського флоту [140].

Пізніше, з 2012 року, в рамках європейської програми «MUNIN» розпочались прикладні наукові дослідження щодо розробки концепції керування БПС та оцінки технічної, економічної та правової складових їх використання [143]. Метою дослідження було наукове обґрунтування доцільності

At the same time, the United States developed its USV, where in 2006 a master plan for the USV creation for the Navy needs was developed [140].

Later, in 2012, within the framework of the European program, «MUNIN», applied scientific research began to develop the concept of USV control and evaluate the technical, economic and legal operation components [143]. The research purpose was to scientifically substantiate the expediency

та можливості створення морських БНС транспортного типу, які б могли забезпечити безпечні океанські перевезення.

Головна ідея проекту полягала в оснащенні вантажних суден спеціальними сенсорними системами й бортовими комп'ютерами, які дають змогу їм безаварійно рухатись у складних навігаційних умовах у повністю автоматичному режимі.

У подальшому в багатьох морських країнах світу розгорнулись теоретичні дослідження та роботи зі створення БНС різного призначення, з'явилися наукові огляди та практичні узагальнення щодо результатів застосування БНС [144-146].

Науковці і проектувальники акцентували увагу на перспективності нового засобу морської транспортної робототехніки та, одночасно, вказували на низку проблем щодо її практичної реалізації.

Так, у рамках подальшого розвитку ідей програми "MUNIN" на протязі 2015-2017 років було виконано проекти "AAWA", головним виконавцем якого була англійська фірма «Rolls-Royce» (Великобританія) [147]. Проект об'єднав університети, проектні організації, виробників обладнання та класифікаційні товариства для вивчення економічних, соціальних, правових, нормативних та технологічних факторів, які необхідно вирішити, щоб БНС стали реальністю.

У рамках проекту його учасники шукали відповіді на три наступні питання:

– які повинні бути технології керування БНС і як вони повинні взаємодіяти при його автономному плаванні;

– як потрібно спроектувати таке судно, щоб воно було настільки ж безпечним, як і звичайні судна, які нові ризики з'являться і як їх уникнути;

– які повинні бути спонукальні мотиви для судновласників вкладати кошти в БНС і хто після їх «легалізації» буде відповідальний у випадку того або іншого інциденту.

Одночасно з проектом "AAWA" у Норвегії було реалізовано проект "AUTOSEA" [148], основною метою була розробка методів судноводіння та навігації БНС. Цей

and feasibility of creating transport-type marine USV that could ensure safe ocean transportation.

The main idea of the project was to equip cargo ships with special sensor systems and on-board computers that enable them to move safely in difficult navigation conditions in fully automatic mode.

Subsequently, in many maritime countries of the world, theoretical studies and works on the creation of BNS for various purposes were launched, scientific reviews and practical generalizations about the results of BNS application appeared [144-146].

Scientists and design engineers focused on the prospects of a new means of marine transport robotics and at the same time pointed out a number of problems in its practical implementation.

Thus, as part of the further development of the ideas of the MUNIN program, during 2015-2017, the AAWA project was completed, the main executor of which was the English company Rolls-Royce (Great Britain).[147] The project brought together universities, design organizations, equipment manufacturers and classification societies to study the economic, social, legal, regulatory and technological factors that need to be addressed to make USV a reality.

Within the project framework, its participants sought answers to the following three questions:

– what should be the USV control technologies and how they should interact during its autonomous navigation;

– how to design such a vessel so that it is as safe as the conventional vessels, what new risks will appear and how to avoid them;

– what incentives should be for shipowners to invest in USV and who after their «legalization» will be responsible in case of this or that incident.

Simultaneously with the AAWA project, the AUTOSEA project [148] was implemented in Norway, the main goal was to develop methods for navigation and USV navigation.

проект підтвердив ефективність системи запобігання зіткненням у повномасштабних натурних експериментах, що дало змогу реалізувати проект автоматичного автомобільного порому для Балтійського моря [149].

Подальшим розвитком проекту «AUTOSEA» був проект Євросоюзу «Hull-to-Hull» [150], метою якого було забезпечення безпечного плавання в безпосередній близькості від інших суден на основі застосування систем супутникової навігації. Такий підхід дозволяє прецизійно оцінювати як відстань до навколишніх об'єктів, включаючи судна, що рухаються, так і швидкість зближення з ними.

Сьогодні у всьому світі нараховується більш ніж 1000 морських автономних надводних суден, які експлуатуються більш ніж 53 організаціями [151].

На рис. 4.3 наведено зовнішній вигляд типових БНС різних архітектурно-конструктивних типів та різного призначення.

Наведені на рис. 4.3 БНС мають наступне призначення:

а – БНС з дистанційним керуванням «Maxlimer» фірми «Sea-Kit International» (Канада), призначене, у тому числі й для роботи з АНПА [152];

б – перший у світі інтелектуальний безпілотний дослідницький корабель-база «Zhu Hai Yun» (КНР) [153];

в – дистанційно кероване через супутник БНС USV XO-450 компанії «XOCEAN» (Канада) для збору батиметричних даних у внутрішніх водах Канади [154];

г – БНС «ORCA UBOAT» (США) для водного серфінгу [155];

д – протимінне БНС «Seagull» (Великобританія [156];

е – БНС «TITAN» (КНР) для очищення мілководних водойм шляхом косіння водних рослин [157];

ж – БНС «C-Worker 5» (Канада) для обстеження підводних кабельних трас [158];

з – БНС-вітрильник «Saildrone» (США) з сонячними елементами для проведення океанографічних досліджень [159].

This project confirmed the collision avoidance system effectiveness in full-scale field experiments, which made it possible to implement the automatic car ferry project for the Baltic Sea [149].

A further development of the «AUTOSEA» project was the European Union «Hull-to-Hull» project [150], the purpose of which was to ensure safe navigation in close proximity to other ships based on the use of satellite navigation systems. This approach makes it possible to accurately estimate both the distance to surrounding objects, including moving vessels, and the approach speed to them.

Today, there are more than 1,000 marine autonomous surface vessels in the world, which are operated by more than 53 organizations [151].

Fig. 4.3 shows the appearance of typical USV of various architectural and structural types and different purposes.

USVs Shown in Fig. 4.3 have the following purposes:

a – USV with remote control of the «Maxlimer»Sea-Kit International» company (Canada), designed, including for work with ANPA [152];

b – the world's first intelligent unmanned research mother-ship «Zhu Hai Yun» (PRC) [153];

c – XO-450 (XOCEAN USV, Canada) remotely controlled via USV satellite for collecting bathymetric data in the inland waters of Canada [154];

d – «ORCA UBOAT» USV (USA) for water surfing [155];

e – Mine countermeasures USV «Seagull» (Great Britain [156];

f – «TITAN» (PRC) USV for cleaning shallow water bodies by mowing aquatic plants [157];

g – «C-Worker 5» USV (Canada) for surveying underwater cable routes [158];

h – Sailplane «Saildrone» USV (USA) with solar cells for conducting oceanographic research [159].

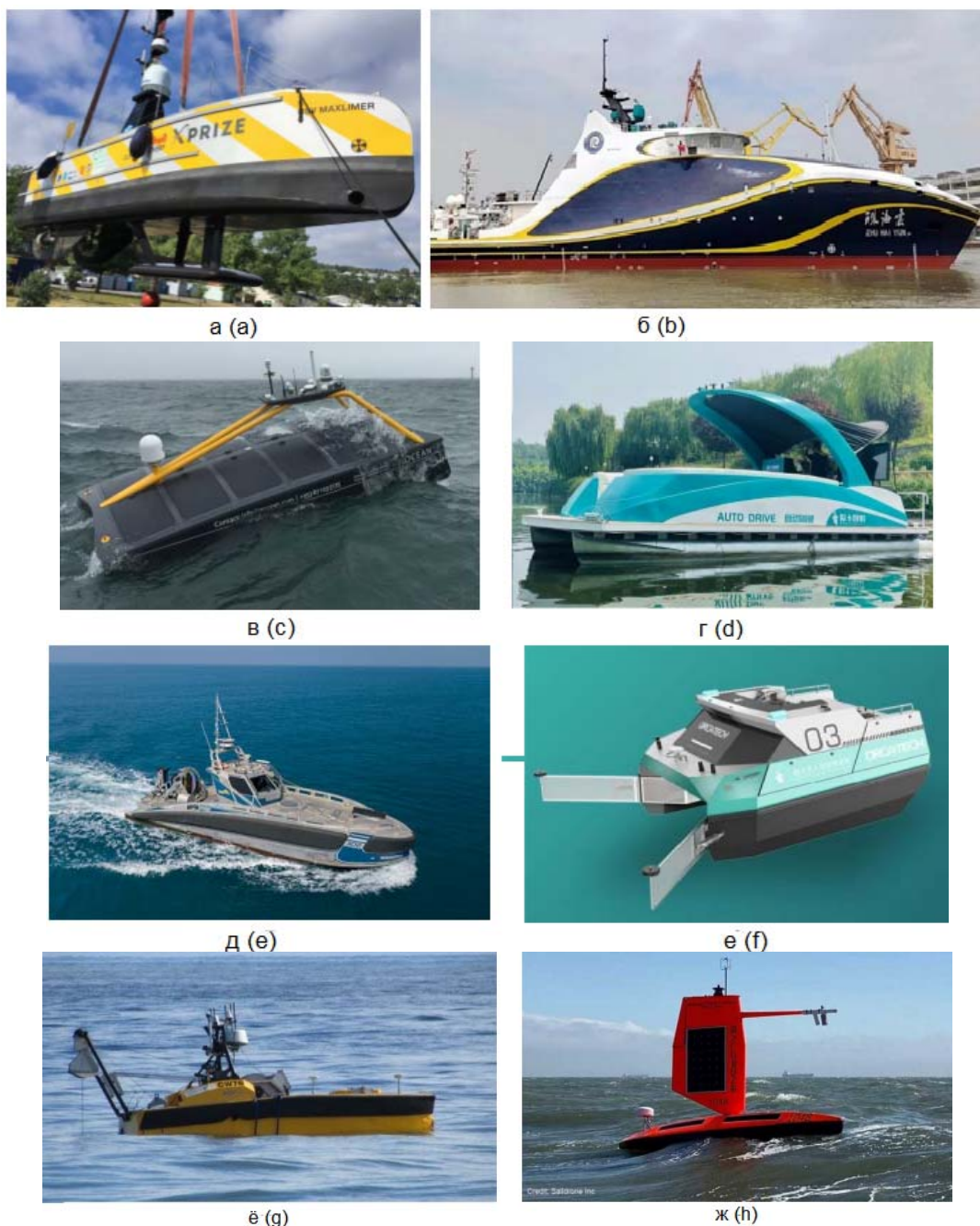


Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд сучасних БНС різного призначення
Figure 4.3 – External view of modern USV for various purposes

На цей час основними напрямками застосування БНС, виходячи з огляду науково-технічних публікацій [134; 160; 161], є науково-дослідницькі, прикладні гідро-

Currently, the main areas of USV application, based on the scientific and technical publication reviews [134; 160; 161], are scientific research, applied hydrographic,

графічні, природоохоронні та аварійно-рятувальні морські роботи.

Саме за цими напрямками автори і вбачають доцільність і можливість використання БНС як носіїв АНПА для їх транспортування до акваторій, де вони мають виконувати групові підводні місії.

environmental protection and marine rescue operations.

It is in these areas that the authors see the expediency and possibility of using USV as AUV carriers for their transportation in the water area where they need to perform group underwater missions.

4.2. Формулювання головних задач створення БНС на основі системного підходу

4.2. Formulation of the main tasks of USV creation based on a systematic approach

З позицій системного підходу до проектування засобів морської робототехніки [162] до генеральної множини $T_{\text{БНС}}$ головних задач створення БНС такого призначення слід віднести наступну множину задач, успішний розв'язок яких забезпечить їх конкурентоздатність на ринку морської техніки:

- множину $T_{\text{БНС-К}}$ задач раціонального вибору форми корпусу БНС, який би максимально повно відповідав вимогам до морехідності таких суден – остійності, міцності, водонепроникності, непотоплюваності, плавучості, керованості (задача $T_{\text{БНС-К-М}} \in T_{\text{БНС-К}}$) та вимогам до ефективного виконання всього переліку режимів щодо застосування АНПА (задача $T_{\text{БНС-К-Еф}} \in T_{\text{БНС-К}}$); зазначимо, що на цей час використовують чотири основні форми корпусу БНС: твердий надувний корпус, однокорпусні (типу «каяк»), катамаран (двохкорпусні) та тримарани (трьохкорпусні);

- множину $T_{\text{БНС-Е}}$ задач вибору типу та потужності головної енергетичної установки – дизель-електрична, акумуляторна, вітрогенераторна, фотоелектрична тощо (задача $T_{\text{БНС-Е-ГЕУ}} \in T_{\text{БНС-Е}}$) та рушійно-стернового комплексу БНС – гребні гвинти у насадках, поворотні рульові колонки, водомети тощо (задача $T_{\text{БНС-Е-ПК}} \in T_{\text{БНС-Е}}$); крім того, важливою складовою підмножини задач $T_{\text{БНС-Е}}$ є задача побудови інтегрованої електроенергетичної системи БНС (в англійській літературі – Integrated Power and Energy Systems, IPES), яка б забезпечила оптимізацію процесів зберігання та ефективного використання бортової енергії з метою збільшення часу виконання морської місії БНС (задача $T_{\text{БНС-Е-Інт}} \in T_{\text{БНС-Е}}$) [163];

From the systematic approach view point to the marine robotics design [162], the following set of tasks should be attributed to the general set T_{USV} of the USV creation main tasks of this purpose, the successful solution of which will ensure their competitiveness in the market of marine facilities:

- a set of $T_{\text{USV-K}}$ tasks of the rational choice of the USV hull shape, which would fully meet the seaworthiness requirements of such vessels – stability, strength, watertightness, unsinkability, buoyancy, controllability ($T_{\text{USV-K-M}} \in T_{\text{BNS-K}}$ task) and the requirements for effective fulfillment of the entire list of regimes regarding the use of AUV ($T_{\text{USV-K-Ef}} \in T_{\text{USV-K}}$ task); note that currently four main forms of USV hulls are used: solid inflatable hulls, single-hull (kayak-type), catamaran (double-hulls) and trimaran (triple-hulls);

- a set of $T_{\text{USV-E}}$ tasks of choosing the type and power of the main propulsion plant – diesel-electric, battery, wind generator, photovoltaic, etc. ($T_{\text{USV-E-MPP}} \in T_{\text{USV-E}}$ task) and the USV propulsion and steering complex – propellers in nozzles, rotary steering columns, water cannons, etc. ($T_{\text{USV-E-PSC}} \in T_{\text{USV-E}}$ task); in addition, an important component of the subset of $T_{\text{BNS-E}}$ tasks is the task of building the USV Integrated Power and Energy Systems (IPES), which would ensure the storage processes optimization and the onboard energy efficient use in order to increase the USV maritime mission execution time ($T_{\text{USV-E-Int}} \in T_{\text{USV-E}}$ task) [163];

– множини $T_{\text{БНС-І}}$ задач синтезу систем інформаційно-керуючого забезпечення функціонування БНС – автоматизованого (телекерування по радіоканалу) чи автоматичного (електронна навігація) керування рухом БНС (задача $T_{\text{БНС-І-Рух}} \in T_{\text{БНС-І}}$), автоматизованого чи автоматичного керування двохстороннім радіо- чи супутниковим зв'язком між БНС та центром керування і контролю (ЦКК, задача $T_{\text{БНС-І-З}} \in T_{\text{БНС-І}}$), автоматизованого чи автоматичного керування бортовим технологічним обладнанням – системами керування енергетичним та інформаційним забезпеченням групи АНПА перед початком місії, системою запуску групи АНПА з борту БНС згідно залежності (3.16), другий етап $RS_{\text{AUV}} \in A_{\text{MUC}}$ та дев'ятий етап $CS_{\text{AUV}} \in A_{\text{MUC}}$ (задача $T_{\text{БНС-І-БТО}} \in T_{\text{БНС-І}}$), автоматизованого чи автоматичного керування загальносудновими механізмами – електро- та гідравлічним обладнанням безпікажного судна (задача $T_{\text{БНС-І-ЗСМ}} \in T_{\text{БНС-І}}$);

– множини $T_{\text{БНС-Ј}}$ задач синтезу складових БНС, які забезпечують ефективне застосування групи АНПА за основним призначенням; зокрема, на сьогодні до таких складових можна віднести розробку берегового чи мобільного центру керування і контролю БНС (задача $T_{\text{БНС-Ј-ЦКК}} \in T_{\text{БНС-Ј}}$), розробку системи керування корисним вантажем (КВ) БНС – систему випуску групи АНПА з борту БНС як об'єкта автоматизованого чи автоматичного керування (задача $T_{\text{БНС-Ј-КВ}} \in T_{\text{БНС-Ј}}$) та розробку вбудованих систем діагностики і захисту електромеханічного обладнання БНС (задача $T_{\text{БНС-Ј-Діагн}} \in T_{\text{БНС-Ј}}$ та задача $T_{\text{БНС-Ј-Зах}} \in T_{\text{БНС-Ј}}$).

Таким чином, генеральна множина $T_{\text{МБК}}$ головних задач створення МБК може бути представлена у вигляді:

$$T_{\text{МБК}} = [T_{\text{БНС-К}}; T_{\text{БНС-Е}}; T_{\text{БНС-І}}; T_{\text{БНС-Ј}}], \quad (4.1)$$

$$T_{\text{МUC}} = [T_{\text{USV-К}}; T_{\text{USV-Е}}; T_{\text{USV-І}}; T_{\text{USV-Ј}}], \quad (4.1)$$

де

$$T_{\text{БНС-К}} = \{T_{\text{БНС-К-М}}; T_{\text{БНС-К-Еф}}\}; \quad (4.2)$$

$$T_{\text{БНС-Е}} = \{T_{\text{БНС-Е-ГЕУ}}; T_{\text{БНС-Е-РК}}; T_{\text{БНС-Е-Імм}}\}; \quad (4.3)$$

$$T_{\text{БНС-І}} = \{T_{\text{БНС-І-Рух}}; T_{\text{БНС-І-З}}; T_{\text{БНС-І-БТО}}; T_{\text{БНС-І-ЗСМ}}\}; \quad (4.4)$$

$$T_{\text{БНС-Ј}} = \{T_{\text{БНС-Ј-ЦКК}}; T_{\text{БНС-Ј-КВ}}; T_{\text{БНС-Ј-Діагн}}; T_{\text{БНС-Ј-Зах}}\}. \quad (4.5)$$

– a set of $T_{\text{USV-І}}$ tasks of USV information and control operation system synthesis – automated (telecontrol via radio channel) or automatic (electronic navigation) control of the USV motion ($T_{\text{USV-І-Motion}} \in T_{\text{USV-І}}$ task), automated or automatic control of two-way radio or satellite communication between the USV and the command and control center (CCC, $T_{\text{USV-І-C}} \in T_{\text{USV-І}}$ task), automated or automatic control of on-board technological equipment (OTE) – control systems for energy and information support of the AUV group before the beginning of the mission, the AUV group launch system from the USV board according to dependence (3.16), the second stage $RS_{\text{AUV}} \in A_{\text{MUC}}$ and the ninth stage of $CS_{\text{AUV}} \in A_{\text{MUC}}$ (task $T_{\text{USV-І-OTE}} \in T_{\text{USV-І}}$), automated or automatic control of general ship mechanisms – electric and hydraulic equipment of a crewless vessel (task $T_{\text{USV-І-GSM}} \in T_{\text{USV-І}}$);

– a set of $T_{\text{USV-Ј}}$ tasks for the synthesis of USV components that ensure the effective use of the AUV group for its main purpose; in particular, today such components include the development of a coastal or mobile command and control center for the USV ($T_{\text{BNS-Ј-CCC}} \in T_{\text{BNS-Ј}}$ task), USV payload (PL) control system development – a system for releasing a group of AUVs from the USV board as an object of automated or automatic control ($T_{\text{USV-Ј-PL}} \in T_{\text{USV-Ј}}$ task) and the development of built-in systems for diagnosing and protecting electromechanical equipment of the USV ($T_{\text{USV-Ј-Diagn}} \in T_{\text{USV-Ј}}$ task and $T_{\text{USV-Ј-Pro}} \in T_{\text{USV-Ј}}$ task).

Thus, the general set T_{MBC} of the main tasks of MUC creation can be represented as:

where

$$T_{USV-K} = \{T_{USV-K-M}; T_{USV-K-Eff}\}; \quad (4.2)$$

$$T_{USV-E} = \{T_{USV-E-MPP}; T_{USV-E-PSC}; T_{USV-E-Imm}\}; \quad (4.3)$$

$$T_{USV-I} = \{T_{USV-I-Motion}; T_{USV-I-Z}; T_{USV-I-OTE}; T_{USV-I-GSM}\}; \quad (4.4)$$

$$T_{USV-J} = \{T_{USV-J-CCC}; T_{USV-J-KB}; T_{USV-J-Diagn}; T_{USV-J-Pro}\}. \quad (4.5)$$

Виходячи з (4.1)-(4.5) можна констатувати, що розробка БНС як носіїв групи АНПА є складним прикладним науковим завданням, яке необхідно виконувати із залученням багатьох наукових та інженерних дисциплін.

Тут розглянемо лише дві задачі з генеральної множини (4.1)-(4.5) можна констатувати, що розробка БНС як носіїв групи АНПА є складним прикладним науковим завданням, яке необхідно виконувати із залученням багатьох наукових та інженерних дисциплін.

Тут розглянемо лише дві задачі з генеральної множини (4.1), які пов'язані з автоматизацією керування БНС: задачу $T_{БНС-I-Pyx} \in T_{БНС-I}$ вдосконалення керування рухом БНС та задачу $T_{БНС-J-Vun} \in T_{БНС-J}$ випуску групи АНПА з борту БНС-носія, яка входить у підмножину $T_{БНС-J}$.

У якості першого кроку до розв'язку вказаних задач розглянемо загальні властивості та особливості БНС як об'єкту автоматичного керування.

4.3. Особливості БНС як об'єкту автоматичного керування

4.3. USV features as an automatic control object

БНС-носії групи АНПА являють собою об'єкти морської робототехніки, які функціонують під керуванням систем автоматичного керування різного призначення та складності.

Автоматичне керування БНС являє собою складну прикладну наукову задачу, до основних особливостей синтезу якої можна віднести:

- суттєву нелінійність БНС як об'єкту керування, обумовлену нелінійним характером його виконавчих механізмів та нелінійним характером обтікання корпусу судна як твердого тіла, яке рухається у воді;

Based on (4.1)-(4.5), it can be stated that the development of USVs as AUV group carriers is a complex applied scientific task, which must be performed with the involvement of many scientific and engineering disciplines.

Here we will consider only two general tasks. Based on (4.1)-(4.5), it can be stated that the development of USV as carriers of the AUV group is a complex applied scientific task that must be performed with the involvement of many scientific and engineering disciplines.

Here we consider only two tasks from the general set (4.1) that are related to the USV control automation: $T_{USV-I-Motion} \in T_{USV-I}$ of the USV control motion improvement task and AUV group release task $T_{USV-J-Rel} \in T_{USV-J}$ from aboard the AUV-carrier, as included in the subset T_{USV-J} .

As a first step to solving these tasks, we will consider the USV general properties and features as an automatic control object.

USV carriers of the AUV group are of marine robotics objects that function under the automatic control systems monitoring of various purposes and complexity levels.

USV automatic control is a complex applied scientific task, the main features of the synthesis of which include:

- significant non-linearity of the USV as a control object, due to the non-linear nature of its executive mechanisms and the non-linear nature of the flow around the ship's hull as a solid body moving in water;

– невизначеність зовнішніх збурень, які діють на корпус БНС (вітро-хвильових збурень та збурень, породжуваних течіями).

Наукові розробки, пов'язані з синтезом та дослідженням САК БНС, наразі проводяться у більшості провідних морських країн світу, оскільки такі судна є серйозною альтернативою традиційному водному транспорту, у тому числі й на внутрішніх водних шляхах [164-166].

Як об'єкти автоматизації БНС утворюють особливий клас морських рухомих об'єктів, для яких характерним є рух з високою швидкістю (до 45 вузлів), часте маневрування зі значними прискореннями [167]. Важливо відзначити, що функціонування розглянутого класу суден часто здійснюється в районах з обмеженими навігаційними умовами і вимагає великої точності утримання на заданій траєкторії.

Виходячи з цього, автоматизація керування БНС як носія групи АНПА, у залежності від вимог практики може бути реалізована такими рівнями:

– рівень телекерування LC_T (дистанційне ручне керування людиною-оператором процесів руху БНС та його бортовим технологічним обладнанням з берегового чи мобільного ПКК);

– рівень автоматизованого керування LC_{AT} (за участю людини-оператора, коли стабілізація курсу, траєкторії та швидкості судна виконуються автоматично, але під контролем людини-оператора з можливістю оперативного втручання у критичних ситуаціях; при цьому, керування бортовим технологічним обладнанням БНС виконується людиною-оператором у режимі телекерування);

– рівень автоматичного керування LC_T (забезпечує повністю автоматичне керування БНС в усіх режимах його функціонування, включаючи електронну навігацію, зв'язок з ЦКК, керування бортовим технологічним обладнанням та загальносудновими механізмами; телекерування залишається як форма контролю безпеки функціонування БНС);

– uncertainty of external disturbances acting on the USV hull (wind-wave disturbances and disturbances generated by currents).

Scientific developments related to the synthesis and research of USV ACS are currently carried out in most of the leading maritime countries of the world, since such vessels form a serious alternative to traditional water transport, including on inland waterways [164-166].

As automation objects, USV form a special class of marine mobile objects, which are characterized by movement at high speed (up to 45 knots), frequent maneuvering with significant accelerations [167]. It is important to note that the operation of the class of ships under consideration is often carried out in areas with limited navigational conditions and requires high accuracy of keeping on a given trajectory.

Based on this, the USV control automation as the AUV group carrier, depending on the requirements of practice, can be implemented by the following levels:

– telecontrol level LC_T (remote manual control of the USV motion processes by a human operator and its on-board technological equipment from a coastal or mobile PCC);

– automated control level LC_{AT} (with the participation of a human operator, when the stabilization of the course, trajectory and speed of the vessel is performed automatically, but under the control of a human operator with the possibility of operative intervention in critical situations; at the same time, the USV onboard technological equipment is controlled by a human operator in the telecontrol mode);

– automatic control level LC_T (provides fully automatic control of the USV in all modes of its operation, including electronic navigation, communication with the CCC, control of on-board technological equipment and general ship mechanisms; telecontrol remains as a form of USV operation safety control);

– рівень інтелектуального керування LC_I (ґрунтується на застосування теорії штучного інтелекту і забезпечує здатність до «розуміння» і навчання САК щодо БНС як об'єкта керування, збурень зовнішнього середовища та умов роботи [168]; вказані властивості дають змогу реалізувати високоточні САК траєкторним рухом технічних систем, коли їх математична модель невідома чи недостовірна.

Таким чином, множина основних рівнів автоматизації БНС може бути представлена наступною залежністю:

$$LC_T = \{LC_P; LC_{AT}; LC_P; LC_I\}. \quad (4.6)$$

Крім того, САК БНС повинна відповідати наступним вимогам [167]:

– забезпечувати безперервність і заводоохист виробленню навігаційних параметрів, а також забезпечувати точність утримання на траєкторії в межах 2-5 метрів;

– склад САК повинен бути компактным, тобто містити мінімальну необхідну кількість приладів;

– прилади системи повинні мати малі масогабаритні характеристики, низьку вартість та низьке енергоспоживання;

– САК повинна забезпечувати ефективне функціонування БНС в умовах хвилювання моря до 3-х балів.

Розглянемо тепер основні режими роботи БНС як носія групи БНС.

Виходячи з основних завдань експлуатації БНС сформулюємо основні режими його функціонування при повній автоматизації:

– режим прямолінійного руху зі стабілізацією курсу φ та швидкості v ;

– режим руху по заданій траєкторії зі стабілізацією швидкості руху v ;

– режим маршрутної точки, коли САК БНС прагне довести судно до заданої маршрутної точки, постійно оновлюючи свій курс, що змінюється внаслідок дії зовнішніх збурень;

– режим циркуляції з заданими значеннями радіусу циркуляції r_C та кутової швидкості ω ;

– intelligent control level LC_I (based on the artificial intelligence theory application and provides the ability to «understand» and train the ACS with respect to the USV as a control object, environmental disturbances and operating conditions [168]; these properties make it possible to implement high-precision ACS of the trajectory movement of systems, when their mathematical model is unknown or unreliable.

Thus, the set of USV automation basic levels can be represented by the following dependence:

In addition, the USV ACS must meet the following requirements [167]:

In addition, the USV ACS must meet the following requirements [167]:

– to ensure continuity and noise immunity in the development of navigation parameters, as well as to ensure the accuracy of keeping on the trajectory within 2-5 meters;

– the ACS composition should be compact, that is, contain a minimum required number of devices;;

– the system devices must have small weight and size characteristics, low cost and low power consumption;

– ACS should ensure the effective functioning of the USV in conditions of sea waves up to 3 points.

Let us now consider the USV main operation modes as USV group carrier.

Based on the USV operation main tasks, we will formulate its main operation modes in full automation:

– mode of rectilinear movement with the stabilization of the course and speed v ;

– mode of movement along a given trajectory with the stabilization of movement speed v ;

– waypoint mode, when the USV ACS strives to bring the vessel to a given waypoint, constantly updating its course, which changes due to external disturbances action;

– circulation mode with specified values of circulation radius r_C and angular velocity ω ;

– режим позиціонування у точці (для спуску групи АНПА перед виконанням підводної місії та для прийому їх на борт після завершення підводної місії);

– режим дрейфу на акваторії, де виконується підводна місія.

Вказані режими реалізуються за допомогою рушійно-стернового комплексу (РСК) судна, який зазвичай, складається з гребного гвинта у насадці, що приводиться в рух електричним чи тепловим двигуном. Іншими варіантами побудови РСК є водометний рушій, вектор тяги якого регулюється за допомогою сопла, або спеціальне вітрило (БНС-вітрильник) [169].

Крім завдань автоматизації керування рухом БНС, актуальними є також завдання автоматизованого чи автоматичного керування його палубними механізмами – спуско-піднімальними пристроями (СПП) для групи АНПА.

Таким чином, забезпечення функціонування БНС відноситься до завдань комплексної автоматизації нелінійного морського рухомого об'єкта, що працює в умовах невизначеності характеристик зовнішнього середовища (ЗС) і нестационарності власних параметрів. Його успішний розв'язок можливий лише на базі застосування сучасних здобутків у галузі штучного інтелекту та математичного моделювання нелінійних динамічних об'єктів.

Узагальнена функціональна структура схема системи автоматичного керування таким БНС показана на рис. 4.4 [170].

Три верхні рівні приймають і обробляють завдання від зовнішнього (берегового чи мобільного) центру керування та контролю (ЦКК) з використанням інформації від системи сенсорів БНС $C_{БНС}$ та системи сенсорів $C_{ЗС}$ зовнішнього середовища. Вказані системи сенсорів генерують інформацію про поточні параметри та технічний стан механізмів БНС і параметри морського середовища.

– point positioning mode (for launching a group of AUVs before the underwater mission execution and for receiving them on board after the completion of the underwater mission);

– drift mode in the water area where the underwater mission is being performed.

These specified modes are implemented using the vessel propulsion-steering complex (PSC), which usually consists of a propeller in a nozzle driven by an electric or thermal engine. Other options for constructing the PSC are a water-jet propulsion system, the thrust vector of which is controlled by a nozzle, or a special sail (USV-sailboat) [169].

Apart from the USV motion control automation tasks, the tasks of automated or automatic control of its deck mechanisms – lowering and lifting devices (LLD) for the AUV group are also relevant.

Thus, ensuring the USV functioning refers to the tasks of complex automation of a nonlinear marine mobile object operating under conditions of uncertainty in the characteristics of the external environment (EE) and non-stationarity of its own parameters. The successful solution of such a task is possible only with the wide application of modern achievements in the field of artificial intelligence and mathematical modeling of nonlinear dynamic objects.

A generalized functional structure diagram of the automatic control system for such a USV is shown in Fig. 4.4 [170].

The three upper levels receive and process tasks from an external (coastal or mobile) command and control center (CCC) using information from the USV sensor system C_{BNS} and the environmental sensor system C_{EE} . These sensor systems generate information about the current parameters and technical condition of the USV mechanisms and the marine environment parameters.

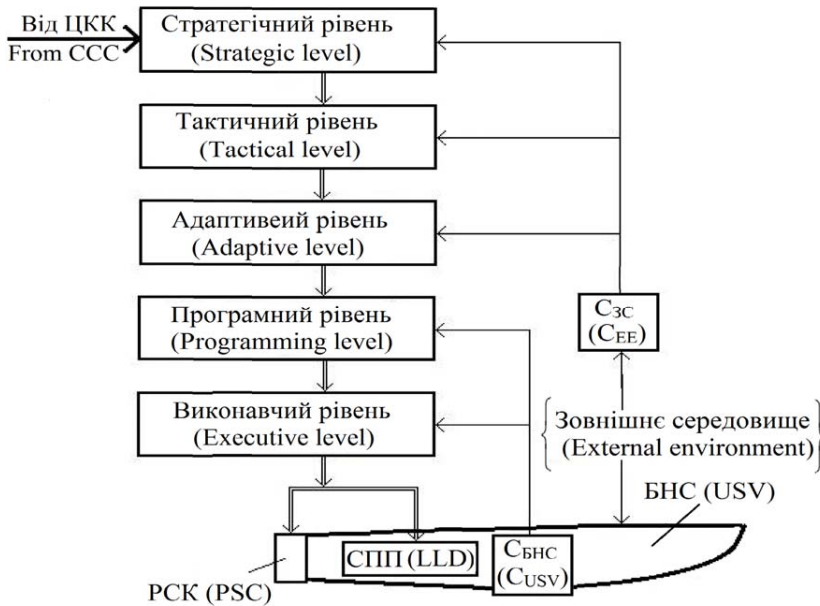


Рисунок 4.4 – Узагальнена функціональна схема системи втоматичного керування БНС
Figure 4.4 – Generalized functional diagram of the USV automatic control system

Таким чином, верхній рівень – це рівень ухвалення рішення або допомоги людині в постановці завдання та у первинній постановці цілей функціонування об’єктів керування. У найближчій перспективі найбільш важливі функції цього рівня залишаються за людиною. У перспективі, як вважають науковці, розв’язок завдань цього рівня може бути виконане без участі людини за допомогою «сильного» штучного інтелекту.

Два нижніх рівні генерують керуючі команди для виконавчих механізмів БНС – його РСК і КВ. Для них джерелами команд є сигнали від верхніх рівнів керування, а також сигнали системи контролю за «внутрішніми» змінними – станом виконавчих механізмів БНС.

При цьому стратегічний рівень аналізує завдання, що надійшло від ЦКК, і планує загальне функціонування БНС для його виконання з урахуванням параметрів зовнішнього середовища.

Тактичний рівень управляє реалізацією стратегічного плану – розробляє траекто-

Thus, the upper level is the level of decision-making or assistance to a person in setting a task and setting the primary goals for the functioning of control objects. In the future, the most important functions of this level remain with the person. In the future, according to scientists, the solution of problems of this level can be performed without human intervention with the help of «strong» artificial intelligence.

The two lower levels generate control commands for the USV executive mechanisms – its PSC and PL. For them, the sources of commands are signals from the upper levels of control, as well as signals from the control system by «internal» variables – the state of USV executive mechanisms

At the same time, the strategic level analyzes the task received from the CCC and plans the USV overall functioning for its implementation, taking into account the parameters of the external environment.

The tactical level controls the implementation of the strategic plan – it develops the spatial

рію просторового переміщення, формує черговість операцій (рухів) у відповідності зі стратегією функціонування БНС та з урахуванням зовнішніх збурень.

Адаптивний рівень коригує рішення тактичного рівня з урахуванням фактичного стану зовнішнього середовища, здійснює пошук оптимальних управлінських рішень у рамках обраної тактики виконання завдання, що надійшло від ЦКК.

Програмний рівень розглянутої системи керування реалізує окремі типові операції – елементарні переміщення БНС та роботу КВ. Це досягається застосуванням заздалегідь інстальованих керуючих програм, які здійснюють, у загальному випадку, групове керування виконавчими механізмами БНС та його корисного вантажу. На цьому рівні виконується аналіз інформації про середовище та умов функціонування БНС, формування послідовності базових операцій та контроль їх виконання для рішення поставленої верхнім рівнем завдання (вибір шляхів руху, траєкторій руху виконавчих органів та ін.).

Виконавчий рівень реалізує керування окремими виконавчими механізмами у режимах стабілізації руху, роботи з КВ, збору інформації про зовнішнє середовище та ін.

Поза залежністю від границь рівнів системи керування при побудові БНС необхідна інтеграція всіх рівнів керування, зокрема, використання єдиного механізму обміну даними й програмування всіх рівнів (кросплатформності).

Функціонування БНС передбачає наступні режими автоматичного керування [171]:

- автоматичне діагностування R_{Dl} механізмів, вузлів і систем БНС перед початком виконання місії;
- автоматичний вихід R_{Bl} з бази до початкової точки маршруту заданої місії;
- автоматичний рух БНС по заданій траєкторії R_{Tl} під час переходу у робочу зону акваторії;
- автоматичне маневрування R_M у робочій зоні акваторії та/чи автоматична стабілізація R_S у заданій точці заданої акваторії;

movement trajectory, forms the sequence of operations (movements) in accordance with the USV functioning strategy and taking into account external disturbances.

The adaptive level corrects the decision of the tactical level, taking into account the actual state of the external environment, searches for optimal control decisions within the framework of the chosen tactics for fulfilling the task received from the CCC.

The software (programming) level of the control system under consideration implements individual typical operations – elementary displacements of the USV and PL. This is achieved by using pre-installed control programs that generally perform the USV executive mechanism group control and its payload. At this level, the information analysis about the environment and conditions of the USV operation, basic sequence formation operations and control of their implementation to solve the problem set by the upper level (selection of movement paths, trajectories of movement of executive bodies, etc.) is carried out at this level.

The executive level implements the control of individual actuators in the modes of motion stabilization, operation with PL, collection of information about the external environment, etc.

Regardless of the boundaries of the control system levels, when building a USV, it is necessary to integrate all control levels, in particular, the use of a single mechanism for data exchange and programming of all levels (cross-platform).

The USV functioning provides for the following modes of automatic control [171]:

- automatic diagnosis R_{Dl} of the USV mechanisms, nodes and systems before the beginning of the mission;
- automatic departure R_{Bl} from the base to the route starting point of the given mission;
- USV automatic motion R_{Tl} along the given trajectory during the transition to the working zone of the water area;
- automatic maneuvering R_M in the working zone of the water area and/or

– автоматичний рух БНС R_{T2} по траскторії повернення у кінцеву точку маршруту місії;

– автоматичне повернення R_{B2} до бази;
 – автоматичне діагностування R_{D2} механізмів, вузлів і систем БНС після завершення місії.

Таким чином, множина $R_{БНС}$ основних режимів функціонування БНС мстить наступні елементи:

$$R_{БНС} = \{R_{D1}; R_{B1}; R_{T1}; R_M; R_S; R_{T2}; R_{B2}; R_{D2}\}. \quad (4.7)$$

$$R_{USV} = \{R_{D1}; R_{V1}; R_{T1}; R_M; R_S; R_{T2}; R_{B2}; R_{D2}\}. \quad (4.7)$$

Очевидно, що для всіх основних режимів роботи БНС, крім режимів R_{D1} та R_{D2} , характерним є наявність дії зовнішніх збурень \vec{F}_{EP} у вигляді векторів сил вітру \vec{F}_{Wn} , хвиль \vec{F}_{Wv} та течії \vec{F}_V .

До головних задач САК БНС слід віднести наступні задачі:

– задача безпечної навігації БНС у режимах руху $\{R_{B1}; R_{T1}; R_M; R_S; R_{T2}; R_{B2}\}$; тут має передбачатись, крім дії зовнішніх збурень \vec{F}_{FP} , наявність навігаційних перешкод у вигляді інших плавзасобів;

– задача автоматичного керування головною силовою установкою (ГСУ) БНС (дизелем чи іншим джерелом механічної чи електричної енергії БНС);

– задача автоматичного керування рушійно-стерновим комплексом (РСК) БНС;

– задача автоматичного керування допоміжними судновими машинами і механізмами (ДСММ) БНС;

– задача автоматичного керування корисним вантажем (КВ) БНС;

– задача автоматичної діагностики (контролю працездатності) обладнання (ДО) БНС (режими R_{D1} та R_{D2}).

Очевидно, що такий складний перелік вимог, що висуваються до САК БНС, можливо задовольнити лише шляхом застосування сучасних принципів і технологій побудови систем керування.

Більшістю дослідників визнають необхідність використання багаторівневої (ієрархічної) структури побудови інтелектуальних систем керування рухомими

automatic stabilization R_S at a given point in a given water area;

– USV automatic movement R_{T2} along the path of return to the mission route end point;

– automatic return R_{B2} to the base;

– automatic diagnosis R_{D2} mechanisms, nodes and systems of the USV after the mission completion.

Thus, the USV set R_{USV} of the operation main modes includes the following elements:

Obviously, for all the USV main operating modes, except for R_{D1} and R_{D2} modes, it is characterized by the presence of external disturbances \vec{F}_{FP} in the form of vectors wind forces \vec{F}_{Wn} , waves \vec{F}_{Wv} and current \vec{F}_V .

The following tasks should be included among the USV ACS main tasks:

– the task of safe navigation of the USV in motion modes $\{R_{B1}; R_{T1}; R_M; R_S; R_{T2}; R_{B2}\}$; here, in addition to the effect of external disturbances \vec{F}_{FP} , the presence of navigational interferences in the form of other vessels should be provided;

– the task of automatic control of the USV main propulsion system (MPS) (diesel or other USV source of mechanical or electrical energy);

– the task of automatic control of the USV propulsion-steering complex (PSC);

– the task of automatic control of auxiliary ship machines and mechanisms (ASMM) of the USV;

– the task of automatic control of the USV payload (PL);

– the task of USV automatic equipment diagnostics (ED) (operational control) of (R_{D1} and R_{D2} modes).

It is obvious that such a complex list of requirements for USV ACS can be satisfied only by applying modern principles and technologies of building control systems.

Most researchers recognize the need to use a multi-level (hierarchical) structure for building intelligent control systems of moving objects. Successful solution of the tasks of

об'єктами. Успішне рішення завдань керування такими об'єктами можливо при побудові ефективного керування на кожному з рівнів і не менш ефективному їх комплексуванні.

Розглянемо особливості побудови інтелектуальних САК БНС, які ґрунтуються на принципах багаторівневої структури згідно рис. 4.4. Сам розподіл на рівні є досить умовним і в значній мірі залежить від конкретної реалізації БНС. У якості основної класифікаційної ознаки при виділенні рівнів керування БНС використовують властивості об'єктів (складових БНС), керування якими реалізується на відповідному рівні.

Тоді узагальнена структури САК рухом БНС в умовах дії зовнішніх збурень буде мати вигляд, показаний на рис. 4.5.

Розглянемо основні принципи роботи запропонованої інтелектуальної САК.

Генератор режимів роботи БНС – це програмний пристрій чи радіоканал, через який задається поточний режим роботи БНС згідно множині (4.7).

Блоки системного опрацювання знань призначені для аналізу зовнішньої обстановки (вектору \vec{F}_{FP}) на основі викори-

controlling such objects is possible when building effective control at each of the levels and no less efficient than their integration (complexation).

Let us consider the features of the USV intelligent ACS construction based on the multilevel structure principles according to Fig. 4.4.

The distribution at the level itself is rather conditional and largely depends on the USV specific implementation. The properties of objects (the USV components), which are controlled at the corresponding level, are used as the main classification feature when singling out the USV control levels.

Then the generalized structure of the USV motion ACS under the action of external disturbances will have the form shown in Fig. 4.5.

Let us consider the basic operation principles of the proposed intellectual ACS.

The USV operating mode generator is a software device or a radio channel through which the current USV operation mode is set according to the set (4.7).

Blocks of systemic knowledge processing are designed to analyze the external environment (vector \vec{F}_{FP}) based

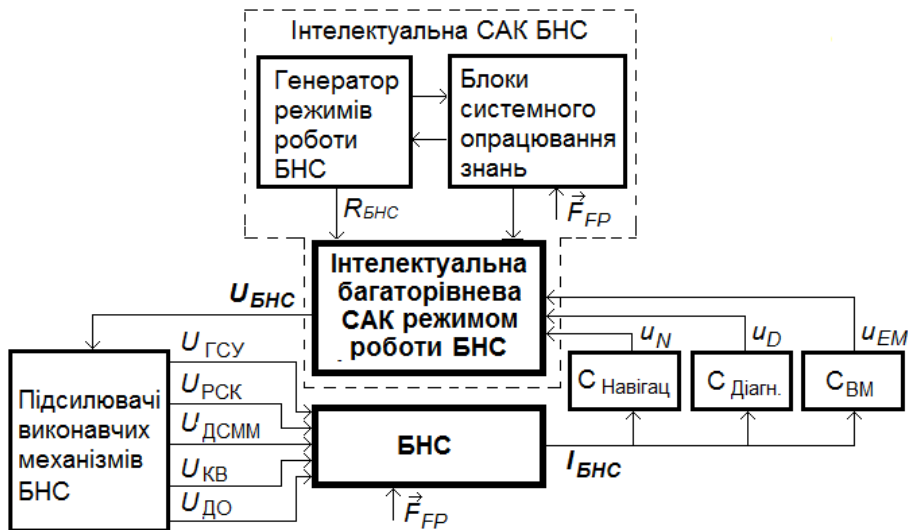


Рисунок 4.5 – Узагальнена структурна схема інтелектуальної САК рухом БНС
 Figure 4.5 – Generalized structural diagram of the USV motion intelligent ACS

стання наступних інформаційних технологій – експертних систем, штучних нейронних мереж, нечіткої логіки, еволюційних методів і генетичних алгоритмів.

В основу концепції інтелектуальності, зазвичай, покладено:

- уміння системи працювати з формалізованими знаннями людини (експертні системи, нечітка логіка);
- властиві людині способи навчання і мислення (нейронні мережі, генетичні алгоритми).

САК режимом роботи БНС реалізує заданий режим роботи судна, у результаті чого формується множина UBHC сигналів керування виконавчими механізмами БНС. Після підсилення генерованих САК сигналів керування ГСУ, РСК, ДСММ, КВ та ДО (відповідно, сигнали УГСУ, УРСК, УДСММ, УКВ та УДО) вони надходять до відповідних виконавчих механізмів БНС і, таким чином, забезпечують виконання заданого йому режиму функціонування.

Вихідними сигналами БНС є множина інформаційних сигналів IBHC, які характеризують поточний стан БНС як об'єкту керування.

Важливою складовою САК є система сенсорів, яка складається з трьох груп:

- навігаційних сенсорів SНавігац., які забезпечують САК інформацією про поточні навігаційні характеристики БНС (курс, швидкість, географічні координати, а також їх похідні);
- діагностичні сенсори SDiagn., які дають інформацію про технічний стан виконавчих вузлів, механізмів і систем БНС;
- сенсори СВМ виконавчих механізмів БНС, які утворюють зворотній зв'язок для САК по керованим величинам БНС як об'єкту керування.

Множина сигналів сенсорів uN, uD та uEM утворюють необхідні канали зворотного зв'язку, необхідного для ефективної роботи САК в основних режимів роботи згідно (4.7).

Таким чином, запропонована САК БНС реалізує два узагальнені принципи інтелектуального керування:

on the use of the following information technologies – expert systems, artificial neural networks, fuzzy logic, evolutionary methods and genetic algorithms.

The concept of intelligence is usually based on:

- the ability of the system to work with formalized human knowledge (expert systems, fuzzy logic);
- human ways of learning and thinking (neural networks, genetic algorithms).

The USV ACS operation mode implements the vessel given operation mode, as a result of which a set of control signals UUSV of USV executive mechanisms is formed. After amplification of the control signals generated by the ACS, the MPS, PSC, ASMM, PL and ED signals (respectively, the UMPS, UPSC, UASMM, UPL and UED signals) are sent to the corresponding executive mechanisms of the USV and, thus, ensure the fulfillment of the operating mode set for it.

The USV output signals are a set of information signals and the IUSV, which characterize the USV current state as a control object.

An important component of USV is the sensor system, which consists of three groups:

- navigation sensors SНавігац., which provide the ACS with information on the USV current navigation characteristics (course, speed, geographical coordinates, as well as their derivatives);
- diagnostic sensors SDiagn., which provide information about the technical condition of actuating units, mechanisms and systems of USV;
- USV executive mechanism sensors SEM, which form feedback for ACS on USV controlled values as a control object.

The set of sensor signals uN, uD and uEM form the necessary feedback channels necessary for the ACS effective operation in the main operation modes according to (4.7).

Thus, the proposed USV ACS implements two generalized principles of intelligent control:

– керування на основі аналізу зовнішніх даних ситуацій та подій (ситуаційне керування з урахуванням впливів \vec{F}_{FP});

– використання сучасних інформаційних технологій для обробки даних та знань.

Наведені вище узагальнена функціональна схема та узагальнена структурна схема інтелектуальної САК рухом БНС враховують основні особливості БНС як об'єкту автоматичного керування і можуть слугувати основою для подальшого синтезу системи автоматичного керування БНС як носія групи АНПА в умовах невизначеності зовнішніх збурень.

– control based on the analysis of external data of situations and events (situational control taking into account the effects \vec{F}_{FP});

– use of modern information technologies for data and knowledge processing.

The above generalized functional diagram and generalized structural diagram of the intelligent ACS with the USV motion take into account the main USV features as an object of automatic control and can serve as the basis for the further USV automatic control system synthesis as the AUV group carrier in conditions of uncertainty of external disturbances.

4.4. Інформаційна модель БНС

4.4. Information model of the USV

Безекіпажне надводне судно – це морський робот, який працює повністю автономно. Інформаційна модель БНС дає змогу досліджувати властивості судна як джерела просторової інформації та розробляти високопродуктивні пакети комп'ютерних програм для успішного виконання ним морських місій.

Синтез інформаційної моделі БНС є важливим етапом у створенні суден, які призначені для виконання морських місій з використанням безлюдних технологій.

Інформаційна модель судна будується методом аналізу інформаційних потоків для повного переліку режимів його роботи.

Пропонується розглядати інформаційну модель БНС у складі двох основних складових:

– моделі IM_I внутрішніх інформаційних потоків, які функціонують всередині БНС:

– моделі IM_E зовнішніх інформаційних потоків, які характерні для каналів обміну інформацією між БНС та береговим центром керування.

Інформаційну модель внутрішніх інформаційних потоків IM_I пропонується створювати у складі наступних субмоделей:

– субмодель IM_{I-ME} інформаційних потоків від сенсорів БНС, які вимірюють гідрофізичні та гідрохімічні характеристики

An unmanned surface vessel is a marine robot that operates completely autonomously. The USV information model makes it possible to study the properties of the ship as a source of spatial information and to develop high-performance computer program packages for its successful execution of maritime missions.

The synthesis of the USV information model is an important stage in the creation of vessels that are designed to perform maritime missions using unmanned technologies.

The ship's information model is built using the method of information flow analysis for a complete list of its operating modes.

It is proposed to consider the information model of the USV as part of two main components:

– models IM_I of internal information flows that function within the USV:

– models IM_E of external information flows, which are characteristic of information exchange channels between the USV and the coastal control center.

It is proposed to create an information model of internal information flows of IM_I as part of the following submodels:

– the submodel IM_{I-ME} of information flows from USV sensors that measure the hydrophysical and hydrochemical characteristics of the marine environment with

морського середовища з прив'язкою до часу та географічних координат; на основі цієї інформації створюється модель зовнішнього середовища, у якому працює БНС;

– субмодель $IM_{I-USV-SM}$ інформаційних потоків від сенсорів БНС, які вимірюють параметри його просторового руху як об'єкта автоматичного керування (навігація);

– субмодель $IM_{I-USV-C}$ інформаційних потоків, які функціонують у системі керування БНС; це, у першу чергу, сигнали керування головною енергетичною установкою БНС, його рушійно-рульовим комплексом та допоміжними системами;

– субмодель $IM_{I-USV-D}$ інформаційних потоків від сенсорів системи діагностики БНС, які дають змогу контролювати його технічний стан та прогнозувати тривалість виконання морської місії.

Інформаційну модель зовнішніх інформаційних потоків IM_E пропонується створювати у складі наступних субмоделей:

– субмодель I_{E-T} потоків телеметричної інформації від сенсорів усіх механізмів і систем БНС та його корисного вантажу, а також від сенсорів систем контролю та діагностики БНС та його корисного вантажу;

– субмодель I_{E-C} сигналів дистанційного керування БНС в усіх режимах його функціонування за призначенням;

– субмодель I_{E-D} інформаційних потоків системи документування процесу та результатів роботи БНС.

Отримана множина моделей утворює теоретичну основу розробки інформаційного забезпечення безлюдних технологій вивчення водного середовища.

reference to time and geographic coordinates; based on this information, a model of the external environment in which the USV works is created;

– the submodel $IM_{I-USV-SM}$ of information flows from USV sensors that measure the parameters of its spatial movement as an object of automatic control (navigation);

– submodel $IM_{I-USV-C}$ of information flows that function in the USV management system; these are, first of all, control signals of the main power plant of the USV, its propulsion and steering complex and auxiliary systems;

– the submodel $IM_{I-USV-D}$ of information flows from the sensors of the USV diagnostic system, which make it possible to monitor its technical condition and predict the duration of the maritime mission.

The information model of external information flows IM_E is proposed to be created as part of the following sub-models:

– submodel I_{E-T} of telemetric information flows from sensors of all mechanisms and systems of the USV and its payload, as well as from sensors of control and diagnostic systems of the USV and its payload;

– the submodel I_{E-C} of the USV remote control signals in all modes of its intended operation;

– submodel I_{E-D} of information flows of the system of documenting the process and results of the USV work.

The resulting set of models forms the theoretical basis for the development of information support for unmanned technologies for studying the aquatic environment.

4.5. Система автоматичного керування курсом БНС

4.5. AUV automatic course control system

Традиційно система автоматичного керування рухом судна по курсу (автостерновий) вирішує наступні завдання [172]:

– стабілізацію – автоматичне утримання судна на заданому курсі;

– маневрування – достатньо точне і швидке виконання отриманих команд (керуючих впливів).

Traditionally, the vessel motion automatic control system along the course (autosteering system) solves the following tasks [172]:

– stabilization – automatic keeping of the vessel on the given course;

– maneuvering – sufficiently accurate and fast execution of received commands (control actions).

Для реалізації завдання автоматичної стабілізації судна на курсі найчастіше використовується ПД-регулятор [173]:

$$\delta_A = k_1 \frac{d\psi}{dt} + k_2 \psi + k_3 \int_0^t \psi dt, \quad (4.8)$$

де δ_A – обчислений кут перекладання стерна РСК; ψ – відхилення судна від заданого курсу; $k_{1,2,3}$ – коефіцієнти регулятора.

Принцип роботи САК курсом судна за допомогою автостернового показаний на рис. 4.6.

На рисунку позначено: $\psi_3, \psi_\phi, \psi_{СК}$ – відповідно, заданий, фактичний та вимірний судновим компасом курсові кути судна; δ_c, δ_ϕ – відповідно, обчислений та фактично заданий для виконавчого механізму БНС (сервопривода) кут перекладки стерна; \vec{F}_{FP} – вектор зовнішніх збурень, які діють на БНС.

Для БНС як носіїв АНПА важливим режимом автономного функціонування, крім стабілізованого руху визначеним курсом R_{BI} , є також режими руху по заданій траєкторії R_{T1} та R_{T2} згідно множини (4.7). З розвитком електронної навігації (e-Navigation, [174]) актуальність розробки систем автоматичного керування траєкторним рухом БНС тільки зростає.

To implement the vessel automatic stabilization task on the course, the PID controller is most often used [173]:

where δ_A is the calculated PSC stern shift angle; ψ – vessel deviation from the given course; $k_{1,2,3}$ – coefficients of the regulator.

The ACS operation principle on the vessel course (heading) with the help of the auto-rudder (autosteering) is shown in Fig. 4.6.

The following are marked in the figure: $\psi_g, \psi_a, \psi_{VC}$ – respectively, the given, actual and measured vessel compass heading angles of the ship; δ_c, δ_a – the calculated and actually specified respectively, for the USV executive mechanism (servo drive) the stern steering angle; \vec{F}_{FP} is a vector of external disturbances acting on the USV.

For USV as AUV carriers, an important autonomous operation mode, in addition to the stabilized motion on the determined course R_{BI} , are also the motion modes along the given trajectory R_{T1} and R_{T2} according to the set (4.7). With the development of electronic navigation (e-Navigation, [174]), the relevance of the development of USV trajectory motion automatic control systems is only growing.

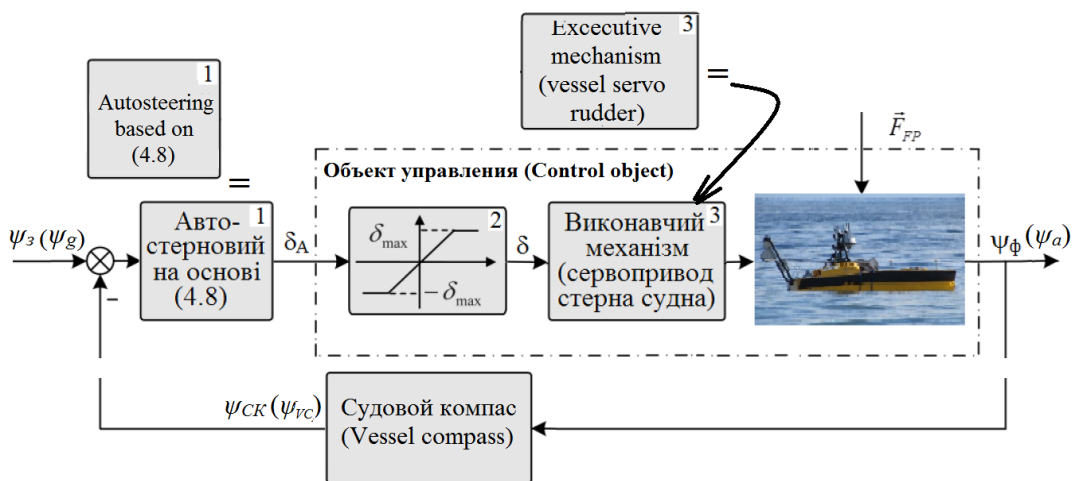


Рисунок 4.6 – Принцип роботи САК курсом судна
Figure 4.6 – The vessel heading ACS operation principle

Успішний розв'язок вказаної задачі радикально змінює ефективність автоматизованого судноводіння та є альтернативою завданню стабілізації на курсі, підвищує рівень автоматизації і безпеки мореплавання, забезпечує економію енергоресурсів БНС і зменшує навантаження на рульовий привод судна, оскільки зменшує число переключень стерна.

При русі по заданій траєкторії основною регульованою величиною є бічне відхилення центру тяжіння судна η від заданої лінії шляху.

Бічне відхилення обчислюється за даними числення і сигналами від засобів навігації, що безперервно виробляють координати судна. Заданий маршрут вводять в систему у вигляді координат початкової і кінцевої точок прямолінійних відрізків бажаної траєкторії, знятих з навігаційної карти.

На основі безперервних даних про поточне місце судна (точка M на рис. 4.7) система виробляє значення відхилення η .

Закон керування в завданні стабілізації на траєкторії будують у вигляді лінійної функції від: $\Delta\psi$ – відхилення курсу від курсового кута ділянки траєкторії; ω_z – кутової швидкості ривання; η – бічного відхилення від траєкторії і інтеграла від нього, що є, по суті, ПІД-регулятором по η з урахуванням того, що комбінація $\Delta\psi$ і ω_z може інтерпретуватися з деяким наближенням як похідна η .

Сигнал керування u_l такого ПІД-регулятора на кожен момент l дискретного часу визначається наступним співвідношенням [175]:

The successful solution of this task radically changes the efficiency of automated navigation and is an alternative to the task of stabilizing the course, increases the level of automation and safety of navigation, ensures the saving of USV energy resources and reduces the load on the vessel steering drive, as it reduces the number of rudder turns.

When moving along a given trajectory, the main adjustable value is the lateral deviation of the vessel's center of gravity η from the given track.

The lateral deviation is calculated based on calculation data and signals from navigational aids that continuously produce the vessel coordinates (position). The given route is entered into the system in the form of the start and end coordinate points of the desired trajectory rectilinear segments, taken from the navigation map.

Based on continuous data on the vessel current position (point M in Fig. 4.7), the system produces a deviation value η .

The control law in the stabilization task on the trajectory is built as a linear function from: $\Delta\eta$ – the course deviation from the heading angle of the trajectory section; ω_z – the yaw angular velocity; η – the lateral deviation from the trajectory and the integral from it, which is, in fact, a PID-controller with respect to η , taking into account the fact that the combination of $\Delta\psi$ and ω_z can be interpreted with some approximation as a derivative η .

The control signal u_l of such a PID controller for each moment l of discrete time is determined by the following relation [175]:

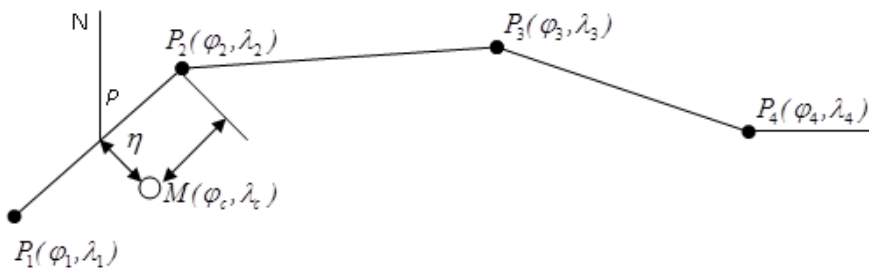


Рисунок 4.7 – До питання стабілізації судна на траєкторії
Figure 4.7 – On the issue of vessel stabilization on the trajectory

$$u_l = -[s_l(\psi_l - \Delta\psi_l) + S_2\omega_{zl}], \quad (4.9)$$

де $\Delta\psi_l$ – поправка до курсу заданому, обчислювана за формулою

where $\Delta\psi_l$ – the correction to the given course, calculated by the formula

$$\Delta\psi_l = s_3\eta_l + s_4 \sum_{i=1}^K \eta_i, \quad (4.10)$$

де $s_{1,2,3,4}$ – коефіцієнти управління.

where $s_{1,2,3,4}$ – control coefficients

Вимірювання координати η , формоване по координатах місцеположення – широті ϕ_{\square} і довготі λ_{\square} (координати обсервацій) та по відомих параметрах локсодромічної ділянки, заданої координатами початкової точки ϕ_0, λ_0 і курсовим кутом P , визначаються формулою (еліпсною Землі нехтують) [175]:

The coordinate measurement η , formed by the location coordinates – latitude ϕ_c and longitude λ_c (coordinates of observations) and by the known parameters of the loxodromic section, given by the starting point coordinates ϕ_0, λ_0 and the course angle P , is determined by the formula (the Earth ellipse is neglected) [175]:

$$\eta = \left\{ -In \left[\frac{(tg\phi_c / 2 + \pi / 4)}{(tg\phi_0 / 2 + \pi / 4)} \right] \sin P + (\lambda_c - \lambda_0) \cos P \right\} R \cos \left(\frac{\phi_0 + \phi_c}{2} \right), \quad (4.11)$$

де R – радіус Землі, або спрощеною формулою

where R is the Earth radius, or by a simplified formula

$$\eta = R \left\{ (\phi_c - \phi_0) \sin P + (\lambda_c - \lambda_0) \cos \left(\frac{\phi_0 + \phi_c}{2} \right) \cos P \right\}, \quad (4.12)$$

Цей перехід здійснений з урахуваннямумови малої довжини локсодромічної ділянки (не більше 50 миль); при цьому в широтах не більше 70°N погрішність, що вноситься, в якнайгіршому випадку (широта рівна 70°N) складає не більше 15 м.

This transition was carried out taking into account the condition of the small length of the loxodrome section (no more than 50 miles); at the same time, at latitudes not exceeding 70°N, the introduced error in the worst case (the latitude is 70°N) is no more than 15 m.

4.6. Вдосконалення системи керування рухом БНС при стабілізації на траєкторії

4.6. Improvement of the USV motion control system during trajectory stabilization

При розв'язку задачі стабілізації судна на траєкторії керування здійснюється згідно із законом (4.9). При цьому бічне відхилення розраховується за залежностями (4.11) чи (4.12). У цих залежностях точність обчислення поточних координат БНС $\phi_{\square}, \lambda_{\square}$ визначає точність визначення його бічного відхилення. Таким чином, при стабілізації судна на траєкторії вирішальним питанням є точне і безперервне визначення місця судна.

When solving the vessel stabilization task on the trajectory, control is carried out according to the law (4.9). In this case, the lateral deviation is calculated from dependences (4.11) or (4.12). In these dependences, the accuracy of calculating the USV current coordinates ϕ_c, λ_c determines the accuracy of determining its lateral deviation. Thus, during the vessel stabilization on the trajectory, the crucial issue is the vessel accurate and continuous identification.

Оптимальне керування судном відповідно до приведенного закону забезпечується автостерновим (АС) на тихій воді і при

The vessel optimal control in accordance with the given law is provided by auto-steering (AS) in calm water and in moderate

помірному хвилюванні. Досвід експлуатації автостернових показує, що при хвилюванні, більшому за 3-х бали, необхідним є перенастроювання параметрів АС, оскільки досягнення заданої точності керування супроводжується перевантаженням стернового приводу. При великому хвилюванні, зазвичай, переходять на ручне керування, при якому людина-стерновий, виходячи зі свого досвіду, ступінчасто перекладає стерно, руляючи курс судна тільки при значних його відхиленнях від заданої траєкторії.

Цим досягається зменшення числа переключень стерна і забезпечується надійна робота стернового приводу, забезпечується підвищення ефективності керування судном у цілому.

Виходячи з аналізу функцій керування рухом при стабілізації на траєкторії і особливостей БНС, вимог до їх систем навігації та керування, а також з аналізу сучасного стану і тенденцій розвитку приладів, систем навігації і керування рухом суден, пропонуються наступні напрями вдосконалення системи керування рухом БНС при стабілізації її на траєкторії [176-178]:

- розробка структури системи керування БНС підвищеної точності, яка включає інтегровану систему орієнтації і навігації (ІСОН) з мінімальним складом малогабаритних навігаційних приладів низької вартості і автостерновий з нечітким регулятором для підвищення ефективності стабілізації БНС на траєкторії;

- обґрунтування складу, розробка структури, моделі і алгоритму функціонування ІСОН, дослідження особливостей її роботи і ефективності застосування при стабілізації БНС на траєкторії;

- розробка нечіткого регулятора АС з метою зменшення числа переключень стерна і дослідження його ефективності при стабілізації БНС на траєкторії.

Як вирішення першого напрямку досліджень пропонується наступна структура системи керування рухом БНС (рис. 4.8).

turbulence. The experience of operating auto-steering shows that in the event of excitement exceeding 3 points, it is necessary to readjust the AS parameters, since achieving the specified control accuracy is accompanied by overloading of the steering drive. In case of great excitement, they usually switch to manual control, in which the helmsman, based on his experience, gradually shifts the rudder, steering the ship's course only when it deviates significantly from the given trajectory.

This achieves a reduction in the number of shifts of the rudder and ensures reliable rudder drive operation, as well as an increase in the vessel control efficiency as a whole.

Based on the analysis of the motion control functions during stabilization on the USV trajectory and the features, the requirements for their navigation and control systems, as well as the analysis of the current state and trends in the development of devices, navigation systems and vessel motion control, the following directions for improving the USV motion control system during its stabilization on the trajectory are proposed [176-178]:

- development of the USV control system structure of increased accuracy, which includes the integrated system of orientation and navigation (ISON) with a minimum composition of small-sized, low-cost navigation devices and an autosteering system with a fuzzy regulator to increase the USV stabilization effectiveness on the trajectory;

- composition substantiation, development of the structure, model and algorithm for the ISON operation, the research of its work features and its application effectiveness in the USV stabilization on the trajectory;

- development of AS fuzzy controller with the aim of reducing the number of rudder transfers and studying its effectiveness in stabilizing the USV on the trajectory.

As a solution to the first direction of research, the following structure of the USV motion control system is proposed (Fig. 4.8).

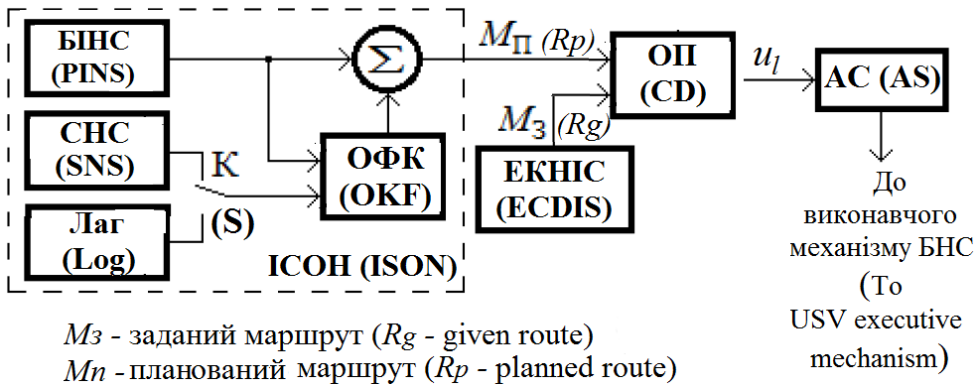


Рисунок 4.8 – Структура системи керування рухом БНС:

БІНС – безплатформна інерціальна навігаційна система;

СНС – приймач супутникової навігаційної системи; ЕКНІС – електронно-картографічна навігаційно-інформаційна система; K – комутатор, який підключає інформацію від лага БНС у випадку тимчасової відсутності сигналу від СНС;

ОП – обчислювальний пристрій; АС – автостерновий БНС,

ОФК – оптимальний фільтр Калмана

Figure 4.8 – Structure of USV motion control system:

PINS – platformless inertial navigation system; SNS – satellite navigation system receiver; ECDIS – electronic cartographic navigation and information system;

S – a switch that connects information from the USV lag in the event of a temporary absence of a signal from the SNS; CD – computational device;

AS – USV autosteering, OKF – optimal Kalman filter

При стабілізації судна на траєкторії задані маршрути руху введені до ЕКНІС і зберігаються в базі даних. На підставі інформації про поточне місцеположення БНС з підвищеною точністю, яку виробляє ІСОН, і даних про маршрути, САК виробляє сигнал керування згідно з (4.9), який подається на АС з нечітким регулятором для керування рухом судна по заданому закону.

Сьогодні БІНС будуються на малогабаритних датчиках, які мають невелику вартість, що відповідає вимогам до малорозмірних БНС. Для корекції помилок БІНС у виробленні навігаційних параметрів залучають дані від приймача СНС і судового лага, які встановлені на більшості суден. ІСОН виконує комплексну обробку інформації з різних джерел і генерує поточні навігаційні параметри БНС з високою точністю.

When the vessel is stabilized on the trajectory, the specified motion routes are entered into the ECDIS and stored in the database. Based on the information about the USV current position with increased accuracy, produced by the ISON, and route data, the ACS produces a control signal according to (4.9), which is supplied to the AC with a fuzzy regulator to control the movement of the vessel according to a given law.

Today, PINS are built on small-sized sensors that have low cost that meets the requirements of small-sized USV. To correct SINS errors in the development of navigation parameters, data from the PINS receiver and vessel log installed on most vessel are involved. ISON performs complex information processing from various sources and generates current USV navigation parameters with high accuracy.

Підвищення точності стабілізації БНС на траєкторії і зниження числа переключень стерна підвищує ресурс АС. Це досягається за допомогою нечіткого регулятора, який синтезовано на основі залучення досвіду групи експертів, що мають практичний досвід керування суднами у штормових умовах.

Для реалізації двох наступних напрямів досліджень необхідно виконати наступне:

- розробити структуру ІСОН БНС, яка складається з безплатформної інерційної навігаційної системи (БІНС), приймача супутникової навігаційної системи і лага;
- розробити математичні моделі помилок і алгоритми функціонування ІСОН на основі оптимальної обробки навігаційної інформації за допомогою оптимального фільтру Калмана;
- розробити структуру, математичну модель і алгоритми роботи нечіткого регулятора для стабілізації БНС на траєкторії з метою оптимізації числа переключень рулюючи в умовах морського хвилювання;
- дослідити ефективність застосування розробленої ІСОН при стабілізації БНС на траєкторії;
- дослідити ефективність застосування нечіткого регулятора АС для керування рухом БНС при стабілізації на траєкторії в умовах морського хвилювання методами математичного моделювання та натурального експерименту.

Вказані напрямки утворюють наступний етап досліджень та синтезу ефективних систем автоматичного керування БНС.

4.7. Методи забезпечення безпеки плавання БНС

4.7. Methods of providing the USV navigation safety

Очевидно, що для безпеки мореплавства БНС повинно бути оснащено системою автоматичного керування, здатною заздалегідь виявляти навігаційні 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.

Increasing the USV stabilization accuracy on the trajectory and reducing the number of rudder shifts (turns) increases the AS resource. This is achieved using a fuzzy controller, synthesized based on the experience of a group of experts with practical experience in steering vessels in stormy conditions.

To implement the following two research directions, necessary to do the following:

- to develop the USV ISON structure, consisting of a platformless inertial navigation system (PINS), a satellite navigation system receiver and a log;
- to develop mathematical models of errors and ISON operation algorithms based on the navigation information optimal processing using the optimal Kalman filter;
- to develop the structure, mathematical model and algorithms of the fuzzy controller to stabilize the USV on the trajectory in order to optimize the number of transfers while steering in conditions of sea turbulence;
- to investigate the effectiveness of the application of the developed ISON in the USV stabilization on the trajectory;
- to investigate the effectiveness of using the AS fuzzy controller to control the USV motion during stabilization on the trajectory in conditions of sea turbulence using the methods of mathematical modeling and full-scale experiment.

The specified directions form the next research stage and synthesis of effective USV automatic control systems.

Obviously, for the navigationsafety, the USV must be equipped with an automatic control system capable of detecting in advance navigational obstacles that are or may arise on the movement trajectory and actively avoid them. It is important that the process of evading interference ends with the restoration of the main task.

Для цього необхідно оснастити САК БНС:

- системою сенсорів для ефективного виявлення надводних/підводних перешкод;
- надійною та продуктивною обчислювальною технікою та периферією;
- програмним забезпеченням, яке на основі інформації від сенсорів про оточуючу обстановку та про мету місії здатне генерувати адекватні команди виконавчим пристроям судна.

Найбільш ефективними на даний час сенсорними системами БНС 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.

Загальний алгоритм роботи системи автоматичного керування рухом БНС з врахуванням необхідності забезпечення безпеки мореплавства приведений на рис. 4.9 [179].

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 навігаційно небезпечний об'єкт, що утворює потенційну загрозу зіткнення.

Показаний на рис. 4.9 алгоритм можна спростити, якщо вважати, що загрози можуть бути тільки рухомими. Нерухомі морські об'єкти (наприклад, буї, скелі, опори) можуть створювати небезпеку, якщо БНС само рухається на них. Тому в алгоритмі на рис. 4.9 можна виключити блоки, що виділені кольором.

For this, it is necessary to equip the control system of UNS with:

- sensor system for effective detection of surface/underwater interference;
- reliable and productive computing equipment and peripherals;
- software that, based on information from sensors about the environment and the purpose of the mission, is able to generate adequate commands to the vessel executive devices.

The most effective USV sensor systems are currently considered to be radar stations (RS) for illuminating the surface situation and hydroacoustic stations (HAS) for illuminating the underwater environment.

It is also possible to use leaders (laser scanners) and technical vision systems in different optical ranges. These sensor systems must satisfy a number of conditions, but the main ones are the detection range, range resolution and interference angle resolution.

The general algorithm of the USV automatic motion control system, taking into account the need to ensure the seaworthiness safety (maritime safety), is shown in Fig. 4.9 [179].

In this algorithm, an operation with the abstract value «dangerous zone» is performed in a logical condition. This is a value that can be determined, taking into account both the speed of the object located next to the USV and the speed of the USV itself. Distance and bearing to the object or obstacle are also necessary components to consider. Thus, the «danger zone» concept means the area of the water area in which there is a navigationally dangerous object that poses a potential threat of collision.

The algorithm shown in Fig. 4.9, can be simplified if assumed that threats can only be mobile. Stationary offshore objects (eg buoys, rocks, pillars) can create a hazard if the USV itself moves towards them. Therefore, in the algorithm in Fig. 4.9, blocks highlighted in color can be excluded.

На рис. 4.10 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 10^0 «ЛО» та «ПО».

Fig. 4.10 shows a diagram for determining the danger level during USV movement (drift, positioning). The concentric dotted rings on the diagram reflect the interference detection distances “D-1” – far, “D-2” – medium and “D-3” – closest relative to the USV.

Also, the diagram shows the sectors (directions) of interference detection relative to the USV – «directly along the course» or «astern», which are marked «0» and «K», respectively.

The sector «straight along the course» is further divided into two more sub-sectors with an opening angle of 10^0 «LO» and «RO».

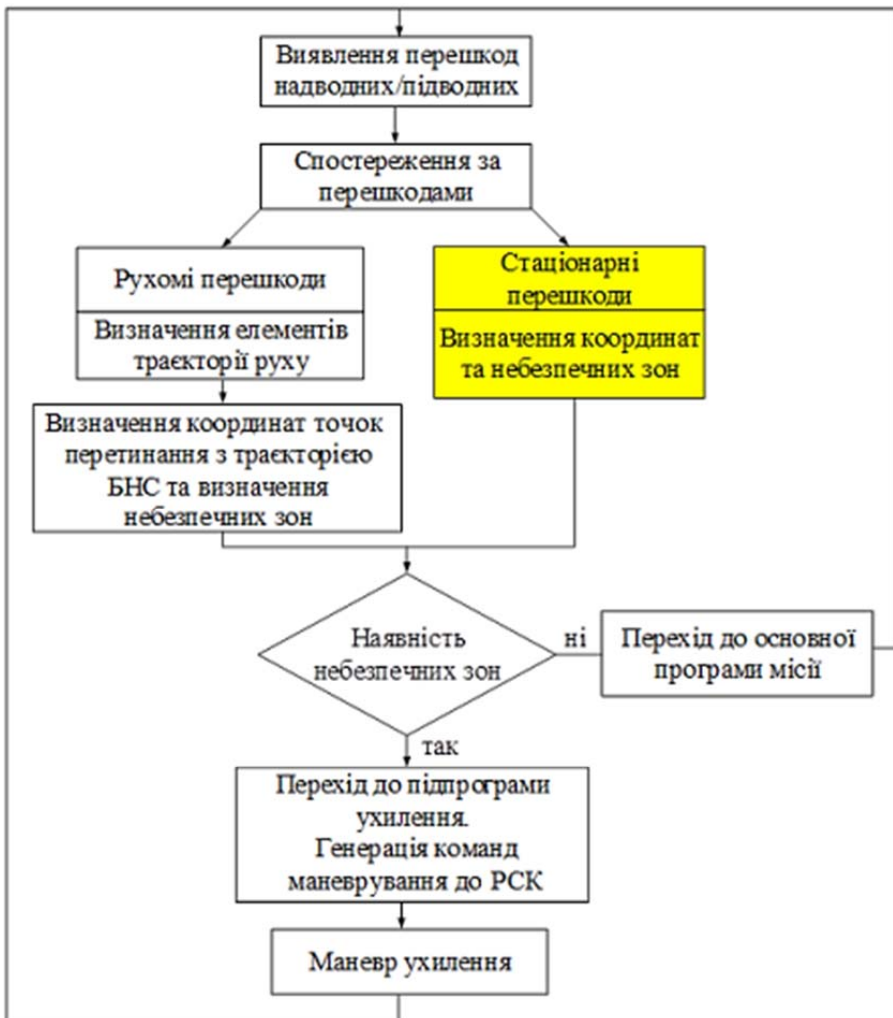


Рисунок 4.9 – Варіант алгоритму забезпечення безпеки мореплавства БНС

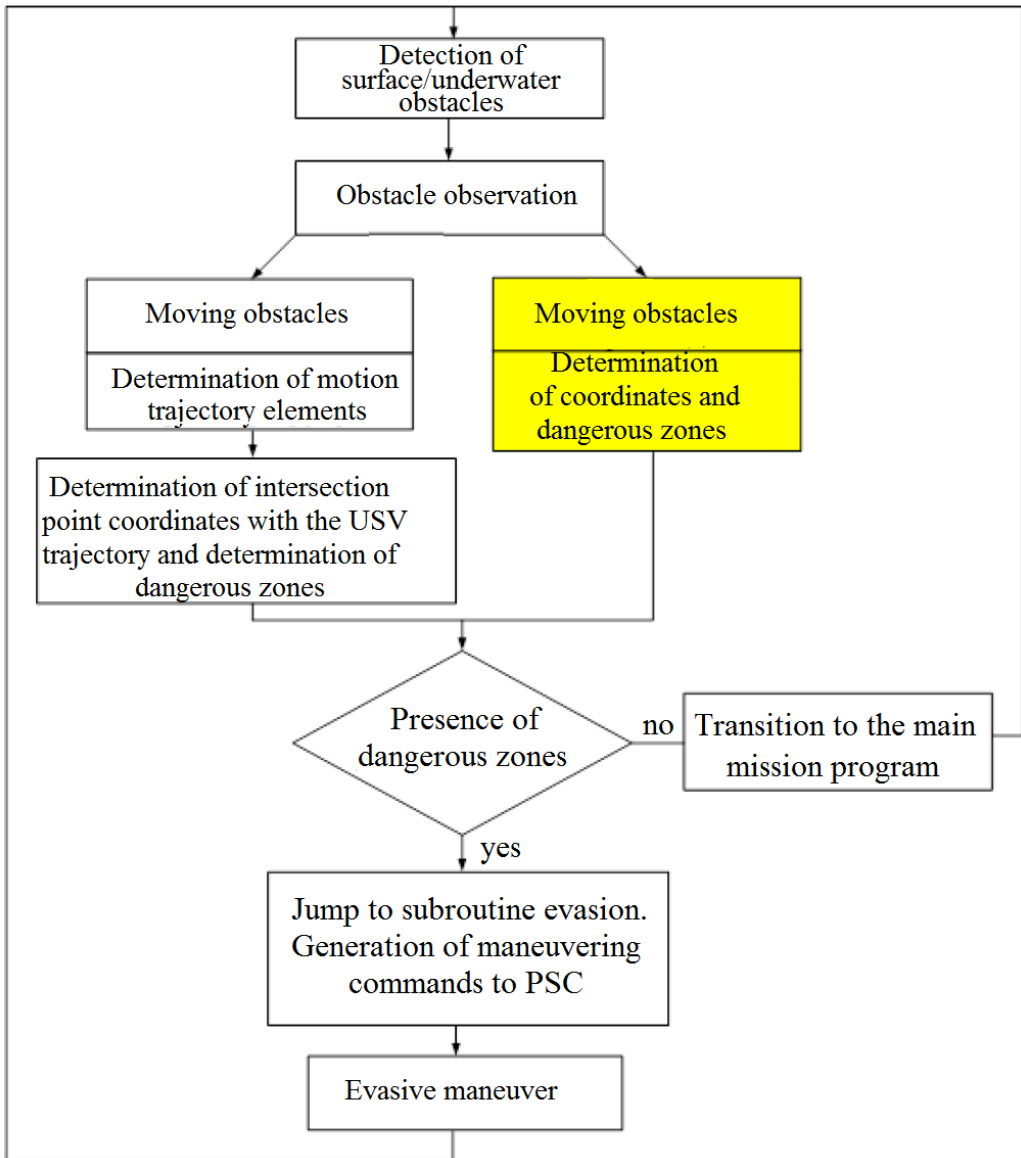


Figure 4.9 – Variant of the USV navigation safety algorithm

З бокових проекцій 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° .

From the lateral projections, two sub-sectors were distinguished: on the left along the course – «L1», on the left along the side – «L2», on the right along the course – «R1» and on the right along the side – «R2»

Sectors «L1», «R1» have opening angle of 65° , «L2», «R2» have an opening angle of 70° , «KL» and «KP» have an opening angle of 35° .

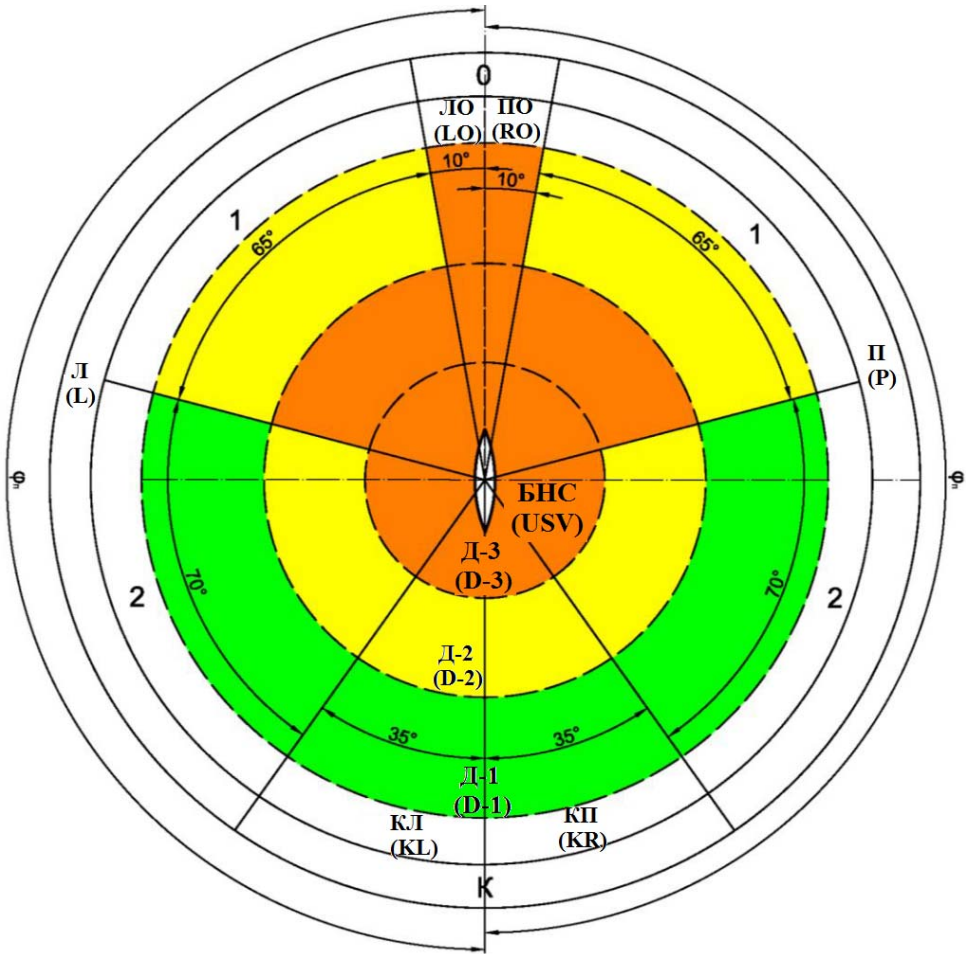


Рисунок 4.10 – Визначення рівня небезпеки перешкод навколо БНС
 Figure 4.10 – Determining the interference danger level of around the USV

Рівень загрози зіткнення (рівень небезпечності) має три градації, які на діаграмі позначені помаранчевим, жовтим та зеленим кольорами.

Рівень небезпеки вважаємо таким, що збільшується від зеленого до помаранчового.

Діаграма, що показана на рис. 4.10, може мати інший вигляд в залежності від режиму роботи БНС, його швидкості або інших параметрів (стан погоди, хвилювання моря, наявність течії та інше).

Тобто,

The collision threat level (danger level) has three gradations, which are marked in orange, yellow and green colors in the diagram.

The danger level is considered to increase from green to orange.

The diagram shown in Fig. 4.10 may have a different appearance depending on the USV operation mode, its speed or other parameters (weather conditions, sea waves, presence of currents, etc.).

That is,

$$R_f = f(V, G, W), \quad (4.13)$$

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, за шкалою Бофорта).

Крім того, положення БНС на діаграмі рис. 4.10 також може регулюватись.

У відповідності до рис. 4.10 можна визначити поведінку САК, яка б вважалась відповідною рівню небезпеки. При цьому справедливі наступні залежності при русі БНС по відношенню до перешкоди:

$$\Delta l = l_{i-1} - l_i, \tag{4.14}$$

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. 4.1):

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{l_{i-1} - l_i}{t_{i-1} - t_i}, \tag{4.15}$$

where R_j – the obstacle detection radius (D-1, D-2, D-3); V – USV speed; G – the waveforce (for example, according to the scale developed by the World Meteorological Organization); W – wind strength (for example, on the Beaufort scale).

In addition, the position of the USV in the diagram in Fig. 4.10 may also be regulated (adjusted).

In accordance with Fig. 4.10, it is possible to determine the ACS behavior that would be considered appropriate for the dangerlevel. In this case, the following dependencies are valid for the USV movement with respect to the obstacle:

where Δl is the radius vector deviation (distance) to the interference in the time interval, $\Delta t = t_{i-1} - t_i$; l_{i-1} – radius vector (distance) to the obstacle – previous value; l_i – radius vector (distance) to the obstacle – current value.

Distance change speed (Table 4.1):

Таблиця 4.1 – Умови визначення положення перешкоди відносно БНС по даним відхилення дистанції

Table 4.1 – Conditions for determining the position of an obstacle in relative to the USV according to the distance deviation data

Якщо (If)	$\Delta l > 0, \frac{\Delta l}{\Delta t} \geq 0$	то перешкода наближається з постійною швидкістю або прискорено (then the obstacle is approaching at a constant speed or acceleration)
Якщо (If)	$\Delta l = 0, \frac{\Delta l}{\Delta t} = 0$	то перешкода рухається паралельно або як сателіт (then the obstacle moves in parallel or as a satellite)
Якщо (If)	$\Delta l < 0, \frac{\Delta l}{\Delta t} < 0$	то перешкода віддаляється з постійною швидкістю або прискорено (then the obstacle moves away at a constant speed or acceleration)

Необхідно також враховувати пеленг на перешкоду відносно власного курсу:

$$\Delta \phi = \phi_{i-1} - \phi_i, \tag{4.16}$$

де $\Delta \phi$ – зміна кута утвореного вектором руху БНС \vec{V} та радіус-вектором \vec{l} (дистанцією) на перешкоду в проміжок часу

It is also necessary to take into account the bearing to the obstacle relative to own course:

where $\Delta \phi$ is the change in the angle formed by the USV motion vector \vec{V} and the radius vector \vec{l} (distance) to the obstacle in the time

$\Delta t = t_{i-1} - t_i$; 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. 4.2):

interval $\Delta t = t_{i-1} - t_i$; φ_{i-1} – the preliminary value of the angle formed by the USV motion vector \vec{V} and the radius vector \vec{l} to the obstacle; φ_i – current value of the angle formed by the USV motion vector \vec{V} and the radius vector \vec{l} to the obstacle.

Angular speed of change of direction to an obstacle (Table 4.2):

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi_{i-1} - \varphi_i}{t_{i-1} - t_i}, \tag{4.17}$$

Таблиця 4.2 – Умови визначення положення перешкоди відносно БНС по даним відхилення кута напрямку на перешкоду

Table 4.2 – Conditions for determining the obstacle position relative to the USV based on the obstacle direction angle deviation

Якщо (If)	$\Delta\varphi > 0, \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \geq 0,$	то перешкода випереджає БНС і рухається з постійною швидкістю або прискорено (then the interference (obstacle) is ahead of (overtakes) the USV and moves at a constant speed or accelerated)
Якщо (If)	$\Delta\varphi = 0, \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = 0,$	то перешкода рухається паралельним курсом (then the obstacle moves along a parallel course)
Якщо (If)	$\Delta\varphi < 0, \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \leq 0,$	то перешкода відстає від БНС і рухається з постійною швидкістю або уповільнюється (then the obstacle lags behind the USV and moves at a constant speed or slows down)

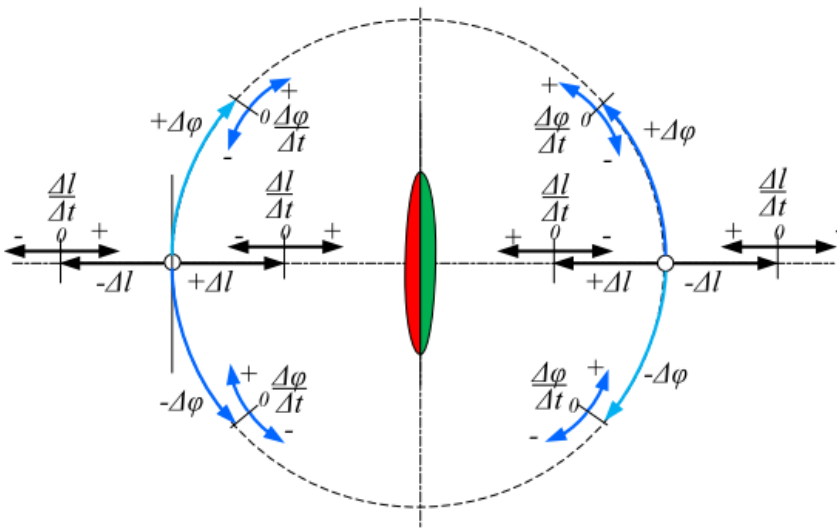


Рисунок 4.11 – Графічна інтерпретація визначення напрямку руху перешкоди відносно БНС по відхиленню дистанції та кута напрямку на перешкоду

Figure 4.11 – Graphical interpretation of the determination of the obstacle movement direction relative to the USV by the deviation of the distance and the angle of the direction to the obstacle

Основним критерієм визначення реакції САК на рівень небезпеки з визначеними параметрами її руху є маневр БНС в протилежну сторону з відповідною швидкістю. Реакція САК може бути визначена експертним методом з їх уточненням на математичних моделях САК, БНС, навколишнього середовища та моделей перешкод. Найбільш придатними САК для обчислення представлених положень є системи на основі нечітких або нейро-нечітких контролерів [82].

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 САК виявляти, супроводжувати та реагувати одночасно на декілька перешкод, як надводних, так і підводних. Це завдання утворює додатковий напрямок прикладних наукових досліджень.

The main criterion for determining the ACS reaction to the danger level with certain movement parameters is the USV maneuver in the opposite direction at the appropriate speed. The ACS response can be determined by an expert method by their refinement on the ACS mathematical models, USVs, the environmental situation and interference models. The most suitable ACS for calculating the presented positions are systems based on fuzzy or neurofuzzy controllers [82].

The navigation intensity on sea routes, near ports and naval bases, as well as in the river fairways, canals, straits, is quite high. Therefore, a necessary condition for ensuring the safety of navigation is the ACS ability to detect, track and respond simultaneously to several obstacles, both surface and underwater. This task forms an additional direction of applied scientific research.