

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
National University of shipbuilding named after admiral Makarov

Буруніна Ж.Ю., Надточий В.А., Алоба Л.Т.,  
Войтасик А.М., Клочков О.П., Сірівчук А.С.

**АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРИВ'ЯЗНИМИ ПІДВОДНИМИ  
СИСТЕМАМИ ПРИ РОБОТІ З ТОЧКОВИМИ ПІДВОДНИМИ  
ОБ'ЄКТАМИ**

Навчальний посібник  
(Під редакцією д.т.н., проф. В.С. Блінцова)

Burunina Zh.Yu., Nadtochy V.A., Aloba L.T.,  
Voytasik A.M., Klochkov O.P., Sirivchuk A.S.

**AUTOMATIC CONTROL OF TETHERED UNDERWATER SYSTEMS  
WHEN WORKING WITH UNDERWATER POINT OBJECTS**

Training Manual  
(Edited by Prof. V.S. Blintsov, Doctor of Technical Sciences)

Mykolaiv♦NUS  
2018

Миколаїв♦НУК  
2018

УДК 681.5:629.584

A18

Укладачі: Буруніна Ж.Ю., Надточий В.А., Алоба Л.Т.,  
Войтасик А.М., Клочков О.П., Сірівчук А.С.

Рецензент О. В. Блінцов, докт. техн. наук, завідувач кафедри комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки НУК ім. адм. Макарова

**А-18**      **Автоматичне** керування прив'язними підводними системами при роботі з точковими підводними об'єктами. / Буруніна Ж.Ю., Надточий В.А., Алоба Л.Т., Войтасик А.М., Клочков О.П., Сірівчук А.С. // Під редакцією д.т.н., проф. В.С. Блінцова – Миколаїв : НУК, 2018. – 63 с.

У навчальному посібнику розглянуті питання автоматизації підводно-технічних робіт, що виконуються прив'язними підводними системами, оснащеними начіпними інструментами – маніпуляторами, ризаками тросів тощо.

Навчальний посібник призначений для студентів, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Морська робототехніка» зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 – «Електрична інженерія».

Навчальний посібник може бути корисним для аспірантів і наукових співробітників, які проводять дослідження з автоматизації керування морськими рухомими об'єктами.

In the training manual, the issues of automation of underwater engineering operations, carried out by tethered underwater systems, equipped with attached (mounted) tools – manipulators, cable cutters, etc., are reviewed.

The training manual is intended for students studying under the educational-professional program "Marine Robotics" by specialty 141 – "Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering" in the branch of 14 – "Electrical engineering".

The training manual can be useful for post graduate students and researchers conducting researches on the automation control of maritime mobile objects.

**УДК 681.5:629.584**

© Буруніна Ж. Ю., Надточий В. А., Алоба Л. Т.,  
Войтасик А. М., Клочков О. П., Сірівчук А. С.,  
2018

© Блінцов В. С., 2018

© Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова, 2018

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

### LIST OF CONDITIONAL ABBREVIATIONS

Скорочення (Abbreviations)	Український	English
ГАС (HAS)	гідроакустична система	hydroacoustic system
ГГ (PS)	гребний гвинт	propeller screw
ЕД (EM)	електродвигун	electric motor
ЕРК (EMC)	електрорушійний комплекс	electromotive complex
ЕРП (EMD)	електрорушійний пристрій	electromotive device
КК(RTE)	корінний кінець кабель-троса	tether cable root end
КЛ (CW)	кабельна лебідка	cable winch
КТ (TC)	кабель-трос	tether cable
ЗО (SO)	затонулий об'єкт	sunken object
ІС (IS)	інформаційна система	information system
ММ (MM)	математична модель	mathematical model
НО (AE)	начіпне обладнання	attached equipment
ПА (ROV)	підводний апарат	remotely operated vehicle
ПЕК (PCP)	пост енергетики і керування	power and control post
ПМ (UM)	підводний маніпулятор	underwater manipulator
ПО (UO)	підводний об'єкт	underwater object
ППС (TUS)	прив'язна підводна система	tethered underwater system
ПСНО (USPEC)	підводна самохідна система з начіпним обладнанням	underwater self-propelled equipment carrier
ПТ (UC)	підводна течія	underwater current
РЗ (WZ)	робоча зона	working zone
РТ (CC)	різак тросу	cable cutter
САК (ACS)	система автоматичного керування	automatic control system
САПС (ASSS)	система автоматичної просторової стабілізації	automatic spatial stabilization system
СН (CV)	судно-носій	carrier vessel
СРК(SDC)	стабілізуючий рушійний комплекс	stabilizing driving (propulsion) complex
СРП (SDD)	стабілізуючий рушійний пристрій	stabilizing driving device
ТО (PO)	точковий об'єкт	point object
ХК(RNE)	ходовий кінець кабель-троса	tether cable running end
ЦМ (CM)	центр мас	center of mass
Я (A)	якорь	Anchor
ЯЛ (AC)	якірного ланцюга	anchor chain

## ЗМІСТ

### CONTENTS

Вступ.....	5	Introduction.....	5
1 Загальні питання автоматизації підводних робіт на точкових об'єктах.....	7	1 General questions of the automation of underwater operations on point objects.....	7
2 Розробка узагальненої структури виконавчого рівня САК при роботі з точковим підводним об'єктом .....	11	2 Development of a generalized structure of the ACS executive level when working with an underwater point object .....	11
3 Розробка та дослідження системи просторової стабілізації ПА при роботі маніпулятора .....	17	3 Development and research of ROV spatial stabilization system during the manipulator's operation .....	17
4 Стабілізація диференту ПА при перерізуванні тросу під натягом.....	31	4 Stabilization of ROV pitch when cutting a metal cable under tension.....	31
5 Автоматизація керування кабельною лебідкою ПСНО на якірній стоянці судна-носія .....	38	5 USPEC cable winch control Automation at the carrier vessel anchorage .....	38
6 Оцінка рівня автоматизації ПСНО .....	51	6. Estimation of the USPEC automation level.....	51
Список літератури.....	60	References.....	60

## ВСТУП

### INTRODUCTION

Прив'язні підводними системи є ефективним інструментом для дистанційного виконання широкого спектру підводно-технічних робіт на затонулих об'єктах. До складу типової прив'язної підводної системи входять самохідний прив'язний підводний апарат (ПА), судно-носій (СН), на якому розміщені пост енергетики і керування (ПЕК) підводним апаратом і кабельна лебідка (КЛ) з кабель-тросом (КТ), через який забезпечується електроживлення та керування ПА. До начіпного обладнання (НО), за допомогою якого виконуються підводні роботи, відносяться підводні маніпулятори (ПМ), різакі тросів (РТ), очисні пристрої тощо.

Велика кількість таких робіт виконується на точкових підводних об'єктах, коли основним режимом ПА є його стабілізація у просторі. Це необхідно для ефективного застосування його НО.

Це утворює новий тип засобів підводної робототехніки – прив'язні підводні системи з начіпним обладнанням (ПСНО) і відкриває принципово нові можливості для підводних технологій – від високоточних дистанційно керованих маніпуляційних робіт до захоплення і підйому підводних об'єктів (ПО) на поверхню.

У навчальному посібнику розглядаються питання автоматизації керування прив'язними підводними системами з начіпним обладнанням при

Tethered underwater systems are an effective instrument for remote execution of a wide range of underwater technical (engineering) operations on sunken objects. A typical tethered underwater system includes a self-propelled remotely operated vehicle (ROV), a carrier vessel (CV), are housed through which the power and control are supplied to the (ROV). The attached (mounted) equipment (AE), by which the underwater operations are carried out, includes the underwater manipulators (UMs), cable cutters (CCs), pollution control facilities and so on.

A large number of such operations are carried out on underwater point objects, when the ROV basic mode is its stabilization in space. This is necessary for the effective implementation of its AE.

This creates a new type of underwater robotics equipments – tethered underwater systems with attached equipment (USPEC) and opens up fundamentally new opportunities for underwater technologies – from high-precision, remotely controlled manipulations for capturing and lifting of the underwater objects (UOs) to the surface.

The questions of tethered underwater systems control automation with the attached equipment when working with the

роботі з точковим підводними об'єктами: розробка узагальненої структури системи автоматичного керування, розробка та дослідження системи просторової стабілізації ПА при роботі маніпулятора, стабілізація диференту ПА при перерізуванні металевих тросів, автоматизація керування кабельною лебідкою ПСНО на якірній стоянці судна-носія, а також оцінка рівня автоматизації ПСНО у цілому.

underwater point objects: development of the generalized structure of the automatic control system, development and research of the ROV spatial stabilization system during the manipulator operation, ROV pitch stabilization in the cutting of the metal cables, USPEC cable winch automation control at the carrier vessel anchorage, as well as the assessment of the USPEC automation level in general are being considered.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПІДВОДНИХ РОБІТ НА ТОЧКОВИХ ОБ'ЄКТАХ

## 1 GENERAL QUESTIONS OF THE AUTOMATION OF UNDERWATER OPERATIONS ON POINT OBJECTS

Робота з точковими ПО є досить широко розповсюдженим видом морської діяльності. До таких об'єктів належать:

цивільні об'єкти – аварійно затонулі транспортні засоби, інженерні об'єкти видобувної інфраструктури, об'єкти наукових (гідрологічних, екологічних, археологічних) досліджень тощо;

воєнні об'єкти – морські міни, затонулі боєприпаси і зброя, підводні оборонні споруди, несанкціоновано розміщені під водою прилади та апаратура спостереження та розвідки противника тощо.

Аналіз досвіду зарубіжних фірм та власний досвід НУК з експлуатації прив'язних підводних систем з начіпним обладнанням (ПСНО) свідчить, що типовими технологіями роботи з такими об'єктами є:

технологія роботи з берегової лінії (причалу, греблі, необладнаного берега);

технологія роботи з судна-носія (СН), який стоїть на якорі;

технологія роботи з СН, який лежить у дрейфі.

Типові схеми застосування ПСНО за цими технологіями наведені на рис. 1.

Розглянемо деякі особливості реалізації вказаних підводних технологій з позицій керування ПСНО.

Working with underwater point objects (POs) is a sufficiently widespread type of marine activities. These objects include:

civilian objects – wrecks of sunken vehicles, engineering facilities of the mining infrastructure, objects of scientific (hydrological, environmental, archaeological) researches, etc.;

military objects – sea mines, sunken ammunition and weapons, underwater defense structures, unauthorized devices located under water and equipment for surveillance and enemy intelligence, etc.

Analysis of the experience of the foreign firms and the personal experience of NUS named admiral Makarov on the underwater self-propelled equipment carrier (USPEC) operation shows that the typical working technologies with such objects are:

working technology from the coastline (berth, dam, unprotected shore (coast));

working technology with the carrier vessel (CV), which is anchored;

working technology with the CV, which is in drift.

USPEC typical implementation schemes by these technologies are shown in Fig. 1.

Consider some implementation features of the specified underwater technologies from the standpoint of USPEC control.

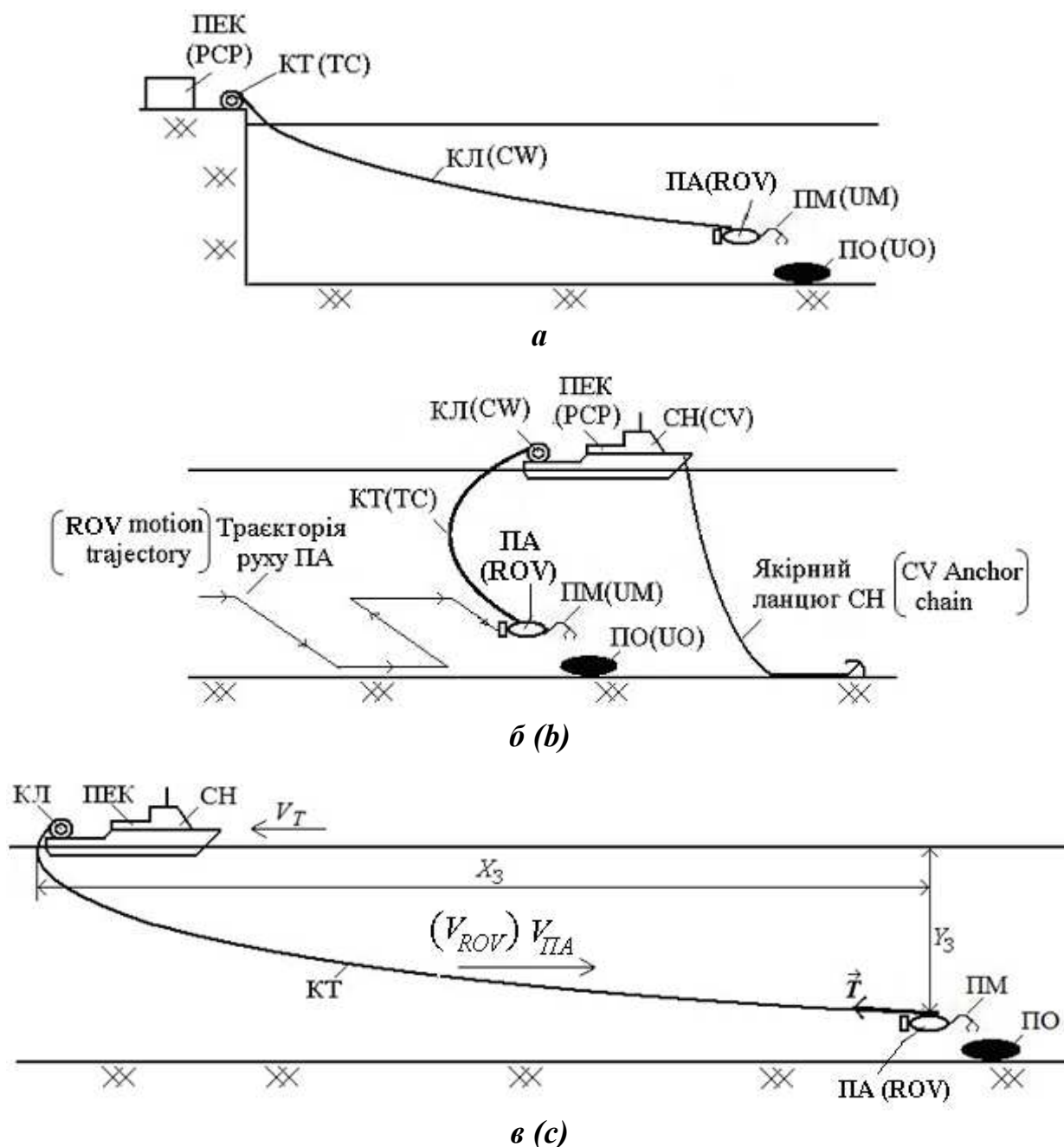


Рисунок 1 – Типові схеми застосування ПСНО: **a** – з берегової лінії;  
**б** – на якорній стоянці CH; **в** – з дрейфуючого CH  
 Figure 1 – Typical schemes for the USPEC application: **a** – from the coastline;  
**b** – at the CV anchorage; **c** – from the drifting CV

Виконання робіт з берегової лінії застосовується при обстеженні технічного стану причальних фронтів морських і річкових портів, а також з метою забезпечення безпечної експлуатації портових акваторій [1-3]. Якщо такі роботи виконуються у

Implementation of operations on the coastline is used in the survey of the berthing (mooring) fronts operating conditions of the sea and river ports, as well as to ensure the safe operation of port waters [1-3]. If such operations are carried out in favorable hydro



сприятливих гідрометеорологічних умовах (відсутні вітро-хвильової дії на КТ та дії течії на корпус ПА), то підводно-технічна робота з точковим об'єктом протікає у режимі ручного керування на стадії допошуку ПО, на стадії позиціонування ПА біля ПО та на стадії роботи НО.

Зазвичай, перші дві стадії застосування заходів автоматизації не потребують, а третьої стадії доцільною є просторова стабілізація ПА біля ПО під час роботи НО.

Проте, коли гідрометеорологічні умови є несприятливими (наприклад, при наявності течії річкового порту), тоді стає актуальним завдання автоматичної стабілізації ПА біля ПО з метою забезпечення умов застосування НО (наприклад, маніпулятора). Очевидно, таке завдання необхідно вирішувати шляхом автоматичної нейтралізації зовнішніх збурень, які діють на КТ і ПА [4].

Робота з точковим об'єктом з заякореного СН застосовується у випадках, коли географічні координати ПО відомі з точністю, достатньою для правильної постановки СН на якір з забезпеченням досяжності ПО прив'язним ПА. Головними особливостями керування ПСНО тут є [5]:

- необхідність допошуку ПО пошуковими приладами ПА (автоматизація цієї стадії підводної роботи обумовлена більшими робочими глибинами у порівнянні з береговим застосуванням ПСНО);

- необхідність автоматичної стабілізації ПА біля ПО при роботі НО в

meteorological conditions (there is no wind-wave effect on the TC and no current action on the ROV hull), the underwater technical operations on a point object proceeds in manual control mode on the UO searching stage, on the ROV positioning stage near the UO and on the AE working stage.

Usually, the first two application stages of the automation measures are not needed, and with the third stage, the ROV spatial stabilization near the UO during AE operation is appropriate.

However, when hydro meteorological conditions are unfavorable, (for example, in the presence of a river port flow), the task of ROV automatic stability near UO with a view to ensuring the application conditions (for example, a manipulator) becomes a matter of urgency. Obviously, such a problem must be solved by automatic neutralization of external disturbances acting on CV and ROV [4].

Working with a point object from an anchored CV is used in cases where the geographic coordinates of the UO are known with the accuracy sufficient to correctly anchor the CV in ensuring the reach of UO by the ROV. The main features of the USPEC control are here [5]:

- the need to search for UO by ROV's searching instruments (automation of this underwater operation stage due to the large working depths compared with the USPEC coastal application)

- the need for ROV automatic stabilization near the UO during AE

умовах дії зовнішніх збурень (вітрово-хвильова дія на СН і КТ та дія течії на корпус ПА);

- необхідність урахування вітрового дрейфу СН на якорній стоянці, що суттєво впливає на розрахунки оптимальної довжини КТ з-за дрейфу корінного кінця КТ по відношенню до ПО.

Робота з точковим об'єктом з борту СН, який дрейфує, виконується у випадках, коли велика глибина моря (або технічні обмеження СН по якорному забезпеченню) не дають змоги встановити судно над ПО. Такі підводно-технічні роботи виконуються, зазвичай, в обмеженому часі, що обумовлено як економічними чинниками (витрати на операцію), так і оперативними міркуваннями (знешкодження ПО, що утворюють особливу загрозу) [6].

У загальному випадку, з позицій автоматизації керування ПСНО, робота з борту СН, що дрейфує, є більш загальним випадком автоматизації роботи з борту заякореного СН. Проте, при великій швидкості дрейфу судна-носія (наприклад, при проведенні робіт в умовах сильної течії) виникає необхідність керованого руху СН для багаторазового його повернення у точку початку дрейфу з метою завершення підводним апаратом його місії [5].

operation under the influence of external disturbances (wind-wave action of CV and TC and the effect of flow on the ROV hull)

- the need to take into account the CV wind drift at the anchorage, which significantly affects the calculations of the TC optimal length due to the drift of the root end of the TC relative to UO.

Working with a point object from the drifting CV, is performed in cases where the high sea depth (or CV technical limitations on the anchor support) does not allow the ship's installment over the UO. Such underwater technical operations are usually carried out in a limited time, due to both economic factors (transaction costs) and operational considerations (neutralization of UO posing a particular threat) [6].

Generally, from the standpoint of USPEC control automation, work from the CV drifting board is a more general case of the automation of work from the anchored CV board. However, with a high drift velocity of the carrier vessel (for example, when working under strong flow conditions), there is a need for CV controlled motion to repeatedly return to the drift's starting point for the remotely operated vehicle complete its mission [5].

## 2 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ СТРУКТУРИ ВИКОНАВЧОГО РІВНЯ САК ПРИ РОБОТІ З ТОЧКОВИМ ПІДВОДНИМ ОБ'ЄКТОМ

### 2 DEVELOPMENT OF A GENERALIZED STRUCTURE OF THE ACS EXECUTIVE LEVEL WHEN WORKING WITH AN UNDERWATER POINT OBJECT

Вказані особливості роботи ПСНО обумовлюють побудову САК таким об'єктом керування за принципами системного підходу та функціональної інтеграції, що містить наступні головні підсистеми:

автоматичного керування КЛ з метою попуснення такої довжини КТ, при якій вплив гідродинамічних сил на ПА з боку КТ було б мінімальним, а також з метою динамічної зміни довжини попущеної частини КТ при компенсації хитавиці СН;

автоматичного руху ПА і його просторового позиціонування в точці підводних робіт з метою надійної стабілізації точки закріплення НО (рами ПА) у робочій зоні відносно ПО;

автоматизованого або автоматичного приведення НО до ПО (наприклад, підводу кінцівки ПМ для надійного захоплення ПО);

контролю поточних координат СН (корінного кінця КТ) для обчислення оптимальної довжини попущеної частини КТ, необхідної для мінімізації збурень, що передаються на ПА;

керування рухом СН для його повернення у точку початку дрейфу та повторного дрейфу, поки ПА виконує підводну роботу з застосуванням НО.

The specified features of USPEC's work determine the construction of the ACS of such control object based on the principles of systems approach and functional integration, contain the following main subsystems:

CW automatic control for the purpose of reducing such TC length, in which the influence of the hydrodynamic forces of the ROV from the side of the TC would be minimal, as well as the purpose of dynamically changing the length of the released part of TC when compensating for CV roll;

automatic motion of the ROV and its spatial positioning at the point of underwater operation in order to reliably stabilize the AE anchorage point (ROV frame) in the working zone relative to UO;

automated or automatic actuation of AE towards UO (for example, the tracking of the limb carriage of an underwater manipulator (UM) for a reliable capture of an underwater object (UO));

the CV current coordinates control (root end of the TC) for calculating the TC optimal length of the part that is necessary to minimize disturbances, are transmitted to the ROV;

CV motion control for its return to the starting point of the drift and re-drift, while the ROV performs underwater operation using AE;

Оскільки остання підсистема, зазвичай, реалізується судноводієм, а не екіпажем ПСНО, у подальшому будемо розглядати автоматизацію комплексу «КЛ – ПА – НО». Структурно інтегровану САК таким комплексом пропонується будувати по ієрархічному принципу як багаторівневу керуючу структуру, що містить наступні рівні:

виконавчий – система підлеглого керування електроприводом КЛ для вибирання/попускання КТ для забезпечення оптимальної його довжини за критерієм мінімуму гідродинамічного впливу на корпус ПА та мінімізації силового впливу хитавиці СН на КТ; керування маршовими, лаговими й вертикальними ЕРП ПА з метою допошуку ПО та просторової його стабілізації в робочій точці біля ПО; керування електроприводами ланок НО (наприклад, електроприводами ланок ПМ з метою стабілізації положення першої ланки-затискача маніпулятора біля ПО та керування процесом захоплення та зажиму ПО затискачем);

контролюючий – у випадку неадекватної реакції об'єктів керування на сигнали керування (наприклад, внаслідок відмови) видає сигнал про неможливість коректного функціонування САК комплексом «КЛ – ПА – НО»;

програмний – групове керування електроприводами КЛ, ПА та НО за завданням тактичного рівня;

тактичний – синтезує конкретні траєкторії руху ПА та ланок НО на базі вимог підводної технології й умов роботи;

Since the latter subsystem is usually implemented by the navigator, and not by the USPEC crew, in the future we will consider the automation of the "CW-ROV-AE" complex. A structurally integrated ACS by such a complex is proposed to be built on a hierarchical principle as a multi-level control structure, which contains the following levels:

executive – the CW electric drive subordinate control system for the TC selection/propagation to ensure its optimal length by the minimum hydrodynamic impact criterion on the ROV hull and minimizing the CV roll power effect on the TC; controls of marching, lags and vertical ROV EMD for the purpose of searching for UO and its spatial stabilization at the operating point near the UO; AE electric drives units control (for example, UM units electric drives in order to stabilize the position of the first clamping unit of the manipulator near the UO and process control of gripping and clamping of UO with the clamp).

supervisory – in case of inadequate response of control objects to control signals (for example, due to failure) gives a signal about the impossibility of correct functioning of the "CW – ROV – AE" complex ACS;

software – group control of CW, ROV and AE electric drives according to the task of the tactical level;

tactical – synthesizes specific motion trajectories of the ROV and the units of AE based on the requirements of the underwater technology and working conditions;

стратегічний – аналізує поставлене завдання, розробляє план функціонування комплексу «КЛ – ПА – НО» для його виконання, формує траєкторії пошуку заданого ПО й реалізує алгоритми його ідентифікації, формує алгоритми позиціонування ПА біля ПО, виведення НО на робочу позицію відносно ПО.

Аналіз принципів побудови систем автоматики рухомих об'єктів, які функціонують в умовах невизначеності, свідчить, що для їхньої ефективної роботи доцільно застосовувати елементи штучного інтелекту – нечітку логіку та штучні нейронні мережі. Тому в пропонованій інтегрованій САК комплексом «КЛ–ПА–НО» передбачається застосування зазначених підходів як на стратегічному рівні керування, так і на виконавчому рівні для безпосереднього керування механізмами ПА і НО. На рис. 2 наведено узагальнену структуру виконавчого рівня інтегрованої САК комплексом «КЛ – ПА – НО» для випадку, коли у якості начіпного обладнання використовується підводний маніпулятор (ПМ).

На виконавчому рівні функціонують три САК електроприводами КЛ, рушійним комплексом ПА та окремих ланок ПМ. Перша САК на основі GPS-інформації про географічні координати СН (широта  $\varphi$ , довгота  $\lambda$  і висота  $h$  над рівнем моря), даних про глибину моря  $-h_M$  та про географічні координати ПА (широта  $\varphi$ , довгота  $\lambda$  і глибина  $-h$  за даними гідроакустичної системи (ГАС) СН і

strategic – analyzes the task, develops a plan for the functioning of the “CW-ROV-AE” complex for its implementation, generates search trajectories for a given UO and implements its identification algorithms, generates ROV positioning algorithms near UO, brings (connects) AE to a working position relative to UO.

The principles analysis of constructing the moving objects automation systems that operate under uncertainty indicates that it is advisable to use elements of artificial intelligence for their effective work – fuzzy logic and artificial neural networks. Therefore, in the proposed integrated ACS, the “CW–ROV–AE” complex provides for the application of these approaches both at the strategic control level and at the executive level for direct control of the ROV and AE mechanisms. In fig. 2 is a generalized structure of the executive level of the integrated ACS of “CW-ROV-AE” complex in the case when the underwater manipulator (UM) is used as mounted equipment.

At the executive level, three ACSs of CW electric drives, a ROV driving complex and separate UM units operate. The first ACS is based on GPS-information about the CV geographical coordinates (latitude  $\varphi$ , longitude  $\lambda$  and height  $h$  above sea level), data on the sea depth  $-h_M$  and the ROV geographic coordinates (latitude  $\varphi$ , longitude  $\lambda$  and depth  $-h$  according to the data of the VC hydroacoustic system (HAS) and

сенсора глибини ПА) контролює взаємне положення СН і ПА і забезпечує оптимальну довжину КТ  $L_{opt}$  та динамічне попускання-вибирання, зменшуючи, таким чином, силовий вплив КТ на ПА.

ROV's depth sensor) controls the mutual position of CV and ROV and provides the TC optimal length  $L_{opt}$  and dynamic release – selection, thus reducing the TC force action on ROV.

**Обмін з вищими рівнями інтегрованої САК  
(Exchange with higher levels of integrated ACS)**

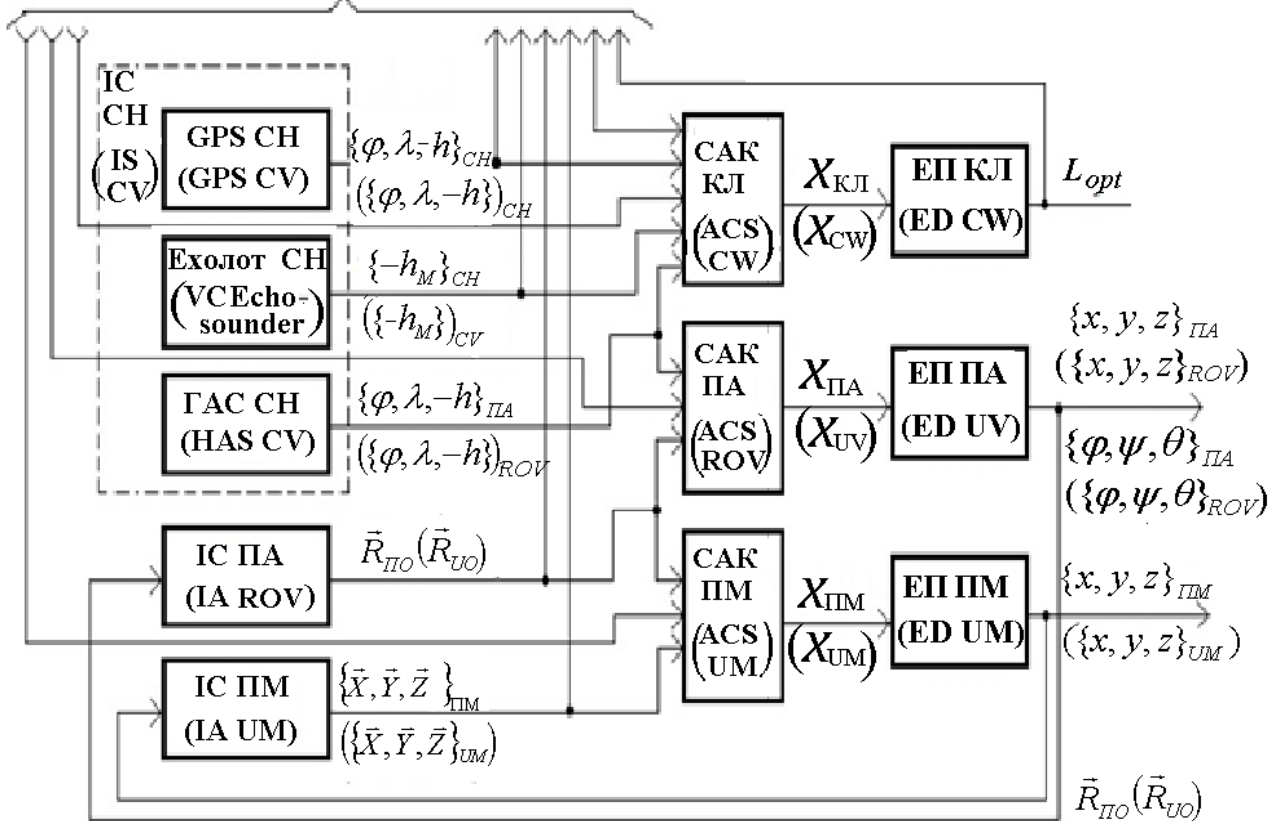


Рисунок 2 – Узагальнена структура виконавчого рівня інтегрованої САК  
Figure 2 – Generalized executive level structure of integrated ACS

Друга САК функціонує на основі даних від інформаційної системи (IC) ПА, яка дає інформацію про просторові координати ПА  $\{x, y, z\}_{ПА}$  і його кути курсу, крену й диференту  $\{\varphi, \psi, \theta\}_{ПА}$  в декартовій системі координат, з урахуванням динаміки руху ПА, забезпечує його стабілізацію відносно підводного об'єкта, відслідковуючи радіус-вектор  $\vec{R}_{П0}$  (дистанцію до ПО).

The second ACS operates on the basis of data from the ROV information system (IS), which gives information on the ROV spatial coordinates  $\{x, y, z\}_{ROV}$  and its course angles, roll and the pitch  $\{\varphi, \psi, \theta\}_{ROV}$  in the Cartesian coordinate system, taking into account the dynamics of ROV motion, provides its stabilization in relation to the underwater object, tracking the radius vector  $\vec{R}_{U0}$  (distance to UO).

Третій рівень САК на основі

The third level of ACS based on

узагальненої інформації про просторовий стан маніпулятора  $\{\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}\}_{\text{ПМ}}$  керує електроприводами ПМ, забезпечуючи задане просторове положення кожної  $i$ -ї ланки  $\{x, y, z\}_{i\text{ПМ}}$  з урахуванням залишкової динаміки фундаменту маніпулятора (точки закріплення на ПА) та зміни маси  $m_{\text{ПА}}$ , метацентричної висоти  $h$  та гідродинамічних характеристик ПА (коефіцієнтів гідродинамічного опору  $C_{x\text{ПА}}, C_{y\text{ПА}}, C_{z\text{ПА}}$ ), обумовлених роботою ПМ.

Множини керуючих впливів  $X_{\text{КЛ}}, X_{\text{ПА}}, X_{\text{ПМ}}$ , забезпечують роботу відповідних електроприводів КЛ, ПА і ланок ПМ по обчисленим у САК законам.

Інформаційна система ПА являє собою сукупність датчиків механічних, електричних та гідромеханічних величин, схем перетворення сигналів і мікропроцесорної техніки, які забезпечують первинну обробку, накопичення й узагальнення інформації про поточні й прогнозовані властивості об'єктів керування з можливістю самоконтролю технічного стану й широкі комунікаційними властивостями.

Застосування інтегрованої САК ПСНО з начіпним обладнанням, яка забезпечує мінімізацією впливу хитавиці СН і просторову стабілізацією ПА як платформи маніпулятора забезпечує підвищену точність підводних робіт в умовах дії зовнішніх збурень та нестационарності власних параметрів підводного

generalized information about the spatial state of the manipulator  $\{\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}\}_{\text{UM}}$  controls the UM electric drives, ensuring a given spatial position of each  $i$ -th link  $\{x, y, z\}_{i\text{UM}}$ , taking into account the residual dynamics of the fundamental of the manipulator (fixation points on the ROV) and the mass changes  $m_{\text{ROV}}$ , metacentric height  $h$  and ROV hydrodynamic characteristics (coefficients of hydrodynamic resistance  $C_{x\text{ROV}}, C_{y\text{ROV}}, C_{z\text{ROV}}$ ) due to UM operation.

The set of control actions  $X_{\text{CW}}, X_{\text{ROV}}, X_{\text{UM}}$ , provide the work of the corresponding electric drives CW, ROV and UM units according to the calculations in ACS laws.

ROV information system is a set of sensors of mechanical, electrical and hydromechanical quantities, signal conversion circuits and microprocessor technology, which provide primary processing, accumulation and generalization of information on current and predicted properties of control objects with the ability to self-control the technical state and wide communication properties.

The use of integrated USPEC ACS with the attached equipment, which ensures minimization of the impact of the CV swinging (roll) and the ROV spatial stabilization as a platform of the manipulator, provides increased accuracy of underwater operations under the influence of external disturbances and the non-stationarity (unsteadiness) of the underwater vehicle's own parameters.

апарата.

Нижче розглянемо найбільш актуальні питання синтезу САК ПСНО для описаних видів робіт.

The most urgent issues of the synthesis of USPEC ACS for the described types of work are considered below.



### **3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПРОСТОРОВОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПА ПРИ РОБОТІ МАНІПУЛЯТОРА**

#### **3 DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ROV SPATIAL STABILIZATION SYSTEM DURING THE MANIPULATOR'S OPERATION**

Постійно зростаючі вимоги до якості підводно-технічних робіт взагалі та, зокрема, до точності підводних операцій з застосуванням ПМ вимагають забезпечення просторової стабілізації ПА, оскільки від цього суттєво залежить ефективність застосування підводних маніпуляторів. Це робить актуальною наукову задачу розробки ефективної системи автоматичної просторової стабілізації для самохідних прив'язних підводних апаратів з маніпуляторами.

Наукова задача автоматизації керування підводними апаратами і, зокрема, стабілізації просторового положення, постійно знаходиться у центрі уваги вітчизняних і зарубіжних науковців. Однак, найбільшу увагу традиційно приділяють автоматизації керування автономними підводними апаратами [7, 8] та, окремо, їх маніпуляторами [9, 10].

Що ж стосується прив'язних самохідних підводних апаратів, то в українських наукових публікаціях ця тема знаходиться на початковій стадії досліджень [11, 12], а в зарубіжних публікаціях викладаються результати досліджень та описуються реально створені ПА з функціями «зависання» над підводними об'єктами без розкриття науково-технічної сутності розробок [13].

Constantly rising requirements to the quality of underwater technical operations in general and, in particular, to the accuracy of underwater operations with the use of UM require the provision of the ROV spatial stabilization, since the use of underwater manipulators effectiveness significantly depends on this. This makes the actual scientific task of developing an effective automatic spatial stabilization system for self-propelled remotely operated vehicle with manipulators.

The scientific task of the remotely operated vehicle control automation and, in particular, of the spatial position stabilization is constantly in the domestic and foreign scientists' focus of attention. However, traditionally, the greatest attention has been paid to autonomous underwater vehicles control automation [7, 8] and, separately, their manipulators [9, 10].

As for self-propelled remotely operated vehicle, in Ukrainian scientific publications this topic is at the initial stage of researches [11, 12], while foreign publications present research results and describe actually created ROV with “hang” functions over the underwater objects without disclosing scientific technical essence of development [13].

Самохідний прив'язний підводний апарат (ПА) є виконавчим елементом ПСНО, головним інструментом якого при виконанні складних підводно-технічних робіт є встановлений на рамі ПА підводний маніпулятор (ПМ). Керування маніпулятором, зазвичай, виконується з ПЕК оператором вручну, оскільки автоматизація цієї частини підводної місії ПА є недоцільною з-за її короткочасності та відповідальності [14]. За цих умов стабілізація ПА біля ПО є важливою додатковою функцією, що забезпечує ефективне ручне керування ПМ та вивільняє оператора ПА від додаткової складної роботи.

У розгорнутому стані ПСНО з ПМ має вигляд, показаний на рис. 3.

The self-propelled remotely operated vehicle (ROV) is the USPEC actuator component, whose main tool when performing complex underwater technical work is the underwater manipulator (UM) mounted on the ROV frame. Manipulator control is usually performed manually by the fuel and energy complex (FEC) operator, since the automation of this part of the underwater mission of ROV is inexpedient due to its short duration and responsibility [14]. Under these conditions of ROV stabilization near the UO is an important additional function, which ensures the efficient UM manual control and frees the ROV operator from additional complex work.

The details of the USPEC with the UM, has the form, shown in fig. 3.

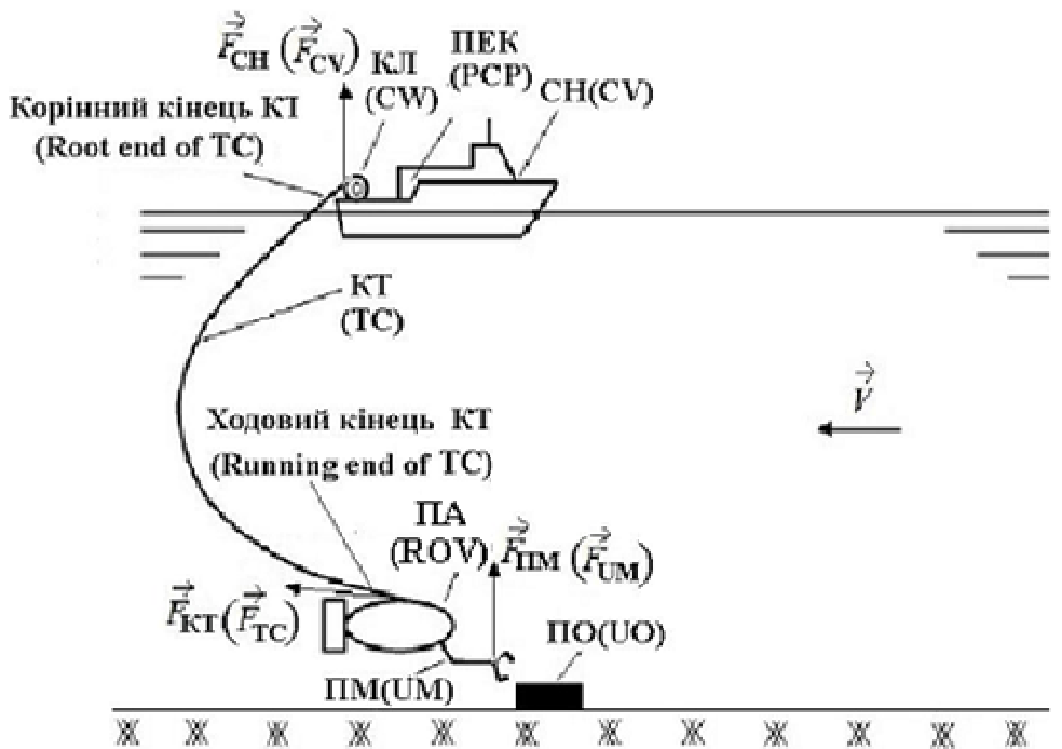


Рисунок 3 – Самохідна прив'язна підводна система з маніпулятором  
Figure 3 – Self-propelled tethered underwater system with a manipulator

Власне ПА є рухомою платформою для ПМ, на яку діють зовнішні збурення від КТ, обумовлені хитавицею СН (сила на корінному кінці КТ  $\vec{F}_{CH}$ ), дією течії з епурою по глибині  $\vec{V}$  на КТ (сила  $\vec{F}_{КТV}$ , яка у сукупності з силою  $\vec{F}_{CH}$  породжують збурюючу силу на корінному кінці КТ  $\vec{F}_{КТ} = f(\vec{F}_{CH}; \vec{F}_{КТV})$ , яка прикладена до вузла закріплення КТ до ПА) та дією течії на корпус ПА (сила  $\vec{F}_{ПАV}$ ).

Крім того, на ПА як платформу ПМ діє збурююча сила від роботи власне ПМ, обумовлена зміною просторового положення ланок ПМ, взаємодією маніпулятора з підводними предметами тощо.

Розглянемо можливості створення системи автоматичної просторової стабілізації самохідного прив'язного підводного апарату біля підводного об'єкту в умовах дії зовнішніх збурень [15].

Система автоматичної просторової стабілізації ПА у підводному просторі є складовою інтегрованої САК ПСНО у цілому (див. р. 2). Її узагальнена структура показана на рис. 4.

Система автоматичної просторової стабілізації (САПС) функціонує на основі:

даних від гідроакустичної системи (ГАС) СН, яка подає первинну інформацію про взаємне просторове положення ПА та ПО, необхідну для наведення підводного апарату на ціль – поточні географічні координати ПА (широта  $\varphi$ , довгота  $\lambda$  і глибина  $-h$  ПА) та географічні координати ПО (широта  $\varphi$ , довгота  $\lambda$  і глибина  $-h$  ПО);

Essentially, ROV is a mobile platform for the UM, on which is subjected to external disturbances from TC, due to VC roll (force at the root end of TC  $\vec{F}_{VC}$ ), action flow with plot along the depth  $\vec{V}$  on TC (force  $\vec{F}_{CTV}$ , together with force  $\vec{F}_{VC}$ , generate a disturbing force at the root end of TC,  $\vec{F}_{CT} = f(\vec{F}_{VC}; \vec{F}_{CTV})$ , which is applied to the node of fixing the TC to the ROV) and the effect of the current on the ROV hull (force  $\vec{F}_{ROV}$ ).

In addition, the ROV as UM's platform, acts as a disturbing force  $\vec{F}_{UM}$  from the work of the UM itself, due to the change in the UM units spatial position, the interaction of the manipulator with underwater objects, etc.

Consider the possibilities of creating an automatic spatial stabilization system for a self-propelled remotely operated vehicle near an underwater object under the influences of external disturbances [15].

The ROV automatic spatial stabilization system in the underwater space is an integral part of the integrated USPEC ACS as a whole (see paragraph 2). Its generalized structure is shown in Fig. 4.

Automatic spatial stabilization system (ASSS) operates on the basis of:

data from CV hydroacoustic system (HAS), which provides the primary information about the ROV mutual spatial position and the UO needed to guide the remotely operated vehicle to a target – current geographical coordinates of the ROV (latitude  $\varphi$ , longitude  $\lambda$  and ROV's depth  $-h$ ), and UO's geographic coordinates (latitude  $\varphi$ , longitude  $\lambda$  and UO's depth  $-h$ );

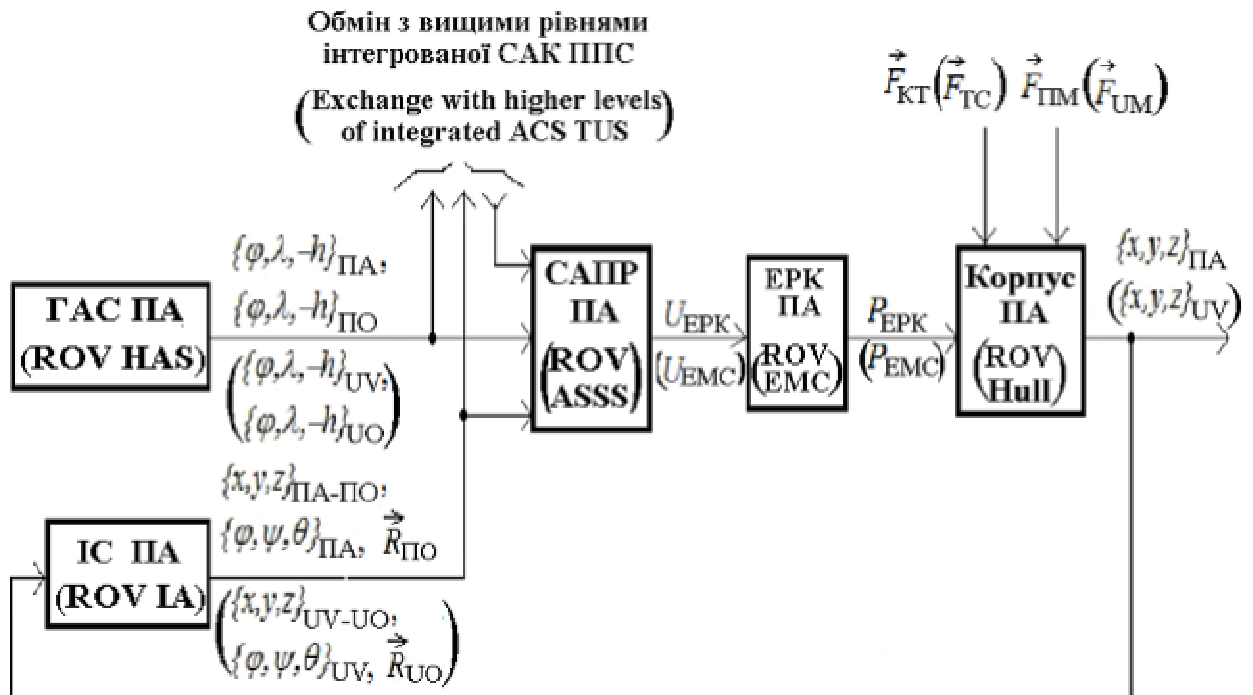


Рисунок 4 – Узагальнена структура системи автоматичної просторової стабілізації ПА

Figure 4 – Generalized structure of the of ROV automatic spatial stabilization system

даних від інформаційної системи (ІС) ПА, яка будується на базі традиційних та інтелектуальних сенсорів і виробляє дані про поточні значення просторових координат ПА відносно ПО  $\{x, y, z\}_{ПА-ПО}$ , вимірює кути курсу, крену й диференту ПА  $\{\varphi, \psi, \theta\}_{ПА}$  в декартовій системі координат, та обчислює дистанцію та пеленг до ПО (радіус-вектор  $\vec{R}_{ПО}$ ).

Головне призначення системи стабілізації – забезпечити просторову стабілізацію ПА відносно ПО, відслідковуючи таке значення радіус-вектору  $\vec{R}_{ПО}$ , яке забезпечить можливість виконання підводним маніпулятором своїх функцій з заданою точністю. При цьому множина керуючих впливів  $U_{ЕРК}$  забезпечує роботу електрорушійного комплексу (ЕРК) ПА по обчисленому у

data from ROV's information system (IS), which is based on traditional and intelligent sensors and produces data on the current values of ROV's spatial coordinates relative to UO  $\{x, y, z\}_{ROV-UO}$ , measures the angles of the course, the roll and the pitch of ROV  $\{\varphi, \psi, \theta\}_{ROV}$  in the Cartesian coordinate system, and calculates the distance and bearing to the UO (radius-vector  $\vec{R}_{UO}$ ).

The main purpose of the stabilization system is to provide ROV spatial stabilization relative to the UO, tracking such a value of the radius-vector  $\vec{R}_{UO}$ , which will enable the underwater manipulator to perform its functions with a given accuracy. In addition, a set of control effects of  $U_{EMC}$  provides the work of ROV electromotive complex (EMC)

САПС закону.

Виконавчим механізмом САПС є ЕРК ПА, від характеристик якого залежить ефективність просторової стабілізації підводного апарату як платформи для ПМ. До головних характеристик ЕРК ПА віднесемо:

кількість  $n_{ЕРП}$  та просторове положення електрорушійних пристроїв (ЕРП) ПА, які утворюють ЕРК ПА;

діапазон керованої зміни упорів кожного ЕРП  $P_{ЕРПi}$  ( $i=1, \dots, n_{ЕРП}$ );

статичні характеристики ЕРП як об'єктів керування ( $P_{ЕРПi} = f(u_{ЕРКi})$ , де  $u_{ЕРКi} \in U_{ЕРК}$ );

динамічні характеристики ЕРП як об'єктів керування (постійні часу  $T_{ЕРПi}$  та ін.).

Прив'язний підводний апарат з позицій керування являє собою вільно плаваючий об'єкт із шістьма ступенями свободи – три лінійних переміщення й три обертання відносно осей системи координат, зв'язаної з корпусом ПА. Всі просторові еволюції ПА у водному середовищі можуть бути зведені до трьох основних режимів руху – переміщення від вихідної позиції до ПО, локального маневрування над об'єктом та просторової стабілізації у заданій точці підводного простору (зависання) біля ПО з метою забезпечення стійкої роботи ПМ. У перших двох режимах роботи превалюють поступальні й квазілінійні просторові переміщення ПА. У третьому режимі ПА повинен мати можливість розвивати упори ЕРК та виконувати малі переміщення по всіх шести ступенях свободи апарату, а при

according to the calculated ASSS law.

The ASSS executive mechanism is the ROV EMC, the characteristics of which depend on the effectiveness of the underwater vehicle spatial stabilization as a platform for UM. The main characteristics of ROV EMC are:

number of  $n_{EMC}$  and spatial position of ROV electromotive devices (EMD), which form ROV's EMC;

the range of controlled change in the thrust force of each EMD  $P_{EMDi}$  (and = 1, ...,  $n_{EMD}$ );

static characteristics of the EMD as control objects ( $P_{EMDi} = f(u_{EMCi})$ , where  $u_{EMCi}$  is  $U_{EMC}$ );

dynamic characteristics of the EMD as control objects (constant time of  $T_{EMDi}$ , etc.).

A remotely operated vehicle, in terms of control, is a free-floating object with six degrees of freedom – three linear displacements and three rotations relative to axes of the coordinate system associated with ROV hull. All ROV spatial evolutions in the aqueous environment can be reduced to three basic motion modes – displacement from the original position to the UO, local maneuvering over the object and spatial stabilization at a given point of the underwater space (in the hang mode) near the UO in order to provide stable UM operation. In the first two modes of operation, translational and quasilinear spatial motions of ROV prevail. In the third mode, the ROV should be able to develop EMC thrust and perform small motions in all six degrees of freedom of

наявності течії – одночасно реалізовувати цим же ЕРК компенсацію зовнішніх збурюючих сил, які з'являються на корпусі та на кабель-тросі ПА. Крім цих сил, ЕРК ПА має нейтралізувати збурюючі сили, які з'являються на рамі ПА в результаті взаємодії ПМ з ПО.

Для просторової стабілізації ПА біля ПО необхідно забезпечити стійкість і керованість по всім шести ступеням свободи ПА в просторі. Тобто, ПА повинен автоматично повертатися у вихідний стан (просторове положення відносно ПО) після виведення його з цього стану під дією зовнішнього збурення та припинення впливу зовнішнього збурення, а також переходити з одного просторового положення до іншого шляхом автоматичної зміни вектору упорів ЕРК.

Сформульовані вимоги можуть бути виконані за умови правильного вибору й розподілу динамічних характеристик ЕРК. Швидкодія ЕРП стає основою реалізації необхідної швидкодії реакції ПА по кожній координаті. При цьому необхідно враховувати, що гідродинамічні характеристики ПА по кожній координаті різні, що особливо важливо при аналізі динамічних характеристик рушіїв.

Для формування просторового вектору сумарного упору ПА повинен мати не менше шести ЕРП, а їх розташування має забезпечувати формування сумарного вектору упору в повній сфері простору. Однак через ряд

the vehicle, and in the presence of flow, simultaneously realize the same EMC compensation of external disturbing forces that appear on the hull and on the ROV tether cable. In addition to these forces, the ROV EMC must neutralize the perturbing forces that appear on the ROV frame as a result of the UM interaction with UO.

For ROV spatial stabilization near UO, it is necessary to provide stability and controllability for all the six degrees of freedom of ROV in space. That is, the ROV must automatically return to its original state (the spatial position relative to the UO) after it is removed from this state under the action of external disturbance and the termination of the influence of external disturbance, as well as to move from one spatial position to another by automatically changing the EMC thrust vector.

The formulated requirements can be fulfilled on condition of the correct choice and distribution of EMC dynamic characteristics. EMD speed becomes the basis for realizing the required response rate of ROV for each coordinate. It should be borne in mind that the ROV hydrodynamic characteristics for each coordinate are different, which is especially important in the thruster dynamic characteristics analysis.

In order to form a spatial vector of the total thrusts, ROV must have, at least, six EMDs, and their arrangement must provide the formation of a total thrusts vector in the entire space sphere.

функціональних і конструктивних причин складно розмістити шість рушіїв на ПА так, щоб вони контролювали будь-які переміщення апарата в просторі. На практиці для розв'язку цієї задачі необхідна більша кількість рушіїв, що визначає певну надмірність ЕРК. Крім того, необхідно врахувати, що крім контролю переміщення ПА існує вимога до швидкодії всього ЕРК.

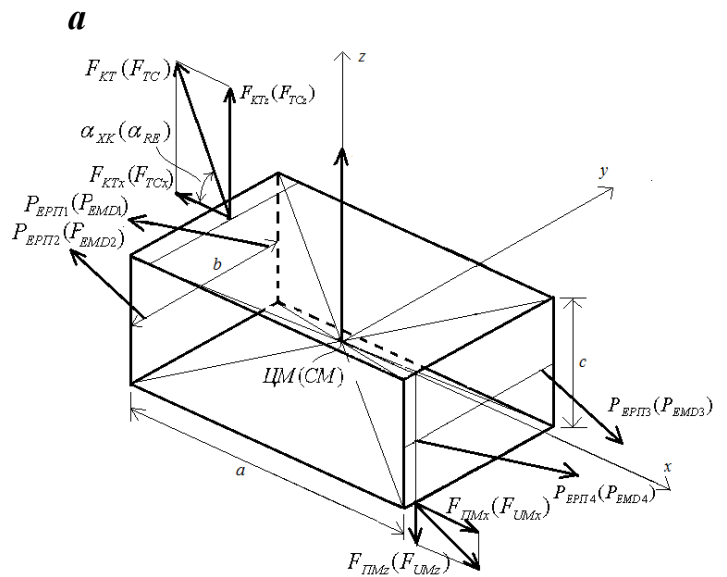
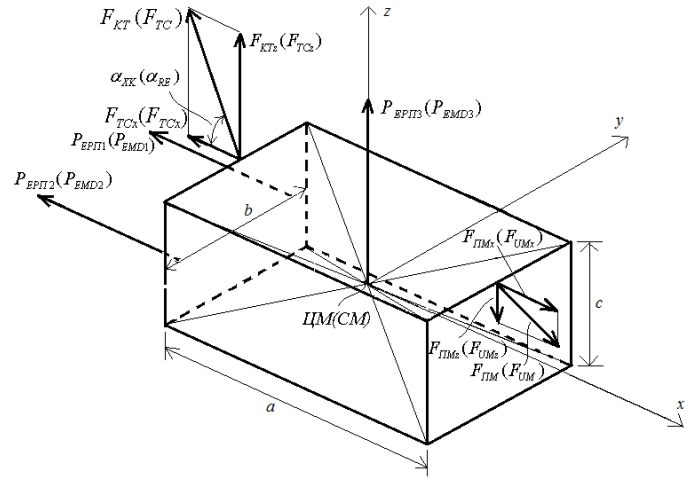
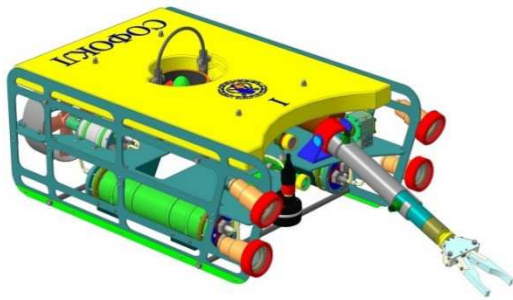
Істотним обмеженням надмірності ЕРК є критерій економічної доцільності. Процес вибору надмірності ЕРК повинен бути компромісним і враховувати задачі функціонування, характеристики підводного середовища, надійність ПА як технічної системи. Вибору достатнього рівня надмірності ЕРК присвячено значну кількість наукових досліджень ще минулого сторіччя. Так, у роботі [16] запропоновано узагальнений підхід до вибору структури ЕРК ПА у вигляді опуклих правильних багатогранників: тетраедр, куб, октаедр, додекаедр і т.д.

Проте, сучасна практика побудови ПСНО провідних країн світу та досвід науково-дослідного інституту підводної техніки НУК свідчать, що на сьогодні одним з найбільш поширених архітектурно-конструктивних типів прив'язних ПА є прямокутний паралелепіпед довжиною  $a$ , шириною  $b < a$  і висотою  $c < a$ , рис. 5.

However, due to a number of functional and constructive reasons, it is difficult to place six propellers (motors) on the ROV so that they control any movement of the vehicle in space. In practice, to solve this problem, a larger number of motors are needed, which determine a certain redundancy of the EMC. In addition, it should be noted that, besides the ROV motion control, there is a requirement for the performance of the entire EMC.

The essential limitation of EMC redundancy is the criterion of economic expediency. The process of choosing the redundancy of the EMC must be a compromise and take into account the tasks of functioning, characteristics of the underwater environment, and the ROV reliability as a technical system. The choice of sufficient level of redundancy EMC is devoted to a considerable number of scientific studies of the past century. Thus, in [16] a generalized approach to the choice of the structure of the ROV's EMC in the form of convex regular polytopes is proposed: tetrahedron, cube, octahedron, dodecahedron, etc.

However, the current practice of constructing USPEC in the leading countries of the world and the experience of the scientific research institute of underwater equipment of the NUS indicate that, today, one of most common architectural and constructive types of ROVs is a rectangular parallelepiped of length  $a$ , width  $b < a$  and height  $c < a$ , Fig. 5.



**б (b)**

Рисунок 5 – Сучасні прив’язні ПА та сили, що прикладаються до їх корпусів:

- a** – ПА проекту «Інспектор» з двома маршовими ЕРП (Україна, НУК);
- б** – ПА проекту «Falcon» з чотирма ЕРК для маршового і лагового руху (Швеція, “SAAB”)

Figure 5 – Modern ROVs and forces applied to their hulls:

- a** – Project ROV "Inspector" with two marching EMD (Ukraine, NUS);
- b** – Project UV "Falcon" with four EMC for marching and lagging motion (Sweden, SAAB)

Такі ПА мають 3-5 ЕРП, які створюють упори по осях декартової системи координат, зв’язаної з корпусом ПА та з центром у точці центру мас апарату ЦМ (рис. 5, **a**), або під деяким кутом до них (рис. 5, **б**).

Зазвичай, на таких ПА встановлюється один вертикальний

Such ROVs have 3-5 EMDs, which create thrust forces on the axes of the Cartesian coordinate system, connected with the ROV body and centered at point of the vehicle’s center of mass (CM) (Fig. 5, **a**), or at some angle to them (Fig. 5, **b**).

Usually, on such ROV, one vertical EMD is installed, which provides



ЕРП, який забезпечує рух апарату по вертикалі та компенсує вертикальну складову  $F_{КТz}$  ( $|\vec{F}_{КТ}| = \sqrt{F_{КТx}^2 + F_{КТz}^2}$ ).

Практика застосування ПА проекту «Інспектор» на глибинах більше 100 метрів свідчить, що в умовах хитавиці СН та за наявності морської течії застосування ПМ є неефективним, оскільки з-за коливань апарату біля ПО його важко застабілізувати так, щоб точно захопити об'єкт і швидко та надійно затиснути його кінцівкою маніпулятора. Приблизно такі ж обмеження існують і в експлуатаційних документах ПА зарубіжних проектів «Panther» і «Falcon» [17].

Розглянемо можливості удосконалення конструкції ПА такого класу та побудови відповідної САПС з метою розширення діапазону гідрокліматичних умов виконання підводних робіт маніпуляційного типу. Далі розглядаємо типовий розрахунковий варіант просторового положення ПСНО, коли СН, ПА та його КТ знаходяться в одній площині – діаметральній площині СН.

Основною робочою гіпотезою такого завдання приймемо твердження, що при роботі на течії ПА завжди розташовують носом проти течії. Це обумовлено тим, що в усталеному (квазістаціонарному) режимі ходовий кінець КТ у потоці води підходить до ПА з корми під деяким кутом  $\alpha_{ХК}$  (див. рис. 5). Така просторова орієнтація ПА є найбільш простою в реалізації та стійкою з позицій керування ПСНО у цілому.

Припускаємо також, що сили

vertical motion of the vehicle and compensates for the vertical component  $F_{CTz}$  ( $|\vec{F}_{TC}| = \sqrt{F_{TCx}^2 + F_{TCz}^2}$ ).

The practical application of "Inspector" ROV project at depths of more than 100 meters testifies that in the conditions of the CV shifting and in the presence of the sea current, the use of UM is inefficient, since, due to the fluctuations of the vehicle near UO makes it difficult to stabilize it so as to precisely capture the object and quickly and reliably clamp it with the manipulator ending. Approximately the same restrictions exist in the operational documents of the foreign "Panther" and "Falcon" ROV projects [17].

Consider the possibilities of improving the design of a ROV of this class and constructing a corresponding ASSS in order to expand the range of hydroclimatic conditions for the implementation of underwater manipulator operations. Next we consider the typical calculation variant of the USPEC spatial position when the CV, ROV and its TC are in the same plane – the diameter plane CV.

The main working hypothesis of this task is to assume that when working on the flow, the ROV always has the nose against the current. This is due to the fact that in the steady (quasi-stationary) mode, the running end of the TC in the flow of water approaches the ROV from the stern at an angle  $\alpha_{RNE}$  (see Fig.5). Such a ROV spatial orientation is the easiest in implementation and consistent with USPEC control position in general.

We also assume that the UM

реакції ПМ, які виникають у процесі взаємодії маніпулятора з ПО, діють переважно у вертикальній площині. Таке припущення справедливе для найбільш поширеної підводної операції – відриву ПО від ґрунту.

Як видно з рис. 5, зовнішні збурення, що діють на ПА з боку ходового кінця КТ, прикладаються до апарату під кутом  $\alpha_{ХК}$ , а їх характер має вид:

$$|\vec{F}_{КТ}| = F_{КТs} + F_{КТd}, \quad (1)$$

де  $F_{КТs}$  – постійна складова модуля вектору  $\vec{F}_{КТ}$ , обумовлена квазістаціонарним обтіканням КТ потоком води з епюрою по глибині  $\vec{V}$ ;

$F_{КТd}$  – змінна складова модуля вектору  $\vec{F}_{КТ}$ , породжена хитавицею СН (сила  $\vec{F}_{СН}$  на корінному кінці КТ) та вібрацією КТ у потоці води (сила  $\vec{F}_{КТv}$ ).

При цьому мають місце відношення:

$$F_{КТd} = F_{КТv} + F_{КТw}, \quad (2)$$

$$F_{КТv} = F_{КТs} + F_{КТw}; \quad (3)$$

$$F_{КТ} = F_{КТv} + F_{КТw}; \quad (4)$$

де  $F_{КТw}$  – сила на ходовому кінці КТ, викликана переміщенням корінного кінця КТ з-за хитавиці СН (з урахуванням сил тертя КТ у воді).

У рівняннях (2) – (4) символи векторів у позначенні сил  $F_{КТv}$  і  $F_{КТ}$  опущені, оскільки їх складові співпадають з результуючими

reaction forces, which arise in the process of interaction of the manipulator with UO, act mainly in the vertical plane. This assumption is valid for the most common underwater operation – the separation of UO from the ground.

As can be seen from Fig. 5, external disturbances acting on ROV on the side of the running end of the TC are applied to the vehicle at an angle  $\alpha_{RE}$ , and their character has the form:

$$|\vec{F}_{TC}| = F_{TCs} + F_{TCd}, \quad (1)$$

where  $F_{TCs}$  is the constant component of the vector module  $\vec{F}_{TC}$ , is due to the TC quasi-stationary flow through the water flow with a plot along the depth  $\vec{V}$ ;

$F_{TCd}$  is the variable component of the vector module  $\vec{F}_{TC}$ , generated by the CV hub (force  $\vec{F}_{CV}$  at the root end of TC) and TC vibration in the water flow (force  $\vec{F}_{TCv}$ ).

At the same time have relationships:

$$F_{TCd} = F_{TCv} + F_{TCw}, \quad (2)$$

$$F_{TCv} = F_{TCs} + F_{TCw}; \quad (3)$$

$$F_{TC} = F_{TCv} + F_{TCw}; \quad (4)$$

where  $F_{TCw}$  – the force at the running (working) end of the TC, caused by the displacement of the root end of the TC due to the CV motion (taking into account the TC frictional forces in the water).

In equations (2) – (4), the symbols of the vectors in the designation of forces  $F_{TCv}$  and  $F_{TC}$  omitted, since their

векторами і діють вздовж КТ.

Що ж стосується вертикальної складової сили реакції ПМ  $F_{ПМz}$ , то вона прикладається до платформи (корпусу ПА) у точці закріплення ПМ, тому її вплив на просторову нестабільність ПА суттєво залежить від розташування ПМ на рамі апарату.

Виходячи з аналізу збурюючих сил, які діють на ПА, пропонується їх компенсувати за допомогою додаткових ЕРК, що розвивають компенсуючі упори по осях дії збурюючих сил.

Оскільки для компенсації сили  $F_{КТs}$  на всіх типах ПА застосовується базовий ЕРК у складі ЕРП горизонтального і вертикального руху, розглянемо шляхи компенсації динамічної складової збурення  $F_{КТd}$ . Така компенсація можлива у наступних варіантах:

за допомогою базового ЕРК шляхом додавання до керуючого сигналу  $U_{ЕРК}$  складових динамічної стабілізації для кожного ЕРП;

за допомогою спеціально встановленого додаткового стабілізуючого рушійного комплексу (СРК) у складі декількох (зазвичай – три-чотири) підрулюючих ЕРП малої потужності;

за допомогою двох стабілізуючих рушійних пристроїв (СРП) – по одному для кожної збурюючої сили  $\vec{F}_{КТ}$  і  $\vec{F}_{ПМz}$ .

Попередній аналіз свідчить, до перші два шляхи мають наступні недоліки:

базовий ЕРК є найбільш

constituents coincide with the resulting vectors and operate along TC.

As for the vertical component of the UM reaction  $F_{UMz}$ , it is applied to the platform (the ROV hull) at the point of fixing the UM, so its effect on the spatial instability of ROV substantially depends on the location of the UM on the vehicle's frame.

Based on the analysis of the disturbing forces acting on the ROV, it is proposed to compensate them by means of additional EMCs developing the compensating tension on the axes of the disturbing forces.

Since to compensate for forces  $F_{TCs}$  in all types of ROV, a basic EMC, consisting of EMD of the horizontal and vertical motion, is applied, we will consider ways to compensate for the dynamic component of perturbation  $F_{TCd}$ . Such compensation is possible in the following variants:

using the basic EMC by adding to the control signal  $U_{EMC}$ , the components of dynamic stabilization for each EMD;

with the help of a specially installed additional stabilizing driving complex (SDC) consisting of several (usually three to four) low power EMD thrusters;

with two stabilizing driving devices (SDDs) – one for each perturbing force  $\vec{F}_{TC}$  and  $\vec{F}_{UMz}$ .

A preliminary analysis shows that the first two ways have the following disadvantages:

the basic EMC is the most powerful

потужним споживачем електроенергії на ПА і має недостатні динамічні характеристики, зокрема, велику постійну часу;

встановлення додаткового СРК у складі декількох ЕРП є найбільш очевидним та ефективним технічним рішенням, проте, призводить до ускладнення конструкції ПА та збільшення його маси.

Тому у роботі пропонується встановити два СРП:

для компенсації збурень  $\vec{F}_{КТd}$  – один СРП з можливістю повороту вектору упору у діапазоні можливої зміни кута  $\alpha_{ХК}$  підходу ходового кінця КТ до рами ПА та установкою його у точці кріплення КТ до рами ПА;

для компенсації збурень  $\vec{F}_{ПМz}$  – один СРП з вертикальним упором та установкою над (під) точкою закріплення ПМ на рамі ПА.

Пропоновані СРП будуть працювати малими, але швидкодіючими додатковими упорами, які будуть накладатись на основні упори базового ЕРП ПА і, таким чином, оперативно компенсувати його відхилення від заданої точки підводного простору.

Узагальнена структура удосконаленої системи автоматичної просторової стабілізації ПА, який оснащений двома СРП для компенсації збурень  $\vec{F}_{КТd}$  і  $\vec{F}_{ПМz}$ , наведена на рис. 6.

consumer of electric power of ROV and has insufficient dynamic characteristics, in particular, a large constant time;

the installation of an additional SDD in several EMDs is the most obvious and effective technical solution, however, leads to complications of ROV design and increase in its mass.

Therefore, in the work, it is proposed to install two SDDs:

for the compensation of perturbations  $\vec{F}_{TCd}$ , – one SDD with the ability to rotate the thrust vector in the range of the possible change of the angle  $\alpha_{RE}$  approach of the running end of the TC to the ROV frame and install it at the point of TC attachment to the ROV frame;

for the compensation of perturbations  $\vec{F}_{UMz}$ , one SDD with a vertical force and installation above (below) the fixing point of the UM on the ROV frame.

The proposed SDDs will operate small, but high-speed additional force which will be applied to the main force of the basic ROV EMD and, thus, to quickly compensate for its deviation from the given point of the underwater space.

The generalized structure of ROV improved automatic spatial stabilization system, which is equipped with two SDDs for compensation of perturbations  $\vec{F}_{TCd}$  and  $\vec{F}_{UMz}$ , is shown in Fig. 6.

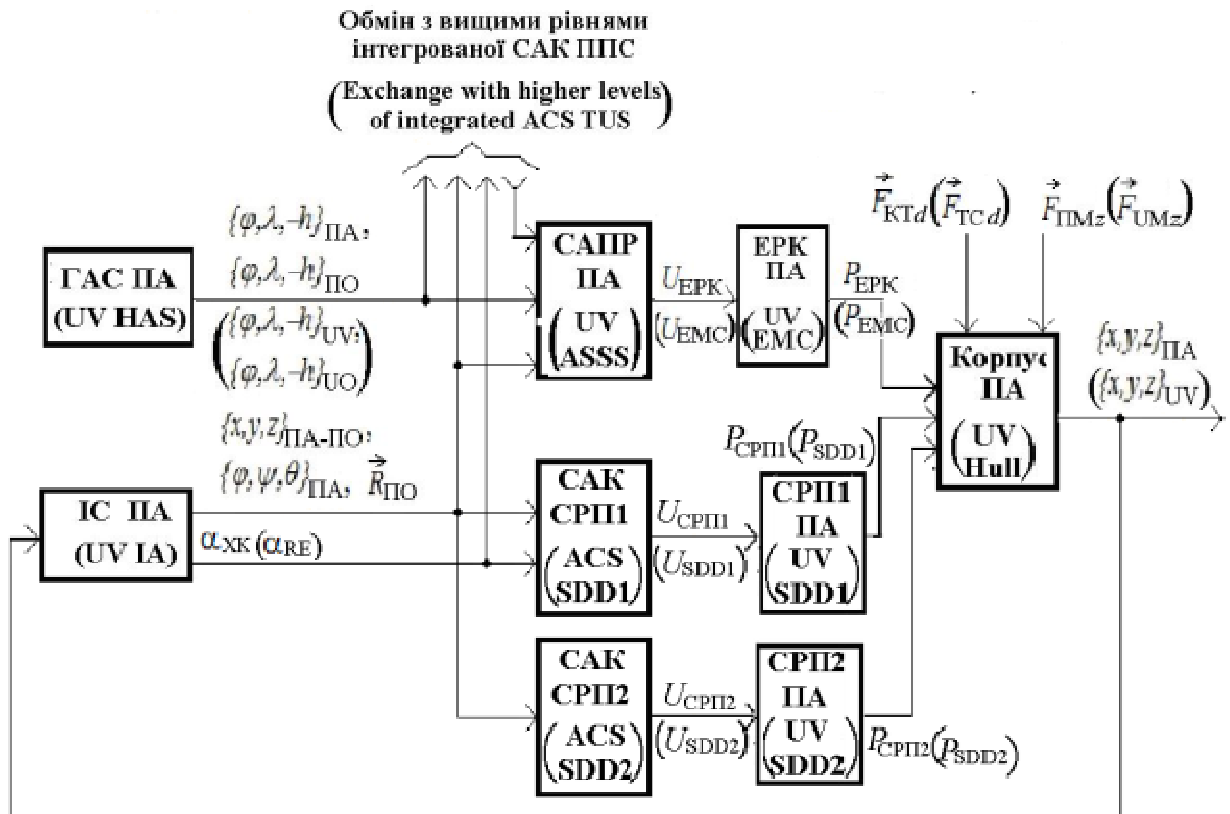


Рисунок 6 – Узагальнена структура удосконаленої системи автоматичної просторової стабілізації підводного апарату

Figure 6 – Generalized structure of the improved of automatic spatial stabilization system of the underwater vehicle

Система автоматичної стабілізації містить, крім традиційної САК ПА, дві додаткові системи автоматичного керування:

САК стабілізуючим рушійним пристроєм СРП1, який забезпечує компенсацію збурень від КТ за допомогою упору  $P_{СРП1}$  на основі комплексного урахування поточних значень просторових координат ПА відносно ПО  $\{x, y, z\}_{ПА-ПО}$ , кутів курсу, крену й диференту ПА  $\{\varphi, \psi, \theta\}_{ПА}$ , радіус-вектору  $\vec{R}_{ПО}$  та кута ходового кінця КТ  $\alpha_{ХК}$ ;

САК стабілізуючим рушійним пристроєм СРП2, який забезпечує компенсацію збурень від ПМ  $\vec{F}_{ПМz}$  за допомогою упору  $P_{СРП2}$ .

The automatic stabilization system contains, in addition to the traditional ROV ACS, two additional automatic control systems:

ACS of stabilizing driving device SDD1, which provides compensation for the disturbances from TC using the force  $P_{SDD1}$  on the based on a comprehensive consideration of the current values of the ROV spatial coordinates relative to the UO  $\{x, y, z\}_{ROV-UO}$ , angles of the ROV course, roll, and the pitch  $\{\varphi, \psi, \theta\}_{ROV}$ , radius-vector  $\vec{R}_{UO}$  and TC running end angle  $\alpha_{RNE}$ ;

ACS of stabilizing propulsion device SDD2, provides compensation of disturbances from the UM  $\vec{F}_{UMz}$  with the help of the force  $P_{SDD2}$ .

Попередня оцінка працездатності запропонованої САПС, виконана шляхом комп'ютерного моделювання, підтвердила її ефективність.

The preliminary performance evaluation of the proposed ASSS, performed by computer simulation, confirmed its effectiveness.

## 4 СТАБІЛІЗАЦІЯ ДИФЕРЕНТУ ПА ПРИ ПЕРЕРІЗУВАННІ ТРОСУ ПІД НАТЯГОМ

### 4 STABILIZATION OF ROV PITCH WHEN CUTTING A METAL CABLE UNDER TENSION

При виконанні морських будівельних робіт типовим режимом для ПА є режим перерізування металевого тросу, який знаходиться під натягом. Наприклад, при укладанні трубопроводу на морське дно деякі понтони не відділяються від нього автоматично. Тому виникає задача перерізування тросу цього понтону вже після того, як трубопровід занурився під воду, а трос знаходиться під дією сили натягу від понтона.

Керований процес перерізування тросу під натягом за допомогою ПА, оснащеного спеціальним НО – різакром тросів (РТ) – складається з наступних фаз:

приведення ПА до тросу під натягом та позиціонування (зазвичай, проти течії) з візуальним контролем за допомогою штатної відеокамери ПА;

захоплення тросу під натягом затискачем РТ з візуальним контролем за допомогою штатної відеокамери ПА;

перерізування тросу під натягом виконавчим пристроєм РТ – електричним різакром з візуальним контролем за допомогою штатної відеокамери ПА;

розжимання затискача у процесі спливання понтона з тросом з візуальним контролем за допомогою штатної відеокамери ПА.

When performing maritime construction works by a typical mode for the ROV, is the cutting mode of a metal cable which is under tension. For example, when laying a pipeline to the seabed, some pontoons do not separate from it automatically. Therefore, there is the problem of cutting the metal pontoon cables arises after the pipeline is plunged under water, and the cable is under the tension influence of the pontoon.

The controlled process of cutting a cable under tension using an ROV equipped with a special AE – cable cutter (CC) consists of the following phases:

bringing the ROV to the metal cable under tension and positioning (usually against the current) with visual control using a standard ROV video camera;

capturing the metal cable under tension with the CC clamp with visual control using the standard ROV video camera;

cutting the metal cable under tension with the CC actuating mechanism – an electric cutter with visual control – using a standard ROV video camera;

unclasp the clamp in the process of pontoons surfacing (popping up) with the metal cable under tension with visual control using a standard ROV video camera.

Таким чином, після перерізування тросу під натягом ПА повинен відстикуватись від нього. Але на ПА у процесі спливання діє сила, прикладена до РТ, яка залежить від динаміки спливання понтона. При цьому створюється диферентуючий момент ПА, який може призвести до заклинювання затискача РТ, а при кутах диференту, що виходять за межі  $\psi = \pm 10^\circ$ , на РТ можуть утворитись моменти, які здатні нанести йому механічні ушкодження. Тому одразу після відрізання тросу під натягом має вмикатись рушій – стабілізатор диференту, щоб не допустити механічного ушкодження РТ.

За рахунок вертикального рушія ПА набиратиме швидкість  $V_y$ . Але забезпечити синхронне спливання ПА та понтона недостатньо. Необхідно вирівняти диферент ПА та утримувати його в діапазоні  $\psi = \pm 5^\circ$ , в цьому випадку вплив збурюючої сили зменшується майже до нуля і з'являється можливість розтиснути затискач.

Рух понтона моделюватимемо за експоненціальним законом:

$$\frac{dv_m}{dt} = \frac{1}{T_m}(V_m - v_m); \quad (5)$$

де  $v_m$  – поточне значення швидкості спливання понтона,  $V_m = 0,5$  м/с – кінцеве значення швидкості спливання понтона,  $T_m = 1$  с – постійна часу моделі спливання понтона [18].

Вплив тросу під натягом на ПА моделюватимемо, використовуючи

Thus, after cutting the cable under tension, the ROV should be detached from it. But on the ROV, in the process of surfacing, there is a force applied to the CC, which depends on the dynamics of the pontoon's ascent. At the same time, a differentiating moment of ROV is created, which can lead to jamming of the CC clamp, and at pitch angles beyond the limits of  $\psi = \pm 10^\circ$ , moments capable of causing mechanical damage on the CC can be created. Therefore, immediately after cutting the cable under tension, the engine – a pitch stabilizer must be activated to prevent mechanical damage to the CC.

Due to the vertical propeller (motor), the ROV will gain speed  $V_y$ . But, ensuring synchronous surfacing of the ROV and pontoons is not enough. It is necessary to align the ROV pitch and hold it in the range  $\psi = \pm 5^\circ$ , in this case, the disturbing force effect decreases to almost zero and there is the possibility of releasing the clamp.

The motion of the pontoon will be modeled according to the exponential law:

$$\frac{dv_m}{dt} = \frac{1}{T_m}(V_m - v_m) \quad (5)$$

where  $v_m$  is the current value of the pontoon clearance rate,  $v_m = 0,5$  m/s is the final value of the pontoon clearance rate,  $T_m = 1$  s is the constant time of the pontoons model surfacing [18].

The cable under tension's effect on the ROV will be modeled using the TC



ММ КТ з двох елементів – корінного та ходового кінців: координата ходового кінця співпадатиме з точкою розташування затискача маніпулятора, координата корінного кінця змінюватиметься за законом:

$$y_m = \iint \frac{dv_m}{dt} dt dt. \quad (6)$$

Довжину КТ приймемо незрівнянно малою у порівнянні з габаритами ПА. Це забезпечить формування силового впливу на ПА в точці утримання тросу під натягом маніпулятором.

На рис. 7 зображено динаміку зміни диференту ПА внаслідок дії спливаючого понтона.

ММ of two elements – the root and the running ends: the coordinate of the running end will coincide with the location of the manipulator clamp; the coordinate of the root end will be changed according to the law:

$$y_m = \iint \frac{dv_m}{dt} dt dt. \quad (6)$$

The length of the TC is assumed to be incomparably small compared with the ROV dimensions. This will ensure the formation of power impact on the ROV at the point of holding the cable under tension by the manipulator.

The dynamics of ROV pitch change as a result of the floating pontoon action is shown in Fig. 7.

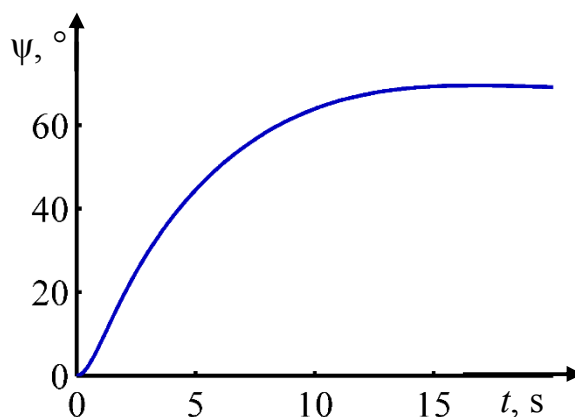


Рисунок 7 – Зміна диференту ПА внаслідок дії збурень від тросу під натягом  
Figure 7 – Change of ROV pitch as a result of disturbances from the cable under tension

Обертний рух ПА під дією збурюючих сил та моменту характеризується нелінійностями, оскільки внаслідок взаємодії нелінійних складових:

- рушійного пристрою;
- корпусу ПА;

The ROV rotating motion under the action of the perturbing forces and momentum is characterized by significant nonlinearities, since it arises as a result of the interaction of nonlinear components:

- the driving device;
- ROV hull;

– власне невизначених зовнішніх збурень у вигляді вектора сили  $\vec{F}_m$  та моменту  $M_m$  тросу під натягом.

Для стабілізації диференту ПА виділимо елементи математичної моделі обертового руху ПА, кожен з яких описується диференціальним рівнянням першого порядку:

- модель електродинамічних процесів в електродвигуні (ЕД) рушійного пристрою;
- модель динаміки механічних процесів в ЕД рушійного пристрою;
- модель динаміки обертового руху корпусу ПА.

Електродинамічні перехідні процеси, які протікають в ЕД рушійного пристрою ПА, значно швидші, ніж механічні перехідні процеси в ньому, тому математичну модель динаміки електромеханічних процесів рушійного пристрою можна представити у вигляді лінійного диференціального рівняння першого порядку, керуючим впливом є напруга живлення ЕД  $u$ , керованою величиною – швидкість обертання гребного гвинта  $\omega_{\Gamma\Gamma}$ .

Застосуємо принцип підпорядкованого керування та отримаємо структуру системи автоматичної стабілізації диферента ПА, яка містить регулятор швидкості обертання гребного гвинта  $R_{\omega_{\Gamma\Gamma}}$  та стабілізатор диферента ПА  $S_{\psi}$  (рис. 8).

– actual uncertain external disturbances in the form of a force vector  $\vec{F}_m$  and moment  $M_m$  of the cable under tension.

To stabilize the ROV pitch, we select the elements of ROV mathematical model rotating motion, each of which is described by the differential equation of the first order:

- model of electrodynamic processes in the driving device electric motor (EM);
- model of dynamics of driving device mechanical processes in the EM;
- model of the rotating motion dynamics of the ROV hull.

Electrodynamic transients that occur in the EM driving device are much faster than mechanical transients in it, therefore the mathematical model of the dynamics of the driving device's electromechanical processes can be represented as a first-order linear differential equation, and the control voltage is the power supply EM  $u$ , controlled value – the rotational speed of the propeller (propelling screw)  $\omega_{PS}$ .

To apply the principle of subordinate control and obtain the structure of the ROV pitch automatic stabilization system, which contains the rotational speed controller  $R_{\omega_{PS}}$  and the ROV differential stabilizer  $S_{\psi}$  (Figure 8).

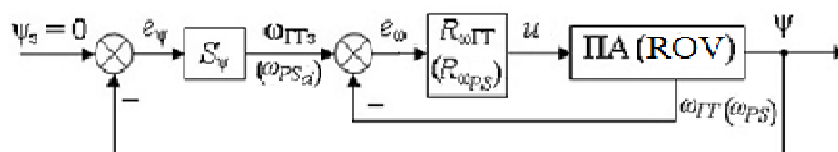


Рисунок 8 – Структура системи автоматичної стабілізації диферента ПА  
Figure 8 – The structure of the of ROV pitch automatic stabilization system

У [19] синтезовано ПІ-регулятор швидкості обертання гребного гвинта  $R\omega_{\Gamma}$ , який працює в умовах невизначених збурень з постійною часу  $T_{\omega_{\Gamma}} = 0,02$  с. Застосуємо його для керування рушійним пристроєм ПА, тоді для реалізації системи автоматичної стабілізації диферента ПА залишається синтезувати стабілізатор  $S_{\psi}$ .

Задачею  $S_{\psi}$  є утримання нульового диференту ПА, виробляючи керуючий вплив  $\omega_{\Gamma 3}$  для регулятора  $R\omega_{\Gamma}$ . При успішній роботі  $S_{\psi}$  диферент ПА буде знаходитись в діапазоні  $\psi = \pm 1^{\circ}$ , що забезпечить мінімізацію збурюючі впливів від тросу під натягом. Крім того, в цьому діапазоні нелінійності обертового руху корпусу ПА також будуть проявлятися слабо, тому представимо математичну модель обертового руху ПА диференціальним рівнянням першого порядку з лінійними коефіцієнтами  $k_{\psi 1}$  та  $k_{\psi 2}$ :

$$k_{\psi 1} \frac{d\psi}{dt} = \omega_{\Gamma} - k_{\psi 2} \psi + \omega_{33}. \quad (7)$$

Величина  $\omega_{33}$  представляє собою зовнішнє збурення, приведене до розмірності керуючого впливу, яке виникає внаслідок взаємодії ПА з тросом під натягом. Очевидно, що  $\omega_{33}$ , а також коефіцієнти  $k_{\psi 1}$  та  $k_{\psi 2}$  залежать від  $V_m$ .

Для стабілізації диферента застосуємо інверсну модель обертового руху ПА [20]:

In [19], the PI velocity controller for rotational propeller  $R\omega_{PS}$ , which operates under conditions of uncertain disturbances with a constant time  $T_{\omega_{PS}} = 0,02$ s, is synthesized. We will apply it for control of ROV propulsion device, then for the implementation of the ROV pitch automatic stabilization system remains to synthesize the stabilizer  $S_{\psi}$ .

The task  $S_{\psi}$  is the maintenance of the zero ROV pitch, producing a control action  $\omega_{PS}$  for the controller  $R\omega_{PS}$ . In successful operation  $S_{\psi}$ , the ROV pitch will be in the range  $\psi = \pm 1^{\circ}$ , which will minimize the disturbing effects of the cable under tension. In addition, in this range of nonlinearities of the rotational motion of the ROV hull will also be weak, therefore, represent the ROV rotary motion mathematical model by the first-order differential equation with the linear coefficients  $k_{\psi 1}$  and  $k_{\psi 2}$ :

$$k_{\psi 1} \frac{d\psi}{dt} = \omega_{PS} - k_{\psi 2} \psi + \omega_{ed}. \quad (7)$$

The magnitude of  $\omega_{ed}$  represents the external disturbance, reduced to the dimension of control influence, which arises as a result of the ROV interaction with the pontoon. Obviously, the  $\omega_{ed}$ , as well as the coefficients  $k_{\psi 1}$  and  $k_{\psi 2}$ , depend on  $V_m$ .

To stabilize the pitch, apply the inverse model of ROV rotary motion [20]:

$$\omega_{PSd} = k_{\psi 1} \omega_d + k_{\psi 2} \psi - \omega_{const}, \quad (8)$$

$$\omega_{\Gamma\Gamma_3} = k_{\psi_1}\omega_3 + k_{\psi_2}\psi - \omega_{\text{const}}, \quad (8)$$

$$\omega_3 = -\frac{\psi}{T_\psi}, \quad (9)$$

де  $\omega_3$  – задане значення кутової швидкості ПА,  $\omega_{\text{const}}$  – константа, що компенсує вплив  $\omega_{33}$ ,  $T_\psi$  – постійна часу стабілізатора диференту.

Серію комп'ютерних експериментів з метою параметричної ідентифікації інверсної математичної моделі (8) було проведено при  $V_m = 0,5$  м/с. Встановлено, що при керуючих впливах  $\omega_{\Gamma\Gamma_3} \approx 72..78$  с<sup>-1</sup> забезпечуються достатні для оперативного керування кутові швидкості  $\omega_3 \approx -1..1$  °/с. Керуючі впливи задавались для диферентів у діапазоні  $\psi \in [-5^\circ, 5^\circ]$ .

Апроксимація табличних даних методом найменших квадратів дала змогу отримати параметри моделі:  $\omega_{\text{const}} = -74,63$  с<sup>-1</sup>,  $k_{\psi_1} = -2.83$  град<sup>-1</sup> та  $k_{\psi_2} = -0,083$  (град·с)<sup>-1</sup> [21].

На рис. 9 представлено результати моделювання системи автоматичної стабілізації диферента ПА.

Як бачимо, стабілізатор утримує диферент ПА в межах  $\psi \in (-2,6^\circ, 5,6^\circ)$ , що запобігає механічному ушкодженню маніпулятора, а через 5 с диферент потрапляє у діапазон  $\psi \in (-1^\circ, 1^\circ)$  і утримується у ньому, що дає можливість розтиснути затискач маніпулятора.

$$\omega_d = -\frac{\psi}{T_\psi}, \quad (9)$$

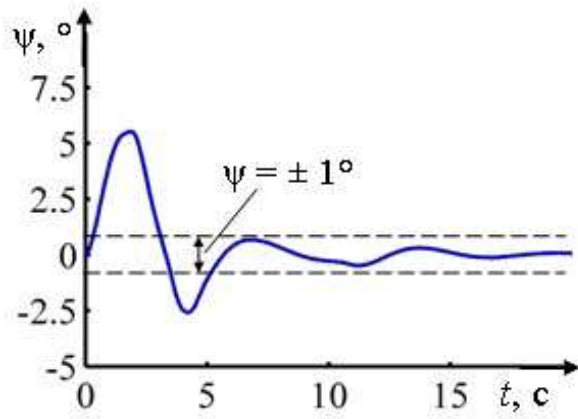
where  $\omega_d$  is the desired value of ROV angular velocity,  $\omega_{\text{const}}$  is the constant that compensates for the effect of  $\omega_{PS}$ ,  $T_\psi$  is the time constant of the pitch stabilizer.

A series of simulation experiments with the purpose of parametric identification of an inverse mathematical model (3.8) was carried out at  $V_m = 0.5$  m/s. It was established that with control actions  $\omega_{PSd} \approx 72..78$  s<sup>-1</sup>, angular velocities  $\omega_d \approx -1..1$ °/s are sufficiently provided for operational control. The control actions were set for the pitch in the range  $\psi \in [-5^\circ, 5^\circ]$ .

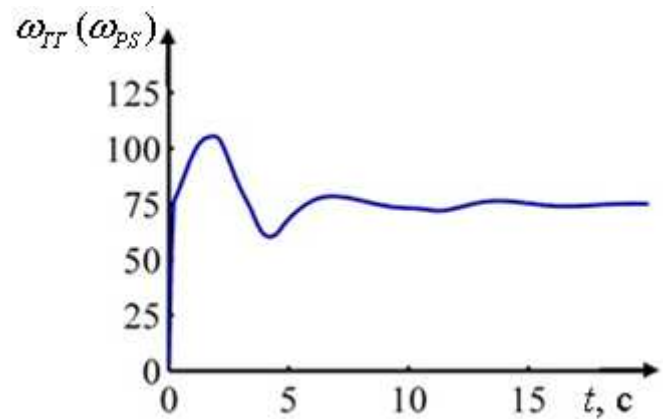
Applying the approximation of tabular data by the method of least-squares made it possible to obtain the model parameters  $\omega_{\text{const}} = -74,63$  s<sup>-1</sup>,  $k_{\psi_1} = -2.83$  deg<sup>-1</sup> and  $k_{\psi_2} = -0,083$  (deg·s)<sup>-1</sup> [21].

The simulation results of ROV pitch automatic stabilization system are presented in fig. 9.

As can be seen, the stabilizer keeps the ROV pitch within the limits  $\psi \in (-2,6^\circ, 5,6^\circ)$  that prevents mechanical damage to the manipulator, and after 5 seconds the pitch falls into the range  $\psi \in (-1^\circ, 1^\circ)$  and is held there, which makes it possible to unlock the clamp of the manipulator.



*a*



*b*

Рисунок 9 – Диферент ПА (*a*) та керуючий вплив  $\omega_{\Gamma\Gamma}$  (*b*)

Figure 9 – UV pitch (*a*) and the controlling action (influence) of  $\omega_{PS}$  (*b*)

## 5 АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ КАБЕЛЬНОЮ ЛЕБІДКОЮ ПСНО НА ЯКІРНІЙ СТОЯНЦІ СУДНА-НОСІЯ

### 5 USPEC CABLE WINCH CONTROL AUTOMATION AT THE CARRIER VESSEL ANCHORAGE

Аналіз зарубіжної науково-технічної літератури свідчить, що на цей час застосування ПСНО, здебільшого, спостерігається з борту спеціалізованих суден-носіїв підводної техніки, оснащених системами динамічного позиціонування, які дають змогу утримувати СН над ПО, з яким працює підводний апарат з маніпулятором [21, 22].

Проте, їх використання пов'язане з великими фінансовими затратами, оскільки орендна оплата таких СН досить висока [22]. Крім того, на цей час в Україні практично відсутні експедиційні судна з динамічним позиціонуванням.

При застосуванні ПА на малих глибинах (до 100 метрів), зазвичай, використовують морські водолазні судна з постановкою їх на якір [23]. Однак, практика свідчить, що судно при цьому виконує значні переміщення по водній поверхні під дією вітру, течії та хвиль. Це породжує збурення, які через КТ передаються на корпус ПА. Крім того, до цих сил на ходовому кінці КТ додається зміна напрямку вектора сили його стаціонарного обтікання підводною течією, породжена зміною просторового положення КТ з-за переміщення СН. У результаті суттєво звужується діапазон гідро-кліматичних умов застосування та знижується ефективність ПСНО.

The analysis of foreign scientific and technical literature shows that currently, the use of USPEC is mostly observed on board specialized vehicles carrying underwater equipment equipped with dynamic positioning systems that enable to keep the CV over the UO with which the underwater vehicles with the manipulator operates [21, 22].

However, their use is associated with high financial costs, since the rent of such CV is quite high [22]. In addition, currently, there are virtually no expeditionary vessels with dynamic positioning in Ukraine.

When applying ROV at shallow depths (up to 100 meters), marine diving vessels are usually used for anchoring them [23]. However, practice shows that the vessel at the same time performs significant movements on the water surface under the influence of wind, current and waves. This gives rise to perturbations, which are transmitted through the TC to the ROV hull. In addition, to these forces, a change in the direction of the force vector of its stationary flow through the underwater current, which is generated by the change in the TC spatial position due to the displacement of CV, is added at the driving end of the TC. As a result, the range of application hydro-climatic conditions is significantly narrowed and USPEC effectiveness decreases.

За цих умов експлуатації ПА для його утримання біля ПО та застосування підводного маніпулятора необхідно регулювати довжину КТ таким чином, щоб збурення від переміщення заякореного судна, які передаються по КТ на підводний апарат, були мінімальними. У дисертації пропонується розв'язок цієї задачі виконувати шляхом керування довжини попущеної частини КТ. Це робить актуальною наукову задачу синтезу САК кабельною лебідкою ПСНО в умовах переміщень судна-носія.

Слід зазначити, що питання регулювання довжини тросів і кабель-тросів прив'язних підводних апаратів і систем постійно знаходяться у полі зору вітчизняних і зарубіжних науковців [24, 25].

У вказаних та інших роботах детально розроблені питання математичного опису процесів, що протікають у морських прив'язних системах, та досліджуються технічні засоби зменшення впливу хитавиці на підводні апарати.

У якості головних технічних рішень у цих роботах розглядаються застосування механічних амортизаторів КЛ, яка розташована на СН [25], та включення до складу обладнання ПА додаткової амортизуючої лебідки з розробкою системи керування нею [26]. Такі рішення ускладнюють конструкцію суднової КЛ та ПА, збільшують їхні масогабаритні розміри. При цьому нейтралізація силового впливу переміщень СН на ПА у цих роботах не розглядається.

Запропоновано концептуально інший підхід до розв'язання задачі

Under the circumstances of ROV operation, for its content in the UO and the use of the underwater manipulator must adjust the length of the TC so that disturbances from the anchored vessel movement, transmitted by TC to the underwater vehicle, were minimal. The solution of this problem is proposed by controlling the length of the raised part of the TC. This makes the actual scientific problem of the ACS synthesis by the USPEC cable winch in the carrier vessel displacement.

It should be noted that the issue of regulating the cable lengths, remotely operated vehicle vehicles tether cable and systems is constantly of interest to domestic and foreign scientists [24, 25].

In the specified and other works, the questions of the mathematical description of the processes occurring in the marine tethered systems are developed in detail, and technical means of reducing the roll effects on underwater vehicles are being researched.

As the main technical solutions in these works, the use of mechanical CW shock absorbers, which are located on the CV [25], and the inclusion of ROV equipment additional amortized winch with the development of its control system [26] are considered. Such decisions complicate the design of the vessel's CW and ROV, and increase their mass-size dimensions. In this case, the neutralization of the force effect of CV displacement on ROV in these works is not considered.

A conceptually different approach to solving the problem of improving the

удосконалення САК кабельною лебідкою ПСНО, який ґрунтується на комплексному оцінюванні процесу зміни взаємного розташування СН і ПА, на основі якого синтезується САК судновою КЛ для нейтралізації вказаних збурень.

Розглянемо основні режими роботи системи «СН – ПСНО» для випадку, коли судно не має динамічного позиціонування. У якості зовнішніх збурювань будемо розглядати тільки вітровий вплив на СН (розу вітрів акваторії  $\vec{V}$ ) та підводну течію  $\vec{V}_{пт}$ , яка діє на КТ і ПА. Робоча зона (РЗ) ПСНО, межі якої утворюються точками максимально можливої віддаленості ПА від СН, має вигляд еліпса, розміри осей якого залежать від глибини моря  $h$  та від тягових характеристик ЕРК ПА.

З досвіду авторів, система «СН – ПСНО» може функціонувати у трьох основних режимах (рис. 10):

- судно-носій стоїть на якорі (Я) над робочою зоною (РЗ) донної поверхні, де знаходиться ПО, і під дією вітру виконує повільні переміщення по траєкторії  $S_A$  у радіусі дії якорного ланцюга (ЯЛ), що викликає переміщення корінного кінця КТ ПСНО; підводний апарат при цьому, як і в наступних режимах, позиціонується біля ПО (рис. 10,*a*);

- судно-носій лежить у дрейфі та піддається впливу вітру, з-за чого повільно зміщується (зазвичай, лінійно, по траєкторії  $S_D$ ) над РЗ донної поверхні, де знаходиться ПО (рис. 10,*б*);

USPEC cable winch ACS, which is based on a comprehensive assessment of the process of changing the mutual location of CV and ROV, on the basis of which the of the vessel CW ACS is synthesized to neutralize the indicated perturbations is proposed

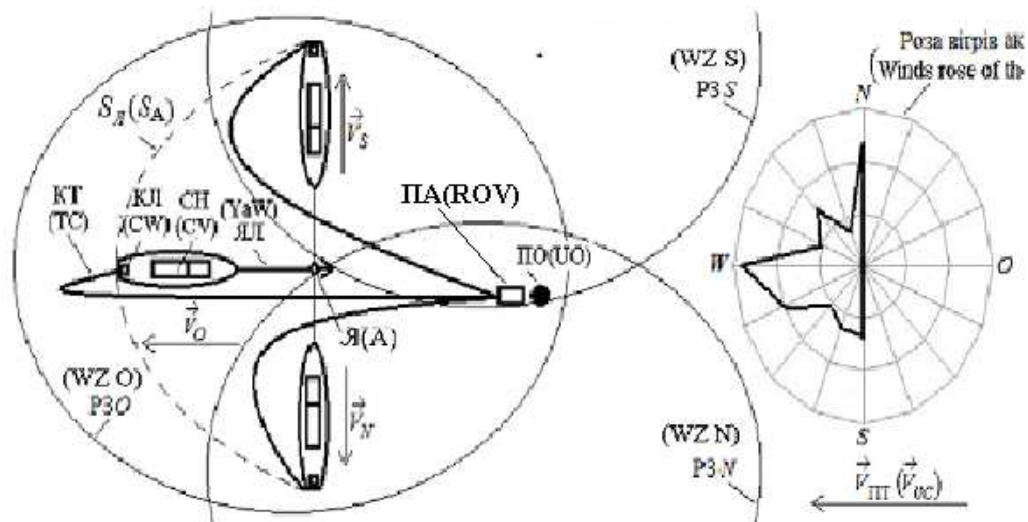
Consider the basic "CV – USPEC" system operating modes for the case when the vessel does not have a dynamic positioning. As external disturbances, we will consider only the wind effect on the CV (wind rose  $\vec{V}$ ) and the undercurrent  $\vec{V}_{uc}$  acting on the TC and ROV. The USPEC working zone (WZ), whose boundaries are formed by points of the maximum possible distance of ROV from the CV, has the form of an ellipse, the dimensions of the axes of which depend on the sea depth  $h$  and from traction characteristics of ROV EMC.

From the author's experience, the "CV – USPEC" system can operate in three main modes (Figure 10):

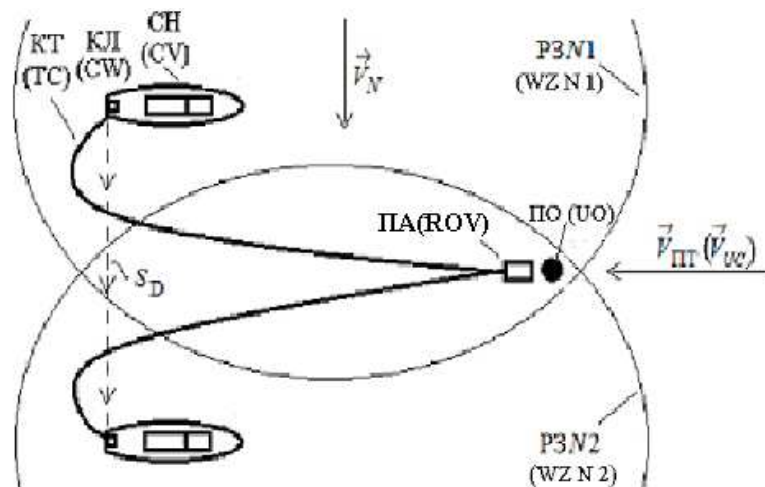
- the carrier vessel is at anchor (A) above the bottom surface, working zone (WZ) where the UO is located, and under the influence of the wind performs slow movements along the trajectory of the  $S_A$  within the radius of the anchor chain (AC) causing the displacement of the root end of the USPEC TC; the underwater vehicle in this case, as in the following modes, is positioned near UO (fig. 10, *a*);

- the vessel-carrier is drifting and exposed to the wind, causing it to shift slowly (usually, linearly, along the  $S_D$  trajectory) over the WZ of the bottom surface where the UO is located (Fig. 10, *b*);

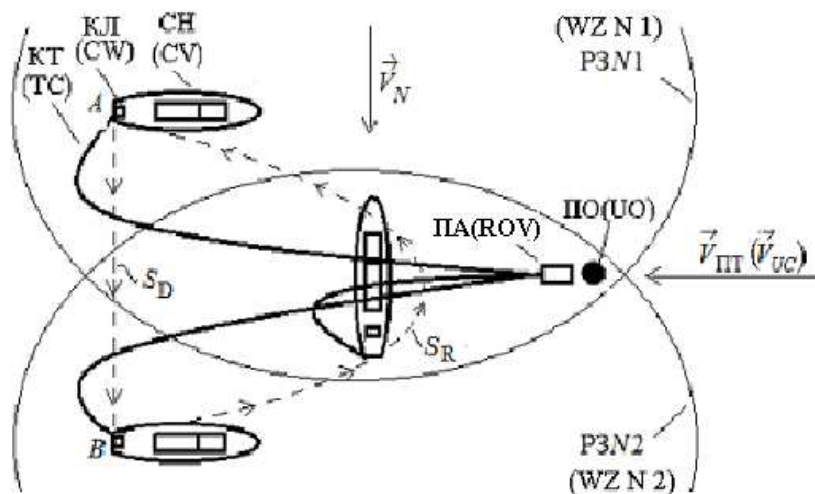




a



б (b)



в (c)

Рисунок 10 – Основні режими роботи системи «СН – ПСНО»:  
 P3S, P3O, P3N – робочі зони ПСНО при дії вітрів, відповідно, з півдня, сходу і півночі; P3N1, P3N2 – робочі зони початкової і кінцевої точок дрейфу СН.

Figure 10 – Basic operating modes of "CV – USPEC" system: WZS, WZO, WZN – USPEC working zones under the influence of winds, respectively, from the south, east and north; WZN1, WZN2 – working zones of the CV initial and final drift points

- судно-носії має дві фази руху – фазу дрейфу від вихідної точки  $A$  у напрямку ПО до кінцевої точки дрейфу  $B$ , обмеженої максимальною довжиною КТ на барабані КЛ, та фазу повернення СН у вихідну точку початку дрейфу по траєкторії  $S_R$  (рис. 10, *б*); при цьому ПА постійно позиціонується біля ПО.

Перший і третій режими, зазвичай, є тривалими у часі і характеризуються великими обсягами підводно-технічних робіт. Тому поточна позиція СН відносно ПО буде залежати від рози вітрів акваторії.

Другий режим є короточасним і виконується одноразово, коли напрямок вітрового збурення можна вважати незмінним. Однак, у зв'язку з цим вимоги до точності його виконання особливо високі.

Очевидно, що описані переміщення СН у горизонтальній площині будуть викликати суттєві зміни зусиль як на корінному (закріпленому на СН), так і на ходовому (закріпленому на ПА) кінцях КТ.

Крім того, до корпусу ПА через КТ будуть прикладатись силові збурення, породжені хитавицею СН.

Задачу синтезу САК КЛ для таких умов експлуатації ПСНО доцільно розв'язувати у двох наступних постановках:

мінімізація статичної складової  $\vec{F}_{КТs}$  сили  $\vec{F}_{КТ}$  на ходовому кінці КТ, обумовленої його гідродинамічним обтіканням, для всього діапазону можливих переміщень СН під дією

- the vessel-carrier has two phases of motion: the drift phase from the starting point  $A$  in the direction of the UO to the end point of drift  $B$ , limited by the TC maximum length on the CR drum, and the CV's return phase to the starting point of the start of drift along the  $S_R$  trajectory (Fig. 10, in *с*); while ROV is constantly positioned at the UO.

The first and third modes are usually long lasting, characterized by large volumes of underwater technical work. Therefore, the current CV position relative to the UO will depend on the wind rose.

The second mode is short-term and executed once, when the direction of wind disturbance can be considered unchanged. However, in this regard, the requirements for the accuracy of its implementation are particularly high.

It is obvious that the described CV displacements in the horizontal plane will cause significant changes in the efforts both at the root (fixed on the CV) and on the running at the ends of the TC (fixed on the ROV).

In addition, through the TC, the power disturbances, generated by the CV hub will be applied to the ROV hull

The task of CW ACS synthesis for such USPEC operating conditions is expedient to be solved in the following two arrangements:

minimization of the static component  $\vec{F}_{TCs}$  of force  $\vec{F}_{TC}$  at the running end of the TC, due to its hydrodynamic flow around the range of possible displacements of the CV under

рози вітрів  $\vec{V}$ , шляхом встановлення за допомогою КЛ оптимальної довжини  $L_{KT_{opt}}$  попущеної частини КТ для кожної точки траєкторій  $S_A$ ,  $S_D$  та  $S_R$  (стаціонарна постановка задачі обтікання КТ потоком води);

мінімізація динамічної складової  $\vec{F}_{KTd}$  сили на ходовому кінці КТ  $\vec{F}_{KT}$ , яка обумовлена вібрацією КТ у потоці води (сила  $\vec{F}_{KTv}$  [27]) та переміщенням корінного кінця КТ у вертикальній площині з-за хитавиці СН (сила  $\vec{F}_{KTw}$ ).

При цьому, мають місце наступні залежності:

$$\vec{F}_{KT} = \vec{F}_{KTs} + \vec{F}_{KTd}; \quad (10)$$

$$\vec{F}_{KTs} = f(\vec{V}_{ПТ}; d_{КТ}; \vec{L}_{KT_{opt}}; C_{КТ}); \quad (11)$$

$$\vec{F}_{KTd} = \vec{F}_{KTv} + \vec{F}_{KTw}, \quad (12)$$

де  $d_{КТ}$  – діаметр КТ;  $\vec{L}_{KT_{opt}}$  – просторова форма КТ нульової плавучості, керована довжина попущеної частини якого  $L_{KT_{opt}}$  у потоці води залежить від взаємного розташування СН і ПА та забезпечує мінімально можливе значення сили гідродинамічного опору КТ  $\vec{F}_{KT}$ ;  $C_{КТ}\{C_{КТn}; C_{КТt}; C_{КТb}\}$  – множина коефіцієнтів гідродинамічного опору КТ – відповідно, нормальній  $n$ , дотичній  $t$  та боковій  $b$  складових гідродинамічних сил.

У роботі розглядається питання синтезу САК кабельною лебідкою у першій постановці, виходячи з відомого твердження [28], що для кожної пари точок  $\{\varphi; \lambda; h\}_{СН}$  і  $\{\varphi; \lambda; h\}_{ПА}$ , які визначають географічні координати

the influence of the wind rose  $\vec{V}$ , by establishing the optimum length  $L_{TC_{opt}}$  using the CW for the allowed parts of TC, for each point of the trajectories  $S_A$ ,  $S_D$  and  $S_R$  (stationary problem statement of TC flow by the water flow);

minimization of the dynamic component  $\vec{F}_{TCd}$  of the force at the running end of the TC  $\vec{F}_{TC}$ , which is caused by the TC vibration in the water flow (force  $\vec{F}_{TCv}$  [27]) and the displacement of the root end of the TC in the vertical plane due to the CV shift (force  $\vec{F}_{TCw}$ ).

In this case, the following dependencies occur:

$$\vec{F}_{TC} = \vec{F}_{TCs} + \vec{F}_{TCd}; \quad (10)$$

$$\vec{F}_{TCs} = f(\vec{V}_{UC}; d_{TC}; \vec{L}_{TC_{opt}}; C_{TC}); \quad (11)$$

$$\vec{F}_{TCd} = \vec{F}_{TCv} + \vec{F}_{TCw}, \quad (12)$$

where  $d_{TC}$  – TC diameter;  $\vec{L}_{TC_{opt}}$  – TC spatial form of zero buoyancy, the controlled length of the released part  $L_{TC_{opt}}$  of which in the flow of water depends on the relative position of CV and ROV and provides the TC minimum possible value hydrodynamic resistance force  $\vec{F}_{TC}$ ;  $C_{TC}\{C_{TCn}; C_{TCt}; C_{TCb}\}$  is the set of TC hydrodynamic resistance coefficients – normal  $n$ , tangential  $t$  and lateral  $b$  of the hydrodynamic forces components respectively.

The work deals with the question of ACS synthesis for the cable winch in the first setting, based on the well-known assertion [28] that for each pair of points  $\{\varphi; \lambda; h\}_{CV}$  and  $\{\varphi; \lambda; h\}_{ROV}$ , which determine the geographical coordinates of

взаємного розташування СН і ПА при стаціонарному обтіканні потоком води, існує одна-єдина довжина  $L_{KT_{opt}}$  КТ нульової плавучості, при якій сили гідродинамічного опору КТ мінімальні.

Задача САК полягає в обчисленні значення  $L_{KT_{opt}}$  для кожного поточного положення ПСНО у просторі та генерації керуючого впливу на виконавчий привод КЛ для фактичного встановлення обчисленого значення  $L_{KT_{opt}}$ .

Поставлена задача є подальшим розвитком викладеного в [28] режиму мінімізації гідродинамічного опору КТ з метою його інсталяції до задачі мінімізації статичної складової  $\vec{F}_{KTs}$  для всього діапазону можливих переміщень СН під дією рози вітрів  $\vec{V}$ .

Блок-схема узагальненого алгоритму роботи запропонованої САК для першого режиму функціонування ПСНО наведена на рис. 11.

Дамо опис блоків алгоритму у порядку їх функціонування:

Б1 – блок уведення інформації про ПО (географічні координати  $\{\varphi; \lambda; h\}_{PO}$ ), інформації про поточні й прогнозовані значення вітрових збурень, які діятимуть на корпус СН під час виконання підводних робіт (характеристики рози вітрів  $\vec{V}$ ) та інформації про епюру підводної течії  $\vec{V}_{пт}$ , яка діятиме на КТ і ПА;

Б2 – блок розрахунку географічних координат  $\{\varphi; \lambda; h\}_A$  точки робочої зони ПСНО, де необхідно покласти якір, щоб у результаті СН під час вітрових переміщень залишалось у робочій зоні ПСНО;

the mutual arrangement of VC and ROV in the stationary water flow, there is a TC single-length  $L_{TC_{opt}}$  of zero buoyancy, in which the TC hydrodynamic resistance forces are minimal.

The task of the ACS is to calculate the value  $L_{TC_{opt}}$  for each current position of the USPEC in space and generate a control influence on the CW actuator for the actual calculation of the calculated value  $L_{TC_{opt}}$ .

The assigned task is a further development of the CV hydrodynamic resistance minimization mode described in [28] with the aim of installing it to the task of minimizing the static component  $\vec{F}_{TCs}$  or the entire range of possible CV displacements under the action of the wind rose  $\vec{V}$ .

The block diagram of the generalized algorithm of the work of the proposed ACS for the first USPEC operation mode is shown in fig. 11.

Let's describe the blocks of the algorithm in the order of their operations:

B1 is an UO information input block (geographic coordinates  $\{\varphi; \lambda; h\}_{UO}$ ), information on current and projected values of wind disturbances that will act on the CV hull during the performance of underwater operations (characteristics of wind rose  $\vec{V}$ ) and information on the plot along the underwater current  $\vec{V}_{UC}$ , which will act on TC and ROV;

B2 – unit of geographical coordinates calculation  $\{\varphi; \lambda; h\}_A$  of the USPEC working zone point where it is necessary to put an anchor, so that as a result, the CV, during locomotion, would remain in the USPEC working zone;

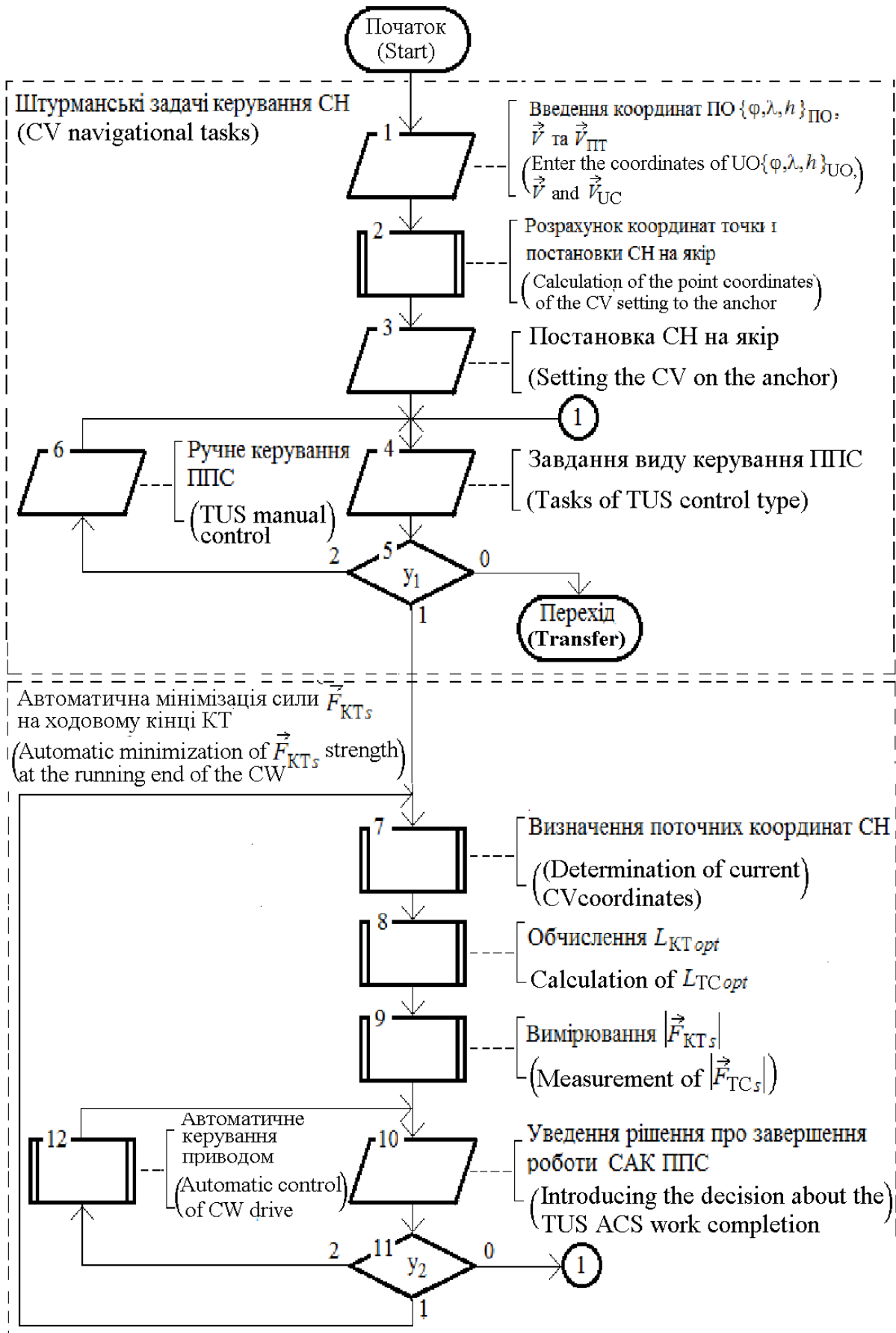


Рисунок 11 – Узагальнений алгоритм роботи системи керування ПСНО у режимі якірної стоянки

Figure 11 – A generalized USPEC control system operation algorithm in the anchorage mode

Б3 – блок виводу СН у точку постановки на якір та виконання, власне, постановки на якір;

Б4 – завдання керівником підводно-технічної роботи виду керування ПСНО (вручну чи автоматично у режимі мінімізації статичної складової  $\vec{F}_{КТs}$ ;

Б5 – умовний перехід (перевірка заданого виду керування прив'язною підводною системою), який приймає наступні значення:

$y_1 = 0$  при завершенні підводно-технічної роботи;

$y_1 = 1$  при переведенні САК у автоматичний режим мінімізації статичної складової  $\vec{F}_{КТs}$  сили на ходовому кінці КТ  $\vec{F}_{КТ}$  для постійно змінюваного під дією вітру поточного положення СН відносно ПО;

$y_1 = 2$  при реалізації ручного керування ПСНО;

Б6 – блок ручного керування прив'язною підводною системою з метою виведення підводного апарата до ПО й утримання його у цій позиції до завдання іншого виду керування ПСНО (блок Б4);

Б7 – блок визначення поточних координат СН  $\{\varphi; \lambda; h\}_{СН}$  за допомогою власної бортової (зазвичай, супутникової) системи навігації;

Б8 – блок обчислення оптимальної довжини попущеної частини КТ  $L_{КТopt}$ , яка забезпечує мінімально можливе значення сили гідродинамічного опору КТ  $\vec{F}_{КТs}$  для поточної пари точок просторового розташування СН і ПО:  $\{\varphi; \lambda; h\}_{СН}$  – на поверхні моря;  $\{\varphi; \lambda; h\}_{ПО}$  –

Б3 – CV output block to the anchoring setting point and to perform the anchoring properly;

Б4 – the task manager of the underwater technical works like USPEC control (manually or automatically in the minimization mode of the static component  $\vec{F}_{TCs}$ ;

Б5 – a conditional transition (checking a given type of tethered underwater control system) which adopts the following values:

$y_1 = 0$  at the end of underwater technical operations;

$y_1 = 1$  when the ACS is transferred into an automatic minimization mode of the static force component at the running end of the TC for continuously changing under the action of the current CV position with respect to UO;

$y_1 = 2$  when implementing USPEC manual control;

Б6 – manual control block of the tethered underwater system in order to bringing the underwater vehicle to the UO and holding it in this position to the task of another type of USPEC control (block B4);

Б7 – block defining CV current coordinates  $\{\varphi; \lambda; h\}_{VC}$  using own on-board (usually, satellite) navigation system;

Б8 – a block for calculating the optimal length of a part of the TC  $L_{TCopt}$ , which provides the minimum possible value of the TC hydrodynamic resistance force  $\vec{F}_{TCs}$  for the current pair of points of CV spatial location and UO  $\{\varphi; \lambda; h\}_{VC}$  – on the surface of

на морському дні;

Б9 – блок вимірювання модуля статичної складової  $\vec{F}_{KTs}$  сили на ходовому кінці КТ  $\vec{F}_{KT}$ ; будується на основі методів динамометрії з усередненням отриманих значень сили  $\vec{F}_{KT}$ ;

Б10 – уведення рішення про завершення роботи САК автоматичної мінімізації статичної складової  $\vec{F}_{KTs}$ ; таке рішення приймається у випадку завершення роботи ПСНО або при неможливості її продовження (наприклад, коли  $L_{KTopt} > L_{KT}$ , де  $L_{KT}$  – повна довжина КТ на барабані КЛ);

Б11 – умовний перехід, який приймає наступні значення:

$y_2 = 0$  при завершення роботи САК автоматичної мінімізації статичної складової  $\vec{F}_{KTs}$ ;

$y_2 = 1$  при виконанні умови  $(L_{KTopt} - e) \leq L_{KTi} \leq (L_{KTopt} + e)$ , де  $e$  – відносна похибка встановлення довжини КТ (задається оператором);  $L_{KTi}$  – поточне значення попущеної довжини КТ; у цьому випадку зміна довжини  $L_{KTi}$  не виконується, а підводний апарат працює в умовах мінімально можливої сили  $\vec{F}_{KTs}$  від КТ;

$y_2=2$  при невиконанні умови  $(L_{KTopt} - e) \leq L_{KTi} \leq (L_{KTopt} + e)$ , коли необхідно змінювати довжину попущеної частини КТ за допомогою привода КЛ до знайденого значення  $L_{KTopt}$ ;

Б12 – блок автоматичного керування приводом КЛ для

the sea;  $\{\varphi; \lambda; h\}_{UO}$  – on the seabed;

B9 – unit of measurement of the module of the static component  $\vec{F}_{TCs}$  of the force at the running end of TC  $\vec{F}_{TC}$ ; based on the methods of dynamometry with averaging the obtained values of force  $\vec{F}_{TC}$ ;

B10 – introduction to ACS work completion of the static component automatic minimization  $\vec{F}_{TCs}$ ; such decision is made in the event of USPEC completion or when it is impossible of its continuation (for example, when  $L_{TCopt} > L_{TC}$ , where  $L_{TC}$  is the TC total length on the CW drum);

B11 – conditional transition, which accepts the following values:

$y_2 = 0$  at the end of ACS work completion of the automatic minimization of the static component  $\vec{F}_{TCs}$ ;

$y_2 = 1$  when meeting the condition where  $(L_{TCopt} - e) \leq L_{TCi} \leq (L_{TCopt} + e)$  where  $e$  is the relative error of establishing the TC length (given by the operator);  $L_{TCi}$  is the current value of the released TC length; in this case, the change in length  $L_{TCi}$  is not performed, and the underwater vehicle operates under conditions of minimum possible force  $\vec{F}_{TCs}$  from the TC;

$y_2 = 2$  if the condition is not fulfilled  $(L_{TCopt} - e) \leq L_{TCi} \leq (L_{TCopt} + e)$  when it is necessary to change the length of the released part of the TC using the CW drive to the found value  $L_{TCopt}$ ;

B12 – CW drive automatic

виконання умови  $y_2=2$ .

Зауважимо, що блоки Б2...Б6 відносяться до штурманських задач керування судном і в роботі не розглядаються.

Реалізацію описаного алгоритму у частині автоматичної мінімізації сили пропонується виконувати у вигляді САК судновою кабельною лебідкою ПСНО, у якій для обчислення  $L_{KTopt}$  використовується спеціалізоване програмне забезпечення "QUASTEC" [28].

Структурна схема САК наведена на рис. 12.

control block to fulfill condition  $y_2 = 2$ .

Note that blocks Б2 ... Б6 are related to navigational tasks of the vessel's control and are not considered in the work.

The implementation of the described algorithm in part of automatic minimization of force  $\vec{F}_{TCs}$  is proposed to be performed as ACS for the USPEC shipboard cable winch, in which to calculate  $L_{TCopt}$  using the specialized "QUASTEC" software [28].

The block diagram of the ACS is shown in Fig. 12.

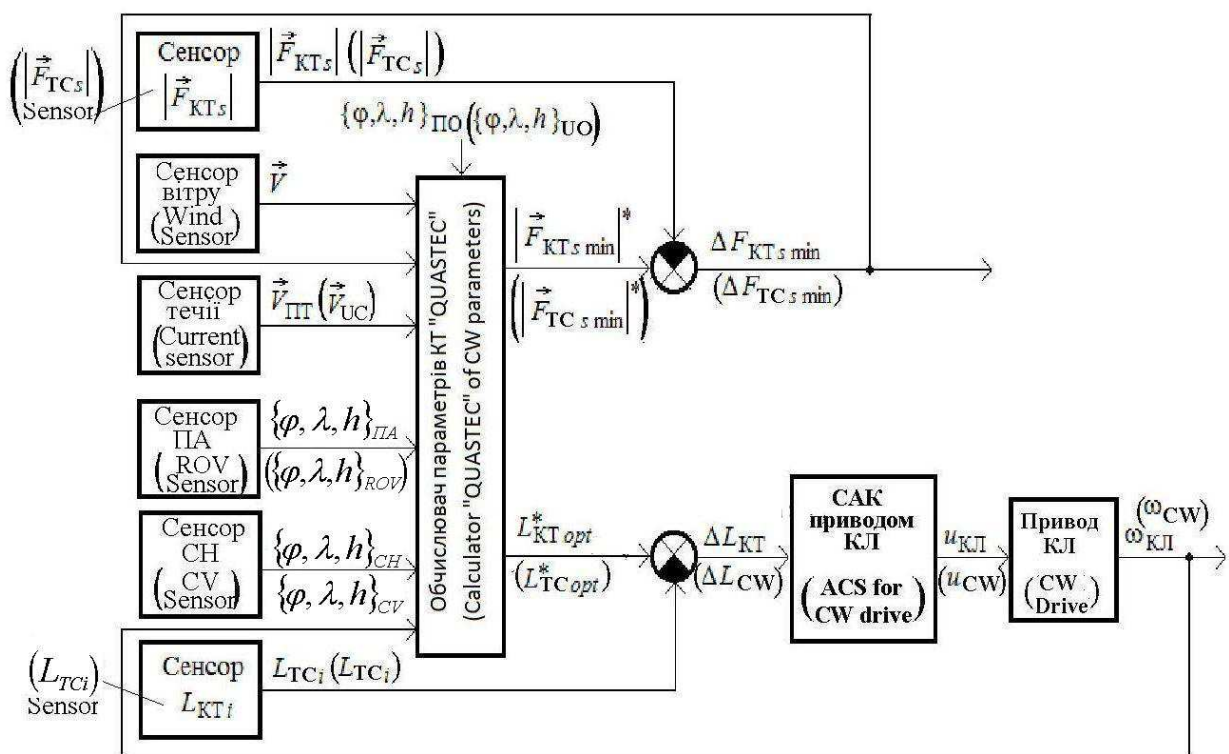


Рисунок 12 – Структура САК мінімізації сили  $\vec{F}_{KTs}$  на ходовому кінці КТ

Figure 12 – The structure of force minimization ACS  $\vec{F}_{TCs}$  at the running end of the CT

На рис. 12 позначено:  $|\vec{F}_{KTs\ min}|^*$  – обчислений програмою "QUASTEC" модуль статичної складової  $\vec{F}_{KTs}$ ,

Indicated in fig. 12:  $|\vec{F}_{TCs\ min}|^*$  – static component module  $\vec{F}_{TCs}$  calculated by the "QUASTEC" program, the



мінімально можливий для поточного взаємного розташування СН і ПА;  $L_{KT\text{opt}}^*$  – обчислена програмою “QUASTEC” оптимальна довжина попущеної частини КТ, яка забезпечує мінімально можливе значення статичної складової  $\vec{F}_{KTs}$  для поточного взаємного розташування СН і ПА;  $u_{KL}$ ,  $\omega_{KL}$  – відповідно, сигнал керування і кутова частота обертання барабану КЛ.

Як видно з рис. 12, запропонована САК має два контури зворотного зв'язку: контур коригування параметрів моделі КТ в обчислювачі “QUASTEC” та контур керування приводом КЛ, який, власне, і забезпечує оптимальну довжину попущеної частини КТ.

Перший контур на основі обчислення похибки  $\Delta F_{KTs\text{min}}$  між фактично вимірним модулем сили  $|\vec{F}_{KTs\text{min}}|$  та обчисленим його значенням коригує коефіцієнти  $C_{KTn}$ ,  $C_{KTb}$ ,  $C_{KTb}$  гідродинамічного опору КТ таким чином, щоб похибка була мінімальною. Це забезпечує адаптацію обчислювача “QUASTEC” до реальних умов обтікання кабель-тросу та підвищує достовірність виконуваних ним обчислень.

Другий контур у залежності від знаку похибки між фактичною довжиною попущеної частини КТ та обчисленою за допомогою програми “QUASTEC” оптимальною довжиною попущеної частини КТ генерує сигнал керування приводом КЛ і, таким чином, забезпечує необхідну кутову швидкість обертання  $\omega_{KL}$  приводу лебідки. При

мінімумом можливого для поточного взаємного розташування СН і ПА;  $L_{TC\text{opt}}^*$  – обчислена програмою “QUASTEC” (software), оптимальна довжина КТ, яка забезпечує мінімум можливого значення статичної складової  $\vec{F}_{TCs}$  для поточного взаємного розташування СН і ПА;  $u_{CW}$ ,  $\omega_{CW}$  – відповідно, сигнал керування і кутова частота обертання барабану КЛ.

As can be seen in Fig. 12, the proposed ACS has two feedback loops: TC model parameters adjusting loop in the QUASTEC calculator and the control circuit of the CW drive, which, in fact, also provides the optimum length of the TC released part.

The first loop, based on the calculation of the error  $\Delta F_{TCs\text{min}}$  between the actually measured modulus of force  $|\vec{F}_{TCs\text{min}}|$  and its calculated value  $|\vec{F}_{TCs\text{min}}|^*$ , corrects the TC hydrodynamic resistance coefficients  $C_{TCn}$ ,  $C_{TCb}$ ,  $C_{TCb}$  in such a way that the error was minimal. This ensures the QUASTEC calculator adaptation to the actual conditions of streamlining the tether-cable and increases the reliability of its calculations.

The second loop, depending on the error sign  $\Delta L_{TC}$  between the actual length of the TC released part and calculated with the “QUASTEC” program, TC raised part optimum length generates a CW drive control signal and, thus, provides the necessary winch drive (actuator) rotational angular speed  $\omega_{TC}$ . In this case, the actual value of the TC released part

цьому фактичне значення поточної довжини попущеної частини КТ вимірюється відповідним сенсором  $L_{КТi}$  (рис. 3) або обчислюється за залежністю  $L_{КТi} = R \int \omega_{КЛ} dt$ , де  $R$  – діаметр барабану КЛ, а напрямок обертання привода КЛ визначається наступними умовами:

$$\omega_{КЛ} = \begin{cases} +\omega_H, \text{ при } L_{КТi} < (L_{КТopt} - e); \\ -\omega_H, \text{ при } L_{КТi} > (L_{КТopt} + e); \\ 0, \text{ при } L_{КТi} = (L_{КТopt} \pm e), \end{cases} \quad (13)$$

де  $\omega_H$  – номінальне значення кутової частоти обертання барабана КЛ.

Таким чином, запропонована структура САК забезпечує мінімальні значення сили  $\vec{F}_{КТs}$  на ходовому кінці КТ при повільному переміщенні СН під дією рози вітрів  $\vec{V}$  на акваторії тривалої якірної стоянки, що забезпечує стійку позицію ПА біля ПО та ефективне застосування підводного маніпулятора.

Два інші основні режими функціонування ПСНО (дрейф і двофазовий рух СН) використовують розглянутий перший основний режим як складову автоматичного забезпечення оптимальної довжини попущеної частини КТ  $L_{КТopt}$ .

Відмінною рисою цих режимів ПСНО є задача одноразового (другий основний режим) та циклічно повторюваного (третій основний режим) попускання КТ на повну довжину КТ  $L_{КТ}$  на барабані КЛ для забезпечення максимального часу стійкої роботи ПА біля ПО.

current length is measured by the corresponding sensor  $L_{TCi}$  (Fig. 3) or calculated by the dependence  $L_{TCi} = R \int \omega_{CW} dt$ , where  $R$  is the CW drum diameter, and the rotation direction of the CW drive is determined by the following conditions:

$$\omega_{CW} = \begin{cases} +\omega_N, \text{ when } L_{TCi} < (L_{TCopt} - e); \\ -\omega_N, \text{ when } L_{TCi} > (L_{TCopt} + e); \\ 0, \text{ when } L_{TCi} = (L_{TCopt} \pm e), \end{cases} \quad (13)$$

where  $\omega_N$  is the nominal value of the CW drum rotational angular frequency.

Thus, the proposed ACS structure provides the minimum values of force  $\vec{F}_{TCs}$  in the TC running end at a CV slow displacement under the influence of the wind rose  $\vec{V}$  in the area of long anchorage, which provides a stable position of the ROV near the UO and effective use of the underwater manipulator.

Two other USPEC basic operation modes (CV drift and two-phase motion) use the considered first basic mode as the automatic optimal length provision component of the TC released part  $L_{TCopt}$ .

A distinctive feature of these USPEC modes is the one-time task (second basic mode) and cyclically repeating (third basic mode) released TC on the TC full length  $L_{TC}$  on the CW drum to provide maximum ROV steady operation time near the UO.

## 6 ОЦІНКА РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПСНО

### 6. ESTIMATION OF THE USPEC AUTOMATION LEVEL

Наукова проблема автоматизації засобів підводної техніки сформульована у вітчизняній та зарубіжній науково-технічній літературі у 80-х роках минулого сторіччя [29]. Її актуальність, в першу чергу, визначалась воєнними застосуваннями (наукові програми Міноборони США «DARPA» та Міноборони СРСР). Суттєве розширення підводних робіт по вивченню й освоєнню мінеральних, енергетичних і харчових продуктів на шельфі морів і океанів, яке спостерігається на протязі останніх 10-15 років, стимулювало розвиток цивільної підводної робототехніки у провідних морських державах світу – США, Великобританії, Франції, Німеччині, Швеції, Канаді, Австралії). Проте, зарубіжні публікації на цю тему мають рекламно-комерційний характер і не містять описів наукових і технічних рішень.

Досвід Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова по створенню засобів океанотехніки для України та зарубіжних країн свідчить, що рівень автоматизації керування ПСНО відіграє важливу роль в оцінках ринкової цінності підводної техніки комерційного призначення та у можливості і доцільності її застосування в оборонних задачах [6, 30, 31]. Досконала система керування просторовим рухом ПА з ПМ забезпечує ефективність його використання – продуктивність та

The automation scientific problem of underwater technology tools is formulated in the domestic and foreign scientific and technical literature in the 1980s [29]. Its relevance, first of all, was determined by the military applications (US Defense Programs DARPA and the USSR Ministry of Defense). Significant expansion of underwater operations on the study and development of mineral, energy and food products on the shelf of the seas and oceans, which has been observed over the last 10-15 years, has stimulated the development of civilian underwater robotics in the leading maritime powers of the world – the United States, Great Britain, France, Germany, Sweden, Canada, Australia). However, foreign publications on this subject are of an advertising-commercial nature and do not contain the descriptions of scientific and technical decisions.

The experience of the Admiral Makarov National Shipbuilding University on the creation of ocean equipment for Ukraine and foreign countries shows that the level of USPEC control automation plays an important role in assessing the market value of underwater technology for commercial use and the possibility and expediency of its application in defense tasks [6, 30, 31]. The perfect ROV spatial motion control system with UM ensures the efficiency of its use – productivity and accuracy of underwater operations and,

точність виконання підводних операцій і, в цілому, ринкові переваги як виробу морської техніки. Це робить актуальною наукову задачу створення методики рівня автоматизації ПСНО як наукового підґрунтя для створення таких апаратів на українських підприємствах та оцінки їх конкурентоздатності на світовому ринку морської техніки.

Автоматизація керування ПСНО на цей час виконується шляхом синтезу окремих регуляторів для стабілізації руху ПА по курсу, по глибині та по висоті ходу над ґрунтом [32, 33]. При цьому, принципи побудови таких регуляторів та досягнуті показники якості керування у доступній науково-технічній та рекламній літературі не наводяться.

Тому розглянемо основні напрямки автоматизації керування ПСНО та базові відношення для кількісної оцінки рівня їх автоматизації.

У роботі ставиться завдання комплексної автоматизації ПСНО, що дасть змогу максимально повно вивільнити людину-оператора від виконання типових рутинних операцій, а також від складних та трудомістких операцій по керуванню системою в умовах невизначеностей зовнішніх збурень та нестационарності власних параметрів ПСНО.

Така постановка є особливо актуальною при використанні підводних робіт з жорсткими обмеженнями у часі.

Крім того, при оцінках рівня автоматизації ПСНО актуальними є наступні нові задачі автоматизації

in general, market advantages as a marine technology product. This makes the actual scientific task of creating a methodology for the USPEC automation level as the scientific basis for the creation of such vehicles in Ukrainian enterprises and evaluations of their competitiveness in the world market of marine equipments.

The USPEC control automation at this time is carried out by the synthesis of separate controllers to stabilize the ROV motion on course, in depth and in height above the ground [32, 33]. At the same time, the principles of constructing such controllers and achieved indicators of control quality in available scientific, technical and advertising literature are not given.

Therefore, we consider the main directions of USPEC control automation and basic relationships to quantify their level of automation.

USPEC complex automation task is set in the operation, which will make it possible to fully free the human operator from performing typical routine operations, as well as from complex and labor-intensive operations to control the system in the conditions of uncertainty of external perturbations and unsteadiness of its own USPEC parameters.

Such an approach is particularly relevant when using underwater operations with severe time constraints.

In addition, when evaluating the level of USPEC automation, the following new automation control tasks are relevant, the solution of which should

керування, розв'язок яких має суттєво скоротити час застосування ПСНО у цілому та підвищити якість його вихідної продукції:

автоматизація діагностування працездатності обладнання ПСНО перед виконанням місії та автоматична ідентифікація аварійних режимів під час виконання місії;

автоматизація керування комплексом обладнання ПСНО для забезпечення ефективної роботи пошукового фотовідеокомплексу ПА в умовах дії зовнішніх збурень;

автоматизація керування комплексом обладнання ПСНО для забезпечення ефективної роботи підводного маніпулятора ПА в умовах дії зовнішніх збурень;

поточний контроль якості підводного фото- і відео документування, яке виконується фотовідеоапаратурою ПА;

автоматизація генерування звітної документації про результати виконання підводної місії.

Розглянемо питання автоматизації підводних робіт для технологій, наведених на рис. 1.

Опишемо базові режими роботи ПСНО  $R$  для сформульованих вище технологій з позицій керування, які достатньо відпрацьовані багаторічною практикою НУК при виконанні підводних робіт:

- перевірка працездатності ПСНО перед спуском ПА на воду  $R_T$ ;
- спуск ПА на воду та перевірка керуваності на поверхні моря  $R_H$ ;
- занурення ПА на задану

considerably reduce the USPEC application time as a whole and improve the quality of its output products:

USPEC equipment operability diagnostics automation prior to the mission implementation and automatic identification of emergency modes during the mission implementation;

USPEC control automation equipment complex for ensuring the efficient ROV photo and video complex search operation under the conditions of external disturbances;

USPEC control automation equipment complex for the effective operation of the ROV underwater manipulator under the conditions of external disturbances;

current quality control of underwater photo and video documentation, which is performed by ROV photo-video equipment;

generation automation of the reporting documentation on the underwater mission implementation results.

Let's consider the questions of automation of underwater operations for the technologies shown in Fig. 1.

We describe the basic USPEC operation modes  $R$  for the above-stated technologies from the control positions that are sufficiently worked out by many years of practice of NUS when performing underwater operations:

- check of the efficiency of USPEC before ROV launching into water  $R_T$ ;
- launching of ROV into water and checking of controllability on the sea surface  $R_H$ ;
- ROV immersion at a desired

глибину по заданій чи довільній траєкторії  $R_Z$ ;

– лінійний рух ПА зі стабілізацією параметрів руху (глибини, висоти над ґрунтом, швидкості, курсу, траєкторії)  $R_L$ ;

– просторовий рух ПА по заданій траєкторії  $R_W$ ;

– стабілізація ПА у просторі (режим позиціонування у точці)  $R_S$ ;

– робота зовнішнього начіпного обладнання ПА  $R_M$ ;

– робота бортового пошуково-вимірювального обладнання ПА  $R_B$ ;

– аварійний режим роботи ПСНО  $R_A$  (узагальнено);

– повернення ПА до берега чи до СН у точку підйому  $R_R$ ;

– підйом ПА на берег чи на борт СН  $R_O$ ;

– перевірка працездатності ПСНО після виконання місії (підводного завдання)  $R_C$ .

Таким чином, у загальному випадку маємо наступну множину режимів роботи ПСНО:

Виходячи з базових режимів роботи ПСНО, сформулюємо наступні головні напрямки автоматизації в задачах керування ПСНО:

– автоматизація діагностування технічного стану обладнання ПСНО перед місією, під час її виконання та після закінчення  $A_D$ ;

– автоматизація режимів руху ПА  $A_R$ ;

– автоматизація режимів роботи

depth along a desired or arbitrary trajectory  $R_Z$ ;

– ROV linear motion with stabilization of motion parameters (depth, height above ground, speed, course, trajectory)  $R_L$ ;

– ROV spatial motion in a given trajectory  $R_W$ ;

– ROV stabilization in space (point positioning mode)  $R_S$ ;

– ROV external attached equipment work  $R_M$ ;

– ROV on-board search and measurement equipment operation  $R_B$ ;

– USPAEC emergency operation mode of  $R_A$  (generalized);

– ROV return to the shore or to the VC at the lifting point  $R_R$ ;

– ROV rise on shore or onboard VC  $R_O$ ;

– USPEC performance check after the mission completion (underwater task)  $R_C$ .

Thus, generally, we have the following set of USPEC operation modes:

Based on the basic USPEC operating modes, we formulate the following main areas of automation in the USPEC control:

– automation of the diagnostics of the technical condition of USPEC equipment before the mission, during its execution and upon completion  $A_D$ ;

– automation of ROV motion modes  $A_R$ ;

– automation of operating modes of

$$R = \{R_T; R_H; R_Z; R_L; R_W; R_S; R_M; R_B; R_A; R_R; R_O; R_C\}. \quad (14)$$

зовнішнього начіпного обладнання ПА  $A_M$ ;

– автоматизація керування інформаційними потоками ПСНО  $A_I$ ;

– автоматизація керування ПСНО в аварійному режимі  $A_A$ .

Таким чином, можлива генеральна множина задач автоматизації ПСНО  $A_{ПСНО}$  складається з наступних чотирьох множин:

ROV external attached (mounted) equipment  $A_M$ ;

automation of USPEC information flow control  $A_I$ ;

- automation of USPEC control in emergency mode  $A_A$ .

Thus, a general set of automation tasks for USPEC  $A_{USPEC}$  consists of the following four sets:

$$A_{ПСНО} = A_{USPEC} = \{A_D; A_R; A_M; A_I; A_A\}. \quad (15)$$

У свою чергу, рівень автоматизації задач для кожної з наведених у (10) підмножин визначається повнотою охоплення режимів роботи і функцій складових ПСНО. Наприклад, автоматизація діагностування технічного стану обладнання ПСНО  $A_D$ , у загальному випадку, буде визначатись множиною

In turn, the task automation level for each of the subsets given in (10) is determined by the coverage completeness of the USPEC operation modes and components functions. For example, the automation of the USPEC equipment technical condition diagnosis  $A_D$ , in general, will be determined by the set

$$A_D = \{A_{DT}; A_{DH}; A_{DZ}; A_{DL}; A_{DW}; A_{DS}; A_{DM}; A_{DB}; A_{DA}; A_{DR}; A_{DO}; A_{DC}\}, \quad (16)$$

де індекси "Т", ... "С" відповідають використаним у (14).

Множина автоматизації режимів руху ПА  $A_R$  відображає ступінь автоматизації:

режиму  $R_Z$  занурення ПА і виходу на стартову точку місії;

режиму  $R_L$  лінійного руху ПА зі стабілізацією параметрів руху;

режиму  $R_W$  просторового руху ПА по заданій траєкторії;

режиму  $R_S$  стабілізації ПА у просторі;

режиму  $R_N$  повернення ПА у точку підйому на СН;

where the indices "T", ... "C" correspond to the ones used in (14).

The set of ROV motion automation modes  $A_R$  displays the degree of automation:

ROV dive mode  $R_Z$  and exit to the mission starting point;

ROV linear motion mode  $R_L$  with stabilization of motion parameters;

ROV spatial motion mode  $R_W$  on a given trajectory;

ROV stabilization mode  $R_S$  in space;

ROV return mode  $R_N$  to the VC recovery (lifting) point;

режиму  $R_Y$  «радника» оператора ПСНО при реалізації типових підводних технологій та у складних режимах роботи (у стиснених умовах підводної навігації тощо).

При використанні у складі ПСНО опускної підводної платформи («підводного гаража» для ПА) до вказаних режимів додаються:

- режим  $R_{G1}$  виходу з «підводного гаража» на початку місії;
- режим  $R_{G2}$  заходу у «підводний гараж» після завершення місії.

Таким чином, множина автоматизації режимів руху ПА  $A_R$  може бути представлена у вигляді відношення:

$$A_R = \{A_{RZ}; A_{RL}; A_{RW}; A_{RS}; A_{RN}; A_{RY}; A_{RG1}; A_{RG2}\}. \quad (17)$$

По аналогії, рівень автоматизації режимів роботи зовнішнього начіпного обладнання ПА може бути представлений множиною:

$$A_M = \{A_{RM}; A_{RU}\}, \quad (18)$$

де  $R_M$  – режим роботи ПА з маніпулятором  $M$  біля ЗО (очищення ЗО, захоплення, завантаження у лоток, вивантаження ЗО з лотка тощо);

$R_U$  – режим підводного транспортування (переносу) вантажів (ЗО, інструментів тощо).

Досвід автора у застосуванні ПСНО свідчить, що важливою складовою автоматизації такого виду морської техніки є автоматизація керування інформаційними потоками

USPEC "adviser" (operator) mode  $R_Y$ , in the typical underwater technologies implementation and in complex operating modes (under constraint conditions of underwater navigation, etc.).

When used in USPEC, the submerged underwater platform ("underwater garage" for ROV), the following modes are attached to the indicated modes:

- exit mode  $R_{G1}$  from the "underwater garage" at the beginning of the mission;
- entry mode  $R_{G2}$  to the "underwater garage" after the completion of the mission.

Thus, the set of automation of ROV motion modes  $A_R$  can be represented as a ratio:

By analogy, the automation level of ROV operation modes of external attached equipment can be represented by set:

where  $R_M$  – the ROV operation mode with the manipulator  $M$  near IO (clearing the IO, capturing, loading in the tray, unloading the IO from the tray, etc.);

$R_U$  – the mode of underwater transportation (transfer) of goods (IO, tools, etc.).

The author's experience in the use of USPEC suggests that an important automation component of this type of marine equipment is the automation of the USPEC information flow control  $A_I$ .



ПСНО  $A_I$ . До головних складових цього процесу належать:

автоматизація керування режимами пошуку  $A_{RL}$ , розпізнавання  $A_{RX}$  та ідентифікації (класифікації) ЗО  $A_{RK}$ ;

автоматизація прийняття рішення на ту чи іншу форму фотовідеодокументування  $A_{RF}$  під час виконання місії в залежності від режиму та умов роботи ПСНО;

автоматизація  $A_{RQ}$  контролю якості фотовідеодокументування підводних об'єктів (світло, колір, різкість, виокремлювальна здатність тощо);

автоматична генерація звіту про виконання місії  $A_{RP}$ .

Тоді рівень автоматизації керування інформаційними потоками в ПСНО буде визначатись відношенням:

$$A_I = \{A_{RK}; A_{RF}; A_{RQ}; A_{RP}\}. \quad (19)$$

Нарешті, важливою складовою автоматизації ПСНО є можливість виявлення аварійної ситуації (або загрози її виникнення у прогнозованому майбутньому)  $A_{AD}$  та забезпечення керованого виходу з цієї ситуації  $A_{AC}$  або припинення виконання місії  $A_{AE}$  з мінімальними збитками.

У цьому випадку рівень автоматизації керування визначиться відношенням:

$$A_A = \{A_{AD}; A_{AC}; A_{AE}\}. \quad (20)$$

Відношення (9) – (15) структурують постановку задачі автоматизації ПСНО у цілому та оцінку

The main components of this process include:

automation of search control mode  $A_{RL}$ , recognition  $A_{RX}$  and identification (classification) of IO  $A_{RK}$ ;

automation of decision-making on this or that form of photo-video documentation  $A_{RF}$  during the mission execution, depending on the USPEC mode and conditions;

Automation  $A_{RQ}$  of photo-video documentation quality control of underwater objects (light, color, sharpness, resolution, etc.);

automatic report generation about mission implementation  $A_{RP}$ .

Then information flow automation control level in USPEC will be determined by the relation:

Finally, an important USPEC automation component is the ability to identify an emergency situation (or the threat of its occurrence in the foreseeable future)  $A_{AD}$  and ensure a controlled exit from this situation  $A_{AC}$  or termination of the mission  $A_{AE}$  with minimal losses.

In this case, the level of control automation will be determined by the ratio:

The relations (9) – (15) structure the USPEC automation task setting in general, and their automation level

рівня їх автоматизації, яка необхідна для обґрунтованого призначення проектно-конструкторських рішень на ранніх етапах створення ПСНО.

Кількісні показники рівнів автоматизації можуть бути отримані відомими методами експертного оцінювання [33] або прямим обчисленням частки режимів ПСНО, які автоматизовані. Наприклад, для режиму  $R_L$  лінійного руху ПА зі стабілізацією параметрів руху можна сформулювати наступні варіанти стабілізованого руху:

рух з автоматичною стабілізацією по курсу ПА  $R_{L\phi}$ ;

рух з автоматичною стабілізацією ПА по висоті ходу над ґрунтом  $R_{Lz}$ ;

рух з автоматичною стабілізацією ПА по глибині занурення (відносно водної поверхні)  $R_{Lh}$ .

Тоді рівень автоматизації  $A_{RL}$  режиму  $R_L$  може приймати чотири значення  $A_{RL} = \{0; 0,25; 0,5; 0,75; 1\}$  у залежності від фактично реалізованих у даній ПСНО можливостей автоматичної стабілізації лінійного руху ПА.

Рівень автоматизації режимів руху ПА  $A_R$ , згідно відношенню (12), може бути обчислений як добуток:

$$A_R = A_{RZ} \cdot A_{RL} \cdot A_{RW} \cdot A_{RS} \cdot A_{RN} \cdot A_{RY} \cdot A_{RG1} \cdot A_{RG2},$$

у якому кожний множник має числове значення, яке отримано методом експертного оцінювання або прямим обчисленням частки робочих функцій, які автоматизовано.

У цілому, рівень автоматизації ПСНО як об'єкту морської техніки

estimation, which is necessary for a reasonable research and development solutions at the early stages of USPEC creation.

Quantitative indicators of automation levels can be obtained by well-known expert estimation methods [33] or direct calculation of USPEC proportion modes that are automated. For example, for the ROV linear motion mode  $R_L$  with the motion parameters stabilization, the following variants of stabilized motion can be formulated:

motion with automatic stabilization on the ROV course  $R_{L\phi}$ ;

motion with automatic stabilization of at height above the ground level  $R_{Lz}$ ;

motion with ROV automatic stabilization by diving depth (relative to water surface)  $R_{Lh}$ .

Then, the level of automation  $A_{RL}$  of mode  $R_L$  can take four values  $A_{RL} = \{0; 0,25; 0,5; 0,75; 1\}$ , depending on the actually implemented possibilities of automatic stabilization of ROV linear motion in this USPEC.

ROV motion modes automation level  $A_R$ , according to the relation (12) can be calculated as a product:

in which each factor has a numerical value obtained by expert estimation methods or by direct calculation of the USPEC operating functions portion that are automated.

In general, the automation level USPEC as an object of marine

може бути обчислено, згідно (10), як добуток:

technology can be calculated according to (10) as a product:

$$A_{ПСНО} = A_{USPEC} = A_D \cdot A_R \cdot A_M \cdot A_I \cdot A_A$$

Таким чином, відношення (14) – (20) дають змогу будувати систему кількісної оцінки рівня автоматизації ПСНО, що створює теоретичне підґрунтя для прийняття технічних рішень на етапі проектування таких систем та надає можливість їх об'єктивного порівняння між собою з метою визначення ринкових переваг.

Thus, the relations (14) – (20) allow to build a system of quantitative analysis of the USPEC automation level, which creates theoretical foundations for making technical decisions at the design stage of such systems and provides an opportunity for their objective comparison with each other to determine market benefits.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

### REFERENCES

1. Пойзнер М., Пушкин Г. Оценка технического состояния и паспортизация гидротехнических сооружений портов и СПЗ Украины. // «Порты Украины». – 2004. – № 5. – С. 17-21.
2. Catsambis, A., Ford, B., Hamilton D. L. The Oxford Handbook of Maritime Archaeology. – Oxford University Press, 2013. – 1248 pages.
3. Rowinski, L. Pojazdy glebinowe. Budowa i wyposazenie [Text] / L. Rowinski. – Gdansk: Przedsiębiorstwo Prywatne “WiB”, 2008. – 593 p.
4. Справочник по теории корабля: В 3-х т. [Текст] / Под ред. Я.И. Войткунского // – Л.: Судостроение, 1985. – Т.1. – 768 с.
5. Блінцов О. В., Надточій В. А. Система автоматичного керування кабельною лебідкою прив’язної підводної системи // «Збірник наукових праць НУК». – Миколаїв: НУК, 2013. – №1. – С. 77-82.
6. Блінцов В.С., Войтасик А.М. Підводна роботизована технологія установки корисного вантажу на морське дно. – «Підводні технології». – Міжнародний науково-виробничий журнал. – К. : КНУБА, 2016. – №4. – С. 50-59.
7. Агеев, М.Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии [Текст] / М. Д. Агеев // – М.: Наука, 2005. – 398 с.
8. Блінцов С. В. Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними апаратами // – Миколаїв: Вид-во НУК, 2014. – 242 с.
9. Алексеев, А.В. Динамическое позиционирование обитаемого подводного аппарата над объектом работ [Текст] / А. В. Алексеев, А. Л. Оленин, Г. В. Смирнов, А. Н. Фендриков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева, 2011. – №2 (26). – С. 218-227.
10. Makoto, Ishitsuka Control of an underwater manipulator mounted for an AUV considering dynamic manipulability [Text] / Ishitsuka Makoto, Ishii Kazuo // Kyushu Institute of Technology, Japan. – International Congress Series DOI, 2006. – 269-272 p.
11. Блінцов В. С., Надточій В. А. Сучасні задачі автоматизації керування самохідними прив’язними підводними системами з начіпним обладнанням. // «Збірник наукових праць НУК». – Миколаїв: НУК, 2012. – №2. – С. 79-83.
12. Кондратенко, Г. В. Проблемы управления манипуляционными системами с подвижным основанием. [Текст] / Г. В. Кондратенко // Збірник наукових праць УДМТУ – Миколаїв: УДМТУ, 1999. – Вип. 4. – с. 135–151.

13. Moore, S. Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication [Text] / Steven W. Moore, Harry Bohm, Vickie Jensen // Publisher: Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010. – 770 p.
14. Шостак, В. П. Подводные аппараты-роботы и их манипуляторы [Текст] / В. П. Шостак // – Чикаго: Мегатрон, 2011. – 134 с. 15. Блінцов О. В., Надточій В. А. Просторова стабілізація самохідного прив'язного підводного апарату з маніпулятором // «Збірник наукових праць НУК». – Миколаїв: НУК, 2012. – №5-6. – С. 69-74.
16. Ястребов, В. С. Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований. Справочник [Текст]/ В. С. Ястребов, Г. П. Соболев, А. В. Смирнов и др.; под общ. ред. В.С. Ястребова // – Л.: Судостроение, 1981. – 304 с.
17. Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат «Фалкон». Инструкция по эксплуатации дополнительного оборудования. – М.: «Тетис-Про», 2009. – 58 с.
18. Илларионов, Г. Ю. Подводные роботы в минной войне: Монография. / Г. Ю. Илларионов, К. С. Сиденко, В. В. Сидоренков // Калининград: ОАО «Янтарный сказ», 2008. – 116 с.
19. Блінцов, О. В. Автоматизація керування одноланковими самохідними прив'язними підводними системами. Навчальний посібник / О. В. Блінцов, В. А. Надточій // Миколаїв : НУК, 2014. – 124 с.
20. Блинцов С. В., Надточий В.А. Возможности онлайн-идентификации параметров подводного аппарата для построения систем управления на базе инверсной модели. // Мат-лы XIII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований». – М.: АПР, 2013. –Т. 1. – С. 305-309.
21. Надточій, В. А. Синтез регулятора диференту підводного апарату при роботі зовнішнього начіпного обладнання. – Миколаїв : Вісник НУК, 2014, № 3.
22. Fossen, Thor I. Handbook of marine Kraft Hydrodynamics and motion Control. [Text] / Thor I. Fossen // – John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – 567 p.
23. Краморенко, А. В. Критерии сравнения характеристик подводных аппаратов с точки зрения выполнения ими подводных работ [Текст] / А. В. Краморенко, А. Н. Скакун // Современные методы и средства океанологических исследований : Материалы XIII Международной научно-технической конференции «МСОИ-2013» : – М.: АПР, 2013. – С. 316-319.
24. Егоров, Г.В. Концепция малых судов обеспечения на примере морских водолазных судов нового поколения [Текст] / Г. В. Егоров, В. И. Тонюк // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 – С. 104-115.

25. Бугаенко, Б. А. Динамика судовых спускоподъемных операций – К.: Наукова думка, 2004. – 320 с.
26. Кувшинов, Г.Е. Системы управление глубиной погружения буксируемых объектов. [Текст] / Г. Е. Кувшинов, Л. А. Наумов, К. В. Чупина // Монография. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 285 с.
27. Егоров, В. И. Подводные буксируемые системы: Учебное пособие [Текст] / В. И. Егоров // – Л.: Судостроение, 1981. – 304 с.
28. Блінцов О.В. Удосконалення керування квазістаціонарним просторовим рухом самохідної прив'язної підводної системи в умовах невизначеності. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи та процеси керування. Національний університет "Львівська політехніка", Львів, 2009.
29. Ястребов В.С., Армишев С.В. Алгоритмы адаптивного движения подводного робота. – М.: Наука, 1988. – 88 с.
30. Molchan, M. The Role of Micro-ROVs in Maritime Safety and Security. [Text] / M. Molchan // – Mochlan Marine Sciences, 2005. – 44 p.
31. Надточій, В. А. Питання оцінки рівня автоматизації морського технологічного комплексу з самохідною прив'язною підводною системою робочого класу [Текст] / В. А. Надточій // Підводна техніка і технологія : Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 85-89.
32. Moore, S. Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication [Text] / Steven W. Moore, Harry Bohm, Vickie Jensen // – Publisher: Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010. – 770 p.
33. Блінцов О. В., Надточій В. А. Оцінка рівня автоматизації самохідних прив'язних підводних систем з маніпуляторами // «Збірник наукових праць НУК». – Миколаїв: НУК, 2012. – №3-4. – С. 66-70.

Навчальне видання

Ж. Ю. БУРУНІНА, В. А. НАДТОЧИЙ, Л. Т. АЛОБА,  
А. М. ВОЙТАСИК, О. П. КЛОЧКОВ, А. С. СІРІВЧУК

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРИВ'ЯЗНИМИ ПІДВОДНИМИ  
СИСТЕМАМИ ПРИ РОБОТІ З ТОЧКОВИМИ ПІДВОДНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Під редакцією д.т.н. проф. В.С. Блінцова  
Комп'ютерне верстання В. В. Трибулькевич

© Національний університет кораблебудування імені  
адмірала Макарова, 2018

---

Формат 80x84/16. Ум. друк. арк. 3,7. Тираж 100 прим. Зам. № 129.  
Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025, E-mail : publishing@nuos.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.