

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

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

**АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРИВ'ЯЗНИМИ ПІДВОДНИМИ
СИСТЕМАМИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ МОРСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ
НА ВЕЛИКИХ АКВАТОРІЯХ**

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

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

**AUTOMATIC CONTROL OF TETHERED UNDERWATER SYSTEMS
WHEN CONDUCTING MARINE OPERATIONS IN LARGE WATER
AREAS**

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

Mykolaiv♦NUS
2018

Миколаїв♦НУК
2018

А-18 **Автоматичне** керування прив'язними підводними системами при проведенні морських операцій на великих акваторіях. / 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. – 53 с.

У навчальному посібнику розглянуті питання автоматизації підводно-технічних робіт, що виконуються прив'язними підводними системами при виконанні ними пошуку та знешкодження небезпечних підводних об'єктів на великих за площею акваторіях.

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 performed by tethered underwater systems are considered in the course of their search and disposal of dangerous underwater objects in large water areas.

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

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

УДК 681.5:629.584

© 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
БД (DB)	база даних	database
БЛ (TW)	буксирувальна лебідка	towing winch
БПА (TUV)	буксирований підводний апарат	towed underwater vehicle
ГП (UG)	гараж підводний	underwater garage
КБ (CT)	кабель-буксир	cable-tug
КЛ (CW)	кабельна лебідка	cable winch
КТ (TC)	кабель-трос	tether cable
М _{ЗВ} (M _{DI})	момент збурюючих впливів, що діють на корпус	moment of disturbing influences acting on the hull
МП (MR)	гідродинамічний момент опору обертання корпусу БПА	TUV hull hydrodynamic moment of the rotational resistance (torque resistance)
МПЛ (SUW)	малогабаритна підводна лебідка	small-sized underwater winch
М _Ц (M _D)	множина цифрових навігаційних даних	digital navigation data
НО (AE)	навісне обладнання	attached equipment
П (G)	планер	glider
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
ПЧО (USPEC)	підводна самохідна система з начіпним обладнанням	underwater self-propelled equipment carrier
ПТ (UC)	підводна течія	underwater current
САК (ACS)	система автоматичного управління	automatic control system
СБ (TV)	судно-буксирувальник	towing vessel
СГ (RD)	стерно глибини	rudder depth
СН (CV)	судно-носій	carrier vessel
у _з (u _d)	константне значення заданої глибини	constant value of the desired depth
(ЯЛ (AC)	якірний ланцюг	anchor chain

ЗМІСТ

CONTENTS

Вступ.....	5	Introduction	5
1 Особливості керування роботою ПСНО при проведенні пошукових та знешкоджувальних морських операцій.....	7	1 Features of USPEC control work when conducting maritime search and neutralizing operations.....	7
2 Автоматизація керування ПСНО при синхронному русі ПА і СН.....	11	2 USPEC control automation with synchronous motion of ROV and CVs.....	11
3 Принципи автоматизації керування ПСНО у комбінованому режимі застосування.....	23	3 Principles of USPEC control automation in the combined application mode	23
4 Розробка слідкувальної системи автоматичного керування глибиною ГП	26	4 Development of a tracking system for UG automatic depth control	26
4.1 Особливості слідкувальної САК глибиною гаража- планера	26	4.1 Features of gilder garage depth tracking ACS.....	26
4.2 Структура слідкувальної САК глибиною ГП	26	4.2 Structure of UG depth tracking ACS	26
4.3 Аналіз ГП як об'єкта керування та розробка математичної моделі його обертowego руху.	29	4.3 Analysis of UG as a control object and the mathematical model development of its rotational motion.....	29
5 Синтез регулятора диферента ГП.....	34	5 UG pitch controller synthesis.....	34
6 Синтез регулятора глибини ГП... ..	42	6 UG depth controller synthesis	42
Список літератури	51	References.....	51

ВСТУП

INTRODUCTION

Прив'язні підводні системи є ефективним інструментом для пошуку затонулих об'єктів на великих за розмірами площах морського дна. 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 пошукові підводні роботи, відносяться підводні відеокамери, гідролокатори, гідроакустичні профілографи, магнітометри тощо.

Велика кількість підводних пошукових робіт виконується на великих за площею акваторіях, коли основним режимом ПА є його стабілізація його просторового руху. Це утворює новий тип засобів підводної робототехніки – прив'язні підводні самохідні системи з начіпним обладнанням (ПЧНО) і відкриває принципово нові можливості для підводних технологій – від високоточних дистанційно керованих пошукових робіт на великих площах морського дна до цифрового картографування знайдених підводних об'єктів (ПО).

У навчальному посібнику розглядаються питання автоматизації керування прив'язними підводними системами з начіпним обладнанням при виконанні пошукових робіт на великих

Tethered underwater systems are an effective instrument for the search of sunken objects on large seabed areas. The typical tethered underwater system is composed of a self-propelled remotely operated vehicle (ROV), a carrier vessel (CV), on which are installed the power and control post (PCP) for the remotely operated vehicle and the cable winch (CW) with the tether cable (TC), through which the (ROV) power supply and control are provided. The attached equipment (AE), which is used for the underwater search operations, includes underwater video cameras, sonar, hydroacoustic profilographs, magnetometers, etc.

A large number of underwater search operations are carried out on large water areas, when the ROV main mode is its spatial movement stabilization. It forms a new type of underwater robotics equipments – tethered underwater systems with the attached equipment (USPEC) and opens up fundamentally new opportunities for underwater technologies – from high-precision remotely controlled search operations on large seabed areas to digital mapping of found underwater objects (UO).

In the manual, the questions of tethered underwater systems control automation with the attached equipment during underwater search operations on large seabed areas with high

за площею морських акваторій з високою продуктивністю. Це забезпечується автоматичним керуванням ПСНО при синхронному русі ПА і СН та автоматизації керування ПСНО у комбінованому режимі застосування, коли для пошуку використовується буксирований режим ПА, а при обстеженні знайденого ПО – самохідний режим руху ПА.

performance are considered. This is provided by the USPEC automatic control in the synchronous motion of the ROV and the CV and the USPEC control automation in the combined implementation mode, when the ROV towing mode is used for the search and the ROV self-propelled motion mode is used during the inspection (survey) of the found UO.

1 ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ ПСНО ПРИ ПРОВЕДЕННІ ПОШУКОВИХ ТА ЗНЕШКОДЖУВАЛЬНИХ МОРСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ

1 FEATURES OF USPEC CONTROL WORK WHEN CONDUCTING MARITIME SEARCH AND NEUTRALIZING OPERATIONS

Пошук підводних об'єктів на великих акваторіях (морських і річкових) належить до надзвичайно складних та відповідальних морських операцій. Виходячи з огляду наукової і виробничої літератури [1-3] та з досвіду проведення таких операцій фахівцями Науково-дослідного інституту підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова [4-6] зазначимо, що основними підводними завданнями у таких операціях є:

пошук, обстеження та навігаційне маркування аварійно затонулих літальних та космічних апаратів, суден та підводних човнів;

пошук, картографування чи знешкодження затонулих залишків озброєння та військової техніки часів Другої світової війни;

пошук, ідентифікація та картографування районів морських екологічних катастроф.

Наведений перелік морських пошукових та знешкоджувальних операцій є характерним для всіх морських країн світу, у тому числі і для України. Для нашої держави цей перелік постійно доповнюється та розширюється у зв'язку з новими воєнними загрозами Україні з морського напрямку [7]. Це на сьогодні утворює додатковий перелік морських антитерористичних операцій, зокрема:

пошук, ідентифікація, картографування, знешкодження чи підйом не санкціоновано встановленої

Search for underwater objects in large water areas (maritime and river) is one of the most complex and vital marine operations. Based on the review of scientific and production literature [1-3] and the experience of conducting such operations by experts of the Research Institute of Underwater Technology of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding [4-6], we note that the main underwater tasks in such operations are:

search, survey and navigational marking of accident sunken aircrafts and spacecrafts, vessels and submarines;

search, mapping or neutralization of sunken remnants of armament and military equipment during the Second World War;

search, identification and mapping of areas of maritime environmental disasters.

The above list of maritime search and neutralizing operations is typical for all maritime countries of the world, including Ukraine. For our country, this list is constantly supplemented and expanded in connection with the new military threats of Ukraine from the sea direction [7]. Today, this particularly creates an additional list of maritime anti-terrorist operations:

the search, identification,

на морське дно апаратури;

пошук та ліквідація (знищення або підйом на поверхню) вантажів контрабандного та терористичного характеру;

обстеження донної поверхні і водної товщі акваторій військово-морських баз, небезпечних фарватерів та тимчасових якірних стоянок кораблів у відкритому морі [8].

Боротьба з виявленими підводними загрозами на цей час виконується у наступних формах:

картографування – шляхом складення цифрової карти морського дна з нанесеними географічними координатами виявлених ПО; виконується за допомогою пошукових гідроакустичних приладів;

маркування – за допомогою пасивного чи активного гідроакустичного маяка; виконується за допомогою НО (транспортного зажимного пристрою) шляхом доставки і встановлення на (біля) ПО гідроакустичного маяка для повторного оперативного знаходження ПО;

знешкодження – знищення ПО шляхом підриву; виконується за допомогою НО (транспортного зажимного пристрою) шляхом доставки і укладання поруч з ПО спеціального пристрою – підривного заряду з дистанційним або часовим підривом;

підйом ПО на поверхню – перенесення ПО до спеціальної підйомної платформи чи закріплення ПО на ПА; виконується за допомогою НО (маніпулятора).

Для наведеного переліку морських операцій характерними вимогами є:

mapping, neutralization or lifting of unauthorized equipment installed on the seabed;

search and liquidation (destruction or lifting to the surface) of smuggled and terrorist goods;

inspection of the bottom surface and the water column of the naval bases' water areas, dangerous fairways and temporary anchorages of vessels on the high seas [8].

Combating detected underwater threats is currently carried out in the following forms:

mapping – by compiling a digital map of the seabed with plotted geographical coordinates of the detected UO; performed using the search hydro acoustic devices;

marking – using a passive or active hydroacoustic beacon; performed with the help of AE (transport clamping device) by delivery and installation on (near) the AE of the hydroacoustic beacon for the UO repeated operational location;

neutralization – destruction of UO by blasting (blowing up); is performed using the AE (transport clamping device) by delivering and stacking next to the UO of a special device – explosive charge with remote or time blasting;

lifting UO to the surface – the transfer of UO to a special lift platform or fixing UO on ROV; performed with the help of AE (manipulator).

For the above list of maritime operations, the following are typical requirements:

висока продуктивність та якість їх виконання, обумовлена великими площами можливого морського театру воєнних дій та з оперативних міркувань;

висока прихованість самого факту проведення деяких видів пошукових чи знешкоджувальних операцій (наприклад, картографування чи маркування ПО).

Зазвичай, підводні об'єкти, що створюють загрозу і підлягають виявленню й нейтралізації, належать до одиночних, розташованих на значній відстані один від одного і розміщаються на морському дні (затонулі боєприпаси минулих воєн, судна, літальні та космічні апарати). Тому ефективним є ведення пошуку і знешкодження ПО без зупинки надводного судна-носія ПСНО, однак це накладає жорсткі умови на систему автоматизації цих робіт, оскільки всі керовані процеси протікають у стислі терміни і вимагають точного і однозначного керування.

Нижче розглянемо два основні режими застосування ПСНО для виконання пошукових та обстежувальних робіт на великих акваторіях, які забезпечують високу продуктивність та вимагають автоматизації керування:

для одноланкової ПСНО – синхронний рух СН і ПА, коли ПА у самохідному режимі рухається у водній товщі ($\vec{V}_{СН} = \vec{V}_{ПА}$);

для двохланкової ПСНО – комбінований режим застосування, коли пошук ПО ведеться у буксированому режимі ПСНО, а допошук і обстеження (знешкодження) – у самохідному режимі руху ПА.

high productivity and quality of their performance due to large areas of possible maritime theater of military operations and for operational reasons;

high concealment, ipso facto carrying out certain types of search or disposing of operations (for example, mapping or marking UO).

Usually, underwater objects that are threatening and subject to detection and neutralization, belong to single objects, located at a considerable distance from each other and emplaced on the seabed (sunken ammunitions of past wars, vessels, aircrafts and spacecrafts). Therefore, it is effective to search and neutralize the UO without stopping the USPEC carrier vessel, but it imposes rigid conditions on the automation of these works, since all managed processes take place in a short time and require precise and unambiguous control.

Below, we will consider two main modes of USPEC application to perform search and survey operations in large areas that provide high performance and require control automations:

for single-link USPEC – synchronous motion of CV and ROV, when ROV in self-propelled mode moves in the water column ($\vec{V}_{CV} = \vec{V}_{ROV}$);

for double-link USPEC – combined application mode, when UO search is carried out in the USPEC towed mode, and search and survey (neutralization) – in the ROV self-propelled motion mode.

Зазначимо, що у роботі розглядаються питання автоматизації керування рухом ПСНО на малих глибинах (до 100 метрів), оскільки з-за тимчасової окупації Криму саме ці глибини наразі є актуальними для проведення пошукових та знешкоджувальних робіт у територіальних водах України.

It should be noted that the work addresses the issues of USPEC automation motion control at shallow depths (up to 100 meters), because due to the temporary occupation of the Crimea, these depths are currently relevant for search and neutralization operations in the territorial waters of Ukraine.

2 АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ПСНО ПРИ СИНХРОННОМУ РУСІ ПА І СН

2 USPEC CONTROL AUTOMATION WITH SYNCHRONOUS MOTION OF ROV AND CVS

Синхронний рух СН та підводного апарату ПСНО застосовують у випадках оперативного реагування на протиправні дії судна-порушника щодо затоплення вантажу (заборонених предметів, засобів риболовства, продукції незаконної морської діяльності тощо). Такі задачі притаманні патрульним суднам Державної прикордонної служби України, Берегової охорони України та суднам інших силових міністерств України, коли факт затоплення або підозра такої дії зловмисника встановлена, але точні координати цього затоплення невідомі і потребують підводного допшуку та подальшого обстеження чи підйому.

Рух підводного апарату ПСНО синхронно з рухом СН передбачає рівність векторів лінійних швидкостей підводного апарата ВПА та судна-носія $V_{СН}$ при заданому їхньому взаємному розташуванні у просторі. Така технологія застосування ПСНО використовується при обстеженні великих акваторій з наперед невідомим розташуванням ПО і забезпечує швидкість руху до 3 м/с, що обумовлено обмеженнями «знизу» на швидкісні можливості більшості СН та «зверху» – на швидкісні можливості ПА.

Для кораблів ВМС ЗС України доцільним є використання такого

Synchronous motion of CV and USPEC underwater vehicle are used in cases of prompt response to the intruder vessel illegal actions concerning flooding of cargo (prohibited items, means of fishing, products of illegal maritime activity, etc.). Such tasks are inherent in the patrol vessels of the State Border Guard Service of Ukraine, the Coast Guard of Ukraine and the boats of other power ministries of Ukraine, when the fact of flooding or suspicion of such an attack by an attacker is established, but the exact coordinates of this flooding are unknown and require underwater search and subsequent inspection or recovery.

The USPEC remotely operated vehicle motion synchronously with the CV motion provides for the equality of the linear velocity vectors of the remotely operated vehicle VUV and the carrier vessel V_{CV} given their mutual position in space. This USPEC technology application is used when inspecting large areas with previously unknown location of UO and provides a speed of up to 3 m/s, which is caused by restrictions "from above" on the speed of most kinds of the CV and "from below" – to the ROV high-speed abilities.

For the Naval Forces ships of the Armed Forces of Ukraine, it is expedient

режиму ПСНО при русі небезпечними фарватерами, що втілено у технічну документацію створення корабельного ненаселеного підводно-технічного комплексу для судна класу «корвет» проекту 58250, який будується на Чорноморському заводі м. Миколаєва [8].

Тому далі розглянемо питання автоматизації керування таким режимом ПСНО на прикладі забезпечення безпечного проходу судна класу «корвет» небезпечним фарватером.

Керування такою ПСНО передбачає наступні етапи:

виведення ПА на задану капітаном судна дистанцію l_{CH} відносно СН (корвету), яка, зазвичай, становить 300-1000 метрів, та на задану глибину моря $h_{ПА}$, яка забезпечує ефективну роботу пошукової апаратури ПА (зазвичай, це рух ПА на висоті 3-5 метрів над ґрунтом);

підтримання заданої дистанції від СН та стабілізація ПА по висоті над ґрунтом при синхронному русі СН та ПА на заданій швидкості руху СН (біля 6 вузлів) для пошуку потенційно небезпечних ПО;

підхід ПА до виявленого потенційно небезпечного ПО, його ідентифікація та, за необхідністю, нейтралізація (з передачею інформації капітану судна).

Загальна схема реалізації режиму синхронного руху СН і ПСНО наведена на рис. 1.

Слід зазначити, що рух небезпечним фарватером є надзвичайно відповідальним та небезпечним для

to use such a USPEC mode when driving in dangerous fairways, which is embodied in the technical documentation of the vessel's uninhabited underwater-technical complex creation for a vessel of the "corvette" class of project 58250, being built at the Black Sea plant in Nikolayev [8].

Therefore, let's consider the control automation of such USPEC mode, for example, by ensuring a safe passage of the "corvette" class vessel in a dangerous fairway.

The control of such USPEC involves the following steps:

ROV's removal to a given distance l_{CV} , by the vessel's captain, relative to the CV (corvette), which is usually 300-1000 meters, and at a given sea depth h_{ROV} , which provides efficient operation of the ROV search equipment (usually, this ROV speed at an altitude of 3-5 meters above the ground);

maintenance of a given distance from the CV and stabilization of the ROV in height above the ground under the synchronous motion of the CV and ROV at a given CV speed (about 6 knots) to search for potentially dangerous UO;

the approach of CV to the detected potentially dangerous UO, its identification and, if necessary, neutralization (with the transfer of information to the captain of the vessel).

The general realization scheme of the synchronous motion mode of the CV and USPEC is shown in fig. 1.

It should be noted that the movement of a dangerous fairway is extremely responsible and dangerous for

судна класу «корвет», тому автоматизації підлягають не всі фази цього руху, а тільки ті, які дають змогу вивільнити екіпаж від рутинної роботи та підвищити її ефективність шляхом передачі допоміжних функцій системі автоматики.

a vessel of the "corvette" class, because not all phases of this movement are subject to automation, but only those that allow the crew to be freed from routine work and increase its efficiency by transferring the auxiliary functions of the automation system.

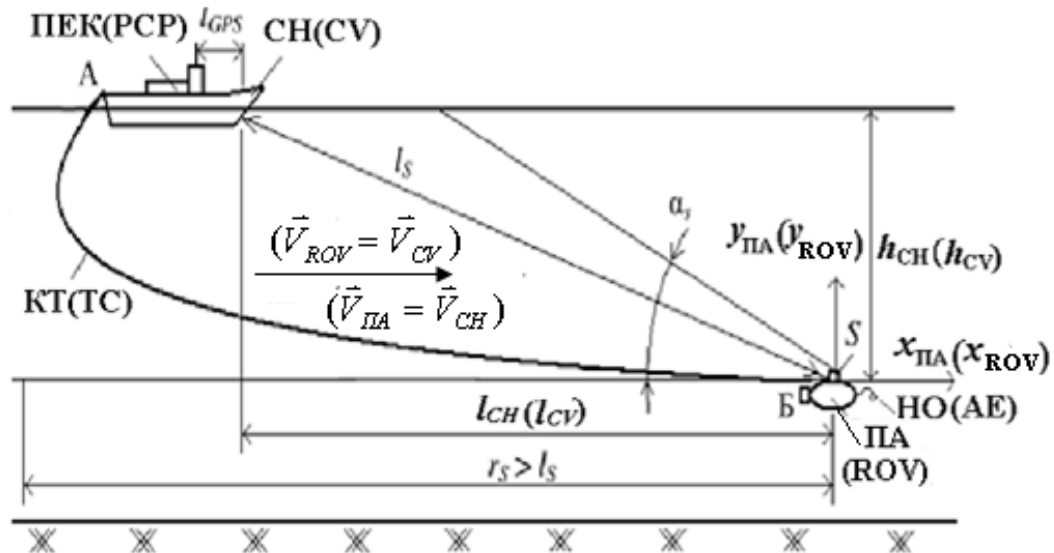


Рисунок 1 – Загальна схема реалізації режиму синхронного руху СН і ПІА
Figure 1 – General scheme of the synchronous motion mode realization of CV and USPEC

Узагальнена схема автоматизованого керування системою «СН – ПІА» при синхронному русі, синтезована автором на основі досвіду застосування прив'язної підводної техніки в Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова та схвалена Головним представництвом Замовника №1301 Міноборони України, наведена на рис. 2 у вигляді узагальненого алгоритму функціонування.

The generalized scheme of automated "CV-USPEC" system control in synchronous motion, synthesized by the author on the basis of the experience of using the tethered underwater technology at the Admiral Makarov National University of Shipbuilding and approved by the Principal Representation of the Customer No. 1301 of the Ministry of Defense of Ukraine, is shown in Fig. 2 in the form of a generalized operation algorithm.

Дано опис розробленого узагальненого алгоритму керування у порядку їх нумерації.

We give a description of the developed generalized control algorithm in their numbering order.

Б1 – розгортання системи «СН – ПІА» для руху у режимі «Прохід

system for movement in the "Passage of

небезпечного фарватеру»: виведення ПА у задану точку підводного простору на позицію руху попереду СН (дистанція до СН l_{CH} , глибина ПА $h_{ПА}$ та його курс задаються орієнтовно і вручну); перевірка керованості системи;

Б2 – уведення заданих характеристик режиму синхронного руху системи «СН – ПСНО»: l_{CH} ; $h_{ПА}$; $\vec{V}_{ПА} = \vec{V}_{СН}$;

Б3 – задавання поточного режиму роботи системи «СН – ПСНО»: автоматичне керування синхронним рухом системи / ручне керування синхронним рухом системи / ручне керування підходом і позиціонуванням ПА біля ПО / завершення роботи у режимі «Прохід небезпечного фарватеру» (відповідно, $A_C/P_C/P_{П/3}$);

Б4 – вимірювання поточного значення дистанції $l_{СН}$ між ПА і СН;

Б5 – обчислення оптимального значення довжини попущеної частини кабель-тросу $l_{КТопт}$, при якому його силовий гідродинамічний вплив на ПА мінімальний;

Б6, Б9 – умовні переходи визначення ручного чи автоматичного режимів керування, відповідно, судном-носієм та кабельною лебідкою ПСНО;

Б7, Б8 – блоки керування рухом СН з заданими параметрами руху (курс $\varphi_{СН}$ та швидкість $V_{СН}$), відповідно, у ручному та в автоматичному режимах;

Б10, Б11 – блоки керування роботою кабельної лебідки, відповідно, у ручному та в автоматичному режимах; у результаті обчислення

a dangerous fairway" mode: bringing of ROV to a given underwater space point to the movement position ahead of the CV (distance to the CV l_{CV} , ROV depth h_{ROV} and its course are given approximately and manually); system controllability check;

B2 – introduction of the given characteristics of the “CV – USPEC” system synchronous motion mode: l_{CV} ; h_{ROV} ; $\vec{V}_{ROV} = \vec{V}_{CV}$;

B3 – tasks of the “CV-USPEC” current system operation mode: automatic control of the synchronic control system/manual control of synchronous system control/manual approach control and ROV positioning close to UO/completion of operation in the "Passage of a dangerous fairway" (according to $A_S / M_S / M_P / C$);

B4 – measurement of the current value of the distance l_{CV} between ROV and CV;

B5 – calculation of the optimal length value of the released part of the tether cable l_{TCopt} , during which its power hydrodynamic effect on the ROV is minimal;

B6, B9 – conditional determination transitions of the manual or automatic control modes of the carrier vessel and USPEC cable winch respectively;

B7, B8 – motion control units with specified motion parameters (course φ_{CV} and speed V_{CV} respectively, in manual and automatic modes;

B10, B11 – cable winch control blocks, respectively, in manual and automatic modes; As a result of the calculation of the difference

різниці $\Delta l_{KT} = (l_{KT} - l_{KT_{opt}})$ цими блоками підтримується оптимальне значення $l_{KT_{opt}}$, що забезпечує мінімально можливі упори рушіїв підводного апарату і, таким чином, максимально можливу дистанцію між СН і ПА, необхідну для безпечного руху судна небезпечним фарватером;

Б12 – умовний перехід визначення ручного (до Б13) та автоматичного (до Б20) режимів руху ПА синхронно з СН одночасно з гідроакустичним пошуком ПО, а також режиму ручного підходу до знайденого підводного об'єкту до (Б14);

Б13 – ручний режим керування рухом ПА з одночасним пошуком ПО; використовується при виникненні нештатних підводних ситуацій (складні умови підводної навігації, часткова відмова обладнання тощо);

Б14 – автоматичне обчислення пеленгу і дистанції від ПА до ПО, приведення ПА до ПО та позиціонування біля ПО (режим Р_п роботи системи «СН – ПСНО»);

Б15 – умовний перехід завершення режиму підходу до ПО та позиціонування ПА;

Б16 – ручний режим ідентифікації ПО; зазвичай, виконується оператором ПСНО за допомогою спеціального програмного комплексу, який містить комп'ютерну базу даних (БД) ПО [9];

Б17 – умовний перехід класифікації ПО як небезпечної цілі, відносно якої необхідно застосувати НО ПА;

Б18 – ручний режим застосування НО, яким оснащений ПА (маніпулятор, різак тощо);

$\Delta l_{TC} = (l_{TC} - l_{TC_{opt}})$, these blocks support the optimal value of $l_{TC_{opt}}$, which ensures the minimum possible thrust forces for the remotely operated vehicle propulsion and, thus, the maximum possible distance between the CV and ROV necessary for the vessel's safe navigation in the dangerous fairway;

B12 – conditional determination transitions of manual (up to B13) and automatic (up to B20) motion modes of the ROV synchronously with the CV simultaneously with the UO hydroacoustic search, as well as the manual approach to the detected underwater object to (B14);

B13 – ROV manual motion control mode with simultaneous search UO; used in case abnormal underwater situations arise (difficult conditions of underwater navigation, partial equipment failure, etc.);

B14 – automatic calculation of the bearing and distance from the ROV to the UO, bringing the ROV to the UO and positioning near the UO (the “CV – USPEC” system operation mode M_p);

B15 – conditional transition of the approach completion mode to the UO and ROV positioning;

B16 – UO manual identification mode; usually, performed by the USPEC operator using a special software complex, containing the UO computer database (DB) [9];

B17 – conditional transition of UO classification as a dangerous goal, for which it is necessary to apply ROV AE;

B18 – AE manual application mode, with which ROV is equipped (manipulator, cutter and etc.);

В19 – умовний перехід за
ознакою завершення роботи НО з
виявленням ПО;

B19 – conditional transition based
on the AE work completion with the
detected UO;

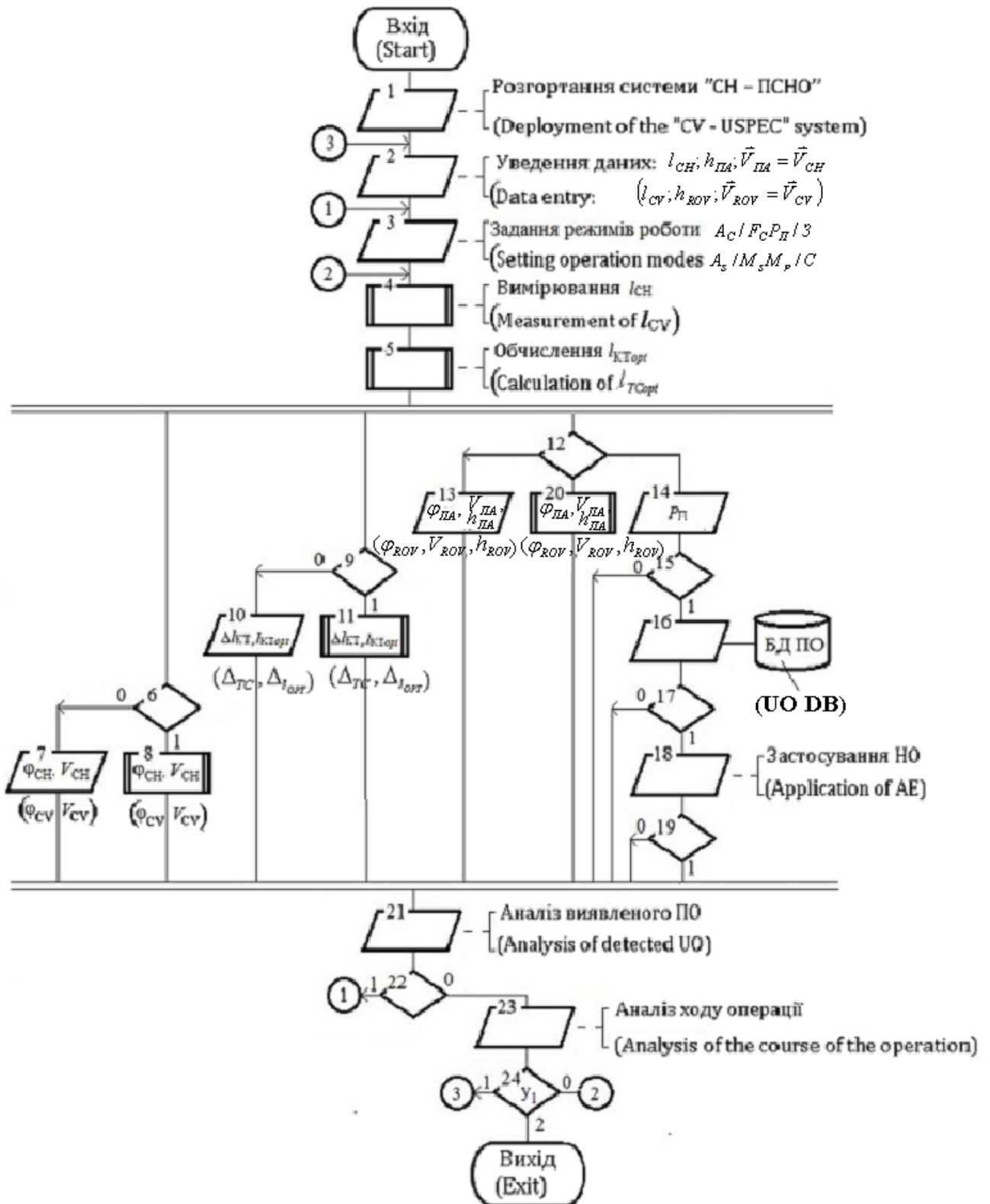


Рисунок 2 – Узагальнена схема автоматизованого керування системою «СН – ПСНО» у режимі синхронного руху
Figure 2 – Generalized scheme of "CV – USPEC" automated system control in synchronous motion mode

В20 – режим автоматичного керування рухом ПА з одночасним пошуком ПО гідроакустичними засобами;

В21 – блок аналізу виявленого ПО; якщо ПО класифікується оператором як небезпечний, за допомогою блоку В22 виконується перехід до блоку В3 задавання режиму РП ручного підходу та позиціонування ПА біля ПО (включення блоку В14);

В23 – блок аналізу ходу підводної пошукової операції; тут приймаються рішення стосовно її ефективності, а також доцільності продовження взагалі та в обраному режимі, зокрема;

В24 – умовний перехід за ознакою необхідності зміни поточного режиму роботи системи «СН – ПСНО»: $y_1=0$ – продовження режиму синхронного руху; $y_1=1$ – зміна параметрів синхронного руху; $y_1=2$ – завершення режиму синхронного руху.

Досвід застосування прив'язної підводної техніки в Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова свідчить, що перший і третій етапи застосування ПСНО, зазвичай, виконуються в автоматизованому чи навіть у ручному режимах, тому далі розглянемо можливості автоматизації другого етапу.

Виходячи з аналізу узагальненої схеми автоматизованого керування системою «СН – ПСНО» (рис. 2), автоматизації підлягають блоки керування рухом СН, КЛ та власне ПА. Зазначимо, що задача утримання СН на заданому курсі при русі з заданою швидкістю є тривіальною і на

В20 – ROV automatic motion control mode with UO simultaneous search by hydroacoustic tools;

В21 – detected UO analysis block; if the UO is classified by the operator as dangerous, with the help of block В22, the transition to block В3, setting the manual approach mode and positioning of ROV near the UO (switching block В14 on);

В23 – progress analysis block of the underwater search operation; here decisions are made about its effectiveness, as well as the desirability of continuing in general and in the chosen mode;

В24 – conditional transition based on the need to change the “CV-USPEC” system current mode: $y_1=0$ – the continuation of the synchronous motion mode; $y_1=1$ – change of synchronous motion parameters; $y_1=2$ – completion of the synchronous motion mode

Experience in applying tethered underwater technology, at the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, shows that the first and third stages of USPEC application are usually performed in automated or even manual modes, thus and so consider the automation possibilities of the second stage.

Based on the analysis of the generalized scheme of “CV – USPEC” automated control system (Figure 2), automation of the CV motion control units of CV, CW and of own ROV. It should be noted that the task of keeping the CV on a given course while driving with a desired speed is trivial and has

цей час успішно вирішена, тому що в роботі не розглядається [10, 11]. Задача забезпечення мінімального впливу КТ на ПА при його квазістаціонарному русі (аналог режиму повільного дрейфу СН на якірній стоянці і роботі ПА в умовах течії) вирішені у даній роботі.

Задача автоматизації керування ПА на заданій відстані від СН також вирішується за допомогою оснащення ПА і СН системою підводної навігації з ультракороткою базою [12]. Недоліком такої автоматизації є необхідність комплектацію системи «СН – ПСНО» додатковою високовартісною системою підводної навігації, що не передбачено Технічним завданням на створення ПА для проекту «корвет-58250» [8].

Пропонується для розв'язку цієї задачі використовувати штатний пошуковий прилад корабельного ПА – гідролокатор кругового огляду (сонар) S. Аналіз виконаємо у плоскій постановці, коли система «СН – КТ – ПА» розташована у діаметральній площині судна-носія і рухається з усталеною швидкістю відносно води $\vec{V}_{ПА} = \vec{V}_{СН}$ (рис. 1).

Ширина променю сонару по вертикалі αS забезпечує виявлення підводної частини СН за умови, що дистанція до нього по прямій l_s не більше, ніж робочий радіус сонару r_s .

Вважаємо, що ПА розташовано горизонтально у площині істинного горизонту спостерігача, а закріплення сонару на ПА є стаціонарним і забезпечує огляд верхньої напівсфери водного простору. Система координат

been so far solved successfully, therefore, not considered in the work [10, 11]. The task of ensuring the minimum impact of the TC on the ROV with its quasi-stationary motion (analogous to the CV mode of slow drift in the anchorage and the ROV operation in the current conditions) is solved in this work.

The task of ROV control automation at a given distance from the CV is also solved by means of ROV and CV equipment by the underwater navigation system with ultra-short baseline [12]. The disadvantage of such automation is the need to complete the "CV – USPEC" system with an additional high-value underwater navigation system that is not provided for by the Terms of Reference for the ROV creation for the project "Corvette-58250" [8].

It is proposed for the solution of this problem, the use of a ship borne ROV regular search instrument – sonar of the roundabout (Sonar) S. The analysis will be carried out in a flat formulation, when the "CV – TC – ROV", system, is located in the carrier vessel diameter plane and moves at a steady speed relative to water $\vec{V}_{ROV} = \vec{V}_{CV}$ (Fig. 1).

The vertical beam width α_s of the sonar provides detection of the underwater part of the CV, provided that the distance to it along the straight line l_s , is not greater than the sonar operating radius r_s .

We believe that the ROV is located horizontally in the observer's true horizon plane, and the fastening of the ROV sonar is stationary and provides an overview of the upper hemisphere of water space. The sonar coordinate system coincides with the

сонару співпадає зі зв'язаною системою координат ПА $\{0, x_{ПА}, y_{ПА}, z_{ПА}\}$ [11].

Тоді після розгортки променю сонару на 360° на навігаційному моніторі ПА матимемо візуальну інформацію (сонограму) та множину $M_{Ц}$ цифрових навігаційних даних (цифрове «вікно»):

$$M_{Ц} = \{K_{ПА}; P_{СН}; KK_{СН}; h_{ПА}; l_S\} \quad (1)$$

де $K_{ПА}$; $KK_{СН}$ – компасний курс ПА по його магнітному компасу; $P_{СН} = K_{ПА} + KK_{СН}$ – компасний пеленг на СН по магнітному компасу ПА; $KK_{СН}$ – курсовий кут на СН, отриманий на основі гідроакустичної відмітки СН на екрані сонару і відрахований від поздовжньої осі підводного апарату $x_{ПА}$; $h_{ПА}$ – глибина занурення ПА.

Модель екранного кадру навігаційного монітору ПА, куди виносяться сонограма, кутові та лінійні параметри ПА відносно СН, показана на рис. 3.

associated ROV coordinate system $\{0, x_{ROV}, y_{ROV}, z_{ROV}\}$ [11].

Then, after scanning the sonar beam 360° on the ROV navigation monitor, we will have visual information (sonogram) and a set of digital navigation data M_D (digital "window"):

$$M_D = \{C_{ROV}; B_{CV}; CC_{CV}; h_{ROV}; l_S\} \quad (1)$$

where ROV ; CC_{CV} – ROV compass course on its magnetic compass; $B_{CV} = C_{ROV} + CC_{CV}$ – CV compass bearings on the ROV magnetic compass; CC_{CV} – the course angle on the CV, obtained based on the ROV hydroacoustic marker on the sonar screen and deduced from the longitudinal axis of the remotely operated vehicle x_{ROV} ; h_{ROV} – ROV depth of immersion.

The ROV navigation screen monitor frame model, where the sonogram is applied, the angular and linear parameters of the ROV relative to the CV, is shown in Fig. 3.

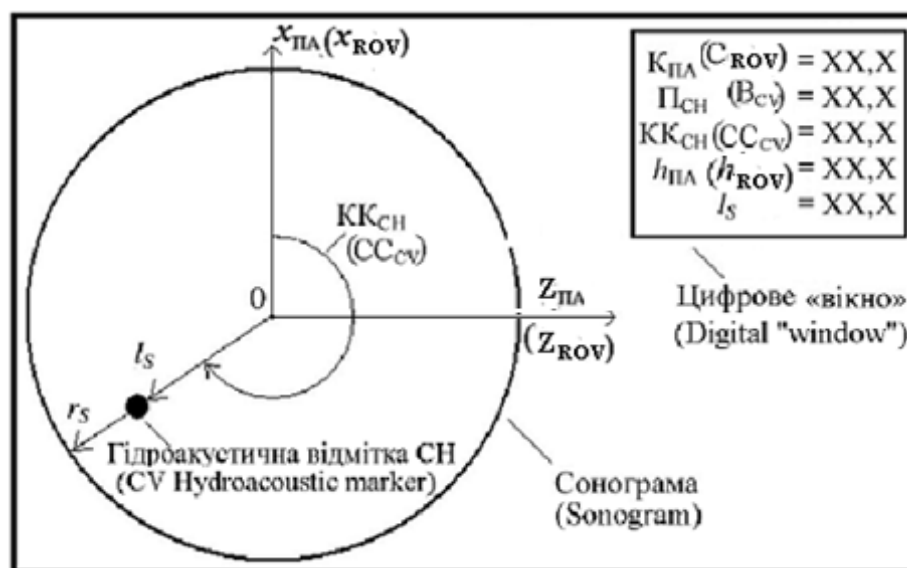


Рисунок 3 – Модель екранного кадру навігаційного монітору ПА

Figure 3 – The screen frame model of ROV navigation monitor

Очевидно, що для визначення істинних значень величин цифрового «вікна» (1) необхідно враховувати наступні природні поправки та приладові похибки:

d – магнітне схилення у точці знаходження ПА (визначається по магнітних картах з похибкою до $\frac{1}{4}^\circ$ [13]);

δ – девіацію магнітного компасу ПА (визначається експериментально для кожного ПА);

$\Delta K_{ПА}$ – приладову похибку визначення курсу магнітним компасом ПА (вказується у технічних характеристиках компасу і складає $1-3^\circ$);

$\Delta K_{СН}$ – приладову похибку визначення курсового кута на СН на основі гідроакустичної відмітки сонару (визначається технічними характеристиками сонару і лежить у межах $0,5-2^\circ$);

$\Delta П_{СН}$ – приладову похибку визначення компасного пеленгу на СН (визначається як функція приладових похибок визначення курсового кута $\Delta K_{СН}$ і компасного пеленгу $\Delta П_{СН}$);

$\Delta h_{ПА}$ – приладова похибка сенсора глибини ПА (лежить у межах $0,01-0,1$ метри і залежить від типу сенсору);

Δl_S – похибку сонару при визначенні дистанції до СН, яка визначається технічними характеристиками сонару і лежить у межах $(0,001-0,05) \cdot l_S$.

Таким чином, первинні вимірювання напрямів ПА у площині істинного горизонту спостерігача виконуються на базі магнітного компасу. Діаграма компасних напрямків ПА має вигляд, показаний на рис. 4.

Obviously, the following natural corrections and instrumental errors must be taken into account to determine the true value of the digital "window" (1):

d – magnetic inclination at the point of finding ROV (determined by the magnetic cards with an error up to $\frac{1}{4}^\circ$ [13]);

δ – deviation of ROV magnetic compass (determined experimentally for each ROV);

ΔC_{ROV} – instrumental error of the course determination by the CV magnetic compass (indicated by the technical characteristics of the compass and is $1-3^\circ$);

ΔC_{CV} – instrumental error of determining the CV course angle based on hydroacoustic sonar mark (determined by the technical characteristics of the sonar and lies within the limits of $0.5-2^\circ$);

ΔB_{CV} – instrumental error of determining the CV compass bearings (defined as the function of instrumental errors for determining the ΔC_{CV} directional angle and ΔB_{CV} compass bearings);

Δh_{ROV} – instrumental error of the ROV depth sensor (lies within $0.01-0.1$ meters and depends on the type of sensor);

Δl_S – the sonar error in determining the distance to the CV, which is determined by the technical characteristics of the sonar and lies within the limits of $(0,001-0,05) \cdot l_S$.

Thus, the primary measurements of the ROV directions in the observer's true horizon plane are performed on the basis of the magnetic compass. The diagram of the ROV compass directions is as shown in Fig. 4.

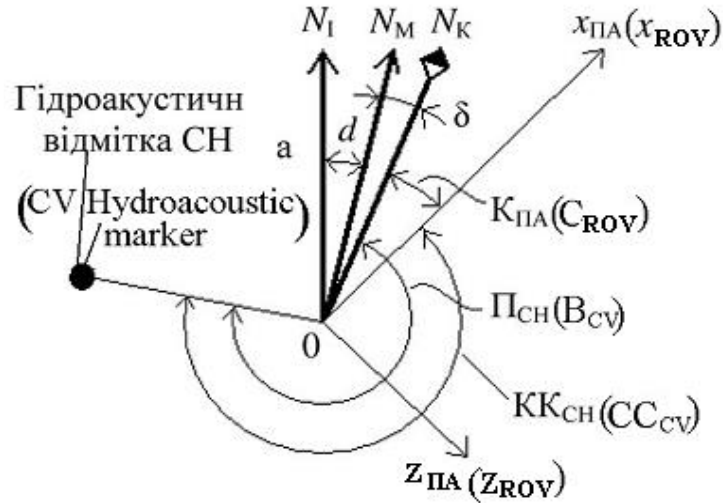


Рисунок 4 – Діаграма компасних напрямків ПА (по магнітному компасу)
 Figure 4 – Diagram of ROV compass directions (by magnetic compass)

На рис.4 позначено: N_I , N_M , N_K – відповідно, північна частина істинного, магнітного та компасного меридіанів спостерігача, що знаходиться на ПА.

Тоді істинні значення курсу ПА $К_{ПА}$, істинного пеленгу на СН Π_{CH} та зворотного істинного пеленгу $\text{ІЗ}\Pi_{CH}$, який дорівнює істинному пеленгу на ПА з борту СН $\Pi_{ПА}$, відраховані від північної частини істинного меридіану спостерігача, визначаємо за залежностями:

$$К_{ПА} = К_{ПА} + \Delta К_{ПА} + d + \delta; \quad (2)$$

$$\Pi_{CH} = \text{ІК}_{ПА} + \text{КК}_{CH} + \Delta \text{КК}_{CH}; \quad (3)$$

$$\text{ІЗ}\Pi_{CH} = \Pi_{ПА} = \Pi_{CH} \pm 180^\circ \quad (4)$$

Реальні значення лінійних складових цифрового «вікна» сонару, позначені індексом « R », визначимо за залежностями:

$$\text{КК}_{CHR} = \text{КК}_{CH} + \Delta \text{КК}_{CH}; \quad (5)$$

$$h_{ПАР} = h_{ПА} + \Delta h_{ПА}; \quad (6)$$

$$l_{SR} = l_S + \Delta l_S \quad (7)$$

In figure 4 are marked N_I , N_M , N_K – respectively, the northern part of the true, magnetic and compass meridians of the observer located on the ROV.

Then the course of ROV true values TC_{ROV} , the CV true bearings on the TB_{CV} and the reverse true bearing RTB_{CV} , which is equal to the true bearings on the ROV from CV's board TB_{ROV} , are deduced from the northern part of the true observer meridian, determined by the dependencies:

$$TC_{ROV} = C_{ROV} + \Delta C_{ROV} + d + \delta; \quad (2)$$

$$TB_{CV} = TC_{ROV} + CC_{CV} + \Delta CC_{CV}; \quad (3)$$

$$RTB_{CV} = TB_{ROV} = TB_{CV} \pm 180^\circ \quad (4)$$

The true values of the linear components of the digital "window" sonar, designated by the index " R ", are determined by the dependencies:

$$CC_{CVR} = CC_{CV} + \Delta CC_{CV} \quad (5)$$

$$h_{ROVR} = h_{ROV} + \Delta h_{ROV}; \quad (6)$$

$$l_{SR} = l_S + \Delta l_S \quad (7)$$

Реальну дистанцію по горизонталі l_R від ПА до СН можна обчислити за залежністю:

$$l_{CHR} = \sqrt{l_{SR}^2 - h_{PAR}^2} + l_{GPS} \quad (8)$$

де l_{GPS} – дистанція по горизонталі від носової частини СН до місця установки суднової навігаційної системи (зазвичай, антени супутникової навігації GPS).

Таким чином, залежність (8) може бути використана в існуючих регуляторах руху ПА [14-16] як джерело первинної інформації про істинне положення ПА відносно СН.

The real distance l_R horizontally from ROV to CV can be calculated from the equation:

$$l_{CVR} = \sqrt{l_{SR}^2 - h_{ROVR}^2} + l_{GPS} \quad (8)$$

where l_{GPS} is the horizontal distance from the nose (front part) of the CV to the installation point of the vessel navigation system (usually GPS satellite navigation antennas).

Thus, the dependence (8) can be used in existing ROV motion controllers [14-16] as a source of primary information about the ROV true position relative to CV.

3 ПРИНЦИПИ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ПСНО У КОМБІНОВАНОМУ РЕЖИМІ ЗАСТОСУВАННЯ

3 PRINCIPLES OF USPEC CONTROL AUTOMATION IN THE COMBINED APPLICATION MODE

Комбінований режим застосування ПСНО передбачає пошук ПО пошуковими приладами СН з буксирування ГП, який одночасно є гаражем для самохідного прив'язного ПА. При виявленні ПО цей ПА переводиться у самохідний режим для підходу до ПО та його обстеження, а планер ГП зменшує висоту свого ходу з одночасним зниженням швидкості руху СБ до значення v_{CHmin} . (виходячи з морської практики – до 1 м/с). При цьому, зміна просторової форми КБ та зменшення швидкості руху корінного кінця КБ забезпечують більш тривале перебування ПА біля ПО без загрози впливу на нього сил від КБ та КТ, що забезпечує успішне виконання підводної місії [17].

Просторове положення ПСНО у початковій (а) та кінцевій (б) стадіях комбінованого застосування наведено на рис. 5.

Враховуючи, що оптоволоконний кабель-трос власне ПА має невеликий діаметр по відношенню до діаметру КБ (близько 3 мм), він як джерело силової дії практично не впливає на ПА. Тому у подальших дослідженнях ПСНО такого типу як об'єкту керування основну увагу приділимо керуванню гаражом-планером.

Зазначимо, що на гараж-планер покладаються функції:

транспортування ПА під час пошуку ПО пошуковою апаратурою СБ;

Combined USPEC application mode provides the UO search by the CV search devices with towing UG, which simultaneously is the garage for self-propelled tethered ROV. When UO is detected, this ROV is transferred to the self-propelled mode for the approach towards the UO and its inspection, and the UG glider reduces the height of its course with the simultaneous decrease in the TV speed to the value v_{CVmin} , (based on maritime practice – up to 1 m/s). At the same time, the change of the CT spatial form and reducing the CT root end speed provide a longer ROV stay near UO without the impact threat on its forces from the CT and TC, which ensures the underwater mission success [17].

The USPEC spatial position in the initial (a) and final (b) stages of the combined application is shown in Fig. 5.

Given that the ROV personal fiber-optic tether cable has a small diameter in relation to the CT diameter (about 3 mm) as a source of force impact, does not practically affect the ROV. Therefore, in further studies of the USPEC of this type of control, the main object of attention is paid to the glider garage control.

Note that the following functions are assigned to the glider garage:

ROV transportation in UO search by the TV search equipment;

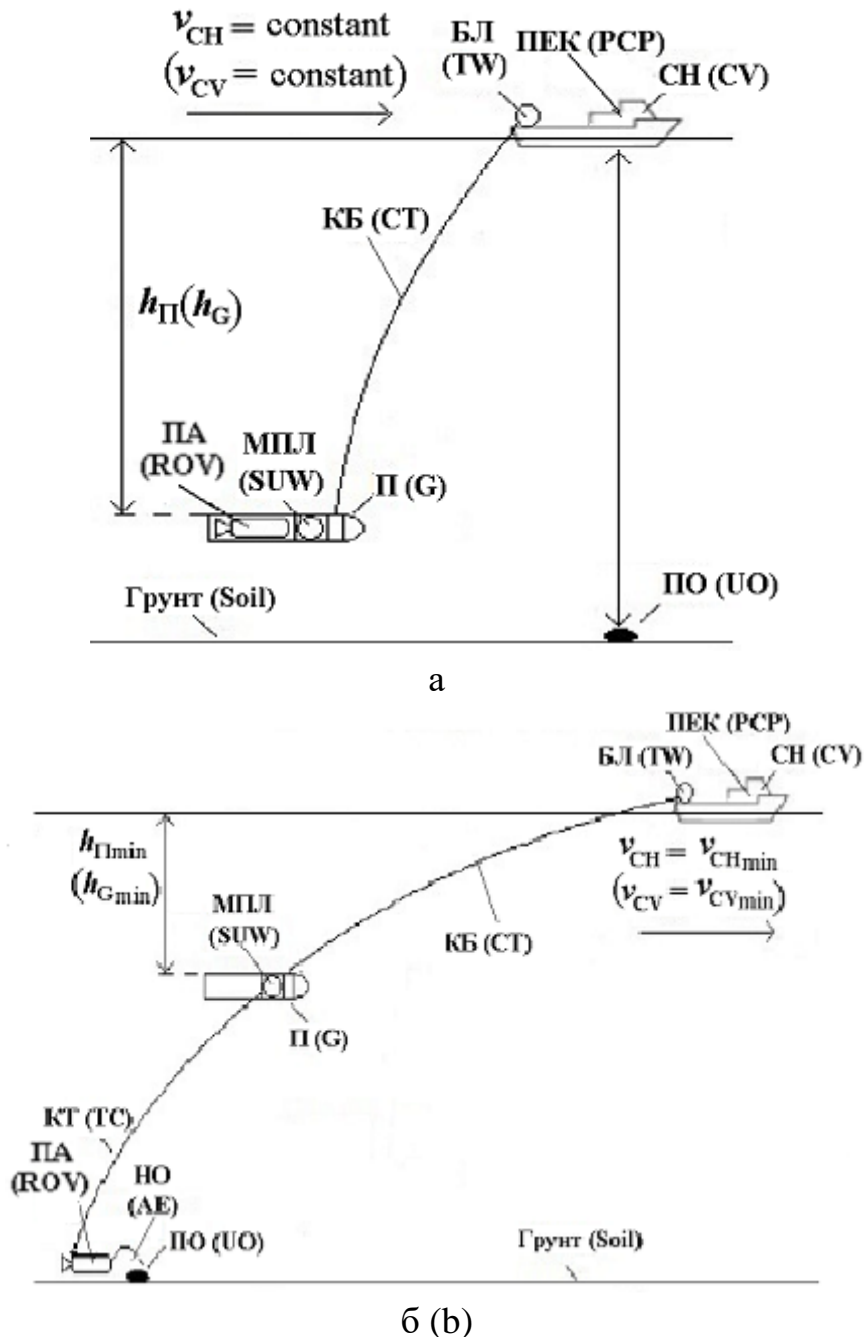


Рисунок 5 – Просторове положення системи «СН – ПСНО» при комбінованому застосуванні ПСНО: а – момент виявлення ПО пошуковою апаратурою СН; б – кінцеве положення системи при повному попущенні КБ і КТ

Figure 5 – Spatial position of the "CV-USPEC" system with the combined USPEC application: a – the moment of UO detection by the CV search equipment; b – the final position of the system with a complete (at full) weakening of CT и TC

дистанційного випуску ПА з корпусу ГП для допошуку та обстеження ПО;

дистанційного причалювання ПА до ГП після завершення підводної місії;

ROV remote release from the UG hull for search and UO inspection;

ROV remote berthing to the UG after the underwater mission completion;

автоматичної зміни висоти (глибини) ходу ГП для забезпечення максимальної довжини гнучкого тіла «КБ – КТ», необхідної для збільшення тривалості роботи ПА.

Розглянемо останню функцію більш детально.

Очевидно, що автоматичне керування глибиною ходу ГП необхідно організовувати, виходячи з одночасного виконання двох задач – автоматичного керування диферентом ГП та автоматичного керування глибиною ГП.

Нижче наведено основні науково-технічні рішення цих задач з позицій синтезу слідкувальної системи автоматичного керування глибиною ГП.

UG stroke height (depth) automatic change of to provide the maximum length of the flexible body "CT – TC" necessary to increase the ROV operation duration.

Consider the last function in more detail.

Obviously, the automatic control of the UG depth stroke should be organized on the basis of the simultaneous execution of two tasks – automatic pitch control and automatic depth control of the UG.

Below are the main scientific and technical solutions to these problems from the positions of synthesis of the tracking system UG of automatic depth control.

4 РОЗРОБКА СЛІДКУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГЛИБИНОЮ ГП

4 DEVELOPMENT OF A TRACKING SYSTEM FOR UG AUTOMATIC DEPTH CONTROL

4.1 Особливості слідкувальної САК глибиною гаража-планера

При довжині КТ 100 м та скиданні СН своєї швидкості до 1 м/с ПА отримує біля 100 с для виконання своєї задачі.

Результати моделювання (планер керувався в ручному режимі) показують, що спливання планера дає змогу виграти для ПА додаткові 15-20 с. При цьому достатньо забезпечити похибку керування глибиною $e_y \leq 1,0..1,5$ м. Подальше підвищення точності не дає суттєвих приростів часу перебування ПА біля ПО.

4.2 Структура слідкувальної САК глибиною ГП

В [18] запропоновано САК глибиною буксированого підводного апарата (БПА), побудовану на основі принципів підпорядкованого керування, з двома послідовно з'єднаними регуляторами диферента та глибини. Таку САК можна застосовувати для забезпечення руху ГП на заданій глибині при реалізації режиму пошуку підводних об'єктів (ПО). Але при реалізації режимів допошуку та ідентифікації ПО бортовими приладами ПА за схемою «все за одне занурення» [17, 19] планеру необхідно спливати на певну задалегідь обраховану глибину для забезпечення максимально

4.1 Features of glider garage depth tracking ACS

With a TC length of 100 m and a CV dropping of its speed to 1 m/s, the ROV gets close to 100 s to complete its task.

The simulation results (the glider was guided in manual mode) show that the glider ascent gives the opportunity to gain an additional 15-20 seconds for the ROV. In this case, it is sufficient to ensure the depth control error $e_y \leq 1,0..1,5$ m. Further increase of accuracy does not provide significant increases in the time spent by the ROV close to UO.

4.2 Structure of UG depth tracking ACS

In [18], an ACS was proposed for the depth of a towed underwater vehicle (TUV) constructed on the basis of subordinate control principles, with two successively connected pitch and depth controllers. Such ACS can be used to ensure the UG motion at a given depth when implementing the search mode of underwater objects (UO). However, when implementing the UO search and identification modes by the ROV onboard devices according to the “all-in-one dive” scheme [17, 19], the glider needs to float to a certain predetermined depth to ensure the maximum possible ROV stay time near UO with increased

можливого часу перебування ПА біля ПО при збільшені відстані між ПА та СН. Глибина, на яку повинен спливати планер, залежить від чинників, які динамічно змінюються.

Попередній аналіз показує, що такими чинниками є координати розташування судна-носія (СН) $P_{СН}$, ПА $P_{ПА}$ та відстань по горизонтальній осі між СН та планером – складова $x_{П}$ координат ГП $P_{П}$. У зв'язку з цим до блоку автоматичного керування САК БПА (див. рис. 8) пропонується додати блок «задавач глибини» (рис. 6).

spacing between ROV and CV. The depth to which the glider should float depends on factors that change dynamically.

Preliminary analysis shows that such factors are position coordinates of the carrier vessel (CV) P_{CV} , ROV P_{ROV} and the distance along the horizontal axis between the CV and the glider is the composite coordinate x_G of the UG P_G . In this connection, in the automatic control unit of the ACS TUV (see Figure 8) it is suggested to add a "depth selector" block (Fig. 6).

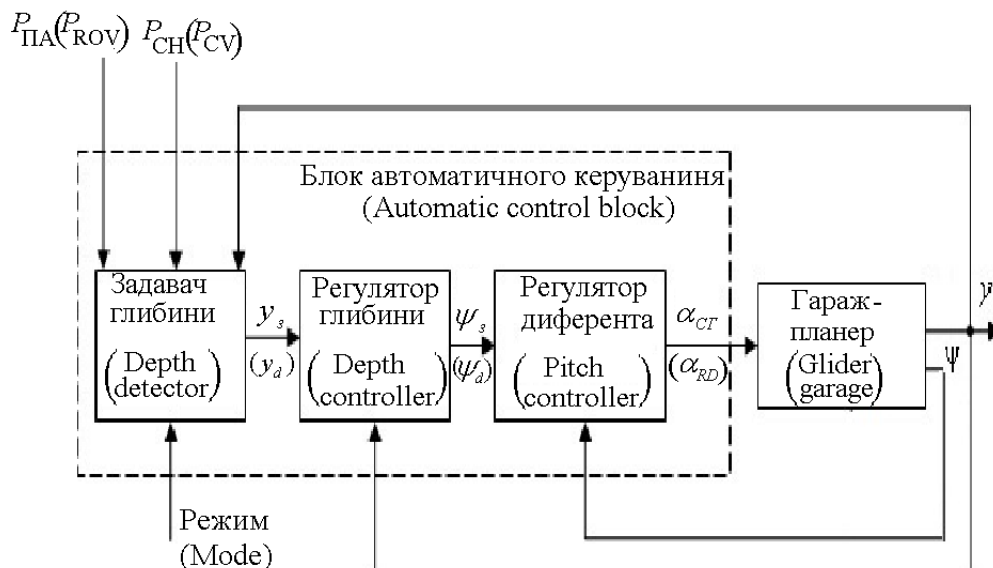


Рисунок 6 – Структура слідкувальної САК глибиною гаража-планера
Figure 6 – Structure of the glider garage depth tracking ACS

При русі в режимі пошуку ПО задавач глибини генерує константне значення заданої глибини ГП y_3 . При відстикуванні ПА (в режимах допошуку та ідентифікації ПО) задавач глибини розраховує необхідну глибину ГП y_3 . Для того, щоб забезпечити максимально можливий час перебування ПА біля ПО при русі СН планер має розташовуватись на

During motion in the UO search mode, the depth selector generates a constant value of the desired UG depth y_d . When disassembling ROV (in the UO search and identification modes) depth selector calculates the required UG depth y_d . In order to ensure the maximum possible time of the ROV near the UO when driving the CV, the glider must be located on a segment that connects the

відрізку, який з'єднує точки P_{CH} та $P_{ПА}$.

В плоскій постановці величину уз можна визначити на основі рівняння прямої, заданої по двох точках:

$$y_3 = \frac{(x_{ГП} - x_{CH})(y_{ПА} - y_{CH})}{(x_{ПА} - x_{CH})} + y_{CH}; \quad (9)$$

де $\{x_{CH}, y_{CH}\}$ – координати точки P_{CH} , $\{x_{ПА}, y_{ПА}\}$ – координати точки $P_{ПА}$, $x_{ГП}$ – поточна координата ГП за віссю абсцис.

Регулятор глибини, запропонований в [21], працює з постійною часу $T_y = 3$ с. Попередні дослідження САК показали, що для забезпечення похибки керування глибиною $e_y \leq 1,5$ м в слідкувальному режимі необхідно задавати T_y не більше 0,5..1,0 с. Регулятор диференту працює на основі принципу керування за приростами [22] і має в своєму складі першу та другу похідну керованої величини – диферента БПА ψ . Наявність першої та другої похідних ψ обмежує його застосування в реальних системах, а також зумовлює появу двох постійних часу регулятора: T_ω та T_ψ , які відповідають за швидкість усунення похибок керування, відповідно, кутовою швидкістю та диферентом БПА. При застосуванні такого регулятора для ГП T_ω має бути значно менша за T_ψ та, у свою чергу, T_ψ має бути значно менша за T_y .

В САК [18] постійні часу мають такі значення: $T_\omega = 0,1$ с, $T_\psi = 1$ с, $T_y = 3$ с. Для того, щоб зменшити T_y , необхідно зменшити T_ψ та, як наслідок, зменшити

points of the P_{CV} and P_{ROV} .

In the flat formulation, the quantity uz, can be determined on the basis of the equation of a straight line given by two points:

$$y_d = \frac{(x_{UG} - x_{CV})(y_{ROV} - y_{CV})}{(x_{ROV} - x_{CV})} + y_{CV}; \quad (9)$$

where $\{x_{ROV}, y_{ROV}\}$ are the coordinates of the point P_{CV} , $\{x_{ROV}, y_{ROV}\}$ – are the point coordinates P_{ROV} , x_{UG} – is the UG current coordinate for the abscissa (on the horizontal axis).

The depth controller, proposed in [21], works with a constant time $T_y = 3$ s. Previous ACS researches showed that in order to ensure the depth control error $e_y \leq 1.5$ m in the tracking mode, it is necessary to set T_y not more than 0.5..1.0 s. The pitch controller operates on the basis of the increment control principle [22] and incorporates the first and second derivatives of the controlled variable — the TUV pitch ψ . The presence of the first and second derivatives ψ limits its application in real systems, and also leads to the appearance of two controller time constants: T_ω and T_ψ , which are responsible for the rate at which control errors are eliminated, respectively, by the angular velocity and the TUV pitch. When using such a controller for a UG T_ω should be significantly less than T_ψ and, in turn, T_ψ should be significantly less than T_y .

In ACS [18], the time constants have the following values: $T_\omega = 0,1$ s, $T_\psi = 1$ s, $T_y = 3$ s. In order to reduce T_y , it is

T_{ω} . Складність підвищення швидкодії такої САК полягає у тому, що зменшення величини T_{ω} призведе до нестабільної роботи регулятора, оскільки в такому випадку величина T_{ω} наблизиться до періоду опитування сенсорів кінематичних параметрів ГП, який складає 0,005..0,01 с. В такому випадку вираховування навіть першої похідної по виміряному диференту втрачає сенс.

Крім того, синтез регулятора глибини необхідно буде виконувати окремо, оскільки конфігурація та параметри ГП відрізняються від аналогічних характеристик БПА з [21].

У зв'язку з цим у подальшому розв'язуються такі задачі:

- налаштування регулятора глибини ГП, яке полягає в синтезі інверсної моделі вертикального руху ГП з заданими габаритними розмірами, параметрами несучої поверхні і стерна глибини та іншими характеристиками; похибка керування глибиною має складати $e_y \leq 1,5$ м;

- синтез регулятора диференту ГП з постійною часу $T_{\omega} \leq 0,2$ с – комп'ютерне моделювання показує, що такого значення буде достатньо для $T_y \leq 1,0$ с.

4.3 Аналіз ГП як об'єкта керування та розробка математичної моделі його обертового руху.

Математична модель руху ГП в діаметральній площині СН описується складною нелінійною системою диференціальних і інтегральних рівнянь. Проте в практиці дослідницького проектування САК такими об'єктами

necessary to reduce T_{ψ} and, consequently, reduce T_{ω} . The difficulty in increasing the operation speed of such ACS is that a decrease in the value of T_{ω} will lead to the instability of the controller, since in this case the value of T_{ω} will approach the sensors polling period of UG kinematic parameters, which is 0.005..0.01s. In this case, the deduction of even the first derivative by the measured pitch loses meaning.

In addition, the depth controller synthesis will need to be performed separately, since the configuration and parameters of the UG differ from the similar TUV characteristics [21].

In this regard, the following tasks are solved in the future:

- adjustment of the UG depth controller, which consists in the synthesis of the inverse model of the UG vertical motion with given overall dimensions, parameters of the bearing surface and the rudder depth and other characteristics; the depth control error should be $e_y \leq 1,5$ m;

- the pitch controller synthesis with time constant $T_{\omega} \leq 0,2$ s – computer simulation shows that such value will be sufficient for $T_y \leq 1,0$ s.

4.3 Analysis of UG as a control object and the mathematical model development of its rotational motion.

The semiconductor motion mathematical model in the CV diametric plane is described by a complex nonlinear differential system and integral equations. However, in the practice of ACSs research design, such objects often

часто використовують їх спрощені математичні описи, більш зручні для синтезу і порівняння ефективності різноманітних регуляторів [9, 20]. В [18] запропоновано математичну модель вертикального руху БПА:

$$\left. \begin{aligned} J_K \frac{d\omega_K}{dt} &= \alpha_{CG} k_{CG} - M_{II}(\omega_K) + M_{ЗВ}; \\ k_1 \frac{dy}{dt} &= \psi - k_2 y, \end{aligned} \right\} (10)$$

де J_K – момент інерції корпусу БПА; ω_K – кутова швидкість обертання корпусу БПА навколо його поперечної зв'язаної осі; α_{CG} – керуючий вплив – кут повороту стерна глибини (СГ); k_{CG} – нелінійний коефіцієнт моделі обертального руху БПА; M_{II} – гідродинамічний момент опору обертання корпусу БПА; $M_{ЗВ}$ – момент збурюючих впливів, що діють на корпус БПА; ψ – диферент БПА; y – вертикальна координата БПА; $k_{1,2}$ – нелінійні коефіцієнти моделі вертикального руху БПА.

Регулятор диферента будується на основі першого рівняння системи (10), регулятор глибини будується на основі другого рівняння системи (10). Спрощення першого рівняння дасть змогу позбавитись похідних керованої величини та застосувати інші підходи до синтезу регулятора диферента.

Дослідимо обертальний рух ГП. Для цього будемо моделювати його обтікання потоком з постійною швидкістю та фіксувати його реакцію на зміну керуючої величини α_{CG} . Результати моделювання при $V = 0,25$,

use their simplified mathematical descriptions, more convenient for the synthesis and comparison of various controllers' effectiveness [9, 20]. In [18], the TUV vertical motion mathematical model was proposed:

$$\left. \begin{aligned} J_H \frac{d\omega_H}{dt} &= \alpha_{RD} k_{RD} - M_R(\omega_H) + M_{DI}; \\ k_1 \frac{dy}{dt} &= \psi - k_2 y, \end{aligned} \right\} (10)$$

where J_H is the TUV hull moment of inertia; ω_H is the TUV hull angular velocity around its transverse coupled axis; α_{RD} – control action – angle of rotation of the rudder depth (RD); k_{RD} – TUV nonlinear coefficient of the of rotational motion model; M_R – TUV hull hydrodynamic moment of the rotational resistance; M_{DI} – the moment of disturbing influences acting on the TUV hull; ψ – TUV pitch; y – is the vertical coordinate of TUV; $k_{1,2}$ – nonlinear coefficients of TUV vertical motion model.

The pitch controller is based on the first equation of the system (10), the depth controller is built on the basis of the second equation of the system (10). Simplification of the first equation will allow get rid of the derivatives of the controlled variable and apply other approaches to the synthesis of the pitch controller.

We investigate the UG rotational motion. To do this, we simulate its flow stream with a constant rate and fix its response to a change in the control value α_{RD} . The simulation results at $V = 0,25, 0,5$,

0,5, 1,0 та 2,0 м/с та $\alpha_{CF} = \pm 10^\circ$ наведені на рис. 7.

1,0 and 2,0 m/s and $\alpha_{RD} = \pm 10^\circ$ are shown in Fig. 7.

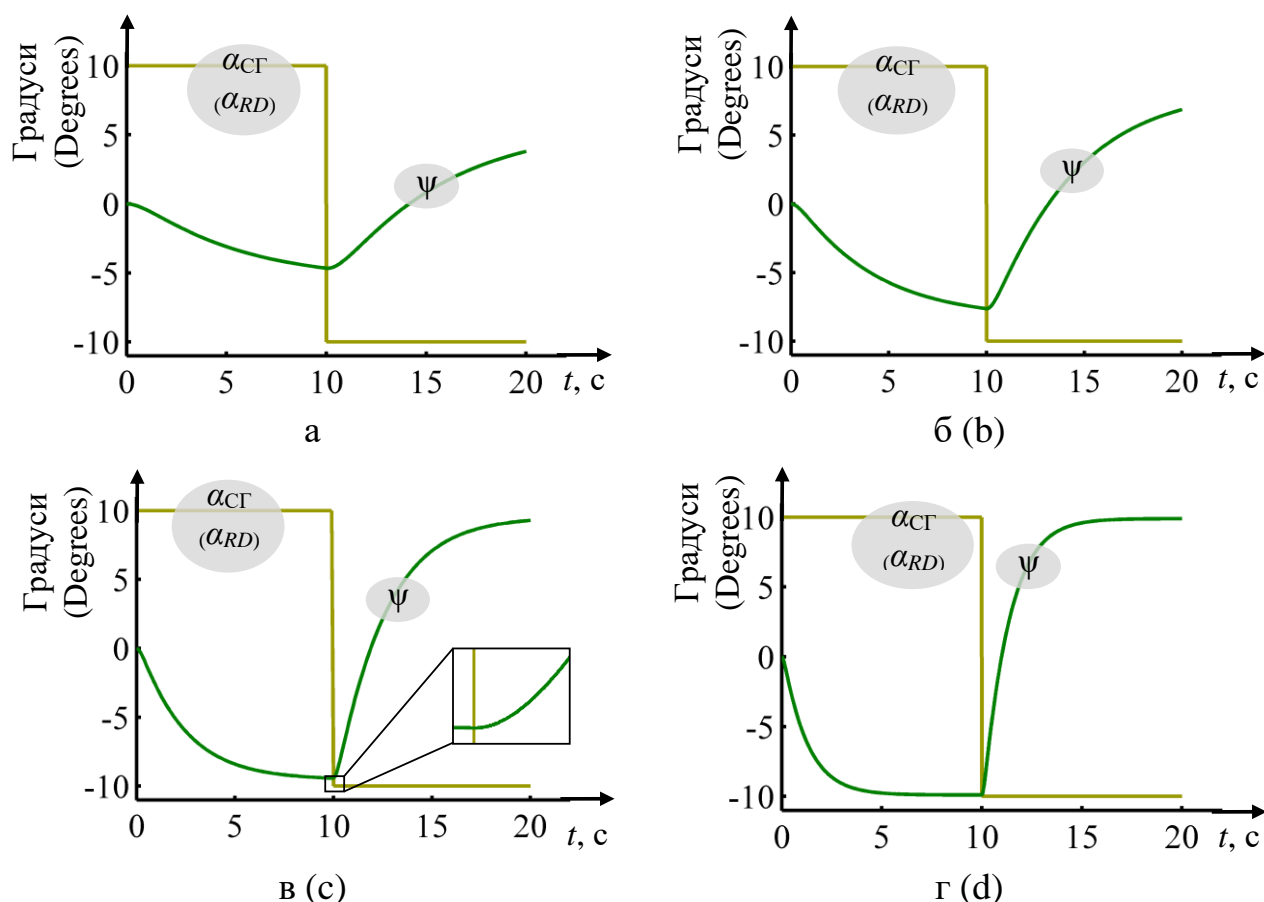


Рисунок 7 – Динаміка перехідних процесів при різних керуючих впливах та різних швидкостях набігаючого потоку води: а – при $V = 0,25$ м/с, б – при $V = 0,5$ м/с, в – при $V = 1,0$ м/с, г – при $V = 2,0$ м/с

Figure 7 – Dynamics of the transient processes at different control actions and different speeds of the oncoming flow of water: a – when $V = 0.25$ m/s, b – when $V = 0.5$ m/s, c – when $V = 1.0$ m/s, d – when $V = 2.0$ m/s

Результати моделювання показують, що обертовий рух корпусу ГП можна описати диференціальним рівнянням, при цьому порядок рівняння можна обрати першим, оскільки інерційність вищих порядків корпусу ГП (див. виноску на рис. 7,в) незрівнянно мала у порівнянні з інерційністю першого порядку:

The simulation results show that the UG hull rotational motion can be described by a differential equation, and the order of the equation can be chosen as in the first, since the inertia of higher orders of the UG hull (see footnote in Fig. 7,c) is incomparably small compared to the first-order inertia:

$$k_1 \frac{d\psi}{dt} = \alpha_{CG} - k_2 \psi, \quad (11)$$

де $k_{1,2}$ – коефіцієнти моделі.

Дійсно, таке представлення не суперечить фізиці процесу, оскільки при встановленні деякого значення α_{CG} при нульовому диференті його вплив на корпус ГП буде максимальним, далі диферент буде збільшуватись, а кут атаки СГ зменшуватись. Це пояснюється тим, що величина α_{CG} представляє собою кут повороту СГ відносно корпусу ГП, при зміні планером диференту СГ обертається разом з ним, тому керуючий вплив α_{CG} залишається незмінним, а кут атаки СГ – кут, під яким потік набігає на СГ – змінюється разом з диферентом.

Серія комп'ютерних експериментів з різними керуючими впливами та при різних величинах швидкості обтікання потоком води показала, що для досліджуваних діапазонів швидкостей $V = 0,1..5,0$ м/с та керуючих впливів $\alpha_{CG} = -20..+20^\circ$ отримане рівняння обертового руху ГП справедливе. При швидкостях $V < 0,1$ планер вже майже не реагує на керуючий вплив, оскільки момент, створюваний стерном глибини, не може подолати відновлювальний момент блоку плавучості ГП. При цьому було помічено, що швидкість набігаючого потоку води впливає на коефіцієнт підсилення та постійну часу моделі, тобто, як наслідок, на коефіцієнти k_1 та k_2 .

З урахуванням отриманої моделі обертового руху ГП математичну

$$k_1 \frac{d\psi}{dt} = \alpha_{RD} - k_2 \psi, \quad (11)$$

where $k_{1,2}$ are the model coefficients.

Indeed, such representation is not contradictory to the physics of the process, since if a certain value of α_{RD} is set at zero pitch, its effect on the UG hull will be maximal, further the pitch will increase, and the angle of attack of the RD will decrease. This is explained by the fact that the value α_{RD} is the RD angle of rotation relative to the UG hull, during the changes by the glider pitch, the RD rotates with it, because the control action (response) α_{RD} remains unchanged, and the angle of attack of the RD – the angle at which the stream flows on the RD – changes together with the pitch.

A series of computer simulations with various control actions and at various values of the flow velocity around the water flow showed that for the studied speed ranges $V = 0.1 \dots 5.5$ m/s and control actions $\alpha_{RD} < C = -20 \dots + 20^\circ$ the resulting equation of the UG rotary motion is valid. At speeds of $V < 0,1$, the glider is almost no longer responsive to the controlling influence, since the moment created by the depth wheel (rudder) cannot overcome the restoring moment of the UG buoyancy block. With that, it was noted that the speed (velocity) of the flowing water stream influences the gain and the constant time of the model, that is, as a consequence, the coefficients k_1 and k_2 .

Taking into account the obtained UG rotational motion model, a

модель його вертикального руху з величиною α_{CG} в ролі керуючого впливу можна представити системою двох диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\left. \begin{aligned} k_{\psi 1} \frac{d\psi}{dt} &= \alpha_{CG} - k_{\psi 2} \psi; \\ k_{y1} \frac{dy}{dt} &= \psi - k_{y2} y, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де $k_{\psi 1}$ та $k_{\psi 2}$ – коефіцієнти моделі обертового руху ГП, k_{y1} , та k_{y2} – коефіцієнти моделі руху ГП за вертикальною координатою.

Таке представлення дає змогу для синтезу регулятора диференту застосувати такий самий підхід, який було застосовано для синтезу регулятора глибини – використовувати інверсну модель обертового руху ГП для автоматичного керування його диферентом.

mathematical model of its vertical motion with the value α_{RD} as a controlling influence can be represented by a system of two differential equations of the first order:

$$\left. \begin{aligned} k_{\psi 1} \frac{d\psi}{dt} &= \alpha_{RD} - k_{\psi 2} \psi; \\ k_{y1} \frac{dy}{dt} &= \psi - k_{y2} y, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

where $k_{\psi 1}$, and $k_{\psi 2}$ are the coefficients of UG rotational motion model, k_{y1} , and k_{y2} are the coefficients of UG motion model on the vertical coordinate.

This representation allows, for the pitch controller synthesis to use the same approach that was used for the syntheses of the depth controller – to use the inverse model of the UG rotational motion for its pitch automatic control.

5 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДИФЕРЕНТА ГП

5 UG PITCH CONTROLLER SYNTHESIS

Для керування диферентом ГП пропонується застосовувати принцип керування на основі інверсної моделі об'єкта:

$$\alpha_{CG} = f(\omega_{K3}, V_K, \psi_V), \quad (13)$$

де ω_{K3} – задане (бажане) значення обертової швидкості ГП, ψ_V – кут нахилу ГП по відношенню до вектора швидкості ГП відносно потоку води \vec{V}_K , V_K – швидкість ГП відносно потоку води (модуль вектора \vec{V}_K).

Величина ψ_V в плоскій постановці задачі визначається як кут між вектором швидкості ГП відносно потоку води \vec{V}_K та віссю абсцис $O_a x_a$ зв'язаної з планером системи координат (рис. 8).

In order to control the UG pitch, it is proposed to apply the control principle based on the inverse object model:

$$\alpha_{RD} = f(\omega_{Kd}, V_K, \psi_V), \quad (13)$$

where ω_{Kd} is the desired value of the UG rotating speed, ψ_V is the UG inclination angle with respect to the UG velocity vector in relation to the water flow \vec{V}_K , V_K is the UG velocity relative to the water flow (vector module \vec{V}_K).

The size ψ_V , in a plain problem statement is defined as the angle between the UG velocity vector \vec{V}_K of the water flow and the abscissa axis $O_a x_a$ associated with the glider coordinate system (Fig.8).

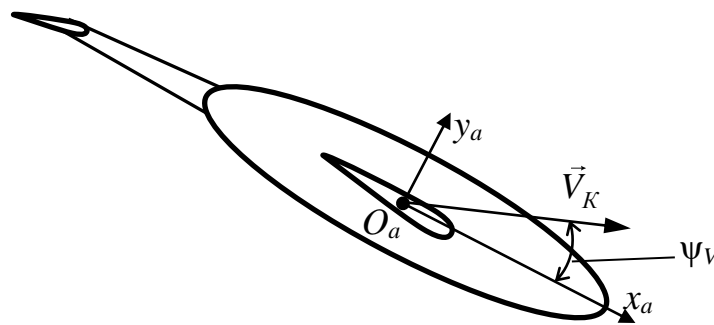


Рисунок 8 – Кут ψ_V

Figure 8 – Angle ψ_V

Визначити ψ_V можна за формулою:

$$\psi_V = \psi - \arcsin\left(\frac{V_{Ky}}{|\vec{V}_K|}\right),$$

Define ψ_V by the formula:

$$\psi_V = \psi - \arcsin\left(\frac{V_{Ky}}{|\vec{V}_K|}\right),$$

де V_{Ky} – проекція вектора \vec{V}_K на вісь ординат базової системи координат.

Величина ω_{K3} визначається на основі похибки керування нахилом ГП $e_{\psi V}$ відносно вектора \vec{V}_K :

$$\omega_{K3} = \frac{e_{\psi V}}{T_{\psi}} = \frac{\psi_{V3} - \psi_V}{T_{\psi}}.$$

Заданий кут нахилу ГП щодо вектора його руху відносно води визначається аналогічно величині ψ_V :

$$\psi_{V3} = \psi_3 - \arcsin\left(\frac{V_{Ky}}{|\vec{V}_K|}\right).$$

Нескладно помітити, що похибка керування диферентом $e_{\psi} = \psi_3 - \psi$ дорівнює похибці керування нахилом ГП $e_{\psi V}$, тому величину ω_{K3} визначатимемо з рівняння

$$\omega_{K3} = \frac{e_{\psi}}{T_{\psi}} = \frac{\psi_3 - \psi}{T_{\psi}}. \quad (14)$$

На основі математичної моделі обертового руху ГП отримаємо його інверсну модель, яка в сукупності з (6) представлятиме закон керування диферентом ГП:

$$\alpha_{CT} = k_{\psi 1} \omega_{K3} + k_{\psi 2} \psi_V. \quad (15)$$

Тепер необхідно виконати параметричну ідентифікацію моделі обертового руху ГП – визначити коефіцієнти $k_{\psi 1}$ та $k_{\psi 2}$, які, за результатами попереднього аналізу (див. рис. 7) залежать від швидкості

where V_{Ky} is the vector projection \vec{V}_K on the base axis (reference) coordinate system.

The value of ω_{Kd} is determined on the basis of the UG inclination control error $e_{\psi V}$ relative to the vector \vec{V}_K :

$$\omega_{Kd} = \frac{e_{\psi V}}{T_{\psi}} = \frac{\psi_{Vd} - \psi_V}{T_{\psi}}.$$

The specified UG inclination angle with respect to its motion vector relative to the water is determined in the same way as the value of ψ_V :

$$\psi_{Vd} = \psi_d - \arcsin\left(\frac{V_{Ky}}{|\vec{V}_K|}\right).$$

It is easy to see that the differential error control $e_{\psi} = \psi_d - \psi$ is equal to the UG slope control error $e_{\psi V}$, so the value of ω_{Kd} will be determined from the equation:

$$\omega_{Kd} = \frac{e_{\psi}}{T_{\psi}} = \frac{\psi_d - \psi}{T_{\psi}}. \quad (14)$$

Based on the UG rotary motion mathematical model, we obtain its inverse model, which together with (6) will represent the UG pitch law:

$$\alpha_{RD} = k_{\psi 1} \omega_{Kd} + k_{\psi 2} \psi_V. \quad (15)$$

Now we need to perform parametric identification of the UG rotary motion model – to determine the coefficients $k_{\psi 1}$ and $k_{\psi 2}$, which, according to the results of the previous analysis (see Figure 7), depend on the UG velocity in

руху ГП відносно потоку та можуть мати нелінійний характер.

Проведемо комп'ютерний експеримент – моделюватимемо обертний рух ГП при різних швидкостях його руху в потоці та зберігатимемо дані, що характеризують динаміку перехідного процесу: α_{CG} , ψ_V та ω_K .

Метою моделювання є отримання ω_K для кожної комбінації значень $\alpha_{CG} \in [-10^\circ, 10^\circ]$, $\psi_V \in [-10^\circ, 10^\circ]$, $V_K \in [0, 1 \text{ м/с}, 5, 0 \text{ м/с}]$, та визначення коефіцієнтів $k_{\psi 1}$ та $k_{\psi 2}$ на їх основі. Для того, щоб отримати такі залежності, слід виходити з того, що диферент ГП ψ_V має два граничних значення: ψ_{\max} при $\alpha_{CG} = -10^\circ$ та ψ_{\min} при $\alpha_{CG} = 10^\circ$. Весь діапазон залежності $\omega_K = f(\psi_V)$ для деякого α_{CG} можна отримати, якщо задавати досліджуване значення α_{CG} з граничних положень ГП ψ_{\max} і ψ_{\min} та чекати на завершення перехідного процесу. Тому моделювання виконувалось в такій послідовності:

1) Встановлення досліджуваного значення швидкості руху ГП V_K .

2) Вибір досліджуваного значення α_{CG} .

3) Встановлення $\alpha_{CG} = 10^\circ$ та очікування завершення перехідного процесу (диферент прийме значення ψ_{\min}).

4) Встановлення досліджуваного значення α_{CG} та очікування завершення перехідного процесу з запам'ятовуванням ψ_V та ω_K .

5) Встановлення $\alpha_{CG} = -10^\circ$ та очікування завершення перехідного процесу (диферент прийме значення ψ_{\max}).

relation to the flow and may have nonlinear character.

We will conduct a computer experiment – we simulate the UG rotary motion at different velocities of its flow in the stream and store the data characterizing the dynamics of the transition process: α_{RD} , ψ_V and ω_K .

The purpose of the simulation is to obtain ω_K for each combination of values $\alpha_{RD} \in [-10^\circ, 10^\circ]$, $\psi_V \in [-10^\circ, 10^\circ]$, $V_K \in [0, 1 \text{ m/s}, 5, 0 \text{ m/s}]$, and determine the coefficients $k_{\psi 1}$ and $k_{\psi 2}$ on this basis. In order to obtain such dependences, one should proceed from the assumption that the UG pitch ψ_V has two limit values: ψ_{\max} when $\alpha_{RD} = -10^\circ$ and ψ_{\min} when $\alpha_{RD} = 10^\circ$. The entire range dependence $\omega_K = f(\psi_V)$ for some α_{RD} can be obtained by setting the investigated value of α_{RD} from the UG boundary positions ψ_{\max} and ψ_{\min} and wait for the completion of the transient process. Therefore, the simulation was performed in the following sequence:

1) Establishing the investigated value of the UG velocity V_K .

2) The choice of the investigated value α_{RD} .

3) Setting $\alpha_{RD} = 10^\circ$ and waiting for completion of the transient process (pitch takes the value ψ_{\min}).

4) Establishing the investigated value α_{RD} and waiting for the completion of the transient process with memorization (storage) ψ_V and ω_K .

5) Setting $\alpha_{RD} = -10^\circ$ and waiting for the completion of the transient process (the diver will accept the value ψ_{\max}).

6) Встановлення досліджуваного значення α_{CG} та очікування завершення перехідного процесу з запам'ятовуванням ψ_V та ω_K .

7) Якщо не всі α_{CG} було досліджено, то перехід до пункту 2, інакше – до пункту 8.

8) Якщо не всі V_K було досліджено, то перехід до пункту 1, інакше – завершення моделювання.

Динаміку перехідних процесів при $V_K = 1$ м/с та досліджуваних $\alpha_{CG} = 0^\circ, 5^\circ, -5^\circ, 9,9^\circ, -9,9^\circ$ наведено на рис. 9.

6) Establishing the investigated value α_{RD} and waiting for completion of the transition process with memorization ψ_V and ω_K .

7) If not all α_{RD} have been investigated, then the transition to point 2, otherwise, to point 8.

8) If not all V_K have been investigated, then the transition to point 1, otherwise – completion of the simulation.

The dynamics of transient processes at $V_K = 1$ m/s and the investigated $\alpha_{RD} = 0^\circ, 5^\circ, -5^\circ, 9,9^\circ, -9,9^\circ$ are shown in Fig. 9.

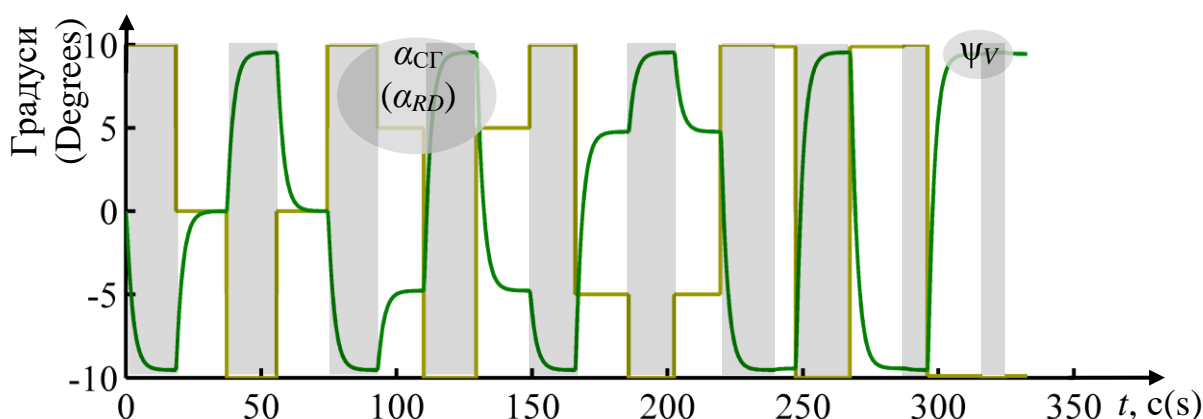


Рисунок 9 – Динаміка перехідних процесів при різних керуючих впливах

Figure 9 – Dynamics of transient processes with different control actions

Затемнені області на рисунку відповідають пунктам 3 та 5 (переведення ГП в положення ψ_{\min} або ψ_{\max}) алгоритму моделювання, решта областей відповідають пункту 6 алгоритму (отримання та зберігання даних).

На рис. 10 побудовано залежності $\omega_K = f(\psi_V)$ при різних значеннях α_{CG} та $V_K = 1$ м/с.

На рисунку кожен ліній $\omega_K = f(\psi_V)$ підписано значенням величини α_{CG} , при якому її було отримано.

The shaded areas in the figure correspond to paragraphs 3 and 5 (transfer of UG to ψ_{\min} or ψ_{\max} position) of the simulation algorithm; the remaining areas correspond to paragraph 6 of the algorithm (data acquisition and storage).

In fig. 10 the dependences $\omega_K = f(\psi_V)$ are constructed at different values of α_{RD} and $V_K = 1$ m/s.

In the figure, each line $\omega_K = f(\psi_V)$ is signed by the signed α_{RD} magnitude value, at which it was obtained.

Як бачимо, при $V_K = 1$ м/с залежність $\alpha_{CG} = f(\omega_K, \psi_V)$ має у цілому лінійний характер.

Аналогічна картина спостерігається при інших значеннях V_K . Лінійність обумовлена тим, що кут атаки СГ не виходить за межі $\pm 10^\circ$ (за виключенням коротких періодів при ступінчастій зміні керуючого впливу) і в цих межах підйомна сила СГ (профіль НАСА0012) залежить від кута атаки майже лінійно.

As we can see, with $V_K = 1$ m/s, the dependence $\alpha_{RD} = f(\omega_K, \psi_V)$ has a generally linear character.

A similar picture is observed with other values of V_K . The linearity is due to the fact that the UG angle of attack does not exceed $\pm 10^\circ$ (except for short periods with a step change of control influence), and within these limits, the UG lifting force (profile NACA0012) depends on the angle of attack almost linearly.

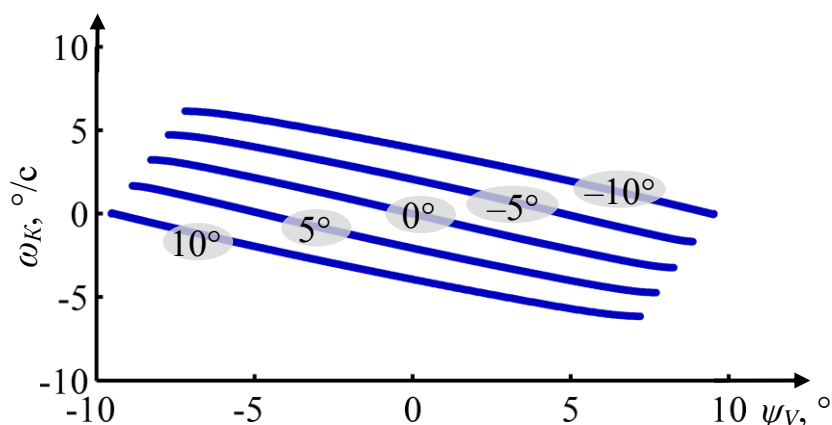


Рисунок 10 – Залежності кутової швидкості ГП від диференту при різних керуючих впливах

Figure 10 – UG angular velocity dependence on the pitch for various control actions

Лінійність залежності (7) при $V_K = \text{const}$ дає змогу методами апроксимації отримати коефіцієнти $k_{\psi 1}$ та $k_{\psi 2}$. Застосуємо метод найменших квадратів та знайдемо коефіцієнти при $V_K = 1$ м/с: $k_{\psi 1} = -2.5350$, та $k_{\psi 2} = -1.0436$.

Аналогічним чином знайдемо коефіцієнти моделі обертового руху ГП для інших значень його швидкості (табл. 1).

The linearity of the relation (7) with $V_K = \text{const}$ allows the methods of approximation to obtain the coefficients $k_{\psi 1}$ and $k_{\psi 2}$. Apply the least squares method and find the coefficients at $V_K = 1$ m/s: $k_{\psi 1} = -2.5350$, and $k_{\psi 2} = -1.0436$

Similarly, we find the coefficients of the UG rotary motion model for other values of its velocity (Table 1).

Таблиця 1 – коефіцієнти моделі обертового руху ГП

Table 1 – coefficients of UG rotary motion model

$V_K, \text{ m/s}$	$k_{\psi 1}, \text{ c}$	$k_{\psi 2}$
0,1	-19,3134	-5,7406
0,2	-11,7768	-2,2589
0,3	-8,1822	-1,5595
0,4	-6,2271	-1,313
0,5	-5,018	-1,1973
0,7	-3,6091	-1,0987
1,0	-2,535	-1,0436
2,0	-1,2743	-1,0074
3,0	-0,8451	-1,0007
5,0	-0,5078	-0,9888

На графіках, зображених на рис. 10, побудовано залежності $k_{\psi 1} = f(V_K)$ та $k_{\psi 2} = f(V_K)$.

За візуальною оцінкою отримані залежності схожі на гіперболічні. Для застосування в складі регулятора диференту спробуємо апроксимувати їх методом найменших квадратів. Результат апроксимації, які майже не відрізняється від вхідних табличних даних для обох коефіцієнтів, дає поліном виду

In the graphs shown in Fig. 10, the dependencies $k_{\psi 1} = f(V_K)$ and $k_{\psi 2} = f(V_K)$ are plotted.

By visual assessment, the obtained dependences are similar to hyperbolic. For use as part of the pitch control, we will try to approximate them using the least squares method. The approximation result, which hardly differs from the input table data for both coefficients, gives the polynomial form.

$$k_{\psi} = a_0 + a_1 \frac{1}{V_K} + a_2 \frac{1}{V_K^2}. \quad (16)$$

Для $k_{\psi 1}$ знайдені коефіцієнти полінома дорівнюють:

$$a_0 = 0,08575, a_1 = -2,7499, a_2 = 0,08076.$$

Для $k_{\psi 2}$ знайдені коефіцієнти полінома дорівнюють:

$$a_0 = -0,9783, a_1 = -0,02565, \\ a_2 = -0,0451$$

Порівняння табличних та апроксимованих залежностей наводиться на рис. 12.

For $k_{\psi 1}$, the coefficients of the polynomial are equal to:

$$a_0 = 0,08575, a_1 = -2,7499, a_2 = 0,08076.$$

For $k_{\psi 2}$, the found coefficients of the polynomial are:

$$a_0 = -0,9783, a_1 = -0,02565, \\ a_2 = -0,0451$$

A comparison of tabular and approximated dependencies is given in Fig. 12.

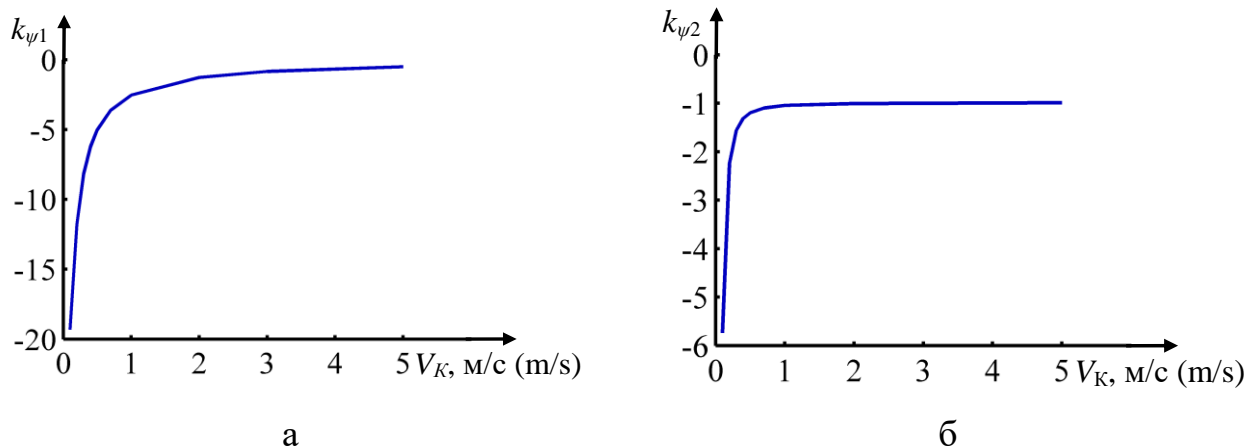


Рисунок 11 – Coefficients $k_{\psi 1}(V_K)$ (а) and $k_{\psi 2}(V_K)$ (б)
 Figure 11 – Coefficients $k_{\psi 1}(V_K)$ (a) and $k_{\psi 2}(V_K)$ (b)

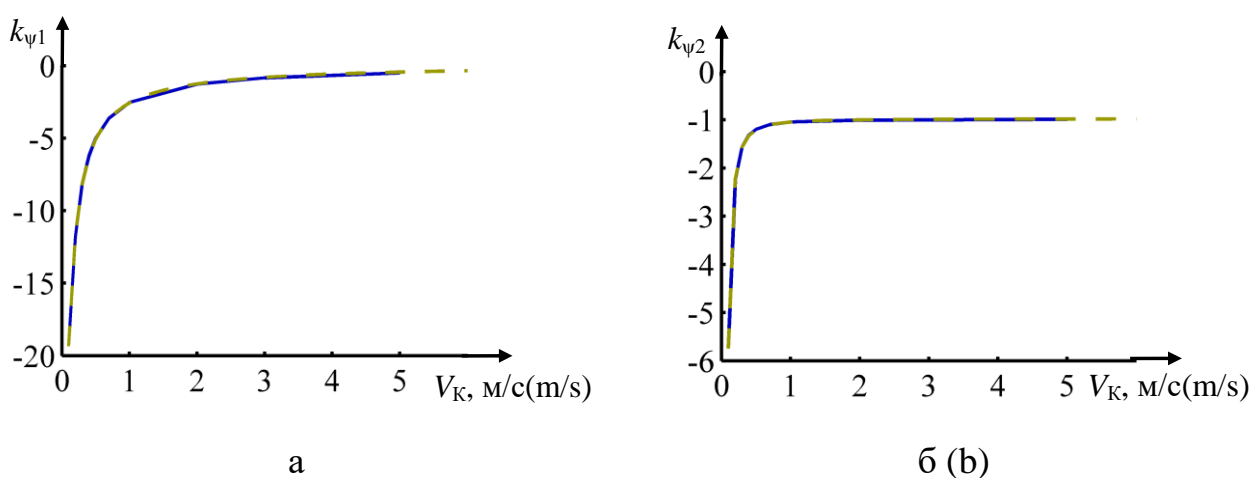


Рисунок 12 – Коефіцієнти $k_{\psi 1}(V_K)$ (а) та $k_{\psi 2}(V_K)$ (б), побудовані за табличними даними (суцільні лінії) та за апроксимованими даними (пунктирні лінії)
 Figure 12 – The coefficients $k_{\psi 1}(V_K)$ (a) and $k_{\psi 2}(V_K)$ (б), are constructed with tabular data (solid lines) and approximated data (dotted lines)

Як бачимо, апроксимовані залежності майже не відрізняються від табличних, що дає змогу застосовувати їх в складі регулятора диферента.

Тестування регулятора диферента ГП виконаємо наступним чином.

Встановимо $T_{\psi} = 0,1$ с та перевіримо роботу регулятора диферента на комп'ютерній моделі ГП.

На рис. 13 представлено результати роботи регулятора при ступінчастій та синусоїдальній зміні

As we can see, approximated dependencies hardly differ from the tabular ones, and this makes it possible to apply them in the composition of the pitch control.

Testing of the UG pitch controller are carried out as follows.

Set $T_{\psi} = 0,1$ s and check the operation of the pitch controller on the UG computer model.

In fig. 13, the results of the controller's operation for stepwise and sinusoidal change of the desired pitch

заданого диференту (швидкість буксирування 5 м/с) (towing speed of 5 m/s) are presented.

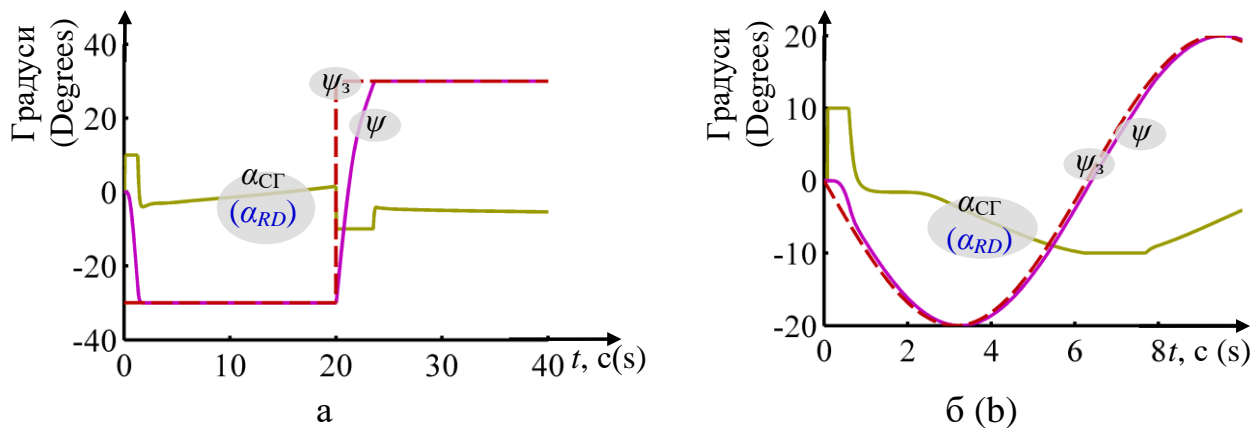


Рисунок 13 – Результати роботи регулятора диферента при ступінчастій (а) та синусоїдальній (б) зміні ψ_3

Figure 13 – The results of the pitch controller's operation for stepwise and sinusoidal (b) change ψ_d

При ступінчастій зміні ψ_3 після виходу регулятора з режиму насичення ($-10^\circ < \alpha_{ст} > 10^\circ$) тривалість перехідного процесу складає 0,1..0,2 с, перерегулювання та статична похибка майже відсутні ($e_{\psi_{ст}} < 0,1^\circ$). При синусоїдальній зміні ψ_3 запізнення складає приблизно 0,1 с, що співпадає з постійною часу регулятора T_ψ . Отримані результати цілком задовільні для задачі регулювання диференту ГП.

With a stepwise change ψ_d after the controller exits saturation mode ($-10^\circ < \alpha_{RD} > 10^\circ$) the transient time is 0.1...0.2 s, the overshoot and static error is almost nonexistent ($e_{\psi_{RD}} < 0,1^\circ$). With sinusoidal change ψ_d , delay is approximately 0.1s, which coincides with the constant time of the controller T_ψ . The obtained results are quite satisfactory for the task of the UG pitch regulation.

6 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ГЛИБИНИ ГП

6 UG DEPTH CONTROLLER SYNTHESIS

Для керування глибиною ГП використаємо інверсну модель його руху по вертикалі:

$$\psi = f(V_{y3}, V_{CH}, y), \quad (17)$$

де V_{y3} – задане (бажане) значення вертикальної швидкості ГП. Величина V_{y3} визначається за формулою

$$V_{y3} = \frac{e_y}{T_y} = \frac{y_3 - y}{T_y}, \quad (18)$$

де e_y – похибка керування за глибиною, y_3 – задане значення вертикальної координати ГП, y – фактичне значення вертикальної координати ГП, T_y – постійна часу регулятора глибини, тобто заданий проміжок часу, за який має буту усунуено похибку e_y .

Для того, щоб отримати інверсну модель ГП в вигляді (17), необхідно виконати моделювання перехідних процесів, вимірюючи V_{yb} для кожної комбінації значень $\psi \in [-40, 50]^\circ$, $V_{CH} \in [1, 5]$ м/с, $y \in [-10, -100]$ м. Верхня межа глибини обмежена значенням -5 м, оскільки при менших глибинах вплив вільної поверхні води вноситиме суттєві збурення в інверсну модель ГП.

З [18] відомо, що інверсну модель ГП можна отримати на основі апроксимації вибірки, отриманої при базовому значенні швидкості

To control the UG depth we use the inverse model of its vertical motion:

$$\psi = f(V_{yd}, V_{CV}, y), \quad (17)$$

where V_{yd} – desired value of the UG vertical speed. The value V_{yd} is determined by the formula

$$V_{yd} = \frac{e_y}{T_y} = \frac{y_d - y}{T_y}, \quad (18)$$

where e_y is the depth control error, y_d is the desired value of the UG vertical coordinate, y is the actual value of the UG vertical coordinate, T_y is the time constant of the depth controller, that is, the desired time interval for which the error e_y is corrected.

In order to obtain an inverse UG model in the form (17), it is necessary to perform transient simulation by measuring V_{yb} for each values combination $\psi \in [-40, 50]^\circ$, $V_{CV} \in [1, 5]$ m/s, $y \in [-10, -100]$ m. The upper depth boundary is limited to -5 m, since at shallower depths; the influence of the free surface of the water brings significant perturbations into the inverse UG model.

It is known from [18] that the inverse UG model can be obtained on the basis of the sampling approximation obtained with the base value of the

буксирування $V_{CH}^* = 1 \text{ м/с}$, а в рівняння (17) замість аргументу V_{y3} надавати базове (масштабоване) значення:

$$V_{y3}^* = \frac{V_{y3}}{V_{CH}}. \quad (19)$$

Отримавши базову інверсну модель вертикального руху ГП (при $V_{CH} = 1 \text{ м/с}$) її можна використовувати для розрахунку диферента ГП при інших швидкостях буксирування:

$$\psi = f(V_{y3}^*, y). \quad (20)$$

Моделювання виконувалось в такій послідовності:

1) Встановлення досліджуваного значення швидкості буксирування ГП $V_{CH} = 1 \text{ м/с}$.

2) Вибір досліджуваного значення керуючого впливу ψ .

3) Встановлення ГП на глибину $y_{\min} = -100$. Перший раз – в режимі ручного керування, запам'ятовуючі керуючі впливи, при повторному виконанні цього пункту – за збереженою програмою.

4) Встановлення досліджуваного значення ψ та очікування завершення перехідного процесу з запам'ятовуванням y та V_y .

5) Встановлення ГП на глибину $y_{\max} = -10$. Перший раз – в режимі ручного керування, запам'ятовуючі керуючі впливи, при повторному виконанні цього пункту – за збереженою програмою.

6) Встановлення досліджуваного значення ψ та очікування завершення перехідного процесу з

towing speed $V_{CV}^* = 1 \text{ м/с}$, and in equation (17), substituting the argument V_{yd} , gives a base (scalable) value V_{yd}^* :

$$V_{yd}^* = \frac{V_{yd}}{V_{CV}}. \quad (19)$$

Having received the basic inverse model of the UG vertical motion (at $V_{CV} = 1 \text{ м/с}$), it can be used to calculate the UG pitch with other towing speeds:

$$\psi = f(V_{yd}^*, y). \quad (20)$$

The simulation was performed in the following sequence:

1) Establishment of the investigated value of UG towing speed $V_{CV} = 1 \text{ м/с}$.

2) The choice of the investigated value of the control action ψ .

3) Setting the UG to a depth of $y_{\min} = -100$. The first time is in the manual mode, memory control actions, during the repeated execution of this step is by the saved program.

4) Setting the researched value ψ and waiting for the completion of the transient process with memorization y and V_y .

5) Setting the UG to a depth of $y_{\max} = -10$. The first time is in manual mode, the memory controlling influences. During the repeated execution of this step is by the saved program.

6) Setting the investigated value ψ and waiting for the completion of the transient process with memorization y

запам'ятовуванням у та V_y .

7) Якщо не всі ψ було досліджено, то перехід до пункту 2, інакше – завершення моделювання.

and V_y .

7) If not all ψ were investigated, then the transition to step 2, otherwise will be the completion of the simulation.

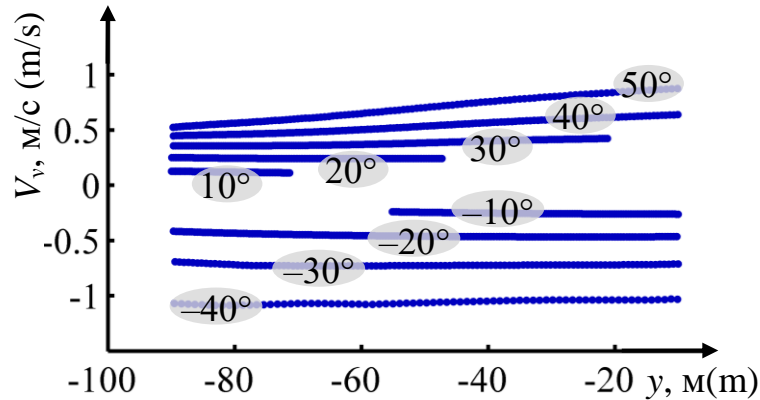


Рисунок 14 – Залежності швидкості занурення V_y від глибини y та керуючого впливу ψ при $V_{CH} = 1$ м/с

Figure 14 – Dependences of the rate of immersion V_y from depth y and control action ψ at $V_{CV} = 1$ m/s

Перехідні процеси в пунктах 4 та 6 алгоритму можуть бути досить довготривалими, але не має необхідності спостерігати їх повністю, достатньо зафіксувати їх початки від глибин y_{min} та/або y_{max} , оскільки в проміжках між ними нелінійність залежності $V_y(\psi)$ проявляється слабо.

На рис. 14 представлено результати комп'ютерного моделювання вертикального руху ГП у вигляді залежностей ГП при різних ψ (швидкість буксирування $V_{CH} = 1$ м/с), поданих в табличному виді.

На рисунку кожен лінію $V_y = f(y)$ підписано значенням величини ψ , при якому її було отримано.

Сукупність кривих $V_y = f(y)$ при різних ψ утворюють поверхню $V_y = f(y, \psi)$, яка представляє собою модель вертикального руху ГП. Якщо в ролі значення функції отримувати ψ , то

The transitions processes in step 4 and 6 of the algorithm can be quite long-term, but there is no need to observe them completely; it is sufficient to fix their origin from the depths of y_{min} and/or y_{max} , since in the intervals between them the non-linearity of the dependence $V_y(\psi)$ is weak.

In fig. 14 the, the computer simulation results of UG vertical motion in the form of UG dependencies for different ψ (velocity of towing $V_{CV} = 1$ m/s), are presented in tabular form.

In the figure, each line $V_y = f(y)$ is signed by the magnitude value of ψ , at which it was received.

The set of curves $V_y = f(y)$ for various ψ form the surface $V_y = f(y, \psi)$, which is a UG vertical motion model. If in the role of the function value to get ψ , then the set of curves forms an UG

сукупність кривих утворить інверсну модель ГП $\psi = f(V_y, y)$ при $V_{сн} = 1$ м/с.

Апроксимуємо табличну інверсну модель вертикального руху ГП та отримаємо закон керування регулятора глибини як залежність (20).

Оскільки таблична модель не повна (для кутів, і нелінійності, хоча і не ярко виражені, але мають нетрадиційний характер, то для апроксимації за такою вибіркою слід застосовувати сучасні засоби на основі елементів штучного інтелекту, спеціально розроблені для апроксимації за нерегулярними вибірками. В даній роботі використовувався генератор формул Екво [21]. Цілком задовільний результат демонструє апроксимація поліномом Падє:

inverse model $\psi = f(V_y, y)$ with $V_{CV} = 1$ m/s.

We approximate the tabular inverse model of the UG vertical motion and obtain the control law of the depth controller as dependence (20).

Since the tabular model is not complete (for angles and non-linearity, although not pronounced, but have an unconventional character, then modern tools based on elements of artificial intelligence, specially designed for approximation by irregular samples, should be used to approximate this sample. The Equo generator formulas [21] were used. The satisfactory result is demonstrated by the approximation by the Pade polynomial:

$$\psi = \frac{a_0 + a_1 V_y + a_2 V_y |V_y| + a_3 y + a_4 y |y| + a_5 V_y y}{1 + b_1 V_y + b_2 V_y |V_y| + b_3 y + b_4 y |y| + b_5 V_y y}, \quad (21)$$

де $a_{0..5}$, $b_{0..5}$ – коефіцієнти полінома. Їх значення зведені в табл. 2.

where $a_{0..5}$, $b_{0..5}$ are the coefficients of a polynomial. Their values are summarized in Table. 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти полінома

Table 2 – Polynomial coefficients

i	a_i	b_i
0	4.2438	–
1	54.37	-0.1502
2	-9.0276	0.1354
3	0.01531	0.006339
4	0.0003378	-1.1632 E-05
5	0.1887	0.00261

Якщо в (21) замість V_y підставляти V_{yz}^* , то результатом розрахунку буде бажане значення

If in (21) V_y is substituted with V_{yd}^* , the calculation result will be the pitch desired value ψ_d , which is applied

диференту ψ_3 , яке подається на вхід регулятора диферента:

$$\psi = \frac{a_0 + a_1 \frac{V_{y3}}{V_{CH}} + a_2 \frac{V_{y3}}{V_{CH}} \left| \frac{V_{y3}}{V_{CH}} \right| + a_3 y + a_4 y |y| + a_5 \frac{V_{y3}}{V_{CH}} y}{1 + b_1 \frac{V_{y3}}{V_{CH}} + b_2 \frac{V_{y3}}{V_{CH}} \left| \frac{V_{y3}}{V_{CH}} \right| + b_3 y + b_4 y |y| + b_5 \frac{V_{y3}}{V_{CH}} y}, \quad (22)$$

$$\psi = \frac{a_0 + a_1 \frac{V_{yd}}{V_{CV}} + a_2 \frac{V_{yd}}{V_{CV}} \left| \frac{V_{yd}}{V_{CV}} \right| + a_3 y + a_4 y |y| + a_5 \frac{V_{yd}}{V_{CV}} y}{1 + b_1 \frac{V_{yd}}{V_{CV}} + b_2 \frac{V_{yd}}{V_{CV}} \left| \frac{V_{yd}}{V_{CV}} \right| + b_3 y + b_4 y |y| + b_5 \frac{V_{yd}}{V_{CV}} y}, \quad (22)$$

Вираз (22) з коефіцієнтами (табл. 2) представляє собою закон керування глибиною ГП.

Налаштування регулятора полягає у виборі $T_y > T_\psi$. Для розв'язку поставлених задач слідкувальної САК обрано $T_y = 0,5$ с.

Тестування слідкувальної САК глибиною ГП виконаємо наступним чином.

Перерахуємо задачі, які має розв'язувати САК:

1) При пошуку підводних об'єктів (ПО) судном-носієм – вивід ГП в координату $y = -100$ м та надійне його утримання на цій глибині ($\pm 1,5$ м) при $V_{CH} = 5$ м/с.

2) При переході СН в режиму повільного пошуку – утримування ГП в координаті $y = -100 \pm 1,5$ м при скиданні СН швидкості з 5 м/с до 1 м/с;

3) При забезпеченні короткочасного перебування ПА на ПО – рух ГП за координатою $y = y_3 \pm 1,5$ м при динамічній зміні u_3 за формулою (9), тобто в слідкувальному режимі при русі СН зі

to the input of the pitch controller:

Expression (22) with coefficients (Table 2) represents the UG depth control law.

Adjusting (tuning) the controller lies in choosing $T_y > T_\psi$. To solve the assigned tasks of the tracking ACS, $T_y = 0,5$ s is selected.

Testing the UG depth tracking ACS is carried out as follows.

We list the tasks that the ACS should solve:

1) When searching for underwater objects (UO) by a carrier vessel, the output of the UG in the coordinate $y = -100$ m and its reliable holding (maintenance) at this depth ($\pm 1,5$ m) with $V_{CV} = 5$ m/s.

2) In the transition of the CV in the slow search mode – the contents of UG in the coordinate $y = 100 \pm 1,5$ m at a drop in UG speed from 5 m/s to 1 m/s;

3) While maintaining a ROV short-term stay on the UO – UG motion in the coordinate $y = y_d \pm 1,5$ m with a dynamic change of y_d by the formula (9), that is, in the tracking mode when

швидкістю $V_{CH} = 5$ м/с;

4) При забезпеченні збільшеного часу перебування ПА на ПО – задача для ГП аналогічна номеру 3, але при $V_{CH} = 1$ м/с.

Пошук ПО може відбуватись за такими сценаріями, які включають всі перераховані задачі САК планером:

1) Судно-носіє починає пошук ПО, знаходить його і за попередньою оцінкою оператор формує для ПА задачу, яка розв'язується за короткий проміжок часу. В такому сценарії САК ГП має послідовно розв'язати задачі 1, 3 та знову 1.

2) Судно-носіє починає пошук ПО, знаходить його і за попередньою оцінкою оператор формує для ПА задачу, для розв'язання якої потребується збільшений час з відповідним зменшенням судном-носієм своєї швидкості. В такому сценарії САК ГП має послідовно розв'язати задачі 1, 2, 4 та знову 1.

Промодельюємо роботу САК за сценарієм 1 (рис. 15).

Результати моделювання свідчать, що при динамічній зміні уз (після відстикування ПА) САК забезпечує похибку керування $e_y < 1,0$ м (рис. 15,а), якщо не знаходиться в режимі насичення. При цьому зміна планером глибини дає змогу уповільнити відстань L між планером та ПА.

Промодельюємо роботу САК за сценарієм 2 (рис. 16).

driving CV at a speed of $V_{CV} = 5$ m/s;

4) Providing increased ROV time of stay in the UO – the task for UG is similar to number 3, but with $V_{CV} = 1$ m/s.

UO searches can take place in the following scenarios, which include all listed tasks of the glider ACS:

1) The carrier vessel launches the UO search, finds it and, according to the preliminary assessment, the operator forms a task for ROV, which is solved over a short period of time. In this scenario, UG ACS must consistently solve tasks 1, 3 and again 1.

2) The carrier vessel launches the UO search, finds it and, according to the preliminary assessment, the operator forms a task for ROV, which requires an increased time with a corresponding decrease in the speed of the carrier vessel. In this scenario, UG ACS must consistently solve tasks 1, 2, 4 and again 1.

We will model the work of the ACS for scenario 1 (Figure 15).

The simulation results show that with a dynamic change in yd (after undocking the ROV), the ACS provides control error $e_y < 1,0$ m (Fig. 15, a), if it is not in the saturation mode. At the same time, changing the depth by the glider makes it possible to reduce the distance L between the glider and the ROV.

We will model the ACS work on scenario 2 (fig. 16 (b)).

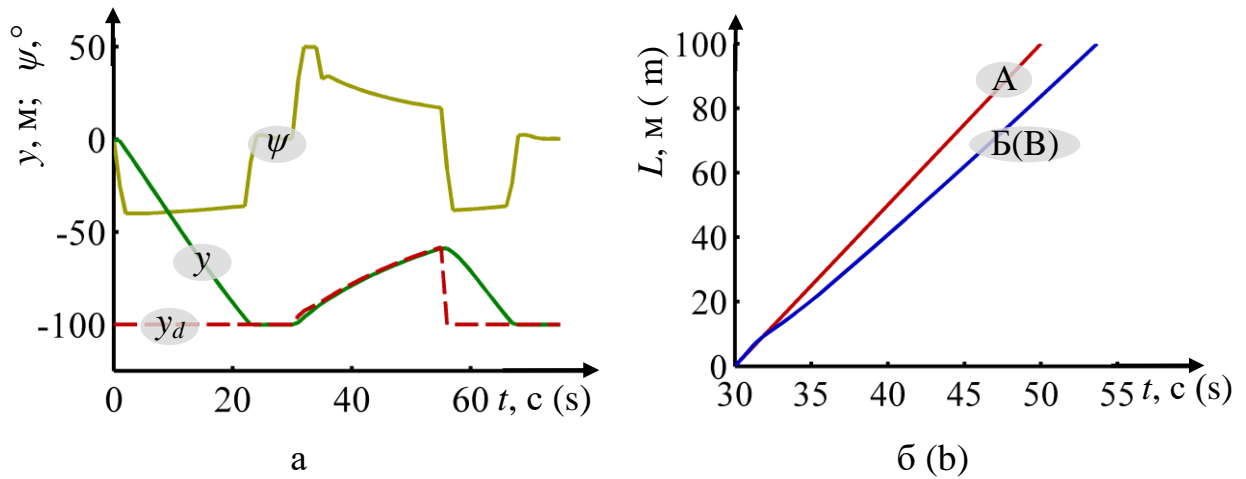


Рисунок 15 – Динаміка перехідних процесів САК (а) та відстань між планером та ПА (б) при реалізації сценарію 1
 Figure 15 – Dynamics of ACS transient processes (a) and the distance between the glider and ROV (б (b)) when implementing scenario 1

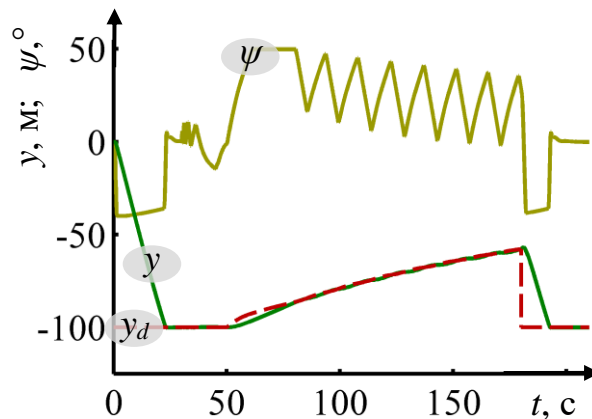


Рисунок 16 – Динаміка перехідних процесів САК при реалізації сценарію 2
 Figure 16 – Dynamics of ACS transient processes when implementing scenario 2

Результати моделювання свідчать, що при динамічній зміні уз (після відстикування ПА) в цьому випадку САК також забезпечує похибку керування $e_y < 1,0$ м (рис. 15,а), якщо не знаходиться в режимі насичення, але демонструє втрату стійкості.

Аналіз результатів моделювання показує, що це обумовлено тим, що при невеликих швидкостях буксирування (0,1..1,5 м/с) постійна часу математичної моделі обертального руху ГП збільшується – планер повільніше

The simulation results indicate that during a dynamic change of y_d (after undocking the ROV), in this case, the ACS also provides a control error of $e_y < 1,0$ m (Figure 15 a) if it is not in the saturated mode, but demonstrates loss of stability (robustness).

Analysis of simulation results shows that this is attributable to the fact that at low towing speeds (0,1 ... 1,5 m/s), the constant time of the mathematical model of the UG rotating motion increases – the glider is more slowly reacting to the

реагує на зміну кута повороту стерна глибини α_{CG} і в результаті маємо повільну зміну диференту ГП ψ .

В цьому можна переконатись, проаналізувавши залежності $k_{\psi 1}(V_K)$ and $k_{\psi 2}(V_K)$ (див. рис. 11) та розраховавши постійні часу моделі обертового руху ГП при швидкостях $V_K = 1$ м/с та 5 м/с:

$$T_{\omega}(V_K) = \frac{k_{\psi 1}(V_K)}{k_{\psi 2}(V_K)}; \quad (23)$$

Врахуємо, що $T_{\omega}(1 \text{ м/с}) = 2,43 \text{ с}$;
 $T_{\omega}(5 \text{ м/с}) = 0,51 \text{ с}$.

Тому при швидкості буксирування $V_{CH} = 1$ м/с маємо ситуацію, коли регулятор глибини з постійною часу $T_y = 0,5$ с вимагає такі керуючі впливи ψ_d , які планер фізично не встигає забезпечити.

Але для автоматичного керування при $V_{CH} = 1$ м/с не має необхідності в такій швидкій реакції регулятора глибини, оскільки величина y_d також не буде змінюватись занадто швидко.

У зв'язку з цим T_y пропонується коригувати на кожній ітерації керування на основі виразу (23) з урахуванням умови $T_y \gg T_{\omega}$:

$$T_y = \begin{cases} 0,5 & \text{при } T_{\omega} < 0,5; \\ T_{\omega} & \text{інакше.} \end{cases} \quad (24)$$

Промодельюємо роботу САК за сценарієм 2 з коригуванням T_y (рис. 17).

Результати моделювання свідчать, що САК забезпечує похибку керування

change in the rotation angle of the depth wheel α_{RD} and as a result, there is a slow change in the UG pitch ψ .

This can be verified by analyzing the dependences $k_{\psi 1}(V_K)$ and $k_{\psi 2}(V_K)$ (see Figure 11) and calculating the constant time of the UG rotary motion model at speeds $V_K = 1$ m/s and 5 m/s:

Consider that $T_{\omega}(1 \text{ m/s}) = 2,43 \text{ s}$;
 $T_{\omega}(5 \text{ m/s}) = 0,51 \text{ s}$

Therefore, at the towing speed $V_{CV} = 1$ m/s, we have a situation where the depth controller with a constant time $T_y = 0,5$ s requires such control influences ψ_d that the glider, physically, does not have time to provide.

But for automatic control at $V_{CV} = 1$ m/s there is no need for such a rapid response of the depth controller, since the value of y_d will not also change too fast.

In this regard, T_y is proposed to be corrected for each iteration control based on the expression (23), taking into account the condition $T_y \gg T_{\omega}$:

$$T_y = \begin{cases} 0,5 & \text{when } T_{\omega} < 0,5; \\ T_{\omega} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (24)$$

We simulate the work of ACS in scenario 2 with the adjustment of T_y (Figure 17).

The simulation results indicate that the ACS provides an error control of

$e_y < 1,0$ м (рис. 17, а), якщо не знаходиться в режимі насичення, та демонструє стійку роботу.

$e_y < 1,0$ m (Figure 17, a), if not in saturation mode, and demonstrates stable operation.

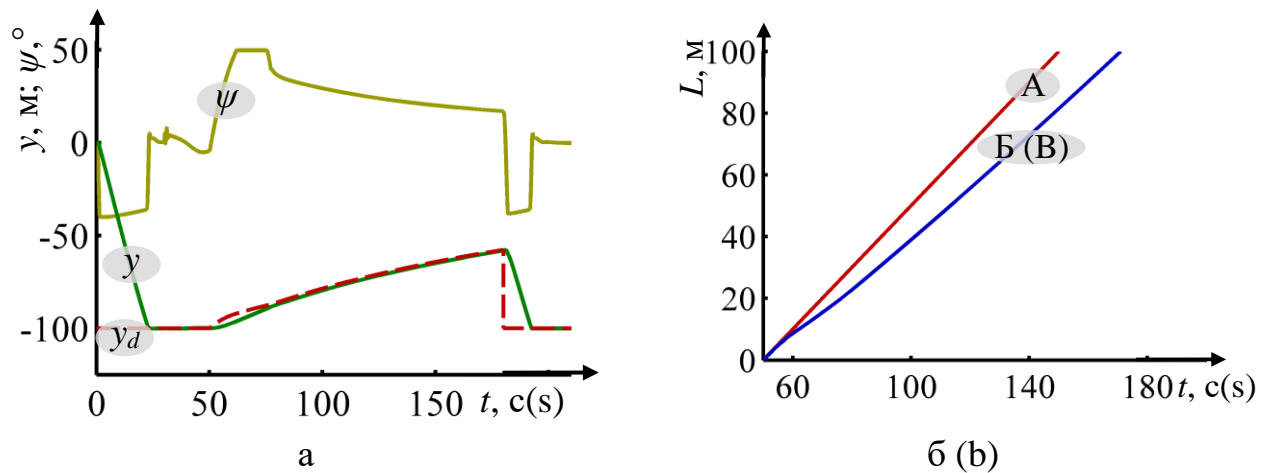


Рисунок 17 – Динаміка перехідних процесів САК з коригованим T_y (а) та відстань між планером та ПА (б) при реалізації сценарію 2

Figure 17 – Dynamics of ACS transient processes with corrected T_y (a) and the distance between the glider and the ROV (b) when implementing scenario 2

Зміна планером глибини дає змогу уповільнити відстань L між планером та ПА. На рисунку рис. 17,б лінія «А» показує відстань L при незмінній глибині ГП, лінія «Б» – відстань L при русі ГП на глибині y_z , що динамічно змінюється. В першому випадку ПА отримує для роботи 100 с часу, в другому випадку 121 с.

Changing the glider depth allows to slow down the distance L between the glider and the ROV. In Fig. 17 b line "A" shows distance L at constant UG depth, line "B" – distance L when moving the UG at the depth of y_d , which dynamically changes. In the first case, UV receives 100 s operation time, in the second case – 121 s.

При реалізації автоматичного керування за сценарієм 2 виграш часу суттєвий і САК виконує поставлену задачу.

In the implementation of automatic control in scenario 2, the time gain is significant and the ACS performs the assigned task.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

REFERENCES

1. Москалев Н. Г. Подводный поиск утерянной радиоизотопной установки в сложном районе Охотского моря // «Морские испытания», 2007. – №2. – С. 14-27.
2. Кузнецов О. Л., Матвиенко Ю. В., Рылов Н. И., Наумов Л. А. Опыт широкомасштабного поиска подводного потенциально опасного объекта в Охотском море – «Подводные исследования и робототехника». // Владивосток, 2010. – С. 38-43.
3. Rowinsky L. Pojazdy Glembinowe. Budowa s Wyposazenie. Gdansk, 2008. – 593 P.
4. Блинцов В.С., Галь А.Ф., Штефирца А.И., Чан Там Дык. Разработка нового поколения поисковых подводных аппаратов. // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв НУК. – 2007. – 4(415). – С. 22-30.
5. Блінцов, В. С. Актуальні задачі управління проектами очищення акваторій від вибухонебезпечних об'єктів [Текст] / В. С. Блінцов, М. Г. Грицаєнко // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 504-506.
6. Блінцов О. В., Грицаєнко М. Г. Телекеровані підводні апарати на службі морегосподарської діяльності Миколаївщини. – Shipbuilding and MarineInfrastructure, 2014. – №1. – С. 28-33.
7. Яким'як, С. В. Концепції роботизованих військових систем міжсферного застосування: сучасний стан і перспективи розвитку / С. В. Яким'як, В.С. Блінцов // Матеріали науково-практичної конференції «Морська могутність України: проблеми та перспективи розвитку. Роль та місце Військово-Морських Сил Збройних Сил України у захисті національних інтересів на морі», 20 грудня 2013 року. – К. : Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, 2014. – С. 142-143.
8. Блінцов В.С., Блінцов С.В., Красних О.В., Тхи Д.Ф. Концепція створення ненаселених автономних підводних апаратів для військово-морських сил держави / Електронне фахове видання «Вісник Національного університету кораблебудування», 2013. – №3.
9. Красильников, Р.В. Системы борьбы с необитаемыми аппаратами — асимметричный ответ на угрозы XXI века. [Текст] / Р. В. Красильников // – СПб: Изд-во Инфо-да, 2013. – 106 с.
10. 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.
11. Лукомский, Ю.А. Навигация и управление движением судов [Текст] / Ю.А. Лукомский, В.Г. Пешехонов, Д.А. Скороходов // Учебник. – СПб.: "Элмор", 2002. – 360 с.
12. Войтов Д. В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. М : МОРКНИГА, 2012. – 506 с.

13. Блінцов О.В., Буруніна Ж.Ю., Клименко П.Г. Оцінка точності визначення місця підводного апарата-робота відносно судна-носія. – Миколаїв: НУК. – Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». – Миколаїв: НУК. – 2012. – №2.
14. Блінцов, О. В. Автоматизація керування одноланковими самохідними прив'язними підводними системами. Навчальний посібник / О. В. Блінцов, В. А. Надточій // Миколаїв : НУК, 2014. – 124 с.
15. 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.
16. Морской энциклопедический справочник: В двух томах. Том 1 / Под ред. Н.Н. Исанина. – Л.: Судостроение, 1987. – 512 с.
17. Надточій, В.А. Керування самохідними прив'язними підводними системами у режимі комбінованого застосування / В. А. Надточій // Електронне видання «Вісник НУК», 2014. – №1.
18. Блинцов, А. В. Система автоматического управления специализированным морским комплексом с буксируемым подводным аппаратом [Текст] / А. В. Блинцов, Т. Д. Чан // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков : ЧП «Технологический Центр», 2013. № 5/4 (65). – С. 23-27.
19. H. Strasdat, A.J. Davison, J.M.M. Montiel, and K. Konolige. Double Window Optimisation for Constant Time Visual SLAM. – Accepted for the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2011.
20. Иконников, И. Б. Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести. [Текст] / И. Б. Иконников, В. М. Гаврилов, Г. В. Пузырев // – СПб. : Судостроение, 1993. – 224 с.
21. Блинцов, С.В. Онлайн-идентификация параметров подводного аппарата как нестационарного объекта в системе управления на базе инверсной модели. Вестник НУК, 2012. – № 3.
22. Блінцов О.В., Надточій В.А. Структура системи автоматичного керування швидкістю маршового руху підводного апарата. – Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції "Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки". К : НТУУ «КПІ», 2015.

Навчальне видання

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

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРИВ'ЯЗНИМИ ПІДВОДНИМИ
СИСТЕМАМИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ МОРСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ
НА ВЕЛИКИХ АКВАТОРІЯХ

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. 3,2. Тираж 100 прим. Зам. № 130.
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.