

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМ МОРСКИМ КОМПЛЕКСОМ С БУКСИРУЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ

Розроблено узагальнену структуру трьохрівневої системи автоматичного керування просторовим рухом спеціалізованого морського комплексу "судно-буксирувальник - одноланковий підводний буксируваний апарат", призначеного для виконання фото-, відео- і гідроакустичних зйомок донної поверхні й підводних об'єктів з високою якістю. Сформульовано основні прикладні наукові завдання, вирішення яких забезпечить ефективне функціонування комплексу

Ключові слова: буксируваний підводний апарат, система автоматичного керування

Разработана обобщенная структура трехуровневой системы автоматического управления пространственным движением специализированного морского комплекса «судно-буксировщик - однозвеньный подводный буксируемый аппарат», предназначенного для выполнения фото-, видео- и гидроакустических съемок донной поверхности и подводных объектов с высоким качеством. Сформулированы основные прикладные научные задачи, решение которых обеспечит эффективное функционирование комплекса

Ключевые слова: буксируемый подводный аппарат, система автоматического управления

А. В. Блинцов

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра импульсных процессов и технологий*

E-mail: energybox@mail.ru

Чан Там Дык

Инженер

Кафедра электрооборудования судов и
информационной безопасности*

E-mail: duc2000@ukr.net

*Национальный университет кораблестроения
им. адмирала Макарова

пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, Украина, 54025

1. Введение

Постоянно возрастающий интерес к подводному культурному наследию Украины, а также постановка рядом организаций Украины задач картографирования донной поверхности стимулирует разработку новых высокопроизводительных подводных систем, обеспечивающих высококачественное документирование и изучение донной поверхности [1 – 4]. Близкие по содержанию подводные работы характерны и для других стран – России, Вьетнама, Китая, Японии, Индии [5 – 7].

Эффективным техническим средством для таких работ являются однозвеньные подводные буксируемые системы (ОПБС), в состав которых входят кабельная лебедка (Л), кабель-буксир (КБ) и подводный буксируемый аппарат (ПБА), рис. 1.

Полезным грузом ПБА является фото-, видео- и гидроакустическая аппаратура (ФВГА), с помощью которой осуществляется документирование донной поверхности и подводных объектов (ПО) в научных и производственных целях.

Управление ОПБС осуществляется с поста энергетики и управления (ПЕУ), расположенного на судне-буксировщике (СБ).

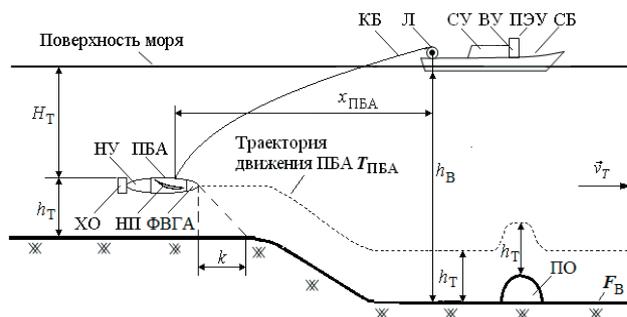


Рис. 1. Состав однозвеньной подводной буксируемой системы

ОПБС обладают рядом существенных преимуществ перед автономными и привязными самоходными подводными системами: высокой производительностью обследования донной поверхности (скорость буксировки в несколько раз выше по сравнению с автономными и привязными системами), простотой эксплуатации и относительно низкими требованиями к судну-буксировщику (СБ) [8]. К настоящему времени особую актуальность приобретает вопрос повышения качества фото-, видео- и гидроакустического документирования донной поверхности при одновременном

обеспечении высокой производительности ОПБС за счет высокой скорости буксировки и расширения диапазона погодных условий их применения.

Учитывая постоянное силовое воздействие на ПБА со стороны СБ и КБ, которое обусловлено морским течением, ветро-волновыми возмущениями и движением СБ, целесообразно ввести в рассмотрение новый объект управления – специализированный морской комплекс (СМК) «судно-буксировщик – однозвенная подводная буксируемая система», обладающий существенно нелинейными характеристиками и эксплуатирующийся в условиях неопределенности внешних силовых воздействий на его элементы.

2. Постановка проблемы

К основным современным требованиям применения СМК относится равномерность их движения в водной толще на заданной глубине или высоте над грунтом. В частности, ставится задача поддержания с высокой точностью ($\pm 0,01$ м) заданного расстояния до дна (при гидроакустическом обследовании) и до объекта подводной съемки (при фото- и видеообследовании) при одновременном согласованном управлении параметрами бортовой ФВГА с целью получения гидроакустических сонограмм и фотовидеозаписей высокого качества [9, 10]. Кроме того, ставится задача существенного повышения производительности СМК, что требует скоростей буксировки не менее 10 м/с в условиях морского волнения до 3 баллов по шкале Бофорта.

Перечисленные задачи являются неотъемлемой составляющей подводных работ по поиску, документированию и картографированию подводных объектов, выполнение которых предусматривается рядом международных обязательств и законов Украины [11 – 14].

Успешное решение таких задач морской практики возможно путем создания специальных СМК, ПБА которых оборудованы ФВГА и системами автоматического управления (САУ) на основе применения элементов искусственного интеллекта и способных функционировать в условиях внешних СИЛОВЫХ воздействий на элементы комплекса.

3. Анализ исследований и публикаций

Изучение научных публикаций по теоретическим вопросам статики и динамики ОПБС показывает, что вопросы управления пространственным движением такого вида морских подвижных объектов достаточно глубоко исследованы, а полученные теоретические результаты успешно внедрены в морскую практику и в учебный процесс [15, 16]. Наиболее полно изучены вопросы математического и компьютерного моделирования буксируемых систем [17 – 19], теоретические аспекты синтеза систем автоматического управления (САУ) глубиной погружения подводных буксируемых тел с регулированием по возмущению [20, 21], а также вопросы стабилизации глубины погружения ПБА с помощью установленной на нем амортизирующей лебедки [22]. Однако, указанные исследования касаются

исключительно вопросов стабилизации движения изолированного ПБА и его кабель-буксира, не учитывают динамику лебедки КБ и движения СБ. Вопросы автоматического управления функционированием пространственным движением ПБС и работой ФВГА в научной литературе не описаны.

4. Формулировка целей статьи

Цель работы – разработка обобщенной структуры системы автоматического управления специализированным морским комплексом «судно-буксировщик – однозвенная подводная буксируемая система», выполняющим фото-, видео- и гидроакустическую съемку донной поверхности, и формулирование прикладных научных задач для реализации системы управления.

5. Разработка структуры системы автоматического управления

Поддержание с высокой точностью заданного расстояния до объекта подводной съемки (линейное или плоское траекторное движение ПБА над грунтом на заданной глубине H_T или дистанции до объекта съемки h_T) при одновременном согласованном управлении параметрами бортовой ФВГА осуществляется трехуровневой САУ [23]. Верхний (ВУ) и средний (СУ) уровни САУ расположены на СБ, а нижний уровень (НУ) – на борту ПБА, (рис. 2).

В соответствии с назначением СМК имеет следующие основные режимы работы:

- подготовительный режим g_0 разворачивания комплекса в рабочее положение, который предусматривает опускание ПБА за борт на стопе СБ, движение СБ малым ходом с одновременным вытравливанием КБ и заглублением ПБА, вывод ПБА на заданную глубину, начало движения СМК с заданной скоростью буксировки v_T и проверка работоспособности всех составляющих буксируемой системы;

- рабочий режим g_1 стабилизации движения ПБА на заданной глубине H_T при движении СБ по заданной траектории и условию $v_T = \text{const}$; при этом оборудование ФВГА работает по специальным алгоритмам управления, обеспечивающим гарантированный захват и документирование донной поверхности с заданными размерами (k – глубина рабочей зоны ФВГА, l_Φ , l_B , l_T – ширина рабочей зоны, соответственно, фото-, видео- и гидроакустической аппаратуры ПБА);

- рабочий режим g_2 стабилизации движения ПБА на заданном расстоянии до объекта съемки h_T при движении СБ по заданной траектории и условию $v_T = \text{const}$; при этом оборудование ФВГА работает по специальным алгоритмам управления, обеспечивающим гарантированный захват и документирование ПО в условиях маневрирования ПБА по глубине и неминимумом отклонении величины h_T от заданного значения;

- режим свертывания ОПБС режим g_3 , предусматривающий возврат ПБА на борт СБ и приведение СМК в исходное положение.

Как объект управления СМК имеет следующие исполнительные механизмы для удержания ПБА на заданной глубине (дистанции) и траектории:

- приводы движительно-рулевого комплекса СБ (в зависимости от типа СБ – главный и подруливающие гребные винты, привод пера руля или рулевой колонки);
- электроприводы кабельной лебедки Л, с помощью которых вытравливается КБ заданной длины l_{KB} , обеспечивающий устойчивое движение ПБА в заданном диапазоне скоростей буксировки;
- электроприводы поворота несущих поверхностей (НП) ПБА, регулируемый угол атаки $\alpha_{НП}$ которых обеспечивает необходимую заглубляющую силу $F_{НПz}$ для движения ПБА на заданной глубине h_T или расстоянии до объекта съемки h_T (донной поверхности или ПО);
- электроприводы поворота хвостового оперения (ХО) ПБА, регулируемые углы атаки рулей высоты и направления $\alpha_{ХО}$ которого обеспечивают стабилизацию движения ПБА на заданной глубине h_T или расстоянии до объекта съемки h_T ;
- электроприводы устройств управления ФВГА (фокусным расстоянием и величиной выдержки, освещенностью ПО, режимами работы гидроакустических приборов – сонара и профилографа), которые обеспечивают съемку заданной полосы донной поверхности длиной k и шириной l_{ϕ} , l_B , l_T и требуемое качество фото-, видео- и гидроакустической съемки.

Управление работой СМК предлагается строить в трех вариантах – ручном, автоматизированном и автоматическом.

Ручное управление целесообразно применять при работе в режимах r_0 и r_3 ввиду их кратковременности и, в связи с этим, низкими требованиями к автоматизации.

Кроме того, ручное управление желательно предусматривать для режимов r_1 и r_2 как резервное для сложных условий эксплуатации (пилотирование ПБА по сложно формализуемым траекториям и в аварийных режимах).

Автоматическое управление СМК целесообразно применять при реализации основных производственных режимов работы r_1 и r_2 , обеспечивая согласованное управляемое движение СБ и ПБА с заданными характеристиками качества работы ФВГА.

Автоматизированное управление СМК целесообразно применять в условиях экстремальных погодных условий, когда полностью автоматическое управление комплексом неэффективно или невозможно. Например, в условиях сильного ветро-волнового воздействия траекторное управление СБ можно выполнять вручную, а управление ОПБС – автоматически.

Анализ научно-технических публикаций и опыт морских исследовательских испытаний опытного образца ПБА показывают, что трехуровневая САУ пространственным движением СМК может иметь следующий вид, рис. 2.

Верхний уровень управления реализует находящаяся в ПЭУ управляющая ЭВМ СМК, которая по заданиям человека-оператора назначает скорость буксировки v_T , географические координаты рабочей зоны и отдельных траекторий движения ПБА (широту, долготу и глубину $\{\Phi; \Lambda; H\}_{БПА}$), размеры полосы донной поверхности $k \times l_{\phi, B, T}$, которую необходимо обследовать, инициирует выполнение программ управления режимами работы СМК $R = \{r_0, \dots, r_3\}$.

Кроме того, на этом уровне реализуется автоматическое управление СБ для режимов работы r_1 и r_2 , для чего используются данные $\{\varphi; \lambda; h\}_{СБ}$ от ЭКНИС (электронной картографической навигационно-информационной системы СБ). Здесь формируется множество управляющих воздействий $Y_{СБ}$ для исполнительных механизмов СБ, а в качестве обратной связи используются сигналы $X_{СБ}$, вычисляемые в локальной САУ СБ среднего уровня.

При реализации режимов r_1 и r_2 оператор СМК имеет возможность также с ВУ вручную управлять исполнительными механизмами Л, ПБА и ФВГА с помощью управляющих воздействий $\{\bar{u}; \bar{u}_{НП}; \bar{u}_{ХО}; \bar{u}_{ФВГА}\}$, контролируя с помощью датчиков обратных связей управляемые величины исполнительных механизмов ПБА $\{l_{KB}; \alpha_{НП}; \alpha_{ХО}; F_{ФВГА}\}$, где $u_{ФВГА}$ – множество управляющих воздействий для исполнительных механизмов ФВГА, $u_{НП}$ – множество управляющих воздействий исполнительных механизмов НП; $u_{ХО}$ – множество управляющих воздействий исполнительных механизмов ХО; $F_{ФВГА}$ – множество сигналов обратной связи от исполнительных приводов ФВГА.

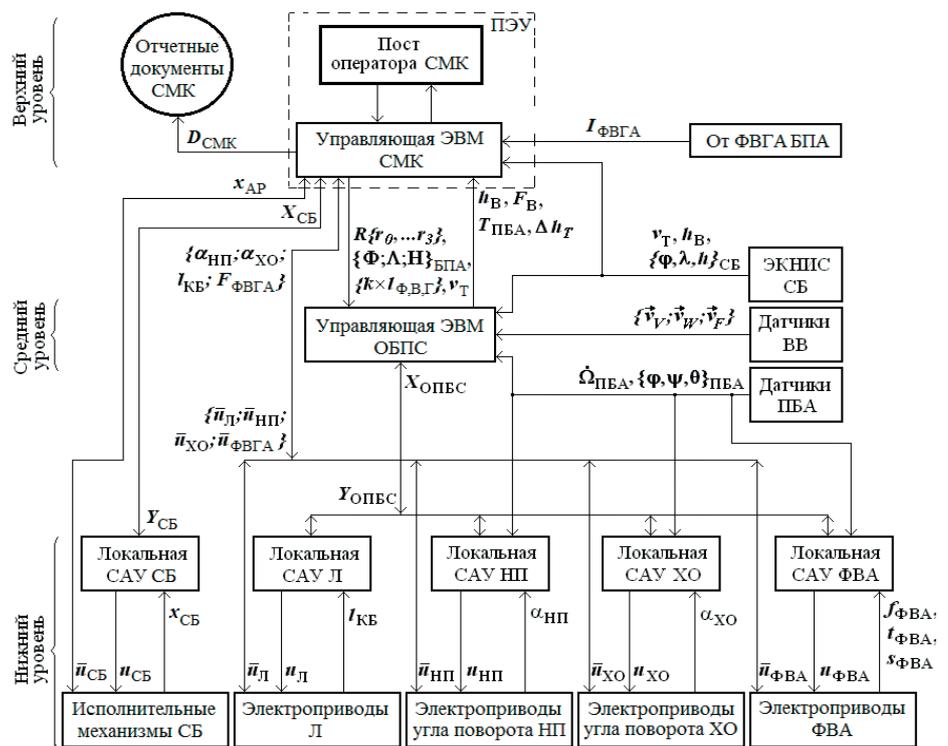


Рис. 2. Структура трехуровневой САУ СМК

На верхнем уровне также осуществляется обработка информации $I_{ФВГА}$, поступающей от фото-, видео- и гидроакустической аппаратуры ПБА и используемой для генерации отчетных документов по экспедиции $D_{СМК}$ – цифровых карт донной поверхности с нанесением обнаруженных ПО и их географической привязкой, фото- и видеодокументов, гидроакустических сонограмм обнаруженных объектов.

На среднем уровне управления находится управляющая ЭВМ ОПБС, обеспечивающая:

- вычисление глубины моря h_B под СБ и формирование рельефа дна F_B на участке $x_{ПБА}$ между СБ и ПБА, необходимого для упреждающего управления высотой хода ПБА над грунтом;

- расчет реально достижимой пространственной траектории $T_{ПБА}$ движения ПБА над морским дном на основе вычисленных данных о его рельефе и с учетом маневренных характеристик конкретной ОПБС;

- синтез законов группового управления $Y_{ОПБС} = \{Y_L, Y_{НП}, Y_{ХО}, Y_{ФВГА}\}$ работой исполнительных механизмов Л, ПБА и ФВГА по критерию по высоте ПБА над грунтом $\Delta h_T \rightarrow \min$ при обязательном условии обеспечения фото-, видео- и гидроакустической съемки донной поверхности с заданными размерами $k \times l_{Ф,В,Г}$; при этом учитывается воздействие на СБ, КБ и ПБА внешних возмущений (ВВ) – ветровых, волновых и течения (соответственно, векторы скоростей $\vec{v}_V, \vec{v}_W, \vec{v}_F$).

Для синтеза законов группового управления исполнительными механизмами ОПБС $Y_{ОПБС}$ используется также информация от ЭКНИС СБ – его текущие географические координаты $\{\varphi; \lambda; h\}_{СБ}$, скорость буксирования v_T и глубина моря h_B .

Множество сигналов обратной связи ХОПБС для среднего уровня САУ включает данные о текущем положении исполнительных механизмов ОПБА и их производных (на рис. 2 не показаны). Кроме того, в качестве обратных связей для САУ ОПБС используются датчики угловых ускорений $\Omega_{ПБА}$ и скоростей $\Omega_{ПБА}$, углов наклона корпуса ПБА $\{\varphi, \psi, \theta\}_{ПБА}$ (углов рыскания, дифферента и крена ПБА), а также бортовой эхолот ПБА, измеряющий высоту хода ПБА h_T над грунтом.

На нижнем (локальном) уровне управления осуществляется автоматическое управление траекторным движением СБ (управляющие сигналы – $u_{СБ}$, сигналы обратной связи – $x_{СБ}$) и локальное управление отдельными исполнительными механизмами (приводами) Л, ПБА и ФВГА с помощью управляющих воздействий $\{u_L, u_{НП}; u_{ХО}; u_{ФВГА}\}$, генерируемых локальными САУ на

основе законов группового управления $Y_{ОПБС}$, синтезированных на среднем уровне управления.

Анализ показывает, что для синтеза предложенной системы управления пространственным движением СМК необходимо решить следующие основные прикладные научные задачи:

- синтезировать обобщенные алгоритмы автоматического управления СМК для реализации режимов $г_0$ - $г_3$ его работы;

- синтезировать структуру САУ траекторным движением СБ при работе в условиях внешних ветро-волновых воздействий; актуальность этой задачи диктуется тем, что вследствие стремления снизить экспедиционные затраты в качестве СБ используются малоразмерные суда, чувствительные к внешним возмущениям;

- разработать математическое и программное обеспечение для оперативного формирования рельефа донной поверхности F_B по судном-буксировщику;

- разработать математическое и программное обеспечение для оперативного вычисления реально достижимой пространственной траектории $T_{ПБА}$ движения ПБА над морским дном;

- разработать математическое и программное обеспечение для оперативного формирования отчетных документов по результатам работы СМК – цифровых карт донной поверхности с нанесением обнаруженных ПО и их географическими координатами, фото- и видеоотчетов, гидроакустических сонограмм обследованных площадей донной поверхности и обнаруженных на них подводных объектов.

Решение перечисленных задач лежит в плоскости применения современных информационных технологий (распознавание образов, геотегинг и др.) и интеллектуальных систем управления (нечетких и нейросетевых регуляторов).

6. Выводы

Разработана обобщенная структура трехуровневой системы автоматического управления пространственным движением специализированного морского комплекса «судно-буксировщик - однозвенный подводный буксируемый аппарат», предназначенного для выполнения фото-, видео- и гидроакустических съемок донной поверхности и подводных объектов с высоким качеством. Сформулированы основные прикладные научные задачи, решение которых обеспечит эффективное функционирование комплекса.

Литература

1. Ballard, R. D. Deepwater Archaeology of the Black Sea: The 2000 Season at Sinop, Turkey [Text] / R. D. Ballard, F. T. Hiebert, D. F. Coleman, C. Ward, J. Smith, K. Willis, B. Foley, K. Croff, C. Major, and F. Torre. // American Journal of Archaeology Vol. 105 No. 4 (October 2001). – P. 607-623.
2. Блінцов, В. С. Актуальні завдання роботизації підводних археологічних досліджень [Текст] / В. С. Блінцов, С. О. Воронов // Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2010. – С. 69-70.
3. Шнюков, Е. Ф. Минеральные богатства Черного моря [Текст] / Е. Ф. Шнюков, А. П. Зиборов // – К.: Национальная Академия Наук Украины, 2004. – 280 с.

4. Блинцов, В.С. Применение телеуправляемых подводных аппаратов в проектах исследования морфоструктурных особенностей морского дна на участках газопроявления в Черном море [Текст] / В.С. Блинцов, С.А. Воронов // Инновации в суднобудуванні та океанотехніці : Матеріали 3-ї міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 606-607.
5. Огороков, А. В. Сокровища на дне [Текст] / А.В. Огороков // М.: Издательство: Вече. Серия: Путешествие за тайной, 2011. – 320 с.
6. Ведерников, Ю. В. Красный дракон: современные военно-морские силы Китая [Текст] / Ю. В. Ведерников // Издательство: Владивосток. – Флот Тихого океана. – Выпуск 3, 2007. – 140 с.
7. Sakai, H. Underwater observation system using Autonomous Towed Vehicle [Text]/ H. Sakai, T. Tanaka // OCEANS '04. MT-TS/IEEE TECHNO-OCEAN '04 (Volume 2), 2004. – P. 822-827.
8. 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.
9. Jiaming, Wu Experimental study on a controllable underwater towed system [Text] / Wu Jiaming , Ye Jiawei , Yang Cheng , Chen Yuanming , Tian Huiping , Xiong Xiaohui // Ocean Engineering Volume 32, Issues 14–15, October 2005, Pages 1803–1817.
10. Блинцов, В. С. Базові технології застосування підводних апаратів-роботів для задач морської археології [Текст] / В. С. Блинцов, С. О. Воронов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції : - Миколаїв: НУК, 2010. – С. 389-391.
11. Міжнародна Конвенція про охорону підводної культурної спадщини ЮНЕСКО (XXXI сесія від 02.XI.2001 р., підписана від імені України 06.11.2001 р.).
12. Європейська конвенція про охорону археологічної спадщини (ратифікована Законом України від 10.12.2003 р. №1369-IV).
13. Державна цільова соціальна програма протимінної діяльності Міністерства з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи на 2009-2014 роки. Затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 18 лютого 2009 р. N 131.
14. Закон України «Про Загальнодержавну цільову програму захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру на 2013-2017 роки». / Відомості Верховної Ради України, 2013, № 19-20, ст.173.
15. Поддубный, В.И. Динамика подводных буксируемых систем [Текст] / В. И. Поддубный, Ю. Е. Шамарин, Д. А. Черненко, Л. С. Астахов // – СПб: Судостроение, 1995. – 200 с.
16. Егоров, В. И. Подводные буксируемые системы: Учебное пособие. [Текст] / В. И. Егоров // – Л.: Судостроение, 1981. – 304 с.
17. Виноградов, Н. И. Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики. [Текст] / Н. И. Виноградов, М. Л. Гутман, И. Г. Лев, М. З. Нисевич // – СПб: Изд-во С.-Петербур. Ун-та, 2000. – 324 с.
18. Masayoshi, Toda A Theoretic Analysis of a Control System Structure of Towed Underwater Vehicles [Text] / Toda Masayoshi // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005. Seville, Spain, December 12-15, 2005. – P. 7526-7533.
19. Vineet, Kumar Srivastava Dynamic Behavior of Underwater Towed-cable in Linear Profile [Text] / Kumar Srivastava Vineet, Sanyasiraju Yuss , Tamsir Mohammad // International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 2, Issue 7, July-2011. – P. 1-10.
20. Jiaming Wu, Allen T. Chwang. Investigation on a two-part underwater manoeuvrable towed system. // Ocean Engineering 28 (2001) 1079–1096. – P. 1079-1096.
21. Lambert, C. Dynamics and control of a towed underwater vehicle system, part II: model validation and turn maneuver optimization [Text] / C. Lambert, M. Nahon, B. Buckham, and M. Seto // Ocean Engineering, 30, pp. 471-485, 2003.
22. Кувшинов, Г. Е. Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов: монография [Текст] / Г. Е. Кувшинов, Л. А. Наумов, К. В. Чупина // Владивосток: Дальнаука, 2005. – 285 с.
23. Блинцов, О. В. Система автоматического управления пространственным движением однозвенной подводной буксируемой видеосистемы [Текст] / О. В. Блинцов, Ж. Ю. Бурунина, П. Г. Клименко, Чан Там Дык // Збірник наукових праць НУК – Миколаїв: НУК, 2012. – №2. – С. 70 - 74.