УДК 681.5 : 629.584

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНОЮ БУКСИРУВАНОЮ ПІДВОДНОЮ СИСТЕМОЮ В УМОВАХ ДІЇ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ

Соколов В. В., *головний інженер – перший заступник генерального директора Державного підприємство «Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод ім. О.М. Макарова», м. Дніпро, Україна; e-mail: sokolow@yuzhmash.com; ORCID: 0000-0002-7015-0464*

Виконано огляд сучасного стану застосування безекіпажних буксируваних підводних систем для виконання робіт на мілководних акваторіях. Наведено результати аналізу сучасних підходів до автоматизації керування такими системами. Визначено основні режими використання безекіпажних буксируваних підводних систем у нормальних та аварійних ситуаціях. Сформульовано завдання автоматизації керування цими системами як суттєво нелінійними об'єктами морської техніки у складі судна-буксирувальника, його кабельної лебідки, безекіпажного буксируваного підводного апарата і його корисного вантажу. Розроблено узагальнену п'ятирівневу структуру системи автоматичного керування безекіпажною буксируваною підводною системою. Розглянуто особливості функціонування стратегічного, тактичного, адаптивного, програмного та виконавчого рівнів системи. Розглянуто основні вимоги до створення математичних моделей основних елементів безекіпажної буксируваної підводної системи як складових системи їх автоматичного керування. Окреслено напрямок подальших досліджень по автоматизації таких систем.

Ключові слова: *безекіпажна буксирувана підводна система, автоматичне керування, структурна схема, математична модель.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2018.2.19.62–72

Постановка задачі. Буксирувані підводні системи (БПС) активно застосовуються при виконанні широкого спектру підводних робіт – пошукових, рибопромислових, геологорозвідувальних, природоохоронних та інших [1–3]. До головних переваг такого виду підводної техніки належать:

– висока продуктивність при роботі на акваторіях, які мають значні площі, оскільки буксирування проводиться на відносно високих швидкостях руху (6–12 вузлів);

– можливість комплексного дослідження параметрів водного середовища шляхом установки на буксируваний підводний апарат (БПА) необхідної різнотипної пошукової та дослідницької апаратури;

– можливість обробки отримуваної інформації про підводне середовище у реальному часі, що у більшості випадків має ключове значення (пошукові, рибопромислові та природоохоронні роботи).

Для виконання робіт на мілководних акваторіях (з глибинами до 100 метрів) перспективним є застосування безекіпажних БПС. До складу таких систем входять БПА, який за допомогою кабель-буксира (КБ) та автоматичної кабельної лебідки (КЛ) з'єднаний з безекіпажним судном-буксирувальником (СБ) (рис. 1).

Рисунок 1 – Основні елементи безекіпажної буксируваної підводної системи

Автоматичне керування безекіпажною БПС виконується з розташованого на СБ поста енергетики і керування (ПЕК), а спуско-піднімальні операції БПА виконуються з застосування палубного пристрою СБ – автоматичного спуско-піднімального пристрою (СПП).

Типовими підводними завданнями для безекіпажних БПС є:

– вимірювання гідрофізичних та гідрохімічних параметрів водного середовища;

– дослідження рельєфу та структури морського дна, цифрове картографування донної поверхні, виявлення підводних об'єктів з географічною прив'язкою;

– відео-, гідроакустичний та магнітометричний пошук підводних об'єктів у водній товщі, на донній поверхні та під шаром ґрунту;

– імпульсне зондування морського дна з метою пошуку корисних копалин на морському шельфі;

– обстеження, документування та картографування протяжних інженерних підводних об'єктів (підводних кабелів, трубопроводів тощо).

На цей час у напрямку експлуатації БПС спостерігається постійне зростання вимог до точності просторового руху БПА, оскільки вони є носіями корисного вантажу (КВ) – високоточного обладнання – гідроакустичних, магнітометричних, гравіметричних та оптичних приладів, пробовідбірників води та приладів для вивчення турбулентності води, її гідрофізичних та гідрохімічних характеристик [4, 5]. При цьому актуальними є прикладні наукові завдання синтезу систем автоматичного керування (САК) як усталеним рухом БПА в умовах дії зовнішніх збурень (хитавиця судна-буксирувальника, течії) так і просторовим рухом БПА у динамічних режимах, коли необхідно змінювати траєкторію його руху згідно завданню підводної місії [6].

Така постановка завдання синтезу високоточної САК вимагає комплексного підходу до аналізу можливостей безекіпажної БПС як об'єкта керування, яка б передбачала використання всіх можливих каналів керування рухом БПА, починаючи з каналів керування самим БПА і закінчуючи керуванням КЛ і СБ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання автоматизації керування буксируваними підводними апаратами і системами постійно привертають увагу науковців та фахівців з експлуатації морської техніки. У таких задачах знайшли застосування як традиційні ПІД-регулятори, так і регулятори на основі застосування елементів штучного інтелекту.

Так, у роботі [7] досліджується вплив хитавиці СБ та пропонуються ПІД-регулятори для її компенсації, у томі числі й за допомогою КЛ, що компенсує цей вплив. У роботі [4] у зв'язку зі складністю отримання математичної моделі БПА запропоновано підхід на основі застосування нечіткої логіки. Роботи [6, 8] присвячені аналізу динаміки та продуктивності БПА при роботі в умовах невизначеності. Для випадку лінеаризованої моделі БПА авторами пропонується адаптивна схема регулятора, яка включає багатоваріантну ідентифікаційну процедуру в режимі «on-line» для поліпшення продуктивності БПС.

У науковому дослідженні [9] для стабілізації датчика турбулентності води пропонується його буксирування з заглиблювачем-привантажувачем. Виконано Simulink-моделювання та досліджено вплив зовнішніх збурень на статику КБ, синтезовано ПІД-регулятор.

У роботах [10, 11] досліджено нелінійний, адаптований по Ляпунову закон регулювання БПА, який мінімізує похибки його крену, курсу та глибини до нуля. Контролер призначений для роботи в умовах невизначеності параметрів підводного апарата. У запропонованій реалізації використовують нелінійний спостерігач для оцінки лінійних швидкостей, що використовуються контролером, таким чином, звільняючись від потреби в датчиках високої вартості.

У роботі [12] проведено аналіз нелінійної динаміки процесу буксирування КБ. Кабель моделювався і аналізувався за допомогою нового методу вузлових позицій кінцевого елемента, який обчислює положення кабелю безпосередньо замість переміщення методом існуючих кінцевих елементів.

Аналізу сучасного стану розвитку та можливостей практичного застосування безекіпажних надводних суден присвячено роботи [13, 14].

Розглянуті та інші публікації стосуються розробки методів математичного моделювання КБ як гнучких елементів з відомими параметрами та дослідження ефективності синтезованих регуляторів просторового положення БПА. Однак, питання моделювання БПС в умовах невизначеності зовнішніх збурень у науковій літературі висвітлені недостатньо.

Що ж стосується автоматизації керування рухом безекіпажних БПС у цілому, то відомі публікації стосуються синтезу та дослідження ефективності тільки регуляторів просторового руху БПА [15] та синтезу узагальненої структури ручного та автоматичного керування БПС, яка базується на населеному СБ [16]. Питання комплексного керування безекіпажною БПС, розгорнутою на борту безекіпажного СБ, яка працює в умовах невизначеності зовнішніх збурень, у літературі не розглядаються.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз останніх публікацій у напрямку автоматизації керування БПС показав, що найбільш дослідженими є питання автоматизації окремих режимів їх функціонування. Однак високоточне автоматичне керування безекіпажними БПА вимагає комплексної автоматизації у вигляді багатоканальної САК, яка повинна мати можливість узгоджено керувати усіма їх елементами: просторовим положенням безекіпажного БПА, довжиною попущеної частини КБ та швидкістю руху безекіпажного СБ.

Крім того, відомі математичні моделі БПС, які використовуються в задачах синтезу САК, передбачають наявність відомостей про гідродинамічні параметри КБ та БПА. Однак, це не завжди можливо, оскільки вони змінюються у ході експлуатації під впливом гідростатичного тиску (КБ) та функціонування корисного вантажу (БПА).

Метою дослідження є синтез структури узагальненої системи автоматичного керування безекіпажною буксируваною підводною системою у складі безекіпажного судна-буксирувальника, автоматичної кабельної лебідки і безекіпажного буксируваного підводного апарата, яка функціонує в умовах невизначеності збурень.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв’язано наступні задачі:

– визначено основні режими роботи безекіпажної БПС у нормальних та аварійних режимах;

– розроблено узагальнену структуру системи автоматичного керування буксируваною підводною системою «безекіпажне судно-буксирувальник – кабельна лебідка – безекіпажний буксируваний підводний апарат», яка функціонує в умовах невизначеності збурень;

– сформульовано у загальному вигляді основні вимоги до математичних моделей БПС та особливості їх застосування при побудові підсистем автоматичного керування окремими елементами безекіпажної БПС як складових процесу керування підводною місією.

Далі у тексті термін «безекіпажний» для БПС та БПА опускаємо для зручності викладення матеріалу.

Викладення основного матеріалу. Функціонування БПС протікає в умовах дії зовнішніх збурень – хитавиці КБ, обумовленої морським хвилюванням, епюри підводної течії, яка впливає на гідродинамічні сили КТ. Маємо наступні основні технологічні режими роботи БПС R, які вимагають високоточної стабілізації крену і диференту БПА у цих умовах застосування:

– прямолінійний рух БПА зі стабілізацією висоти над ґрунтом h_{H} чи глибини h_{D} занурення (відповідно, режими R_{SH} і R_{SD});

– рух БПА за заданою плоскою вертикальною чи горизонтальною траєкторією (відповідно, режими R_{FV} і R_{FF});

– просторовий рух БПА за заданою траєкторією, коли необхідно забезпечувати керовану зміну поточних координат БПА одночасно по вертикалі й по горизонталі (режим R_T).

До основних аварійних режимів роботи БПС можна віднести вимушені відхилення від вказаних вище режимів з-за появи навігаційних перешкод, які загрожують зіткненнями та пошкодженнями БПА та/чи його КБ. Аварійні ситуації можуть виникнути у будь-якому з вище названих режимів, тому позначимо їх індексом «A».

Крім того, зазвичай, виділяють ще два службових режими [16]:

– підготовчий режим r_0 розгортання БПС у робоче положення – опускання БПА за борт на стопі СБ, рух СБ малим ходом з одночасним витравлюванням КБ і заглибленням БПА, вихід БПА на задану глибину, початок руху БПС із заданою швидкістю буксирування v_{TB} і перевірка працездатності всіх складових системи;

– режим згортання БПС r_E, що передбачає повернення БПА на борт СБ і приведення буксируваної системи у початкове положення.

Таким чином, повний перелік R режимів роботи БПС можна представити у вигляді множини:

$$R=\{r_0;\ R_{SH};\ R_{SD};\ R_{FV};\ R_{FF};\ R_T;\ R_{SHA};\ R_{SDA};\ R_{FVA};\ R_{FFA};\ R_{TA};\ r_E\}. \quad (1)$$

Оскільки БПС з позицій автоматизації керування є суттєво нелінійним об'єктом і працює в умовах невизначеності, проблема синтезу високоточної САК $S_{БПС}$ розпадається на чотири групи завдань[16]:

– завдання синтезу підсистеми SS_{TB} автоматичного керування рухом СБ – лінійною швидкістю СБ v_{TB} та параметрами плоского траєкторного (маневрового) руху СБ v_{TV} (наприклад, при зміні буксирувальних галсів);

– завдання синтезу підсистеми SS_{CW} автоматичного керування КЛ – керування довжиною L_{TC} попущеної частини КБ як гнучкого тіла у потоці води; керування цим параметром необхідне як при реалізації режимів r_0 та r_E, так і при реалізації майже всіх режимів множини R (крім режимів усталеного прямолінійного руху БПА);

– завдання синтезу підсистеми SS_{TA} автоматичного керування БПА як твердим тілом у потоці води;

– завдання синтезу підсистеми SS_{PL} автоматичного керування корисним вантажем БПА.

Таким чином, проблема синтезу високоточної САК $S_{БПС}$ має розв'язуватись шляхом автоматизації керування елементами БПС за чотирма каналами керування:

$$S_{БПС} = \{SS_{TB};\ SS_{CW};\ SS_{TA};\ SS_{PL}\}. \quad (2)$$

Перша група завдань синтезу зазначених в (2) підсистем пов'язана з синтезом ММ усталеного лінійного та акселеративного траєкторного руху СБ, синтезом та дослідженням методами комп'ютерного моделювання ефективності регуляторів підсистеми SS_{TB}, які забезпечують керовану зміну вектору сили $\vec{F}_{TC1}$ буксирування КБ, що прикладається до його корінного кінця (рис. 1).

Друга група завдань пов'язана з синтезом ММ гідродинаміки кабель-буксира як гнучкого тіла у потоці води, синтезом та дослідженням методами комп'ютерного моделювання ефективності керованої зміни довжини попущеної частини КБ, що виконується регуляторами підсистеми SS_{TC}.

Третя група завдань пов'язана з розробкою математичної моделі (ММ) гідродинаміки БПА як твердого тіла у потоці води, синтезом та дослідженням методами комп'ютерного моделювання ефективності регуляторів підсистеми SS_{TA} прямолінійного і просторового руху БПА, басейновими випробуваннями діючих макетів БПА з синтезованими регуляторами.

Четверта група завдань пов'язана з розробкою підсистеми $SS_{КВ}$ автоматичного керування корисним вантажем БПА – приведенням його у робочий режим, керуванням процесами його застосування, діагностики тощо

Ці завдання необхідно вирішувати на основі синтезу високоточних математичних моделей динаміки СБ, БПА і КБ у квазістаціонарних та перехідних режимах з урахуванням їх силової взаємодії.

Узагальнену структуру САК БПС, яка побудована на принципах комплексної автоматизації та містить всі чотири підсистеми керування елементами буксируваної системи, можна представити як п'ятирівневу систему автоматичного керування [17] (рис. 2).

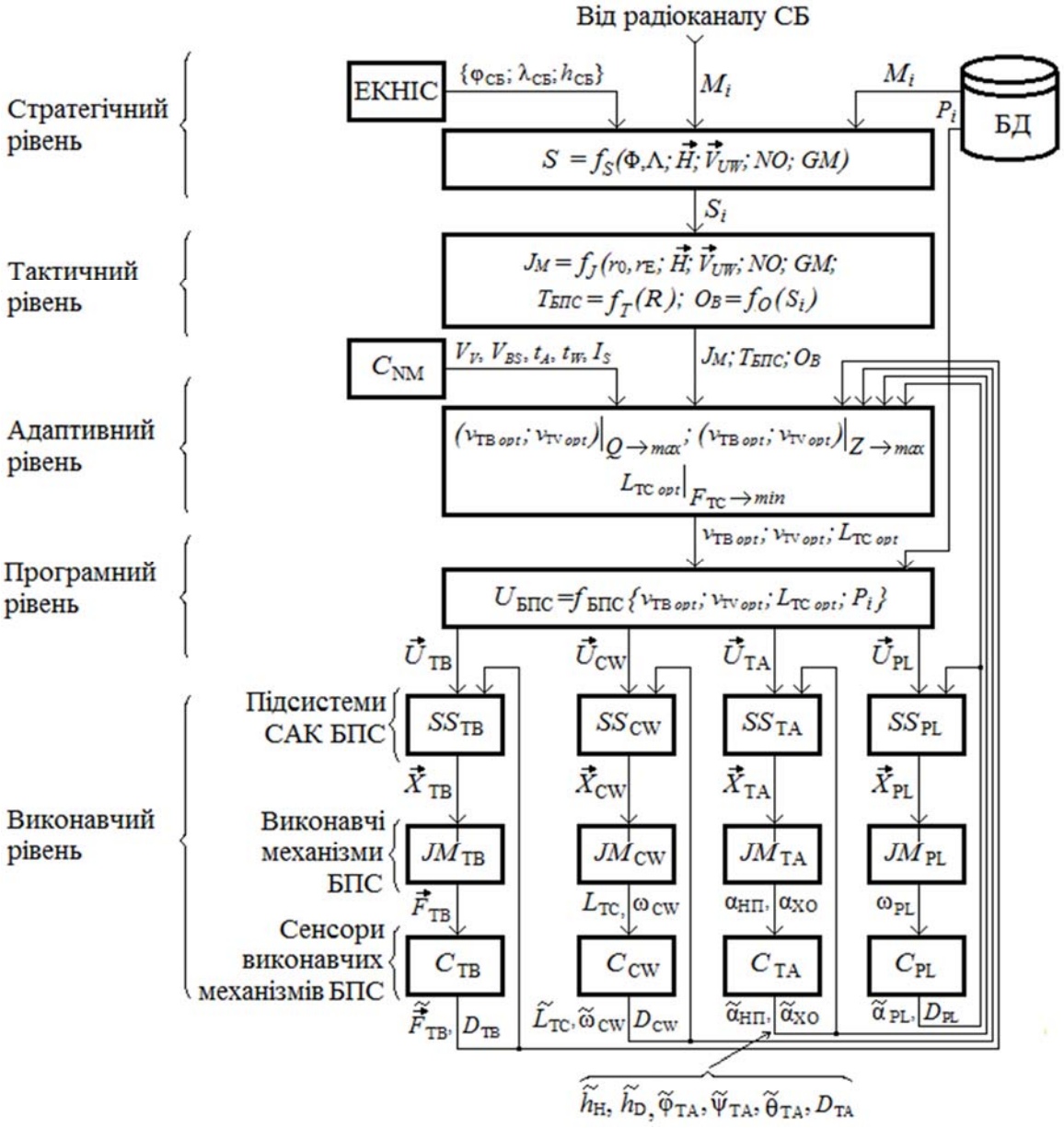

Рисунок 2 – Узагальнена структура САК БПС

Така структура САК БПС має:

– стратегічний рівень, на якому: аналізується задача для БПС (*i*-та місія M_i), що надійшла по радіоканалу або задана програмно у базі даних (БД) перед виходом БПС у море; планується загальне функціонування (стратегія S_i) БПС для її виконання з урахуванням розмірів заданої акваторії, її глибин і течій (географічних координат акваторії, заданих множинами широти і довготи (Ф,Λ), ізобат глибин моря ($\vec{H}$) та епюри

підводних течій ($\vec{V}_{UW}$), навігаційних особливостей та обмежень (*NO*) цієї акваторії (активного судноплавства, видобувної промислової діяльності, «нечистих ґрунтів» тощо) та гідрометеорологічних характеристик зовнішнього середовища (*GM*) («рози вітрів» $\vec{V}_V$, морського хвилювання $\vec{V}_{BS}$, температури повітря $\overline{t}_A$ та води $\overline{t}_W$, наявності криги на частині акваторії $\overline{I}_S$ тощо); для визначення поточного положення СБ на акваторії використовується інформація від електронної картографічної навігаційно-інформаційної системи (ЕКНІС) – його поточні географічні координати $\{\varphi_{СБ}; \lambda_{СБ}; h_{СБ}\}$;

– тактичний рівень, який планує реалізацію прийнятої стратегії; тут з урахуванням заданих характеристик *H, VV, NO* та *GM* обираються методики J_M виконання режимів r_0 та r_E, розробляються траєкторії $T_{БПС}$ просторового переміщення БПС для реалізації основних технологічних режимів *R* роботи БПС, формуються послідовності базових операцій O_B (наприклад, галсів СН) у відповідності до стратегії функціонування БПС тощо;

– адаптивний рівень, який коригує рішення тактичного рівня з урахуванням технічного стану елементів БПС та фактичного стану зовнішнього середовища V_V, V_{BS}, t_A, t_W, I_S, здійснює пошук оптимальних керуючих рішень у рамках обраної тактики виконання завдання, що надійшло від тактичного рівня керування; тут із залученням методів математичного моделювання визначаються оптимальні швидкості руху БПС v_{TBopt} та v_{TVopt} (за критеріями максимальної продуктивності *Q*, експлуатаційних витрат *Z*), обчислюються оптимальні довжини КБ L_{TCopt}, за яких мінімізуються сили $\vec{F}_{TC1}$ та $\vec{F}_{TC2}$ при різних режимах буксирування КБ і, таким чином, унеможливлюється його поперечна вібрація у потоці води, що набігає тощо;

– програмний рівень, який забезпечує узгоджене керування каналами у залежності від режиму роботи БПС згідно (1); тут синтезуються алгоритми групового керування виконавчими механізмами БПС та генерується (або залучається з БД) їх програмна реалізація P_i; вихідними сигналами цього рівня є вектор задаючих впливів $\vec{U}_{БПС} = \left\{\vec{U}_{TB},\ \vec{U}_{CW},\ \vec{U}_{TA},\ \vec{U}_{PL}\right\}$ для підсистем автоматичного керування елементами БПС (2);

– виконавчий рівень, який на основі задаючих впливів виробляє сигнали $\vec{X}_{БПС} = \left\{\vec{X}_{TB},\ \vec{X}_{CW},\ \vec{X}_{TA},\ \vec{X}_{PL}\right\}$ керування виконавчими механізмами $JM_{БПС} = \{JM_{TB}; JM_{CW}; JM_{TA}; JM_{PL}\}$ елементів БПС; для СБ такими виконавчими механізмами є рушійний пристрій (розвиває вектор упору $\vec{F}_{TB}$), для КЛ – це привод кабельного барабана (забезпечує кутову частоту обертання кабельного барабана ω_{CW} та регулює довжину L_{TC} попущеної частини КБ), для БПА – це приводи повороту його несучих поверхонь (НП) та хвостового оперення (ХО), для КВ – це приводи повороту (PL) відеокамер, сонарів тощо.

Вихідними змінними сенсорів БПС $\{C_{TB}; C_{CW}; C_{TA}; C_{PL}\}$ є сигнали зворотного зв'язку її елементів, які використовуються відповідними підсистемами виконавчого рівня та адаптивним рівнем САК БПС (позначені знаком «~»): дані про фактичний вектор упору СБ $\tilde{\vec{F}}_{TB}$, про результати роботи КЛ (сигнали $\tilde{\omega}_{CW}$ та $\tilde{L}_{TC}$), про просторовий стан та динаміку БПА (фактичні значення кутів повороту його несучих поверхонь $\tilde{\alpha}_{НП}$ та хвостового оперення $\tilde{\alpha}_{ХО}$, глибину $\tilde{h}_H$ та висоту ходу над ґрунтом $\tilde{h}_D$, кути його рискання $\tilde{\varphi}_{TA}$, крену $\tilde{\theta}_{TA}$, диференту $\tilde{\psi}_{TA}$ та, у загальному випадку, їхні перша і друга похідні, на рис. 2 не показані), про роботу виконавчих механізмів КВ (сигнали $\tilde{\alpha}_{PL}$). Крім того, обов'язковою складовою сигналів від сенсорів $\{C_{TB}; C_{CW}; C_{TA}; C_{PL}\}$ є діагностична інформація про технічний стан вказаних виконавчих механізмів $\{D_{TB}; D_{CW}; D_{TA}; D_{PL}\}$.

Попередній аналіз показує, що невід'ємною складовою задач синтезу САК на всіх рівнях є широке використання математичних моделей (ММ) як для організаційного планування підводних місій, так і для синтезу регуляторів окремих складових БПС – СБ, КЛ, БПА та КВ.

Розглянемо у загальному вигляді основні вимоги до ММ БПС та особливості їх побудови і застосування на різних рівнях функціонування САК БПС.

На стратегічному рівні, де в автоматичному режимі розробляється стратегія S_i виконання місії M_i, математичне моделювання має застосовуватись для попереднього аналізу множини n варіантів організації виконання стратегії S_{in} з урахування навігаційних обмежень, характеристик зовнішнього середовища та за заданими критеріями оптимальності (продуктивність Q, безпечна експлуатація БПС Z та ін.). Очевидно, що в основу розроблюваних ММ та їх застосування тут можуть бути покладені відомі методи дослідження операцій та їх програмні реалізації [18].

На тактичному рівні визначаються режими роботи БПС R, необхідні для реалізації прийнятої стратегії $S_i \in S_{in}$, обираються відомі та/чи розробляються нові методики J_M їх реалізації, визначаються характеристик пошукових галсів СБ та ін. [19]. Для цього режиму математичне моделювання доцільно застосовувати з метою конкретизації виконання основних технологічних режимів роботи БПС R – дослідження особливостей реалізації керованого траєкторного руху БПС $T_{БПС}$, побудови послідовності виконання базових операцій O_B (руху БПА галсами з визначеними характеристиками, використання КВ тощо).

На адаптивному рівні за допомогою математичного моделювання доцільно уточнювати процеси керованого руху елементів БПС з урахуванням їх поточного технічного стану (відмов обладнання, тренду технічних характеристик у ході експлуатації тощо). Важливою складовою ММ є дослідження керованого руху БПС в умовах впливу зовнішніх збурень ($\vec{V}_{UW}$, $\vec{V}_V$, $\vec{V}_{BS}$, $\overline{t}_A$, $\overline{t}_W$, $\overline{I}_S$) та пошук оптимальних за критеріями Q та Z значень експлуатаційних параметрів основних режимів R – швидкостей руху v_{TBopt} та v_{TVopt}, довжини попущеної частини КБ L_{TCopt}, траєкторій безпечного руху БПА та ін.

На програмному рівні з залученням методів математичного моделювання відпрацьовуються алгоритми узгодженого керування основними елементами БПС (СН, КЛ, БПА та КВ) та перевіряється ефективність їх функціонування у квазістаціонарних (усталених) та динамічних режимах, а також налагоджуються програми їх реалізації. Тут використовуються ММ цих елементів, зазвичай, у вигляді систем нелінійних диференціально-алгебраїчних рівнянь, які описують роботу елементів БПС у миттєвих змінних.

На виконавчому рівні ММ основних елементів БПС із програмного рівня використовуються, в основному, у складі регуляторів СН, КЛ, БПА та КВ для забезпечення їх роботи з заданою точністю.

Висновки. У статті розглянуті сучасні завдання автоматизації керування безекіпажною буксируваною підводною системою у складі безекіпажного судна-буксирувальника, автоматичної кабельної лебідки і безекіпажного буксируваного підводного апарата, яка функціонує в умовах невизначеності збурень.

Дано опис основних режимів роботи безекіпажної БПС у нормальних та аварійних режимах та запропоновано узагальнену структуру системи автоматичного керування буксируваною підводною системою «безекіпажне судно-буксирувальник – кабельна лебідка – безекіпажний буксируваний підводний апарат», яка функціонує в умовах невизначеності зовнішніх збурень.

Сформульовано основні вимоги до математичних моделей БПС та показано головні напрямки їх застосування в задачах синтезу підсистем автоматичного керування окремими елементами безекіпажної БПС як складових процесу керування підводною місією.

Подальші наукові дослідження у напрямку автоматизації безекіпажних буксируваних підводних систем доцільно виконувати шляхом синтезу математичного і програмного забезпечення систем автоматичного керування, розробки діючих макетів та перевірки їх ефективності шляхом басейнових і морських натурних випробувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fossen T. I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. – John Wiley and Sons Ltd, 1994. – 494 p.

2. Динамика подводных буксируемых систем [Текст] / В. И. Поддубный, Ю. Е. Шамарин, Д. А. Черненко, Л. С. Астахов. – СПб : Судостроение, 1995. – 200 с.

3. Popov O.S., Burakov M.V.Principle of construction and structure of anautomated control system by underwater towedcomplex for ocean researchers. – Transactions on the Built Environment. WIT Press, 1997. Vol 24. – P. 465–472.

4. Holger Korte. Track Control of a Towed underwater Sensor Carrier. – IFAC Control in Transportation Systems, Braunschweig, Germany, 2000. – P. 89–94.

5. Римский-Корсаков Н. А. Управление положением телеуправляемого подводного аппарата в режиме совместного с носителем движения. – Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 11 (часть 1) – С. 13-17.

6. Giampiero Campa, Jacqueline Wilkie, Mario Innocenti. Robust Control and Analysis of a Towed Underwater Vehicle. – International Journal of Adaptive Control and Signal Processing 12(8) · December 2001. – Pages 689-716.

7. Кувшинов Г. Е., Наумов Л. А., Чупина К. В. Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов. – Владивосток : Дальнаука, 2005. – 285 с.

8. Giampiero Campa, Mario Innocenti, Jacqueline Wilkie. MODEL-BASED ROBUST CONTROL FOR A TOWED UNDERWATER. – Jacqueline Wilkie, Article (PDF Available) · December 2001 with 22 Reads. DOI: 10.2514/6.1996-3829.

9. Amy Linklater. Design and Simulation of a Towed Underwater Vehicle. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State Universityin partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Aerospace Engineering. – Blacksburg, Virginia, 2005. – 170 Pp.

10. Francisco Curado Teixeira, António Pedro Aguiar, António Pascoal. Nonlinear control of an underwater towed vehicle. 2006. https://docplayer.net/95496116-Nonlinear-control-of-an-underwater-towed-vehicle-francisco-curado-teixeira-1-antonio-pedro-aguiar-antonio-manuel-pascoal.html

11. Francisco Curado Teixeira, António Pedro Aguiar, António Pascoal. Nonlinear adaptive control of an underwater towed vehicle. Ocean Engineering, Volume 37, Issue 13, September 2010, P. 1193–1220.

12. Sun F.J., Zhu Z.H., La Rosa M. Dynamic modeling of cable towed body using nodal position finite element method. Ocean Engineering, Volume 38, Issue 4, 2011, pp. 529-540.

13. Justin Manley. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. – Conference: OCEANS, 2008. – DOI: 10.1109/OCEANS.2008.5152052.

14. Arzamendia M, Gregor D., Reina D.G., Toral S.L. An Evolutionary Approach to Constrained Path Planning of an Autonomous Surface Vehicle for Maximizing the Covered Area of Ypacarai Lake/ – Soft Computing: Springer Verlag, 2017. – DOI: 10.1007/s00500-017-2895-x.

15. Toda, Masayoshi. A Theoretic Analysis of a Control System Structure of Towed Underwater Vehicles. [Text] / Masayoshi Toda // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, 2005, Seville, Spain, December 12-15. – Seville: 2005. – P. 7526–7533.

16. Блинцов, А.В. Система автоматического управления пространственным движением однозвенной подводной буксируемой видеосистемы [Текст] / А. В. Блинцов, Ж.Ю. Бурунина, П.Г. Клименко, Т. Д. Чан // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 2. – С. 70–74.

17. Блінцов В. С., Соколов В. В. Сучасні задачі автоматизації керування безекіпажним надводним катером / В. С. Блінцов, В. В. Соколов // Автоматика / Automatics – 2016 : Матеріали XXIII Міжнародної конференції з автоматичного управління, 22-23 вересня 2016 р. – Суми: СДУ, 2016. – С. 201–202.

18. Joseph Geunes. Operations Planning: Mixed Integer Optimization Models. – CRC Press, 2017. – 218 P.

19. Joaquín Aranda Gallego, Manuel Armada, Jesús De la Cruz. Automation for the Maritime Industries. Produssion Grafica Multimedia, PGM, Madrid, Spain, 2005. – 273 Pages.

REFERENCES

1. Fossen T. I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. – John Wiley and Sons Ltd, 1994. – 494 pages.

2. Poddubnyy V. I., Shamarin Yu. Ye., Chernenko D. A., Astakhov L. S. Dinamika podvodnykh buksiruemykh sistem [Dynamics of underwater towed systems]. Saint Petersburg, Sudostroenie, 1995, 200 p.

3. Popov O.S., Burakov M.V. Principle of construction and structure of an automated control system by underwater towed complex for ocean researchers. – Transactions on the Built Environment. WIT Press, 1997. Vol 24. – 465-472 Pp.

4. Holger Korte. Track Control of a Towed underwater Sensor Carrier. – IFAC Control in Transportation Systems, Braunschweig, Germany, 2000. – Pp. 89-94.

5. Rimskiy-Korsakov N.A. Upravlenie polozheniem teleupravlyaemogo podvodnogo apparata v rezhime sovmestnogo s nositelem dvizheniya [Control of the position of the remote-controlled underwater vehicle in the mode of joint motion with the carrier]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy – International Journal of Applied and Basic Research, 2017, no. 11 (part 1), pp. 13-17.

6. Giampiero Campa, Jacqueline Wilkie, Mario Innocenti. Robust Control and Analysis of a Towed Underwater Vehicle. – International Journal of Adaptive Control and Signal Processing 12(8) · December 2001. – Pages 689-716.

7. Kuvshinov G.Ye., Naumov L.A., Chupina K.V. Sistemy upravleniya glubinoy pogruzheniya buksiruemykh obektov [Control systems for the depth of the towed objects]. Vladivostok, Dalnauka, 2005. 285 p.

8. Giampiero Campa, Mario Innocenti, Jacqueline Wilkie. MODEL-BASED ROBUST CONTROL FOR A TOWED UNDERWATER. – Jacqueline Wilkie, Article (PDF Available) · December 2001 with 22 Reads. DOI: 10.2514/6.1996-3829.

9. Amy Linklater. Design and Simulation of a Towed Underwater Vehicle. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Sciencein Aerospace Engineering. – Blacksburg, Virginia, 2005. – 170 Pp.

10. Francisco Curado Teixeira, António Pedro Aguiar, António Pascoal. Nonlinear control of an underwater towed vehicle. 2006. https://docplayer.net/95496116-Nonlinear-control-of-an-underwater-towed-vehicle-francisco-curado-teixeira-1-antonio-pedro-aguiar-antonio-manuel-pascoal.html

11. Francisco Curado Teixeira, António Pedro Aguiar, António Pascoal. Nonlinear adaptive control of an underwater towed vehicle. Ocean Engineering, Volume 37, Issue 13, September 2010, Pages 1193-1220.

12. Sun F.J., Zhu Z.H., La Rosa M. Dynamic modeling of cable towed body using nodal position finite element method. Ocean Engineering, Volume 38, Issue 4, 2011, pp. 529-540.

13. Justin Manley. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. – Conference: OCEANS, 2008. – DOI: 10.1109/OCEANS.2008.5152052.

14. Arzamendia M, Gregor D., Reina D.G., Toral S.L. An Evolutionary Approach to Constrained Path Planning of an Autonomous Surface Vehicle for Maximizing the Covered Area of Ypacarai Lake/ – Soft Computing: Springer Verlag, 2017. – DOI: 10.1007/s00500-017-2895-x.

15. Toda, Masayoshi. A Theoretic Analysis of a Control System Structure of Towed Underwater Vehicles. [Text] / Masayoshi Toda // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005 Seville, Spain, December 12-15. – Seville: 2005. – P. 7526-7533.

16. Blintsov A. V., Burunina Zh. Yu., Klimenko P. G., Chan T. D. Sistema avtomaticheskogo upravleniya prostranstvennym dvizheniem odnozvennoy podvodnoy buksiruemoy videosistemy [The system of automatic control of the spatial movement of the single-link underwater towed video system] / Zbirnik naukovikh prats NUK [Collection of scientific works of NUOS], Mikolaïv, NUOS, 2012, no. 2, pp. 70-74.

17. Blincov V.S., Sokolov V.V. Suchasni zadachi avtomatyzaciji keruvannja bezekipazhnym nadvodnym katerom [Modern tasks of automation of control by a unmanned supercharger]. Materialy XXIII Mizhnarodnoji konferenciji z avtomatychnogho upravlinnja «Automatics – 2016» (22.09-23.09.2016) [Proceedings of the XXIII International Conference on Automatic Control «Automatics – 2016»]. Sumy, 2016, pp.201-202.

18. Joseph Geunes. Operations Planning: Mixed Integer Optimization Models. – CRC Press, 2017. – 218 Pages.

19. Joaquín Aranda Gallego, Manuel Armada, Jesús De la Cruz. Automation for the Maritime Industries. Produssion Grafica Multimedia, PGM, Madrid, Spain, 2005 - 273 Pages.

Соколов В. В. АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗЭКИПАЖНОЙ БУКСИРУЕМОЙ ПОДВОДНОЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Выполнен обзор современного состояния применения безэкипажных буксируемых подводных систем для выполнения работ на мелководных акваториях. Приведены результаты анализа современных подходов к автоматизации управления такими системами. Определены основные режимы использования безэкипажных буксируемых подводных систем в нормальных и аварийных ситуациях. Сформулированы задачи автоматизации управления этими системами как существенно нелинейными объектами морской техники в составе судна-буксировщика, его кабельной лебедки, безэкипажного буксируемого подводного аппарата и его полезного груза. Разработана обобщенная пятиуровневая структура системы автоматического управления безэкипажной буксируемой подводной системой. Рассмотрены особенности функционирования стратегического, тактического, адаптивного, программного и исполнительного уровней системы. Рассмотрены основные требования к созданию математических моделей основных элементов безэкипажной буксируемой подводной системы как составляющих системы их автоматического управления. Определено направление дальнейших исследований по автоматизации таких систем.

Ключевые слова: *безэкипажная буксируемая подводная система, автоматическое управление, структурная схема, математическая модель.*

Sokolov V. V. UNMANNED TOWED UNDERWATER SYSTEM CONTROL AUTOMATION UNDER EXTERNAL DISTURBANCES INFLUENCE

An overview of the current state of use of unmanned towed underwater systems for performing works in shallow water areas is carried out. The main tasks of underwater search and water environment research, which are expedient to carry out with application of unmanned towed underwater systems, are formulated. The results of the analysis of modern approaches to control automation of such systems are given. The necessity of an integrated approach to control automation of such systems is established for achievement of high indexes of quality of underwater works. The basic modes of using unmanned towed underwater systems in normal and emergency situations are determined. The main technological modes include straight-line

motion of an unmanned towed underwater vehicle with stabilization of height above the ground or depth of immersion, the movement of the vehicle on the given flat vertical or horizontal trajectory and the spatial motion of the vehicle in a given trajectory. The tasks of control automation of these systems as essentially non-linear objects of naval equipment are formulated. Such system consist of a towing vessel, cable winch, unmanned towed underwater vehicle and its payload. The generalized five-level structure of the automatic control system of an unmanned towed underwater system is developed. At the strategic level, an underwater mission of an unmanned towed underwater system is analyzed and a strategy for its implementation is being developed. At the tactical level, a plan is developed to implement the adopted strategy, the methods of performing all modes of operation are selected, the trajectories of spatial movement of the towed system for the implementation of the main technological modes of its work are developed. At the adaptive level, tactical level decisions are adjusted taking into account the technical state of the elements of the towed system and the actual state of the environment, and the search for optimal control decisions within the framework of the chosen task tactics is carried out. The program level provides the synthesis of the algorithms of group control of the executive mechanisms of the towed system and generates their program implementation for the executive level. The basic requirements for the creation of mathematical models of the main elements of the unmanned towed underwater system as components of their automatic control system are considered. The direction of further research on automation of such systems is outlined.
Keywords: *unmanned towed underwater system, automatic control, structural scheme, mathematical model.*

© Соколов В. В.

Статтю прийнято
до редакції 13.12.18