

УДК 656.61:629.5
Б 69

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КАБЕЛЬНОЮ ЛЕБІДКОЮ ПРИВ'ЯЗНОЇ ПІДВОДНОЇ СИСТЕМИ

О. В. Блінцов, канд. техн. наук;
В. А. Надточій, асп.

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. На основі аналізу режимів роботи прив'язної підводної системи розроблено узагальнений алгоритм роботи та структуру системи автоматичного керування для режиму якорної стоянки судна-носія. Систему керування побудовано з використанням спеціалізованого програмного забезпечення «QUASTEC».

Ключові слова: прив'язна підводна система, режими роботи, структура системи керування, алгоритм роботи.

Аннотация. На основе анализа режимов работы привязной подводной системы разработаны обобщенный алгоритм работы и структура системы автоматического управления для режима якорной стоянки судна-носителя. Система управления построена с использованием специализированного программного обеспечения «QUASTEC».

Ключевые слова: привязная подводная система, режимы работы, структура системы управления, алгоритм работы.

Abstract. The generalized algorithm of work and an automatic control system structure for the vessel-carrier anchorage mode have been developed on the basis of the analysis of tethered underwater system operation modes. The control system is developed with the use of the specialized «QUASTEC» software.

Keywords: tethered underwater system, operation mode, control system structure, operation algorithm.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Прив'язні підводні системи (ППС) широко використовуються у світовій і вітчизняній морській практиці для виконання пошукових та інспекційних підводних робіт, оскільки забезпечують режим «реального часу» для їх операторів та «ефект присутності» під водою для фахівців-неводолазів [1, 13]. Ці переваги обумовили розширення переліку дистанційно керованих підводно-технічних робіт, зокрема маніпуляційного типу. Такі роботи виконуються за допомогою встановлених на підводних апаратах (ПА) систем підводних маніпуляторів (ПМ), керованих автоматично або вручну операторами ПА у дистанційному режимі.

На цей час застосування ПА з ПМ здебільшого спостерігається з борту спеціалізованих суден-носіїв (СН) підводної техніки, оснащених системами динамічного позиціонування, які дають змогу утримувати СН над підводним об'єктом (ПО), з яким працює підводний апарат з маніпулятором [10]. Проте їх використання пов'язане з великими фінансовими затратами, оскільки орендна оплата таких СН досить висока [9]. Крім того, на цей час в Україні практично відсутні експедиційні судна з динамічним позиціонуванням.

При застосуванні ПА на малих глибинах (до 100 метрів) зазвичай використовують морські водолазні судна з постановкою їх на якорі [7]. Однак практика свідчить, що судно при цьому виконує значні переміщення по водній поверхні під дією вітру, течії та хвиль. Це породжує збурення, які через кабель-трос (КТ) передаються на корпус ПА. При цьому до поздовж-

ніх гармонійних зусиль від хитавиці СН на ходовому кінці КТ додається зміна напрямку вектора сили його стаціонарного обтікання, породжена зміною просторового положення КТ через переміщення СН. У результаті суттєво звужується діапазон кліматичних умов застосування та знижується ефективність ППС.

За цих умов експлуатації ПА для його утримання біля підводного об'єкта та застосування підводного маніпулятора необхідно регулювати довжину КТ таким чином, щоб збурення від переміщення заякореного судна та хитавиці, які передаються по КТ на підводний апарат, були мінімальними. Тому актуальним є наукове завдання створення системи автоматичного керування (САК) кабельною лебідкою (КЛ) ППС в умовах переміщень судна-носія та його хитавиці.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання регулювання довжини тросів і кабель-тросів прив'язних підводних апаратів та систем постійно знаходяться у полі зору вітчизняних і зарубіжних науковців. До найбільш значимих наукових результатів за цим напрямком можна віднести роботи професорів Б.А. Бугаєнка, Ю.Є. Шамаріна (Україна), Г.Е. Кувшинова (Росія) [5, 6, 11]. У вказаних та інших роботах детально розроблено питання математичного опису процесів, що проходять у морських прив'язних системах, та досліджено технічні засоби зменшення впливу хитавиці на підводні апарати. Як головні технічні рішення у цих роботах розглянуто застосування

механічних амортизаторів КЛ, яка розташована на СН [5, 6], та включення до складу обладнання ПА додаткової амортизуючої лебідки з розробкою системи керування нею [11]. Такі рішення ускладнюють конструкцію суднової КЛ та ПА, збільшують їхні масогабаритні розміри. При цьому нейтралізація силового впливу переміщень СН на ПА у цих роботах не розглядається.

Авторами пропонується концептуально інший підхід до розв'язання задачі вдосконалення САК кабельною лебідкою ППС, який ґрунтується на комплексному оцінюванні процесу зміни взаємного розташування СН і ПА та динаміки СН на хитавиці, на основі якого синтезується САК судновою КЛ для нейтралізації вказаних збурень.

МЕТА РОБОТИ – аналіз основних режимів функціонування морського комплексу «судно-носій – прив'язна підводна система», який експлуатується в умовах дії вітрових збурень та підводної течії за відсутності системи динамічної стабілізації судна-носія, та синтез системи автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи для мінімізації збурень на корпус підводного апарата від кабель-троса.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розглянемо основні режими роботи системи «судно-носій – прив'язна підводна система» для випадку, коли судно не має динамічного позиціонування. Як зовнішні збурення будемо розглядати тільки вітровий вплив на СН (розу вітрів акваторії \vec{V}) та підводну течію $\vec{V}_{\text{пт}}$, яка діє на КТ і ПА. Робоча зона (РЗ) ППС, межі якої утворюються точками максимальної віддаленості ПА від СН, має вигляд еліпса, розміри осей якого залежать від глибини моря h та від тягових характеристик рушійно-рульового комплексу (РПК) ПА [1].

Система «судно-носій – прив'язна підводна система» може функціонувати у трьох основних режимах (рис. 1):

– судно-носій стоїть на якорі (Я) над робочою зоною донної поверхні, де знаходиться ПО, і під дією вітру виконує повільні переміщення по траєкторії $S_{\text{я}}$ у радіусі дії якорного ланцюга (ЯЛ), що викликає переміщення корінного кінця КТ ППС; підводний апарат при цьому, як і в наступних режимах, позиціонується біля ПО (див. рис. 1,а);

– судно-носій лежить у дрейфі та піддається впливу вітру, через що повільно зміщується (зазвичай лінійно по траєкторії $S_{\text{д}}$) над РЗ донної поверхні, де знаходиться ПО (див. рис. 1,б);

– судно-носій має дві фази руху: фазу дрейфу від вихідної точки A у напрямку ПО до кінцевої точки дрейфу B , обмеженої максимальною довжиною КТ на барабані КЛ, та фазу повернення СН у вихідну точку

початку дрейфу по траєкторії $S_{\text{р}}$ (див. рис. 1,в); при цьому ПА постійно позиціонується біля ПО.

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

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

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

Крім того, до корпусу ПА через КТ будуть прикладатися сили збурення, породжені хитавицею СН.

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

мінімізація статичної складової $\vec{F}_{\text{КТs}}$ сили $\vec{F}_{\text{КТ}}$ на ходовому кінці КТ, обумовленої його гідродинамічним обтіканням, для всього діапазону можливих переміщень СН під дією рози вітрів \vec{V} , шляхом установлення за допомогою КЛ оптимальної довжини $L_{\text{КТopt}}$ попущеної частини КТ для кожної точки траєкторій $S_{\text{я}}$, $S_{\text{д}}$ та $S_{\text{р}}$ (стаціонарна постановка задачі обтікання КТ потоком води [2]);

мінімізація динамічної складової $\vec{F}_{\text{КТd}}$ сили на ходовому кінці КТ $\vec{F}_{\text{КТ}}$, яка обумовлена вібрацією КТ у потоці води (сила $\vec{F}_{\text{КТv}}$ [8]) та переміщенням корінного кінця КТ у вертикальній площині через хитавицю СН (сила $\vec{F}_{\text{КТw}}$).

При цьому мають місце наступні залежності:

$$\vec{F}_{\text{КТ}} = \vec{F}_{\text{КТs}} + \vec{F}_{\text{КТd}};$$

$$\vec{F}_{\text{КТs}} = f(\vec{V}_{\text{пт}}; d_{\text{КТ}}; \vec{L}_{\text{КТopt}}; C_{\text{КТ}});$$

$$\vec{F}_{\text{КТd}} = \vec{F}_{\text{КТv}} + \vec{F}_{\text{КТw}},$$

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

У роботі розглядається питання синтезу САК кабельною лебідкою у першій постановці, виходячи з відомого твердження [3], що для кожної пари точок

$\{\varphi, \lambda, h\}_{\text{CH}}$ і $\{\varphi, \lambda, h\}_{\text{ПА}}$, які визначають географічні координати взаємного розташування СН і ПА ППС при стаціонарному обтіканні потоком води, існує одна-єдина довжина $L_{\text{КТopt}}$ КТ нульової плавучості, при якій сили гідродинамічного опору КТ мінімальні. Задача САК полягає в обчисленні значення $L_{\text{КТopt}}$ для кожного поточного положення ППС у просторі та генерації керуючого впливу на виконавчий привід КЛ для фактичного встановлення обчисленого значення $L_{\text{КТopt}}$.

Поставлена задача є подальшим розвитком викладеного в [12] «Режиму мінімізації гідродинамічного опору КТ» з метою його інсталяції до задачі мінімізації статичної складової $\vec{F}_{\text{КТ}}$, для всього діапазону можливих переміщень СН під дією рози вітрів \vec{V} .

Блок-схема узагальненого алгоритму роботи запропонованої САК для першого режиму функціонування ППС наведена на рис. 2.

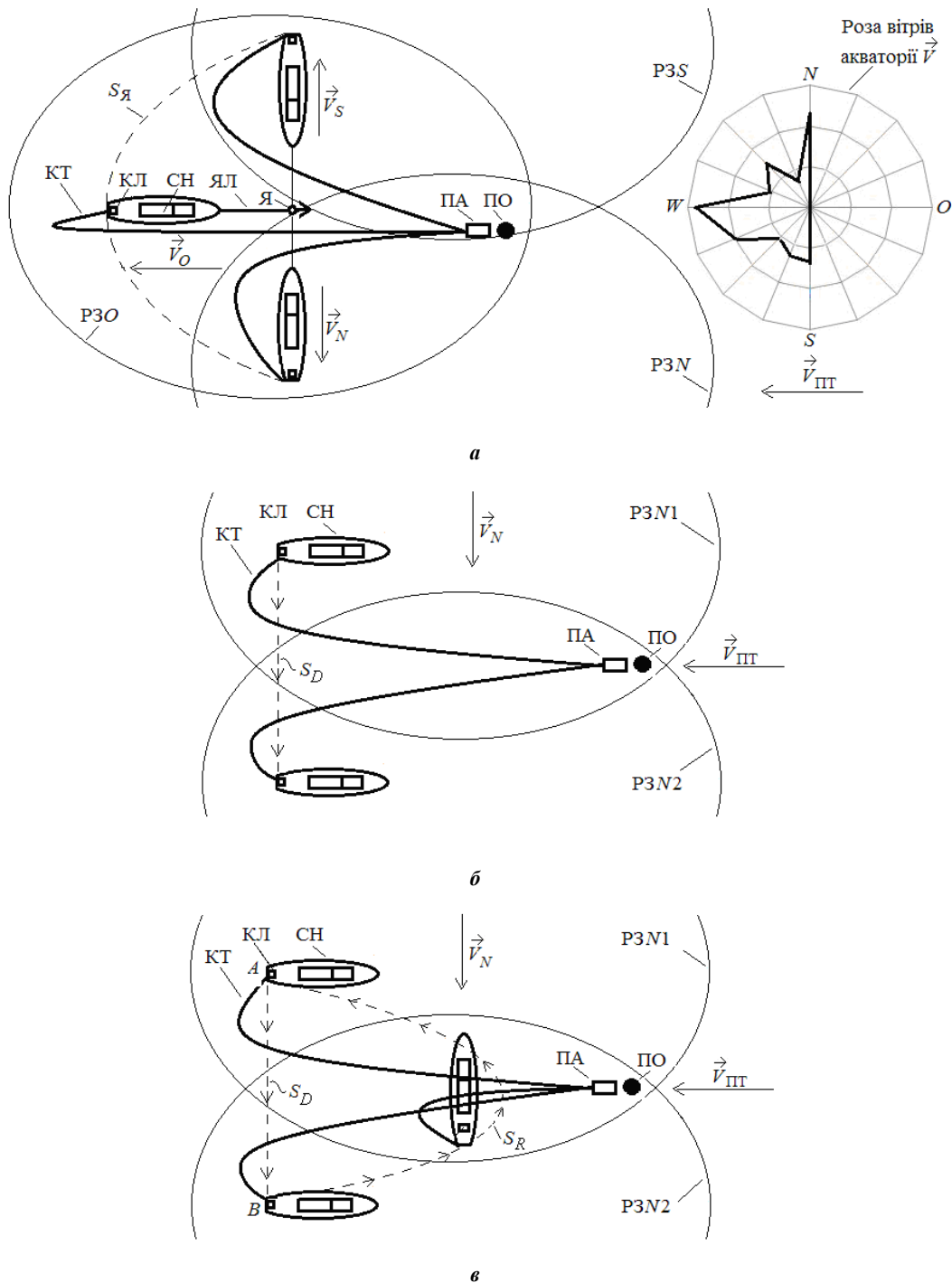


Рис. 1. Основні режими роботи системи «судно-носії – прив'язна підводна система»: P3S, P3O, P3N – робочі зони ППС при дії вітрів відповідно з півдня, сходу і півночі; P3N1, P3N2 – робочі зони початкової і кінцевої точок дрейфу СН

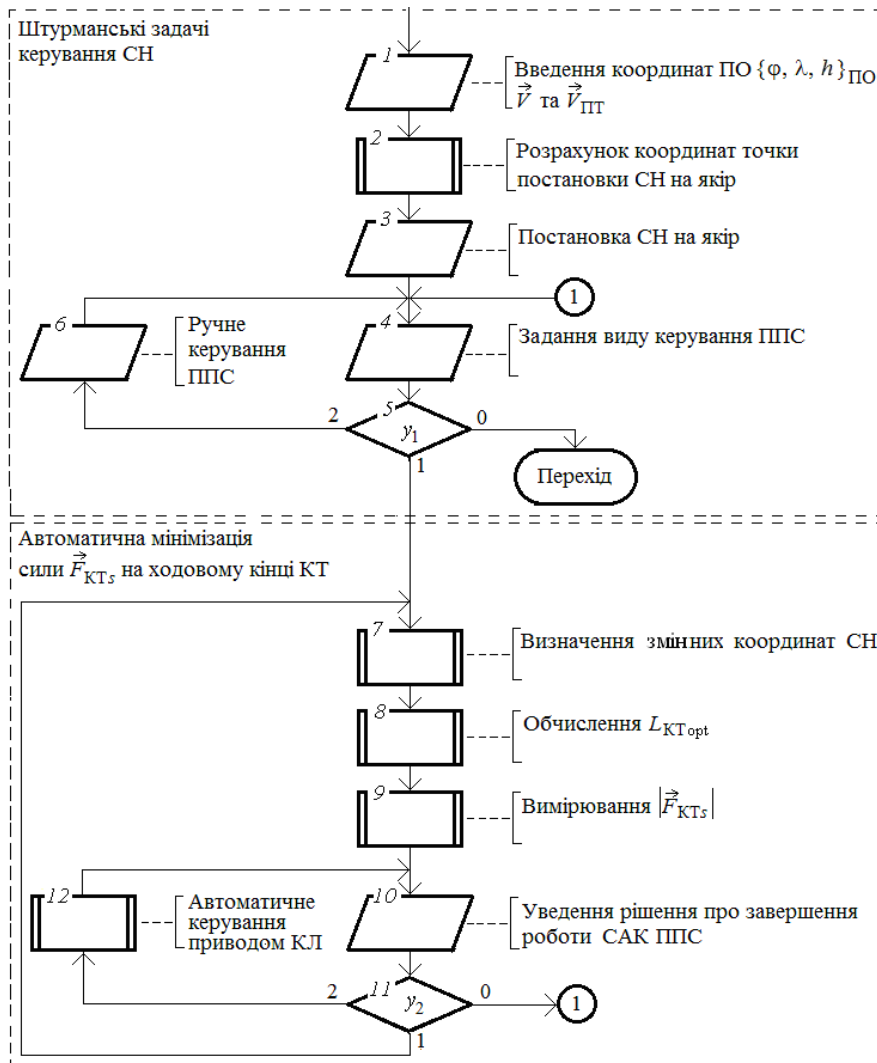


Рис. 2. Блок-схема узагальненого алгоритму роботи системи керування ППС у режимі якірної стоянки

Нижче подано опис блоків алгоритму у порядку їх функціонування:

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

2 – блок розрахунку географічних координат $\{\varphi, \lambda, h\}_я$ точки робочої зони ППС, де необхідно покласти якір, щоб у результаті СН під час вітрових переміщень залишалося у робочій зоні ППС;

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

4 – задання керівником підводно-технічної роботи виду керування ППС (вручну чи автоматично у режимі мінімізації статичної складової $\vec{F}_{КТs}$);

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

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

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

$y_1 = 2$ при реалізації ручного керування ППС;

6 – блок ручного керування прив'язною підводною системою з метою виведення підводного апарата до ПО й утримання його у цій позиції до задання іншого виду керування ППС (блок 4);

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

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

9 – блок вимірювання модуля статичної складової $\vec{F}_{КТs}$ сили на ходовому кінці КТ $\vec{F}_{КТ}$; будується на

основі методів динамометрії з усередненням отриманих значень сили $\vec{F}_{КТ}$;

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

11 – умовний перехід, який отримує наступні значення:

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

$y_2 = 1$ при виконанні умови $(L_{КТopt} - e) \leq L_{КTi} \leq (L_{КТopt} + e)$, де e – відносна похибка встановлення довжини КТ (задається оператором); $L_{КTi}$ – змінне значення попушеної довжини КТ; у цьому випадку зміна до-

вжини $L_{КTi}$ не виконується, а підводний апарат працює в умовах мінімально можливої сили від КТ $\vec{F}_{КТs}$;

$y_2 = 2$ при невиконанні умови $(L_{КТopt} - e) \leq L_{КTi} \leq (L_{КТopt} + e)$, коли необхідно змінювати довжину попушеної частини КТ за допомогою приводу КЛ до знайденого значення $L_{КТopt}$;

12 – блок автоматичного керування приводом КЛ для виконання умови $y_2 = 2$.

Зауважимо, що блоки 2–6 належать до штурманських задач керування судном і в статті не розглядаються.

Реалізацію описаного алгоритму у частині автоматичної мінімізації сили $\vec{F}_{КТs}$ пропонується виконувати у вигляді САК судновою кабельною лебідкою ППС, в якій для обчислення $L_{КТopt}$ використовується спеціалізоване програмне забезпечення «QUASTEC» [4].

Структурна схема САК наведена на рис. 3.

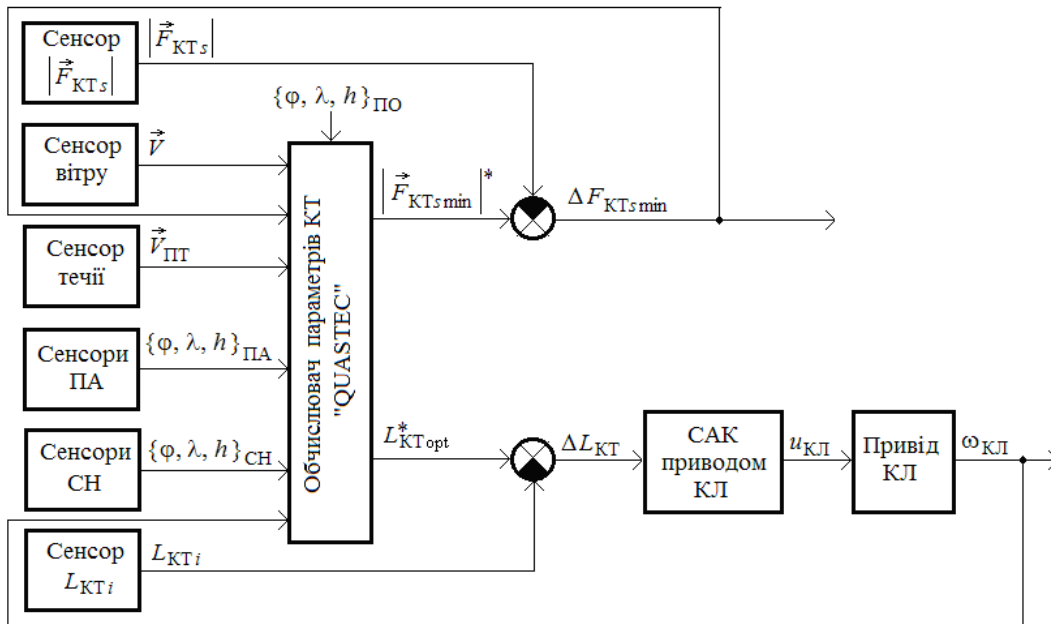


Рис. 3. Структура САК мінімізації сили $\vec{F}_{КТs}$ на ходовому кінці КТ

На рис. 3 позначено: $|\vec{F}_{КТsmin}|^*$ – обчислений програмою «QUASTEC» модуль статичної складової $\vec{F}_{КТs}$, мінімально можливий для поточного взаємного розташування СН і ПА; $L_{КТopt}^*$ – обчислена програмою «QUASTEC» оптимальна довжина попушеної частини КТ, яка забезпечує мінімально можливе значення статичної складової $\vec{F}_{КТs}$ для поточного взаємного розташування СН і ПА; $u_{КЛ}$, $\omega_{КЛ}$ – відповідно сигнал керування і кутова частота обертання барабана КЛ.

Як видно з рис. 3, запропонована САК має два контури зворотного зв'язку: контур коригування параметрів моделі КТ в обчислювачі «QUASTEC» та контур керування приводом КЛ, який, власне, і забезпечує оптимальну довжину попушеної частини КТ.

Перший контур на основі обчислення похибки $\Delta F_{КТsmin}$ між фактично вимірним модулем сили $|\vec{F}_{КТsmin}|$ та обчисленим його значенням $|\vec{F}_{КТsmin}|^*$

коригує коефіцієнти $C_{КТn}$, $C_{КТr}$, $C_{КТb}$ гідродинамічного опору КТ таким чином, щоб похибка була мінімальною. Це забезпечує адаптацію обчислювача «QUASTEC» до реальних умов обтікання кабель-троса та підвищує достовірність виконуваних ним обчислень.

Другий контур у залежності від знака похибки $\Delta L_{КТ}$ між фактичною довжиною попушеної частини КТ та обчисленою за допомогою програми «QUASTEC» оптимальною довжиною попушеної частини КТ генерує сигнал керування приводом КЛ і, таким чином, забезпечує необхідну кутову швидкість обертання $\omega_{КЛ}$ приводу лебідки. При цьому фактичне значення поточної довжини попушеної частини КТ вимірюється відповідним сенсором $L_{КTi}$ (див. рис. 3)

або обчислюється за залежністю $L_{КTi} = R \int \omega_{КЛ} dt$, де R – діаметр барабана КЛ, а напрямок обертання приводу КЛ визначається наступними умовами:

$$\omega_{\text{КЛ}} = \begin{cases} +\omega_n & \text{при } L_{\text{КТ}i} < (L_{\text{КТорт}} - e); \\ -\omega_n & \text{при } L_{\text{КТ}i} > (L_{\text{КТорт}} + e); \\ 0 & \text{при } L_{\text{КТ}i} = (L_{\text{КТорт}} \pm e), \end{cases}$$

де ω_n – номінальне значення кутової частоти обертання барабана КЛ.

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

Два інші основні режими функціонування ППС (дрейф і двофазовий рух СН) використовують розглянутий перший основний режим як складову автоматичного забезпечення оптимальної довжини попущеної частини КТ $L_{\text{КТорт}}$. Відмінною рисою цих режимів ППС є задача одноразового (другий основний режим) та циклічно повторюваного (третій основний режим) попускання КТ

на повну довжину КТ $L_{\text{КТ}}$ на барабані КЛ для забезпечення максимального часу стійкої роботи ПА біля ПО.

ВИСНОВКИ

1. Для морського комплексу «судно-носії – прив'язна підводна система» як об'єкта керування виділено три основні режими функціонування за відсутності системи динамічної стабілізації судна-носія (якірна стоянка, дрейф і двофазовий рух судна-носія) та проаналізовано особливості їх реалізації в умовах дії вітрових збурень і підводної течії.

2. Розроблено узагальнений алгоритм функціонування та структуру системи автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи для режиму якірної стоянки морського комплексу, що дає змогу при повільному переміщенні судна-носія під дією вітрових збурень забезпечити мінімізацію збурюючої гідродинамічної сили на ходовому кінці кабель-троса і, як наслідок, забезпечити стійку позицію підводного апарата біля підводного об'єкта та ефективно застосування встановленого на ньому підводного маніпулятора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Блинцов, В. С.** Привязные подводные системы [Текст] / В. С. Блинцов. – К. : Наукова думка, 1998. – 232 с.
- [2] **Блинцов, В. С.** Проектирование самоходных привязных подводных систем [Текст] : монографія / В. С. Блинцов, В. Е. Магула. – К. : Наукова думка, 1997. – 140 с.
- [3] **Блінцов, О. В.** Особливості побудови інтелектуальної системи керування просторовим рухом самохідної прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блінцов // Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю. – Миколаїв : НУК, 2007. – С. 275–280.
- [4] **Блінцов, О. В.** Підвищення ефективності розрахунків характеристик кабель-троса прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блінцов // Вост.-Европ. журн. передових технологій. – Х., 2008. – Вып. 2/2 (32). – С. 36–40.
- [5] **Бугаенко, Б. А.** Динамика судовых спускоподъемных операций [Текст] : монографія / Б. А. Бугаенко. – К. : Наукова думка, 2004. – 320 с.
- [6] Динамика подводных буксируемых систем [Текст] / В. И. Поддубный, Ю. Е. Шамарин, Д. А. Черненко, Л. С. Астахов. – СПб. : Судостроение, 1995. – 200 с.
- [7] **Егоров, Г. В.** Концепция малых судов обеспечения на примере морских водолазных судов нового поколения [Текст] / Г. В. Егоров, В. И. Тонюк // Судовождение : сб. науч. трудов / ОНМА. – О. : ИздатИнформ, 2012. – Вып. 21. – С. 104–115.
- [8] **Егоров, В. И.** Подводные буксируемые системы [Текст] : учеб. пособие / В. И. Егоров. – Л. : Судостроение, 1981. – 304 с.
- [9] **Краморенко, А. В.** Критерии сравнения характеристик подводных аппаратов с точки зрения выполнения ими подводных работ [Текст] / А. В. Краморенко, А. Н. Скакун // Современные методы и средства океанологических исследований : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. «МСОИ–2013». – М. : АПР, 2013. – С. 316–319.
- [10] **Краснов, В. Н.** История научно-исследовательского флота Российской академии наук [Текст] / В. Н. Краснов. – М. : Наука, 2005. – 264 с.
- [11] **Кувшинов, Г. Е.** Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов [Текст] : монографія / Г. Е. Кувшинов, Л. А. Наумов, К. В. Чупина. – Владивосток : Дальнаука, 2005. – 285 с.
- [12] **Павлов, Г. В.** Синтез системи автоматичного керування лебідкою кабель-троса самохідної прив'язної підводної системи [Текст] / Г. В. Павлов, О. В. Блінцов // Вісн. Кременчуцьк. держ. політехн. ун-ту імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2008. – Вып. 4 (51). – Ч. 2. – С. 97–99.
- [13] **Christ, R.** The ROV Manual: A User Guide for Observation Class Remotely Operated Vehicles [Text] / Robert D. Christ, Robert L. Wernli Sr. Elsevier, 2007. – 308 p.

© О. В. Блінцов, В. А. Надточій

Надійшла до редколегії 20.02.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов