

О.В. Блінцов, В.А. Надточій

**АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ
ОДНОЛАНКОВИМИ САМОХІДНИМИ
ПРИВ'ЯЗНИМИ ПІДВОДНИМИ
СИСТЕМАМИ**

Навчальний посібник

Миколаїв • НУК • 2014

Блінцов О.В., Надточій В.А. Автоматизація керування одноланковими самохідними прив'язними підводними системами. Навчальний посібник – Миколаїв : Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2014. – 124 с.

У посібнику наведено загальні відомості про склад та області застосування одноланкових самохідних прив'язних підводних систем, розглянуто особливості їх математичного опису як об'єктів керування. Розглянуті питання автоматизації керування рухом таких систем, зокрема, загальні питання автоматизації керування ними та методологію синтезу системи автоматичного керування просторовим рухом підводного апарата як виконавчого елемента одноланкової самохідної прив'язної підводної системи.

Посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 8.05070202 «Електричні системи і комплекси транспортних засобів» та спеціалізаціями 8.05070202.02 «Електрообладнання і автоматика підводно-технічних систем і комплексів» і 7.092201.03 «Експлуатація суднових автоматизованих систем».

Рецензенти:

завідувач кафедри автоматики

Національного університету кораблебудування

імені адмірала Макарова,

доктор технічних наук, професор **М.Я. Хлопенко**,

член-кореспондент

Академії наук суднобудування України,

кандидат технічних наук, доцент **Д.В. Костенко**

Рекомендовано Вченою радою Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова у якості навчального посібника.

ВСТУП

Одноланкові прив'язні підводні системи з самохідними підводними апаратами належать до найбільш ефективних засобів морської техніки, оскільки реалізують безлюдні підводні технології і дають змогу у реальному часі виконувати гідроакустичний і візуальний пошук та обстеження підводних об'єктів. До суттєвих переваг такої техніки перед іншими підводними засобами належить можливість дистанційного керування підводними маніпуляторами, що встановлюються на підводні апарати у якості зовнішнього начіпного обладнання. Це надає підводному апарату принципово нові експлуатаційні можливості для виконання підводних маніпуляційних робіт – складних вимірювань, різання і зварювання, підводного будівництва тощо.

Досвід авторів у проектуванні, побудові та експлуатації таких систем свідчить, що автоматизація керування їхнім просторовим рухом з позицій теорії керування є нетривіальною технічною задачею, оскільки підводна система як об'єкт керування характеризується нестаціонарністю її власних параметрів, а також невизначеністю зовнішніх збурень, які впливають не тільки на підводну частину системи, а й на судно-носії. Успішний розв'язок цієї задачі можливий шляхом побудови систем автоматичного керування власне самохідним прив'язним підводним апаратом та його кабель-тросом як системою твердих і гнучких тіл у потоці води з урахуванням динаміки судна-носія.

У посібнику наведено загальні відомості про одноланкові самохідні прив'язні підводні системи як об'єкти керування, викладено сучасні підходи до математичного моделювання таких систем та описано методологію синтезу систем автоматичного керування їх просторовим рухом для основних режимів експлуатації.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

Б	– барабан
БП	– блок плавучості
БСК	– базова (земна) система координат
ГГ	– гребний гвинт
ЕД	– електродвигун
ЗЗ	– зовнішнє збурення
ЗСК	– зв’язана система координат
ІНС	– інерційна навігаційна система
КЛ	– кабельна лебідка
КТ	– кабель-трос
МР	– мотор-редуктор
НО	– начіпне обладнання
НСК	– напівзв’язана з судном-носієм система координат
ПА	– підводний апарат
РВ	– редуктор-валопровід
ПЕК	– пост енергетики і керування
ПО	– підводний об’єкт
РП	– рушійний пристрій
РРК	– рушійно-рульовий комплекс
САК	– система автоматичного керування
СН	– судно-носії
СНС	– супутникова навігаційна система
СППС	– самохідна прив’язна підводна система

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СППС

1.1 Класифікація та коротка характеристика СППС як об'єкта морської техніки

Самохідні прив'язні підводні системи (СППС, в англomовній літературі - ROV, Remotely Operated Vehicle) утворюють широкий клас підводної техніки для виконання пошукових, інспекційних, аварійно-рятувальних та інструментальних робіт під водою [1-4].

Розширення обсягів і номенклатури підводних робіт з їх застосуванням в останні роки обумовлене низкою унікальних експлуатаційних властивостей цього виду техніки:

- практично необмеженим часом перебування і роботи під водою;
- передачею відео- та телеметричної інформації про підводну обстановку у реальному часі;

- можливістю дистанційного керування підводними маніпуляторами та іншими підводними приладами та інструментами без присутності водолаза;

- супроводом і керуванням водолазними роботами та безлюдними підводними технологіями (пошук та ідентифікація об'єктів, будівництво) з забезпеченням "ефекту присутності" фахівців, які не мають водолазної підготовки;

- відсутністю людини-гідронавта на борту, що знижує вартість СППС у порівнянні з населеними підводними апаратами і не створює додаткових обмежень на застосування СППС за гідрометеорологічними умовами.

До недоліків СППС відносяться: істотна залежність величини робочої зони ПА від положення СН та довжини КТ; вимоги по динамічному позиціонуванню СН при роботі ПА на великих глибинах та в умовах дії зовнішніх збурень.

Структурно СППС підрозділяються на одноланкові та двохланкові, рис. 1.1.

До складу типової одноланкової СППС входять самохідний прив'язний підводний апарат (ПА), судно-носії (СН), на якому розміщені пост енергетики і керування апаратом (ПЕК) та кабельна лебідка (КЛ) кабель-троса нульової плавучості (КТ), через який забезпечується електроживлення та керування ПА, рис. 1.1, *а,б*.

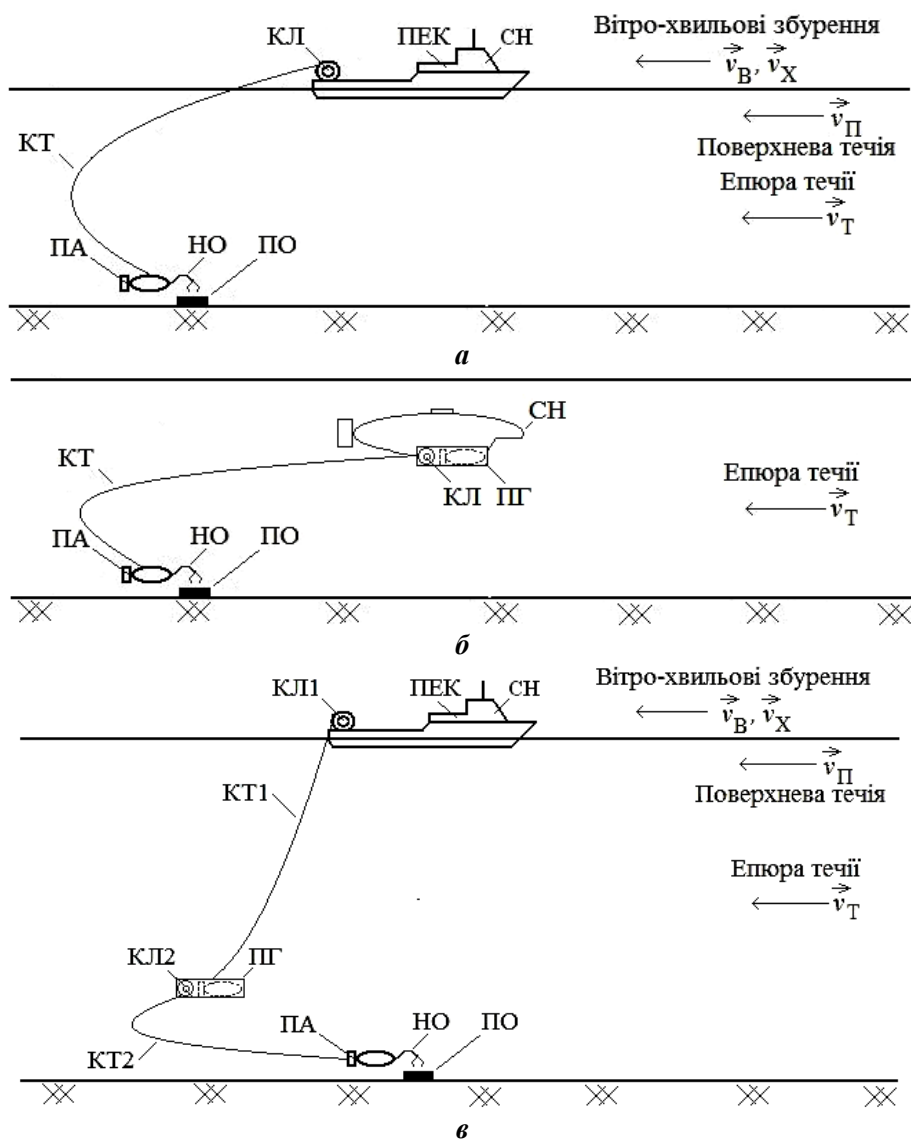


Рис. 1.1 – Склад обладнання СППС: *a* – одноланкової СППС з надводним СН; *б* – одноланкової СППС з підводним СН; *в* – двохланкової СППС

На ПА встановлюється рушійно-рульовий комплекс (РРК), навігаційно-керуюче обладнання, відеокomплекс з підводними світильниками, гідроакустичні прилади – сонари, ехолоти тощо.

У якості зовнішнього начіпного обладнання (НО) на ПА для роботи з підводними об'єктами (ПО) встановлюються підводні маніпулятори, різак тросів, очисні пристрої тощо [5, 6].

При роботі на великих глибинах та за наявності сильної течії використовують двохланкові СППС, які включають важкий кабель-трос КТ1 та привантажувач – підводний гараж (ПГ) для ПА, рис. 1.1,б [7]. Конструкція ПГ містить вторинне джерело електроживлення ПА та телекеровану підводну кабельну лебідку КЛ2 для кабель-троса нульової плавучості КТ2.

Оскільки найбільше розповсюдження у морській практиці знайшли одноланкові СППС, далі будемо розглядати загальні принципи функціонування та автоматизацію керування саме одноланковими СППС

За цільовим призначенням і особливостями технічного оснащення одноланкові СППС розділяють на два великих класи: пошуково-обстежувальні та робочі [8, 9].

Перший клас СППС призначений для пошуку, візуального та приладового обстеження підводних об'єктів за допомогою:

- відео- і фотокамер у комплекті зі світильниками;

- гідроакустичних локаторів кругового, секторного та бічного огляду;

- гідроакустичних профілографів;

- магнітометрів;

- датчиків фізичних і хімічних характеристик підводних об'єктів, води та ґрунту;

- ультразвукових товщиномірів;

- датчиків катодного потенціалу;

- лазерних далекомірів;

- систем виявлення витоків нафти;

- трасошукачів.

Другий клас СППС призначений для виконання робіт безпосередньо на підводному об'єкті:

- зварювання та різання;

- монтаж, дистанційне технічне обслуговування та демонтаж підводного встаткування;

- вимірювання характеристик підводних конструкцій;

прокладка підводних кабелів;
розмив замулених предметів;
доставка корисного вантажу з поверхні моря у задану точку підводного простору;

підйом малорозмірних предметів на поверхню.

Основними інструментами СППС робочого класу є: багатофункціональні маніпулятори, вимірювальні прилади неруйнівного контролю, гідромонітори, різакі тросів, металевих і бетонних конструкцій.

За масою ПА СППС діляться на п'ять класів: мікро (маса до 5 кг), міні (маса до 30 кг), легкі (до 500 кг), середні (маса 500- 5000 кг) і важкі (маса більше 5000 кг).

Підводні мікро-, міні- і легкі апарати, зазвичай, призначені для виконання пошуково-обстежувальних робіт. Середні та важкі апарати, крім цих робіт, застосовуються в аварійно-рятувальних операціях, інженерно-будівельних і ремонтних роботах. До класу важких ПА також відносяться ПА на гусеничному ході, що виконують механічну роботу на морському дні.

ПА експлуатуються у двох основних режимах – плаваючому та глибоководному. У плаваючому режимі ПА безпосередньо опускається за борт СН вручну (ПА класів мікро та міні) або за допомогою спускопіднімального пристрою (ПА інших класів). У глибоководному режимі підводний апарат одноланкової СППС занурюється на робочу глибину за допомогою привантажувача, який закріплено на КТ. На заданій глибині ПА переміщується переважно у горизонтальній площині, що суттєво зменшує енерговитрати на його керований рух.

Типові характеристики ПА класів мікро та міні: робоча глибина занурення – до 400 м; швидкість – до 2 вузлів. Типові характеристики ПА інших класів: робоча глибина – до 3000 м, радіус дії в глибоководному режимі – до 300 м; швидкість – до 4 вузлів. Окремі ПА мають робочу глибину більше 10 км (ПА "Nereus", США, рекордна глибина 10,9 км).

Зовнішній вигляд типових ПА показано на рис. 1.2.

Області застосування СППС:

цивільне використання – інспекція підводної частини гідротехнічних споруд, корпусів суден на плаву, донної поверхні портів, фарватерів і водних транспортних шляхів; будівництво та експлуатація підводних інженерних об'єктів; виконання науково-дослідних робіт в області океанології, екології, підводній археології;



a



б



в



г



д

Рис. 1.2 – Зовнішній вигляд типових ПА одноланкових СППС:
a – ПА класу мікро «AC-ROV SP50» фірми «AC-CESS» (Англія);
б – ПА класу міні «SeaBotix» фірми «SeaBotix, Inc.» (США);
в – ПА легкого класу «Гідрограф» виробництва НУК ім. адм. Макарова (Україна); *г* – ПА середнього класу «NEREUS» фірми виробництва Woods Hole Oceanographic Institution (США);
д – ПА важкого класу «Flexjet II» фірми «Saipem» (Італія)

військове використання – протимінні, пошукові та рятувальні морські операції; будівництво та ремонт підводних інженерних споруд військового призначення; висвітлення підводної обстановки на охоронюваних акваторіях; проведення розвідки акваторій і підводних об'єктів; доставка військових вантажів і розгортання підводних комунікацій; охорона кораблів, якірних стоянок і прибережних об'єктів; обстеження підводної частини кораблів на плаву та оцінка ушкоджень.

Підводні апарати СППС характеризуються широким спектром архітектурно-конструктивних форм і складом устаткування [10].

Конструктивно ПА виконують у вигляді несучої рами із пластику, алюмінієвого або титанового сплаву, на якій закріплені:

- блоки плавучості;

- рушійно-рульовий комплекс (3-10 рушіїв типу "електро- або гідравлічний двигун – валопровід – гребний гвинт у насадці або в трубі");

- циліндричні або сферичні міцні корпуси із системами енергоживлення, навігації, телеметрії та управління апарата (1-6 шт.);

- фотовідеокomплекс (1-8 кольорових і чорно-білих фото- і відеокамер зі світильниками);

- начіпний робочий інструмент і прилади – маніпулятори (1-2 шт.), пробовідбірники води та ґрунту (до 6 шт.), датчики параметрів води та ґрунту (1-6 шт.), ґрунтососи та гідромонітори (1-2 шт.).

Загальне корисне навантаження сучасних ПА – від 0,2 кг до 150 кг і залежить від класу ПА. Типовий пост енергетики і керування ПА малого й вище класів виконується у вигляді набору пультів керування рухом ПА і його встаткуванням із джойстиком та відеомоніторами, а також пультів керування лебідками кабель-тросів і щитів електроживлення ПА.

З позицій керування просторовим рухом ПА є носієм корисного вантажу (фото- і відеокамер, сенсорів фізичних та хімічних характеристик води і ґрунту, маніпуляторів тощо), який необхідно переміщати у водній товщі за заданими траєкторіями та/або позиціонувати у заданих точках підводного простору [11].

1.2 Типові конструкції ПА

Конструктивно самохідний ненаселений прив'язний ПА являє собою тверде тіло рамної конструкції і містить рушійно-рульовий комплекс, стій-

кі до зовнішнього гідростатичного тиску міцні корпуси з електронним обладнанням (системами керування та інформаційного обміну з ПЕК, навігаційним обладнанням), один або декілька відеокomплексів – підводних відеобоксів з встановленими в них фото- та відеокамерами і світильниками, гідроакустичні прилади – сонари, ехолоти тощо. На рамі ПА передбачаються вузли для закріплення зовнішнього націпного обладнання – маніпуляторів, вимірювальних приладів, пробовідбірників тощо.

Для роботи в умовах значної течії рамну конструкцію закривають легким корпусом – гідродинамічним обтічником, який суттєво зменшує гідродинамічний опір ПА в умовах обтікання потоком води $\vec{v}_T$.

Електроживлення та інформаційний обмін з ПА забезпечується через кабель-трос, корінний кінець якого закріплено на КЛ, а ходовий кінець – на ПА за допомогою спеціального вузла вводу КТ.

Як об'єкт керування ПА має шість ступенів свободи – три ступені лінійного руху у просторі і три ступені обертального руху [2, 10]. У загальному випадку, для кожного ступеня свободи ПА повинен мати хоча б один рушій. Однак, завдяки властивості остійності корпусу ПА, яка забезпечується конструктивно, більшість сучасних прив'язних ПА мають чотири рушія (групи рушіїв), які забезпечують їм керований просторовий рух без крену і диференту.

Типовий варіант архітектурно-конструктивного типу такого ПА показано на рис. 1.3.

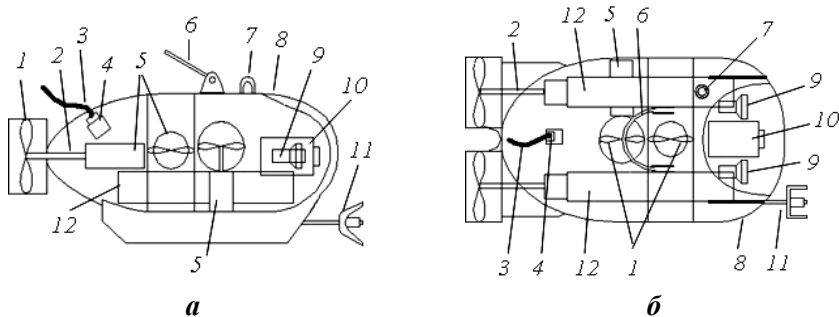


Рис. 1.3 – Структура ПА: **а** – вид збоку; **б** – вид зверху;
 1 – гребний гвинт, 2 – валопровід, 3 – кабель-трос, 4 – вузол вводу кабель-троса, 5 – електродвигун, 6 – спуско-піднімальна скоба, 7 – світловий маяк, 8 – обтічник, 9 – світильник, 10 – відеобокс, 11 – націпне обладнання, 12 – міцний корпус

Таким чином, підводний апарат є головним об'єктом керування СППС. Керованими величинами є його просторові координати відносно судна-носія, а керуючими – сигнали керування його рушійно-рульовим комплексом, який складається з декількох рушійних пристроїв (РП).

У подальшому розглядається ПА, який має наступний типовий склад РРК: два РП маршового руху ПА – для подолання горизонтальної складової сили гідродинамічного опору КТ, сили лобового опору корпусу ПА, а також для стабілізації ПА проти набігаючого потоку води; один РП вертикального руху ПА – для подолання вертикальної складової сили гідродинамічного опору КТ, сили вертикального опору ПА та залишкової сили плавучості ПА; один РП лагового (бокового) руху ПА – для подолання бокової складової сили гідродинамічного опору КТ та сили бокового опору ПА.

1.3 Кабель-троси СППС

Кабель-трос (КТ, в англomовній літературі – tether-cable) є гнучким елементом СППС, який має у поперечному перетині форму круга. При обтіканні потоком води такий елемент у загальному випадку приймає просторову форму, на ньому утворюються сили гідродинамічного опору, які повинен долати ПА [11]. Призначення КТ – живлення ПА електроенергією (енергетична функція), інформаційний обмін між ПА та ПЕК (інформаційна функція), силова взаємодія ПА з СН (вантажна функція). Керованою величиною КТ у процесі керування просторовим рухом СППС є довжина його випущеної частини, яка задається за допомогою КЛ і забезпечує задану просторову форму кабель-троса. Керуючою величиною КЛ є сигнал керування мотор-редуктором її барабана.

На рис. 1.4-1.6 показані типи КТ виробництва ВАТ "Азовкабель" (Україна) для підводних систем НУК (м. Миколаїв), заводу "Ташкабель" (Казахстан) і фірми Perry Tritech.

Кабель-троси марки КНП і марки КВ призначені для застосування в одноланкових СППС з підводними апаратами міні та легкого класів на глибинах до 2000 м. При цьому, кабель-трос додатньої плавучості марки КНП діаметром 12,3 мм забезпечує безпосередній зв'язок ПА з ПЕК, а кабель-трос КВ діаметром 8,5 мм використовується на підводній кабельній лебідці платформи ПА як проміжний для забезпечення безконтактного електричного зв'язку електрообладнання платформи з кабель-тросом марки КНП.

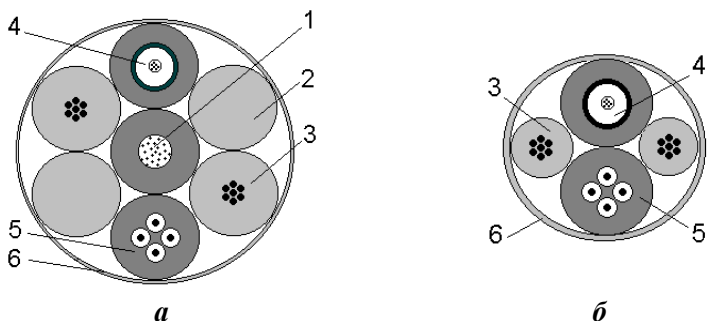


Рис. 1.4 – Кабель-троси ВАТ “Азовкабель” (Україна):
а – кабель-трос марки КНП; ***б*** – кабель-трос марки КВ

Кабель-трос марки КНП (рис. 1.4, ***а***) містить центральний вантажо-несучий елемент 1, який представляє собою канат, скручений з синтетичних високоміцних ниток СВМ-К і витримує розривне зусилля не менше 2 кН. Оскільки технічна нитка СВМ-К знижує свою розривну міцність під дією води на 20-30 %, її вкрито ізоляційним матеріалом – спіненим поліетиленом марки “Пеноком” з густиною 600-700 кг/м³.

Кабель-трос марки КНП має додатню лінійну плавучість 1,33 Н/м на поверхні води і нульову плавучість на глибині 1000 м і більше. Це забезпечується двома циліндричними корделями 2 діаметром 3,8 мм, також виготовленими з “Пенокому”. Композиція “Пеноком” має мілкопористу структуру з ізованими одна від одної повітряними мікропорами, які роблять її стійкою до підвищеного гідростатичного тиску і забезпечують кабель-тросу задану плавучість на всьому діапазоні глибин.

Для електроживлення ПА служать дві ізовані силові жили 3, виготовлені з семи ниток мідного проводу марки ММ діаметром 0,37 мм, забезпечуючих загальну площу поперечного перерізу провідників струму не менше 0,75 мм². Ізоляція силових жил - композиція “Пеноком”.

Внутрішній провідник коаксіального проводу 4 також виготовлено з сьоми ниток мідного проводу діаметром 0,15 мм для підвищення стійкості до багаторазових перемоток. Зовнішній провідник проводу 4 – плетіння з мідних дротів діаметром 0,12 мм. Внутрішня ізоляція проводу виконана на основі композиції поліетилену 153-02К, оболонка – композиція “Пеноком”. Хвильовий опір коаксіальної пари – 50 Ом.

Для керування апаратом використовується четвірка ізованих мідних дротів діаметром 0,42 мм, які конструктивно виготовлені як

один провід 5. Ізоляція мідних провідників – композиція поліетилену 271-70. Додатково плавучість КТ забезпечується використанням композиції “Пеноком” як заповнювача групи жил.

Зовнішня оболонка 6 скріплює всі елементи КТ і утворює сердечник кабель-троса. Оболонка 6 виготовлена з міцних синтетичних (поліефірних) ниток. Вона забезпечує механічний захист елементів КТ і обумовлює високу гнучкість кабель-троса за рахунок того, що пропускає воду всередину конструкції КТ і не обмежує взаємного переміщення його елементів при наявності значного зовнішнього гідростатичного тиску.

Кабель-трос марки КВ (рис. 1.4, б) не має спеціального центрального вантажонесучого елемента та елементів плавучості, оскільки знаходиться на барабані підводної лебідки. Вантажонесучі функції тут виконує зовнішня синтетична оболонка 6.

Кабель-троси ПК-2 та НК-2 призначені для використання у одноланкових і дволанкових СППС з робочою глибиною до 600м.

Внутрішня побудова кабель-троса НК-2 показана на рис. 1.5.

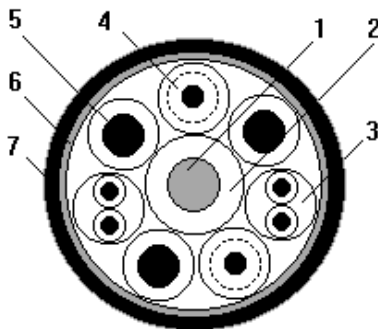


Рис. 1.5 – Кабель-трос марки НК-2

Обидва види КТ мають однакову внутрішню побудову і відрізняються лише площею перерізу провідників силових жил, товщиною зовнішньої оболонки і плавучістю. Розривне зусилля ПК-2 – не менше 3 кН, кабеля НК-2 – не менше 6 кН. Діаметр ПК-2 – 20,0 мм, його плавучість на поверхні води складає 1,02 Н/м, на глибині 600 м – 0,4 Н/м; діаметр кабель-троса НК-2 – 15,4 мм, його плавучість від’ємна і складає 0,9-1,1 Н/м.

Центральний вантажонесучий елемент 1 діаметром 5,2 мм виконано на основі синтетичної високоміцної нитки НСВМ-58,8, яка знаходиться в поліетиленовій оболонці 2. Дві звиті пари управляючих провідників 3 служать для інформаційного обміну між ПА і ПЕК. Діаметр кожного ізольованого провідника – 1,7 мм, діаметр мідної жили – 0,5 мм. Для передачі відео- та гідроакустичних сигналів з ПА у складі кабель-троса передбачено два коаксіальних провідника 4 з хвильовим опором 50 Ом. Діаметр провідників – 3,4 мм. Внутрішній центральний елемент має сім мідних провідників діаметром 0,15 мм. Зовнішній провідник проводу 4 – плетіння з мідних дротин діаметром 0,12 мм. Три силові жили 5 з м'якого мідного проводу марки ММ забезпечують енергоживлення ПА 3-фазною напругою або напругами двох різних номіналів. Кожна з них складається з сьоми ниток мідного проводу діаметром 0,37 мм. Діаметр силових жил в ізоляції – 3,45 мм. Всі внутрішні елементи КТ зафіксовані як сердечник шляхом обмотки фторопластовою плівкою 6. Матеріалом внутрішньої ізоляції коаксіальних пар, силових та управляючих жил, а також оболонки коаксіальних пар і зовнішньої оболонки КТ служить композиція поліетилену з густиною 910 кг/куб.м.

Для енергозабезпечення потужних ПА, призначених для виконання енергоємних підводних технологій, використовуються КТ з великою кількістю силових жил. Типові конструкції таких КТ виробництва фірми Perry Tritech Inc. (Норвегія) показані на рис. 1.6.

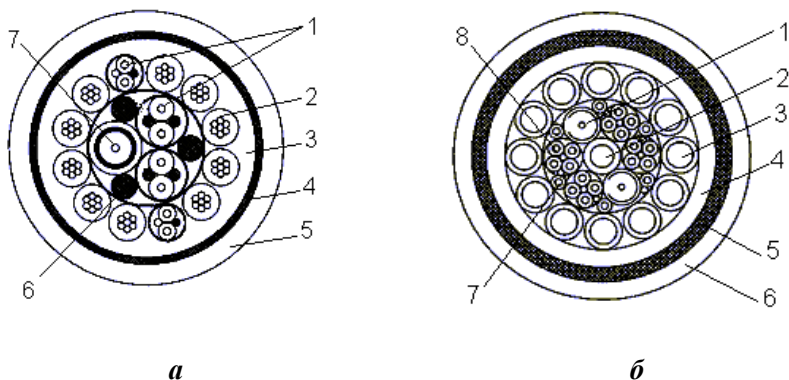


Рис. 1.6 – Кабель-троси виробництва фірми Perry Tritech Inc. (Норвегія): *а* – кабель-трос нульової плавучості;
б – кабель-трос від'ємної плавучості

Кабель-трос нульової плавучості (рис. 1.6, *а*) має чотири екрановані звіти пари керування 1 перерізом $0,12 \text{ мм}^2$, десять алюмінієвих силових сердечників 2 перерізом $0,88 \text{ мм}^2$, один коаксіальний провід 7 з хвильовим опором 75 Ом , вантажонесучий елемент на основі арамідних волокон 4, елементи плавучості 6, а також термопластикові внутрішню 4 і зовнішню 5 резинові оболонки.

Номінальна вага кабелю у морській воді: 0 Н/м ; зовнішній діаметр: $16,4 \text{ мм}$; теоретичне розривне зусилля – $4,2 \text{ кН}$.

Кабель-трос від'ємної плавучості (рис. 1.6, *б*) має два коаксиальних провoda 1 з хвильовим опором 75 Ом , спільний електричний провід 2 перерізом $2,5 \text{ мм}^2$, дванадцять силових алюмінієвих провідників 3 з перерізом $3,33 \text{ мм}$ кожний, поліуретанову внутрішню оболонку 4, вантажонесучий елемент на основі арамідних волокон 5, поліуретанову зовнішню оболонку 6, шість поліуретанових зовнішніх оболонок 7 перерізом $0,22 \text{ мм}$, чотири четвірки звитих пар 8 перерізом $0,22 \text{ мм}^2$. Номінальна вага в морській воді – $1,32 \text{ Н/м}$; зовнішній діаметр: $24,5 \text{ мм}$; теоретичне розривне зусилля: $30,0 \text{ кН}$.

Для забезпечення електромагнітної сумісності силових та інформаційних провідників найбільш відповідальні сигнали у КТ передають за допомогою оптично-волоконних ліній зв'язку (ОВЛЗ). Крім того, заміна мідних керуючих жил оптичними волокнами зменшує вагу КТ у воді і спрощує конструктивні заходи по забезпеченню заданої плавучості.

На рис. 1.7 показана конструкція кабелів з ОВЛЗ для буксируваних та самохідних прив'язних підводних систем.

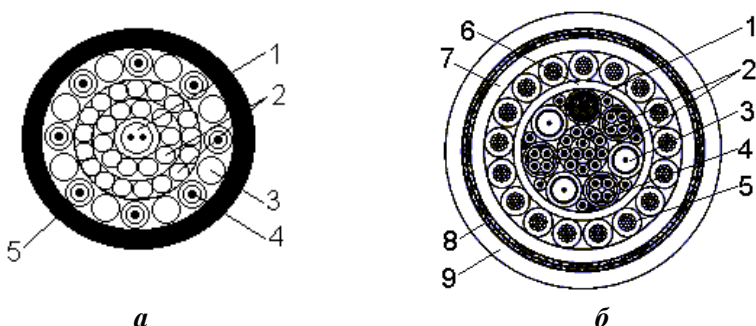


Рис. 1.7 – Конструкція кабелів з ОВЛЗ

Кабель-буксир ОКУ-1 (розробник – НВП “ВНИИКП”, Росія), містить центральну ОВЛЗ 1, два шари сталених тросів 2 діаметром 1,25 мм і шар з послідовно укладених восьми вантажонесучих тросів 3 діаметром 2,25 мм та восьми провідників струму 4. ОВЛЗ являє собою мідну трубку діаметром 2,9 мм, всередині якої вільно укладено 2-4 оптичних волокна.

Стринги захисних тросів 2 мають протилежну скрутку для забезпечення мінімального моменту скручування, який виникає під час дії динамічних розтягуючих зусиль на кабель. На звивку ОВЛЗ зі сталеними тросами накладено обмотку фторопластової стрічки. Провід 4 містить багатожильний мідний провідник діаметром 0,98 мм в поліетиленовій ізоляції. Навколо скрутки тросів 3 і провідників 4 накладено фторопластову обмотку і зовнішню оболонку 5 товщиною 3 мм з поліетилену марки 153-10К. Зовнішній діаметр кабель-буксиру – 16 мм, теоретичне розривне зусилля – 30 кН.

Вантажонесучий КТ фірми Perry Tritech (рис. 1.7, б) призначений для використання глибоководних СППС і містить шість ОВЛЗ 1, дев'ятнадцять провідників управління 2 перерізом 0,5 мм², три коаксіальні пари 3 з хвильовим опором 75 Ом, три екрановані четвірки звитих пар 4 перерізом 0,5 мм², сімнадцять силових провідників струму 5 перерізом 4,0 мм². Елементи 1, 2 і 3 скріплені внутрішньою поліетиленовою оболонкою 6, а провідники 5 – поліуретановою оболонкою 7. Вантажонесучий елемент утворено двома шарами арамідного волокна 8.

Типовими за конструкцією для прив'язних систем різного призначення є кабель-троси фірми «VideoRay» (США), рис. 1.8.

Такі кабель-троси виготовляються у трьох видах:

КТ від'ємної плавучості;

КТ нейтральної плавучості;

КТ з підвищеними проектними зусиллями на розрив (для важких робочих ПА).

КТ нейтральної плавучості мають 3 звиті пари по 4 сигнальних провідника, кевларовий вантажонесучий елемент з розривним зусиллям до 1 кН, мідні силові провідники струму до 3 А, термопласти кому гумову електроізоляцію, поліуретанову зовнішню оболонку, і мають зовнішній діаметр до 0,42 дюйма та робочу електричну напругу до 48 В постійного струму.

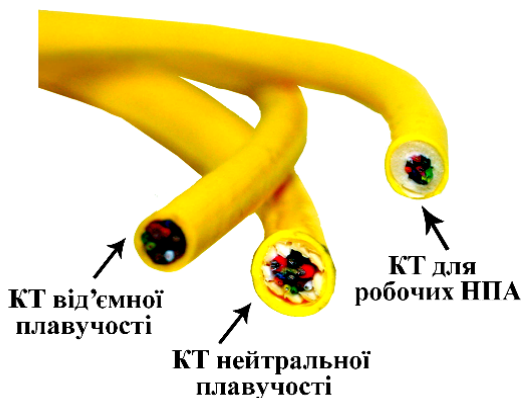


Рис. 1.8 – Кабель-троси фірми «VideoRay» (США)

КТ від'ємної плавучості мають схожі електричні характеристики, але їх зовнішній діаметр складає 0,32 дюйма.

КТ з підвищеними проектними зусиллями на розрив має схожі електричні характеристики з вищеописаними варіантами КТ, проте містить силові мідні жили для постійного струму до 30 А та кевларовий вантажонесучий елемент з максимальним розривним зусиллям до 10 кН.

1.4 Кабельні лебідки СППС

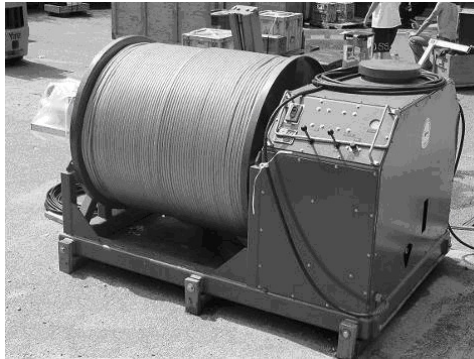
Кабельні лебідки (КЛ, в англomовній літературі – Cable Winch) являють собою електрифіковані пристрої морського застосування і забезпечують керовану зміну довжини попущеної частини КТ СППС у залежності від поточних умов її експлуатації, а також зберігання КТ у міжопераційний період.

Кабельні лебідки СППС класифікують за такими ознаками:

- за розміщенням – на палубі судна-носія (СН) та під водою;
- за типом привода – на електричні та гідравлічні;
- за рівнем автоматизації – на ручні, автоматизовані та автоматичні.

Палубні КЛ розташовують на палубах суден-носіїв СППС і керування ними виконує палубна команда судна-носія, рис. 1.1, *а*. Підводні КЛ встановлюються на підводні СН (підводні човни та населені підводні апарати), рис. 1.1, *б*.

Зовнішній вигляд деяких електричних КЛ для СППС різного призначення показано на рис. 1.9.



a



б

Рис. 1.9. Типові конструкції КЛ СППС:

a – палубна КЛ СППС «Global_Explorer», Норвегія;

б – палубна КЛ СППС «Агент-1» виробництва Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

Виготовляються КЛ для мілководдя (до 100 м), малих (до 600 м), середніх (до 2000 м), великих (до 6000 м) і надвеликих (більше 6000 м) глибин.

Електричний чи гідравлічний приводи КЛ використовують у залежності від маси кабель-троса і, відповідно, необхідної потужності для обертання барабану КЛ у заданому діапазоні швидкостей.

Зазвичай, електричний привод використовують у діапазоні потужностей до 300-500 кВт та при необхідності плавного регулювання швидкостей випускання-підбирання КТ.

Гідравлічний привод частіше застосовують у діапазоні потужностей привода 100 кВт і більше, коли припустимим є ступінчасте керування швидкістю обертання барабана КЛ.

Рівень автоматизації КЛ розглядається у двох аспектах – як шлях розвантаження операторів СППС від напруженої тривалої праці та виключення помилок у керуванні, обумовлених людським фактором, а також як єдино можливе технічне рішення при дистанційному керуванні КЛ як підвоним обладнанням (у складі СППС підводного човна або населеного підводного апарата).

Конструктивне виконання КЛ можна підрозділити також:

по типу установки – на стаціонарні (закріплені на палубі, стіні, стелі) і пересувні (на візках, що пересуваються по палубі або по підвісних шляхах);

по числу барабанів – на одно-, двох- і багатобарабанні лебідки;

по типу кабельного барабану (нарізні, гладкі та фрикційні).

Конструктивне виконання КЛ та їх складових частин має забезпечувати можливість проведення технічного обслуговування, ремонту і зберігання КЛ і розташованого на кабельному барабані КТ.

1.5 Особливості керування СППС

Керуюча функція ПЕК полягає в забезпеченні заданого просторового руху ПА шляхом генерації керуючих сигналів на електродвигуни РРК та КЛ на основі обробки сигналів зворотного зв'язку від сенсорів СППС та/або по обчисленню.

Типовий склад сенсорів зворотного зв'язку для традиційних систем керування СППС містить:

сенсори курсу, крену та диференту ПА (часто – конструктивно суміщені);

сенсори маршової, лагової та вертикальної швидкостей і прискорень руху ПА;

сенсори глибини та висоти ПА над ґрунтом;

сенсори кутової частоти обертання (у перерахунку – упорів) гребних гвинтів РК;

сенсори (системи) визначення просторового положення ПА відносно СН;

сенсор довжини випущеної частини КТ.

Аналіз виробничої літератури з експлуатації підводної техніки та досвід авторів по створенню та випробуванням СППС свідчить, що ПА та КТ як об'єкти керування характеризуються невизначеністю їх власних параметрів, до головних з яких можна віднести:

змінність маси і залишкової плавучості ПА з-за водопоглинення композитними матеріалами корпусу та з-за прийняття на борт ПА затонулих об'єктів;

змінність коефіцієнтів гідродинамічного опору корпусу ПА з-за роботи його корисного вантажу;

змінність залишкової плавучості, діаметру та коефіцієнтів гідродинамічного опору КТ під дією гідростатичного тиску та розтяжних зусиль, які виникають при його русі у воді.

Таким чином, СППС як об'єкт керування являє собою систему двох тіл – твердого тіла (ПА) та гнучкого тіла (КТ), що механічно взаємодіють між собою в потоці води і характеризуються невизначеністю власних параметрів.

Крім того, СППС як об'єкт керування характеризується невизначеністю зовнішніх збурень, які діють на СН, КТ і ПА – вітро-хвильові збурення та епіюра течії у районі виконання підводних робіт.

2 САМОХІДНА ПРИВ'ЯЗНА ПІДВОДНА СИСТЕМА ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ

2.1 Базові режими експлуатації та задачі керування СППС

Вивчення областей застосування СППС та особливостей керування ними показує, що рух її ПА як головного виконавчого органу можна класифікувати наступним типами:

- прямолінійний рух зі стабілізацією глибини H , або висоти h ходу ПА над ґрунтом;
- горизонтальний або просторовий рух зі стабілізацією курсу або швидкості ПА;
- прямолінійний рух по вертикалі або рух по вертикалі зі стабілізацією дистанції ПА до вертикального протяжного об'єкта;
- рух у горизонтальній або вертикальній площині по заданій траєкторії;
- рух по довільній заданій просторовій траєкторії;
- позиціонування ПА у заданій точці.

Типові траєкторії руху підводного апарата СППС показані на рис. 2.1.

Зазначені типи руху реалізуються квазістаціонарними та динамічними режимами. Це стосується як пошукових підводних робіт, так і науково-дослідницьких, інспекційних та спеціальних підводно-технічних робіт [11].

2.1.1 Квазістаціонарний рух СППС.

Акселеративний рух будь-якого елемента СППС (СН, КТ або ПА), при якому приєднаними масами води на елементах СППС можна нехтувати з-за їх малості, є квазістаціонарним.

Розглянемо особливості роботи СППС в квазістаціонарному режимі руху.

Квазістаціонарний режим руху СППС виникає в двох випадках: при якірній стоянці СН на незмінній течії; при русі СН з усталеною швидкістю.

В обох випадках СН гідродинамічно взаємодіє з водою, тому можна розглядати вектор швидкості руху СН відносно водної товщі $\vec{V}_{\text{СНв}}$:

$$\vec{V}_{\text{СНв}} = \vec{V}_{\text{СНг}} - \vec{V}_{\text{т}}, \quad (2.1)$$

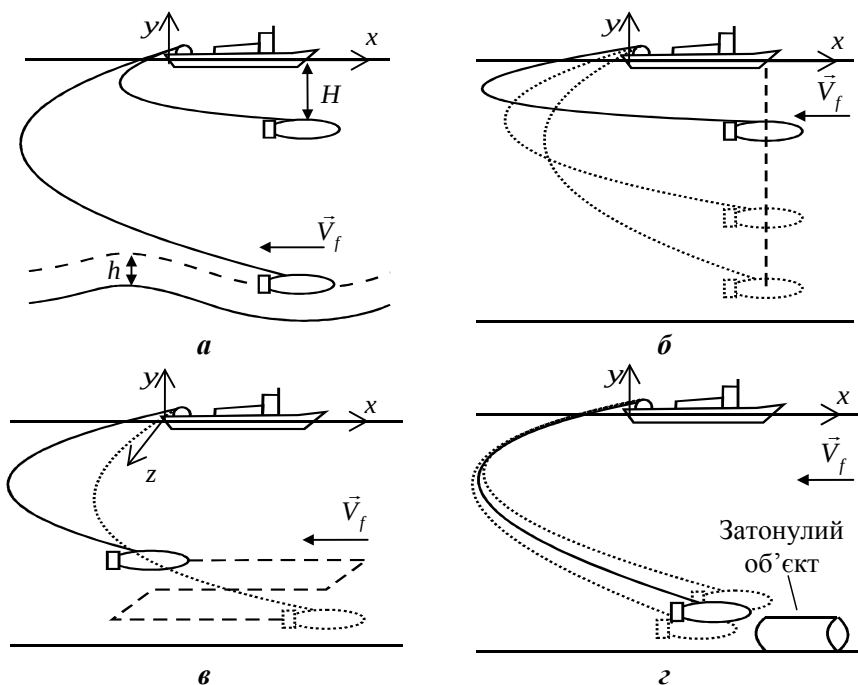


Рис. 2.1 – Типові траєкторії руху підводного апарата СППС:
а – рух із заданою глибиною або висотою над ґрунтом, **б** – рух по вертикалі, **в** – рух по довільній траєкторії, **г** – позиціонування ПА

де $\vec{V}_{\text{CHr}}$ – вектор швидкості руху СН відносно ґрунту, $\vec{V}_t$ – вектор швидкості течії (відносно ґрунту).

В деяких випадках зручно розглядати вектор швидкості набігаючого потоку води відносно СН:

$$\vec{V}_f = -\vec{V}_{\text{CHв}}. \quad (2.2)$$

Його абсолютне значення V_f вимірюється бортовими приладами СН. При цьому просторове положення ПА відносно СН є або незмінним, або змінюється малими прискореннями (гальмуваннями).

Досвід практичного застосування СППС, накопичений у НДІ підводної техніки та морській лабораторії «Дельта» Національного універ-

ситету кораблебудування імені адмірала Макарова свідчить, що квазістаціонарний режим руху ПА відносно СН виникає при його переміщенні з постійною швидкістю або малими прискореннями (гальмуваннями), коли приєднаними масами води на КТ та корпусі ПА можна знехтувати. При цьому відносна швидкість ПА не повинна перевищувати 0,1 м/с, тоді рух КТ також можна вважати квазістаціонарним [12].

Гідрологічні дослідження і практика виконання підводних робіт на Чорному та Азовському морях свідчать, що швидкість і напрямок течії $\vec{V}_T$ у строгому розумінні є нестаціонарними величинами [13]. Зміна епюри течії суттєво залежить від пори року, властивостей акваторії в місці проведення підводних робіт. Однак в рамках окремої експедиції можна вважати епюру незмінною. Тому при моделюванні СППС можна прийняти, що вплив вектора течії $\vec{V}_T$ на СППС має квазістаціонарний характер і є незмінним по глибині.

2.1.2 Динамічні режими руху СППС.

З позицій керування динамічні режими відносяться до найбільш складних при експлуатації СППС. Для цих режимів найбільш складно організовувати якісне виконання підводно-технічних робіт, особливо, коли необхідно забезпечувати якісне фото-, відео- та гідроакустичне обстеження підводних об'єктів (ПО) та картографування донної поверхні, а також застосування дистанційно керованих підводних маніпуляторів чи приладів забору проб води чи ґрунту.

До головних режимів СППС, у яких виникають перехідні процеси, що вимагають автоматизації керування, відносяться:

- рух ПА по схвильованій водній поверхні при його відході від СН перед зануренням та при підході до СН для підйому на борт;
- занурення ПА у задану підводну робочу зону;
- маневрування ПА біля ПО при його обстеженні;
- позиціонування ПА біля ПО при виконанні підводно-технічних робіт вимірювального чи маніпуляційного типу;
- рух ПА зі стабілізацією курсу, глибини, висоти ходу чи швидкості руху.

До головних зовнішніх збурень (ЗЗ), які суттєво впливають на СППС у цих режимах, можна віднести:

- вітро-хвильова дія на корпус ПА та КТ (при знаходженні ПА та частини його КТ на водній поверхні чи у приповерхневому шарі води);

- епюра сил підводної течії у районі проведення підводних робіт (у тому числі й турбулентність потоку води поблизу ПО), які впливають на корпус ПА та на КТ по всій довжині його попущеної частини;

- хитавиця СН, у результаті якої через лінію КТ до корпусу ПА передаються додаткові збурюючі сили;

- динаміка горизонтального руху СН, обумовлена його дрейфом або вимушеним маневруванням, що призводить до динаміки точки закріплення корінного кінця КТ.

Керованими параметрами СППС у цих режимах є:

- упори рушійно-рульового комплексу ПА;

- довжина попущеної частини КТ.

2.2 Характеристика зовнішніх збурень, які діють на СППС

Автоматизація керування просторовим квазістаціонарним рухом СППС є складною прикладною науково-технічною задачею, оскільки об'єкт керування є суттєво нелінійним і функціонує в умовах невизначеності власних характеристик та параметрів зовнішнього середовища:

- невизначеності вітро-хвильових збурень, які діють на корпус СН і через КТ передаються на корпус ПА;

- невизначеності швидкості і напрямку течії; невизначеності швидкості потоку води, що набігає на елементи СППС, та густини води, оскільки вимірювати ці параметри по всій глибині в морських умовах немає технічної можливості;

- невизначеності гідродинамічних характеристик КТ та корпусу ПА, як наслідок невизначеності їх параметрів та турбулентного характеру обтікання потоком води.

Слід зазначити, що окрім вказаних невизначеностей у деяких режимах застосування СППС задача керування ускладнюється відсутністю зворотного зв'язку по поточним координатам ПА, коли в таких режимах застосування систем позиціонування ПА відносно СН (гідроакустичних, інерційних тощо) є недоцільним за економічними міркуваннями або через обмеження підводної технології [14, 15].

Вітро-хвильові збурення при якірній стоянці СН діють на нього двома основними шляхами суттєвими для застосування СППС – викликають вертикальну хитавицю, яка через КТ передає поздовжні зусилля

на корпус ПА, та вітрову циркуляцію СН і, відповідно, горизонтальні переміщення корінного кінця КТ.

Обидва збурення суттєво ускладнюють експлуатацію СППС, тому для зменшення їх впливу на систему на практиці вживають наступні заходи: встановлюють на систему "КЛ – КТ" спеціальні механічні демпфери повздовжніх збурень [16]; встановлюють СН на стоп-анкер, який обмежує його вітрову циркуляцію так, що відхилення СН від заданої точки відносно ґрунту не перевищує 3-5 м, що є задовільним для якісного керування СППС [17] (рис. 2.2).

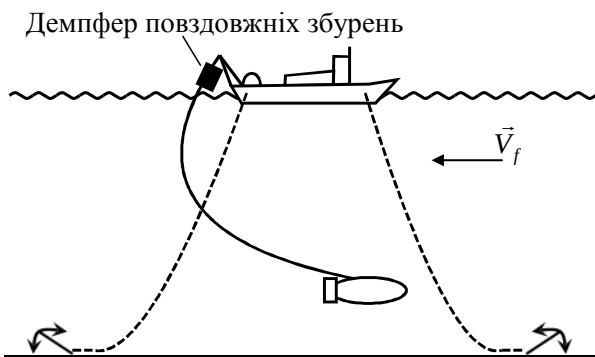


Рис. 2.2 – Схема застосування СППС в умовах дії вітро-хвильових збурень з демпфером та стоп-анкером

При усталеному русі СН вітро-хвильові збурення мають вплив на вектор швидкості його руху відносно ґрунту $\vec{V}_{\text{СНг}}$, але цей вплив має квазістаціонарний характер [18]. Таким чином вектор $\vec{V}_f$ є квазістаціонарним, оскільки він утворюється сумою квазістаціонарних векторів (2.1, 2.2).

Аналіз механізмів виникнення сили гідродинамічного опору КТ показує, що основні величини, які її утворюють, є невизначеними [19]:

діаметр D , який може дещо змінюватись по глибині внаслідок дії гідростатичного тиску;

коефіцієнти нормальної та тангенціальної складових сили гідродинамічного опору C_n та C_t , які нелінійно залежать від V_f ;

швидкість набігаючого потоку води V_f , невизначеність якого обумовлена виникненням турбулентних явищ на елементах КТ та корпусі ПА;

густина води ρ , яка може змінюватись через нестабільність солоності та температури водного середовища.

В морській практиці неможливо оперативно вимірювати значення цих величин з точністю, достатньою для задач керування. Тому приймають, що всі вказані невизначеності мають квазістаціонарний та інтегральний вплив на КТ, який враховується в розрахунках відповідними коефіцієнтами. Так, вплив турбулентності потоку води на КТ приймають незмінним по глибині і враховують коефіцієнтами C_n та C_t . Еквівалентні за силовою дією на КТ V_f та ρ також приймаються незмінними по глибині, що відповідає класичним підходам гідродинаміки для дослідження гнучких ниток у потоках [20].

Таким чином, з урахуванням прийнятих вище припущень квазістаціонарний рух елементів СППС розглядається як усталений рух в потоці води, при якому на цих елементах інтегровано проявляються основні гідродинамічні залежності ідеального обтікання цих елементів та всі невизначені процеси обтікання, прояв яких теж є інтегрованим по відношенню до результуючих зовнішніх гідродинамічних сил, що виникають на цих елементах.

Виходячи з цього, автоматизація керування рухом СППС полягає у застосуванні регуляторів, які б забезпечували автоматичний рух ПА в основних експлуатаційних режимах:

- регулятор швидкості маршового руху ПА;
- стабілізатор курсу ПА;
- регулятор довжини випущеної частини КТ.

2.3 Системи координат, що використовуються в задачах керування СППС

При розв'язанні задач навігації, орієнтації та керування рухом використовують різні системи координат [21]. Це пояснюється відмінністю задач, а також тим, що структура та форма рівнянь суттєво залежать від вибору координатної системи.

2.3.1 Геоцентрична система координат

Вихідною є геоцентрична система координат O_g, x_g, y_g, z_g (рис. 2.3, *a*).

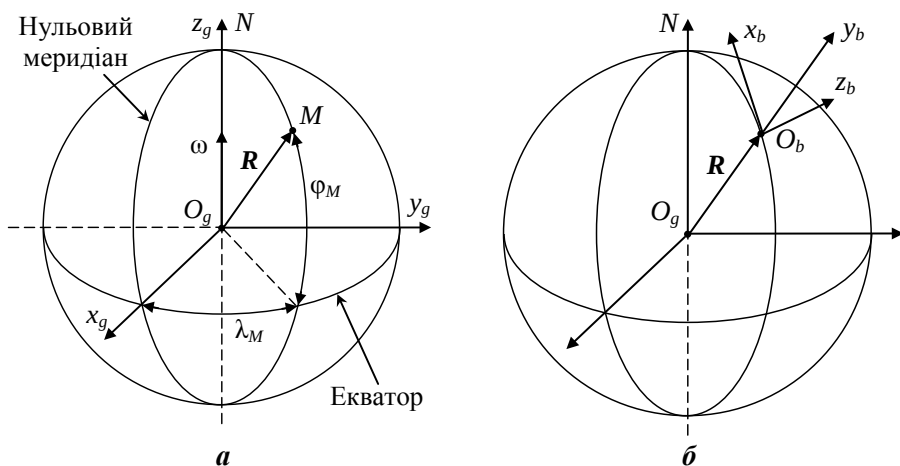


Рис. 2.3 – Геоцентрична (а) та земна базова (б) системи координат

Початок координат цієї системи O_g збігається з центром Землі, вісь $O_g z_g$ спрямована по осі добового обертання Землі в точку північного географічного полюса N ; вісь $O_g x_g$ розташована в площині земного екватора та спрямована від центра Землі в точку перетинання екватора та нульового меридіана; вісь $O_g y_g$ становить із першими двома осями праву систему координат.

Геоцентрична система координат обертається в просторі навколо осі $O_g z_g$ з кутовою швидкістю добового обертання Землі ω .

Положення будь-якої точки M , що лежить на поверхні Землі, однозначно визначається в геоцентричній системі координат трьома лінійними координатами.

Однак зручніше визначати положення точки M її географічними координатами, вважаючи незмінним радіус поверхні Землі. Тоді положення точки M характеризується географічними широтою та довготою.

Географічна широта – це кут φ_M між радіусом-вектором $\mathbf{R}$, проведеним із центра Землі в точку M , і площиною екватора.

Географічна довгота – це двограний кут λ_M між площиною нульового меридіана та площиною меридіана, що проходить через точку M . Довжина радіуса-вектора $\mathbf{R}$ вважається відомою.

2.3.2 Земна базова система координат

Оперативне керування рухом здійснюється в обмежених часових і просторових інтервалах в околі довільної точки криволінійної траєкторії маршруту. Тому можна розглядати переміщення СН або ПА відносно «плоскої і нерухомої» Землі та використовувати прямокутні координатні системи. Одна з них – земна базова система координат (БСК) $O_b x_b y_b z_b$ – орієнтована по основних напрямках на поверхні Землі (рис. 2.3, **б**). Початок системи координат зв'язаний з деякою точкою на поверхні Землі, вісь $O_b y_b$ є продовженням радіуса-вектора $\mathbf{R}$, осі $O_b x_b$ та $O_b z_b$ лежать у площині горизонту, вісь $O_b x_b$ завжди спрямована на північ, вісь $O_b z_b$ становить із першими двома осями праву систему координат.

2.3.3 Напівзв'язана система координат

Проміжна земна або напівзв'язана система координат (НСК) $O_m x_m y_m z_m$ – характеризується тим, що її початок завжди сполучений із центром мас об'єкта і переміщується з ним у просторі (рис. 2.4, **а**).

Її координатні осі або паралельні відповідним осям базової системи координат, так що вісь $O_m x_m$ орієнтована на північ, або постійно повернені в горизонтальній площині на кут заданого курсу СН к таким чином, що вісь $O_m x_m$ збігається з кусочно-лінійним відрізком маршрутною траєкторії й орієнтована в напрямку окремої цілі руху.

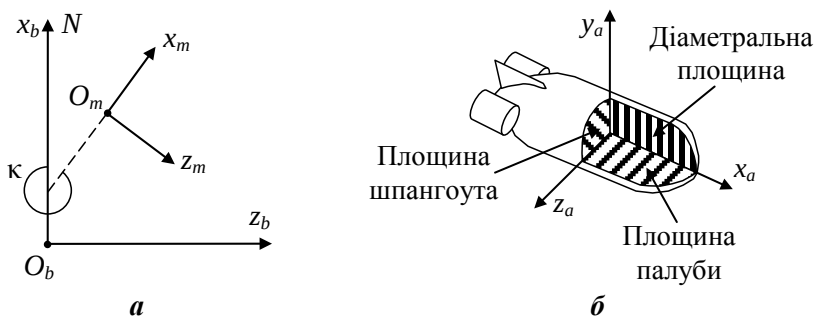


Рис. 2.4 – Напівзв'язана з СН (**а**) та повністю зв'язана з ПА (**б**) системи координат

У поверненій на кут к НСК зручно розглядати рискання СН на курсі, оскільки в цьому випадку воно характеризується малими кутами, а сам кут курсу може змінюватися в межах повного повороту.

2.3.4 Зв'язана система координат

Рухомою координатною системою $O_a x_a y_a z_a$ повністю зв'язана з корпусом ПА, переміщується й обертається разом з ним (рис. 2.4, б). Тому така система одержала назву зв'язаної системи координат (ЗСК). Зазвичай її центр сполучається із центром мас, а осі збігаються з головними центральними осями інерції. Поздовжня вісь $O_a x_a$ і нормальна вісь $O_a y_a$ лежать у поздовжній площині симетрії ПА (діаметральній площині). Перша з них спрямована до носової частини, друга – вертикально вгору. Поперечна вісь $O_a z_a$ утворює з ними праву координатну систему і разом з поздовжньою віссю $O_a x_a$ розташовується в горизонтальній площині (площини палуби), а разом з вертикальною віссю $O_a y_a$ – у поперечній площині (площини шпангоута).

Про дослідженні руху СППС координати СН зазвичай представляють в БСК, а координат ПА – в НСК.

2.4 Кінематичні параметри руху ПА

ПА як тверде рухоме тіло характеризують шість ступенів свободи, серед яких виділяють три елементарних поступальних рухи та три елементарних обертових рухи, які в сукупності утворюють дванадцять кінематичних параметрів: шість позиційних і шість швидкісних. У табл. 2.1 наведені найменування елементарних рухів, позиційні та швидкісні кінематичні параметри.

Поступальне переміщення ПА в будь-який момент часу характеризується положенням його центра мас в тривимірному просторі і визначається точкою з трьома координатами x, y, z .

Орієнтація ПА в просторі в будь-який момент часу визначається взаємним розташуванням НСК і ЗСК, яке характеризується трьома кутовими координатами – кутами Ейлера:

- кут рискання φ – кут між проекцією осі ЗСК $O_a x_a$ на горизонтальну площину НСК $O_m x_m z_m$ та віссю $O_m x_m$;
- кут диференту (тангажу) ψ – кут між віссю ЗСК $O_a x_a$ і горизонтальною площиною НСК $O_m x_m z_m$;
- кут крену θ – кут між поздовжньою площиною симетрії (діаметральною площиною) ПА $O_a x_a y_a$ і вертикальною площиною, яка паралельна осям НСК $O_m y_m$ та $O_m x_m$.

Таблиця 2.1 – Кінематичні параметри ПА

Найменування елементарних рухів твердого тіла			Кінематичні параметри			
Основні		Застосовані для ПА	Позиційні		Швидкісні	
			Найменування	Умове позначення	Найменування	Умове позначення
Поступальний рух	Поздовжній поступальний рух	Маршовий рух	Поздовжнє переміщення	x	Швидкість поздовжнього переміщення	v_x
	Вертикальний поступальний рух	Вертикальна хита-виця	Вертикальне переміщення	y	Швидкість вертикального переміщення	v_y
	Поперечний поступальний рух	Бічне знесення	Бічне переміщення	z	Швидкість бічного переміщення	v_z
Обертовий рух	Обертний рух щодо поздовжньої осі	Бічна хита-виця	Кут крену	θ	Кутова швидкість бортової хита-виці	ω_x
	Обертний рух щодо вертикальної осі	Рух за курсом	Кут курсу	φ	Кутова швидкість рискання	ω_y
	Обертний рух щодо поперечної осі	Кільова хита-виця	Кут диференту (тангажу)	ψ	Кутова швидкість кільової хита-виці	ω_z

Організоване поводження ПА припускає стабілізацію або зміну за певним законом позиційних кінематичних параметрів всіх елементарних рухів. Іноді процес стабілізації протікає шляхом природного регулювання та не вимагає примусового керування. Це насамперед відноситься до деяких видів хита-виці надводних суден. В інших випадках рух неможливий без залучення спеціальних технічних засобів ПА, без яких не досягаються ні стабілізація, ні цілеспрямована зміна кінематичних параметрів руху. Тоді виникає необхідність у ручному або автоматичному керуванні.

2.5 Рівняння зв'язку між різними системами координат

Розглянемо три вектора $\vec{i}_b$, $\vec{j}_b$, $\vec{k}_b$, що мають такі координати в БСК: $\vec{i}_b = \{1, 0, 0\}$, $\vec{j}_b = \{0, 1, 0\}$, $\vec{k}_b = \{0, 0, 1\}$. Тоді базис $B = \{\vec{i}_b, \vec{j}_b, \vec{k}_b\}$ є базисом БСК векторного простору Q_{vec} .

Розглянемо три вектора $\vec{i}_m$, $\vec{j}_m$, $\vec{k}_m$, що мають такі координати в НСК: $\vec{i}_m = \{1, 0, 0\}$, $\vec{j}_m = \{0, 1, 0\}$, $\vec{k}_m = \{0, 0, 1\}$. Тоді базис $M = \{\vec{i}_m, \vec{j}_m, \vec{k}_m\}$ є базисом НСК векторного простору Q_{vec} . Базис M співпадає з базисом B , якщо кут $\kappa = 0$.

Розглянемо три вектора $\vec{i}_a$, $\vec{j}_a$, $\vec{k}_a$, що мають такі координати в ЗСК: $\vec{i}_a = \{1, 0, 0\}$, $\vec{j}_a = \{0, 1, 0\}$, $\vec{k}_a = \{0, 0, 1\}$. Тоді базис $A = \{\vec{i}_a, \vec{j}_a, \vec{k}_a\}$ є базисом ЗСК векторного простору Q_{vec} .

Перенесемо в точку початку координат БСК три вектора $\vec{i}_b$, $\vec{j}_b$, $\vec{k}_b$, три вектора $\vec{i}_m$, $\vec{j}_m$, $\vec{k}_m$, три вектора $\vec{i}_a$, $\vec{j}_a$, $\vec{k}_a$ і три вектора $\vec{i}_c$, $\vec{j}_c$, $\vec{k}_c$, тоді координатам деякої точки n однозначно відповідає радіус-вектор

$$\vec{n} = \{n_{xb}, n_{yb}, n_{zb}\}_B = \{n_{xm}, n_{ym}, n_{zm}\}_M = \{n_{xa}, n_{ya}, n_{za}\}_A,$$

де n_{xb}, n_{yb}, n_{zb} – проекції вектора $\vec{n}$ на відповідні осі БСК, n_{xm}, n_{ym}, n_{zm} – проекції вектора $\vec{n}$ на відповідні осі НСК, n_{xa}, n_{ya}, n_{za} – проекції вектора $\vec{n}$ на відповідні осі ЗСК, n_{xc}, n_{yc}, n_{zc} – проекції вектора $\vec{n}$ на відповідні осі КСКТ. Тобто при переході від одного базису векторного простору до іншого змінюються і координати вектора [22].

Якщо відомі координати вектора $\vec{n}$ в одному з базисів, то за допомогою рівнянь зв'язку можна знайти його координати в решті базисів, при умові, що відомий взаємозв'язок між базисами.

2.5.1 Рівняння зв'язку між БСК, НСК та ЗСК

Зв'язок між складовими деякого вектора $\vec{n}$, заданими в НСК координатами n_{xm}, n_{ym}, n_{zm} та в ЗСК координатами n_{xa}, n_{ya}, n_{za} здійснюється за залежностями

$$\begin{bmatrix} n_{xa} \\ n_{ya} \\ n_{za} \end{bmatrix} = K_m \begin{bmatrix} n_{xm} \\ n_{ym} \\ n_{zm} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} n_{xm} \\ n_{ym} \\ n_{zm} \end{bmatrix} = K_m^{-1} \begin{bmatrix} n_{xa} \\ n_{ya} \\ n_{za} \end{bmatrix},$$

де K_m та K_m^{-1} – кінематична та зворотна до неї матриці зв'язку НСК та ЗСК:

$$K_m^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \psi \cos \theta) & (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta) \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta) & (\cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) \end{bmatrix}$$

Наведені рівняння дають змогу переводити координати будь-якого вектора з НСК в ЗСК та навпаки, якщо орієнтація ЗСК відносно НСК задана кутами Ейлера φ , ψ та θ , також на їх основі отримуються рівняння зв'язку між БСК та НСК з урахуванням того, що в кінематичній матриці K_b замість кута φ використовуємо кут κ , а решта кутів дорівнює нулю:

$$K_b^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & 0 & \sin \kappa \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \kappa & 0 & \cos \kappa \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} n_{xm} \\ n_{ym} \\ n_{zm} \end{bmatrix} = K_b \begin{bmatrix} n_{xb} \\ n_{yb} \\ n_{zb} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} n_{xb} \\ n_{yb} \\ n_{zb} \end{bmatrix} = K_b^{-1} \begin{bmatrix} n_{xm} \\ n_{ym} \\ n_{zm} \end{bmatrix}.$$

Якщо швидкість руху ПА задана в ЗСК вектором $\vec{V} = \{v_{xa}, v_{ya}, v_{za}\}_A$, то його складові в НСК та БСК $\vec{V} = \{v_{xm}, v_{ym}, v_{zm}\}_M = \{v_{xb}, v_{yb}, v_{zb}\}_B$ визначаються на основі рівнянь відповідно

$$\begin{bmatrix} v_{xm} \\ v_{ym} \\ v_{zm} \end{bmatrix} = K_m^{-1} \begin{bmatrix} v_{xa} \\ v_{ya} \\ v_{za} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} v_{xb} \\ v_{yb} \\ v_{zb} \end{bmatrix} = K_b^{-1} \begin{bmatrix} v_{xm} \\ v_{ym} \\ v_{zm} \end{bmatrix}.$$

Координати ПА в НСК x, y, z визначаються на основі диференціального рівняння

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{xm} \\ v_{ym} \\ v_{zm} \end{bmatrix}.$$

2.5.2 Рівняння зв'язку кінематичних параметрів обертового руху ПА

Три послідовних оберти проти годинникової стрілки навколо вертикальної поперечної та поздовжньої осей на кути відповідно φ, ψ та θ переводять ЗСК з початкового стану, коли вона сполучена з НСК, через проміжні в деяке довільне положення, яке визначає орієнтацію ПА в поточний момент часу. Кут рискання $\varphi > 0$ при оберті діаметральної площини ПА на лівий борт відносно заданого напрямку руху $O_m x_m$, кут диференту $\psi > 0$ – при диференті на корму, кут крену $\theta > 0$ при крені на правий борт.

Зв'язок кутів Ейлера з іншими кінематичними параметрами обертового руху ПА – проекціями кутової швидкості на осі абсцис, ординат і аплікват ЗСК відповідно $\omega_{xa}, \omega_{ya}, \omega_{za}$ – встановлюється на основі кінематичних співвідношень, які називають рівняннями зв'язку обертового руху:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \varphi \\ \psi \end{bmatrix} = K_{\omega}^{-1} \begin{bmatrix} \omega_{xa} \\ \omega_{ya} \\ \omega_{za} \end{bmatrix}; \quad K_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix},$$

де K_{ω} – кінематична матриця зв'язку обертового руху.

2.6 Виконавчі механізми

Виконавчі механізми утворюють засоби керування СН та ПА і забезпечують їх рух в заданому напрямку при підтриманні в визначених

межах його кінематичних параметрів. До них відносять перш за все рушії, які примушують СН та ПА рухатись з поступальною швидкістю. Керування напрямком руху досягається застосуванням гідродинамічних і аеродинамічних рулів, підрулюючих пристроїв або рушійно-рульових колонок. На ПА для стабілізації крену і диференту використовують горизонтальні гідродинамічні рулі, елерони, закрилки.

При роботі засобів керування разом з основним керуючим ефектом можливі деякі побічні явища. Так, рушії крім сили тяги створюють момент диференту. Гідродинамічні рулі утворюють обертовий момент на корпусі відносно вертикальної осі й одночасно додатковий опір в продольному напрямку, а також бокову силу, що створює неконтрольоване знесення судна.

Найбільш розповсюдженим типом рушія є гребний гвинт (ГГ), упор (сила тяги) якого створюється за рахунок реакції води, що відкидається лопатями при його обертанні. Форма лопатей утворена гвинтовими поверхнями. На деяких суднах встановлюють ГГ з регульованим кроком, у яких змінюється положення лопатей і таким чином забезпечується регулювання сили тяги. Для швидкохідних ПА використовують співвісні ГГ протилежного обертання, завдяки чому досягається взаємна компенсація моментів крену, які є побічним ефектом роботи ГГ.

Крім ГГ використовують крильчасті рушії, гребні колеса, водометні рушії, але широкого застосування ці пристрої не отримали.

Висока ефективність, простота конструкції і передавання потужності від двигуна, низька вартість виготовлення, надійність експлуатації роблять ГГ одним з самих економічних рушіїв для СН та ПА.

Гребні гвинти дають змогу змінювати швидкість в широких межах, забезпечують простоту керування та високий коефіцієнт корисної дії.

Засоби керування напрямком руху на сьогоднішній день досить різноманітні. Найбільше розповсюдження отримали гідродинамічні рулі, поворотні кільцеві насадки на ГГ, підрулюючі пристрої і поворотні гвинтові рушійно-рульові колонки. Гідродинамічні рулі і поворотні кільцеві насадки на ГГ ефективні лише при інтенсивній роботі головних рушіїв. Їх застосовують на ПА, яким властиві значні швидкості руху. На ПА, які в робочому режимі мають малі швидкості, встановлюють поворотні гвинтові колонки, або розміщують рушії так, щоб створювались керовані обертові моменти.

Дія гідродинамічного руля основана на тому, що при його повороті з нейтрального положення на поверхні крила виникає гідродинамічна сила. Так як вона не проходить через початок зв'язаної з СН або ПА системи координат, то виникає момент відносно вертикальної осі. Саме наявність цього моменту на корпусі забезпечує керований поворот, зміну курсу судна і стабілізацію кута ризику.

Крім моменту, гідродинамічна сила руля створює небажані ефекти: виникнення поперечної швидкості, неконтрольованого бічного знесення судна та збільшення кута дрейфу. Це продовжує шлях судна, знижує середню швидкість руху та призводить до перевитрат палива.

Засоби активного керування напрямком – підрулюючі пристрої та поворотні рушійно-рульові колонки – не потребують використання головних рушіїв, оскільки вони обладнані власними приводами і забезпечують керування на малих швидкостях або взагалі без поступального руху, коли відсутня сила звичайного пасивного гідродинамічного руля.

Підрулюючі пристрої представляють собою рушії, розміщені в поперечному каналі підводної частини корпусу в носу та/або кормі судна. Це дає змогу створювати різноманітні бокові сили і обертові моменти, змінювати характер бокового переміщення та розвороту судна.

Рульові колонки представляють собою ГГ, розміщені в кільцевих насадках і винесені за межі корпусу судна. Їх використовують на судах, які за умовами експлуатації мають тривало знаходитись в певній точці моря. Регулювання сили тяги, зміна її напрямку разом з необхідною кількістю рульових колонок дають змогу використовувати їх різноманітних режимах керування рухом суден.

Ефективність засобів активного керування напрямком руху знижується по мірі збільшення швидкості судна, тому їх застосовують в швартовних режимах і режимах позиціонування в заданій точці.

2.7 Сенсори СППС

В загальному випадку сенсори, які використовуються при керуванні СППС, можна розділити на сенсори кінематичних параметрів, сенсори експлуатаційних параметрів та сенсори зовнішніх і внутрішніх збурень.

Сенсори кінематичних параметрів називають приладами морської навігації, які є основними для здійснення керування СППС і призначені

для вимірювання їх кінематичних параметрів. Серед них можна виділити прилади, призначені для визначення поточного місцезнаходження і напрямку руху, та прилади вимірювання швидкісних параметрів СН та ПА.

Сенсори експлуатаційних параметрів, зовнішніх та внутрішніх збурень призначені для вимірювання інших параметрів СППС та зовнішнього середовища, які мають вплив на його рух:

довжину випущеної частини КТ та сил його натягу на корінному та ходовому кінцях;

температури водного середовища;

питомої густини води тощо.

Розглянемо більш детально прилади морської навігації як основні для здійснення керування СППС.

2.7.1 Компаси

Магнітний компас використовується як основний курсопоказчик на па класу «Мікро» та як резервний засіб на ПА інших класів. В основі його роботи лежить вплив магнітного поля Землі (МПЗ) на магнітну стрілку, яка при відсутності сторонніх магнітних впливів орієнтується вздовж силової лінії МПЗ у напрямку Північного магнітного полюса.

Індукційні компаси ґрунтуються на перетворенні магнітного поля в електричні сигнали. Для цього використовують ферозонди, в магнітоті яких осердях яких наводяться індукції МПЗ і поля, яке створюється в обмотках збудження. Основна перевага індукційних компасів полягає в дискретному характері сигналу, що суттєво спрощує його передачу і обробку.

Гірокомпаси – найбільш поширені в морській практиці гіроприлади. Класичний гіроскоп представляє собою карданну систему, побудовану на механічному гіроскопі, принцип дії якого ґрунтується на впливі кутової швидкості обертання Землі на положення головної осі гіроскопа.

Також розвиток набувають безкарданні конструкції з лазерними або оптоволоконними гіроскопами, які мають більшу точність вимірювання курсу, незалежні від магнітних мас судна та МПЗ.

2.7.2 Лаги

Лагом називають пристрій, який вимірює швидкість СН або ПА.

Найбільш розповсюджені індукційні лаги, які дають змогу вимірювати швидкість відносно води. Первинний перетворювач індукційного лага містить електромагніт та вимірювальні електроди. Електромагніт створює змінне магнітне поле, яке при русі об'єкта наводить у воді елек-

трорухому силу. Електроди вимірюють цю напругу, величина якої згідно з законом Фарадея пропорційна швидкості руху об'єкта. Для вимірювання всіх трьох складових вектора швидкості руху відносно води можна використовувати три лаги, розташовані взаємно перпендикулярно.

Гідродинамічні лаги використовуються на підводних човнах та великих суднах. Принцип їх роботи полягає у вимірюванні гідродинамічного тиску, який створюється швидкісним напором набігаючого потоку води при русі судна.

Гідроакустичні лаги дають змогу виміряти абсолютну швидкість руху СН або ПА (відносно морського дна), принцип їх дії заснований на застосуванні ефекту Доплера. Випромінювач формує акустичний промінь, направлений під кутом к горизонту в бік морського дна. Прийнятий сигнал має частоту, яка залежить від швидкості руху. Глибина моря, на якій працює гідроакустичний лаг, визначається його енергетичним потенціалом. Чим більша робоча глибина, тим нижче має бути робоча частота випромінювання і тим більші розміри антени.

2.7.3 Інерційні навігаційні системи

Інерційні навігаційні системи (ІНС) будуються як платформні та безплатформні і забезпечують безперервне вироблення інформації про курс, координати, швидкість руху і кутову орієнтацію об'єкта.

Платформна ІНС представляє собою пристрій, який на основі інформації від акселерометрів, гіроскопів та бортового годинника моделює вертикаль місцезнаходження об'єкта, інерційну і земну системи координат. Центр інерційної системи координат співпадає з центром Землі, а взаємно ортогональні осі направлені на нерухомі зірки. Земну систему координат будує гіроскопічна стабілізована платформа, розміщена в карданному підвісі. Задача визначення координат розв'язується шляхом вимірювання кута між поточним і початковим положеннями вертикалі. Точність вироблення курсу підтримується на рівні однієї кутової хвилини, кутів хитамиці – десяти кутових секунд, координат – одного кілометра.

Безплатформна ІНС містить гіроскопи і акселерометри, жорстко зв'язані з корпусом ПА. Датчики кутів вимірюють кути повороту роторів гіроскопів відносно їх корпусів. Акселерометри розташовуються взаємно ортогонально. Безплатформні ІНС відрізняються спрощеною конструкцією, обумовленою відсутністю гіростабілізованої платформи в карданних кільцях.

2.7.4 Супутникові навігаційні системи

Супутникові навігаційні системи (СНС) забезпечують глобальне високоточне визначення координат надводних суден в будь-якому районі Світового океану. Вони складаються з трьох основних компонентів: групування космічних апаратів з приймально-випромінюючою апаратурою, наземного контрольно-вимірювального комплексу з системою зв'язку та апаратури користувача, яка розміщується на СН та інших рухомих об'єктах.

На цей час СНС дають змогу визначати координати СН на поверхні Землі з точністю в декілька метрів. Найбільш відомі СНС належать Міністерству оборони США та Росії відповідно GPS (Global Positioning System) та ГЛОНАСС (Глобальна Навігаційна Супутникова Система).

2.7.5 Ехолоти

Найбільш розповсюдженим гідроакустичним засобом є ехолот – прилад, який вимірює глибину під СН чи ПА. Принцип дії ехолоту полягає у визначенні часу між випромінюванням та прийомом сигналу, відбитого від дна, з урахуванням швидкості розповсюдження акустичних хвиль у воді, яка для морської води дорівнює приблизно 1500 м/с. Сучасні ехолоти призначені для роботи на глибинах до 500 м, мають точність до 0,1 м та нормально працюють при швидкості судна до 40 вуз. та хитах до $7...15^\circ$.

2.7.6 Маяки-відповідачі

Маяки представляють собою гідроакустичні прилади, розміщені на морському дні в точках, координати яких відомі, і працюють в режимі «запит-відповідь». В залежності від кількості маяків використовуються різні методи визначення координат. Найпростіша схема містить три маяки. Суднова апаратура надсилає запит, отримує відповідь від маяків та розраховує дальності до кожного, за якими визначає власні координати. З урахуванням обмеженої потужності сигналів від маяків і шумів моря визначення координат можливе на відстанях до 10 км до маяків.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРОВАНОГО ПРОЦЕСУ ПРОСТОРОВОГО РУХУ СППС

3.1 Структура математичної моделі ПА

Рух ПА підпорядковується законам механіки руху твердого тіла у тривимірному просторі і виникає під дією векторів рівнодіючої зовнішніх сил і рівнодіючої зовнішніх моментів, що прикладені до його корпусу. Всі зовнішні сили і моменти можуть бути розділені на такі основні категорії [21]:

- гідродинамічні сили і моменти, які виникають внаслідок взаємодії корпусу ПА з потоком води;
- сили ваги та плавучості;
- керуючі сили та моменти, які створюються рушіями та іншими засобами керування ПА;
- сили і моменти, обумовлені дією кабель-троса (для прив'язних ПА);
- сили та моменти, обумовлені вітро-хвильовими збуреннями (при русі в приповерхневому шарі або безпосередньо на поверхні води).

Підводний апарат може реалізувати керований рух по всіх ступенях свободи у просторі. Конструкція типового ПА містить корпус, який рухається у водній товщі під гідродинамічним впливом (ГВ), рушійний комплекс (РК) та блок плавучості (БП), кожен з цих компонентів певним чином впливає на рух ПА. Структуру математичної моделі ПА представлено на (рис. 3.1).

Кінематичні параметри ПА представлені:

- радіус-вектором $\vec{R}_{ПА}$ розташування ПА в базовій системі координат (БСК) або напівв'язаній з СН системі координат (НКС);
- вектором поступальної швидкості ПА відносно водної товщі $\vec{V}_{ПА}$;
- вектором кутової орієнтації ПА $\vec{H}_{ПА}$;
- вектором швидкості обертання ПА відносно водної товщі $\vec{\Omega}_{ПА}$.

В залежності від сил і моментів, які діють на корпус ПА, його математична модель розраховує кінематичні параметри ПА.

Вектор сигналів керування $\vec{u}$ надходить до РК, який виробляє вектори сили $\vec{F}_{РК}$ і моменту $\vec{M}_{РК}$ рушійного комплексу, їх величина залежить від власної швидкості руху ПА відносно водної товщі $\vec{V}_{ПА}$.

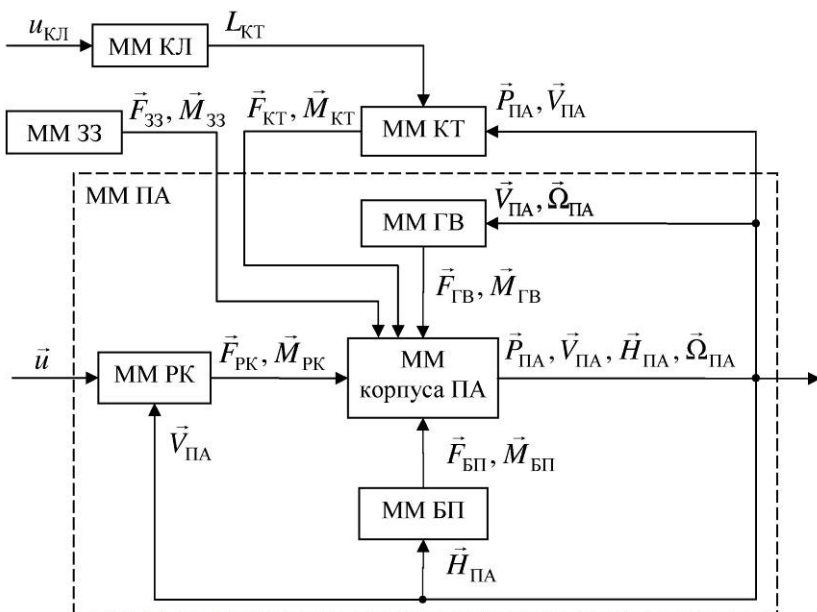


Рис. 3.1 – Структура математичної моделі ПА

Математична модель блоку плавучості БП розраховує вектори сили блоку плавучості $\vec{F}_{\text{БП}}$ та моменту блоку плавучості $\vec{M}_{\text{БП}}$. Вектор $\vec{F}_{\text{БП}}$ враховує дію сил тяжіння та плавучості на ПА. Момент $\vec{M}_{\text{БП}}$ виникає під дією сили $\vec{F}_{\text{БП}}$ і залежить від поточної кутової орієнтації ПА $\vec{H}_{\text{ПА}}$.

Підводні апарати зазвичай розробляються так, щоб забезпечити нульову плавучість, тому для таких апаратів сила плавучості урівноважується силою тяжіння і дорівнює нулю: $\vec{F}_{\text{БП}} = \text{null}$.

Проте при крені або диференті на корпус ПА починає діяти відновлювальний момент $\vec{M}_{\text{БП}}$, обумовлений неперервною дією сили плавучості.

Під дією сил і моментів корпус ПА рухається у водній товщі і взаємодіє з набігаючим потоком води.

Математична модель гідродинамічних впливів розраховує відповідні вектори сили $\vec{F}_{\text{ГВ}}$ і моменту $\vec{M}_{\text{ГВ}}$ в залежності від швидкостей поступального $\vec{V}_{\text{ПА}}$ та обертового $\vec{\Omega}_{\text{ПА}}$ рухів ПА. Якщо швидкість ПА та потоку

води однакові (режим дрейфу за течією), то взаємодія корпусу ПА з водною товщею відсутня і вектори $\vec{F}_{ГВ}$ та $\vec{M}_{ГВ}$ дорівнюють нулю.

Математична модель КТ розраховує вектори сили натягу кабель-троса $\vec{F}_{КТ}$ та моменту кабель-троса $\vec{M}_{КТ}$, які залежать від поточного розташування ПА $\vec{P}_{ПА}$ та його швидкості $\vec{V}_{ПА}$. Математична модель кабельної лебідки (КЛ) визначає довжину КТ $L_{КТ}$ і керується сигналом $u_{КЛ}$.

Крім базових сил і моментів на ПА можуть діяти зовнішні сили і моменти, наприклад, сили і моменти начіпного обладнання, вітрохвильові збурення і т.п. Їх вплив враховується в математичній моделі зовнішніх збурень, яка виробляє відповідні вектори сили $\vec{F}_{ЗЗ}$ та моменту $\vec{M}_{ЗЗ}$.

3.2 Математична модель корпусу ПА

Рух корпусу ПА виникає внаслідок дії на нього сил (поступальний рух) та моментів (обертовий рух). Всі сили та моменти, які діють на ПА, підпорядковуються принципу суперпозицій:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_{ПА} &= \vec{F}_{РК} + \vec{F}_{БП} + \vec{F}_{ГВ} + \vec{F}_{КТ} + \vec{F}_{ЗЗ}; \\ \vec{M}_{ПА} &= \vec{M}_{РК} + \vec{M}_{БП} + \vec{M}_{КТ} + \vec{M}_{ЗЗ}, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де $\vec{F}_{ПА}$ та $\vec{M}_{ПА}$ – вектори відповідно рівнодіючої сил та рівнодіючої моментів, які діють на корпус ПА.

Рівняння динаміки корпусу ПА одержують на основі закону збереження руху та зазвичай записують у зв'язаній з корпусом ПА системі координат (ЗСК). Тому в ролі швидкісних кінематичних параметрів руху виступають проекції векторів поступальної $\vec{V}_{ПА}$ і кутової $\vec{\Omega}_{ПА}$ швидкостей ПА на його зв'язані осі. Використання зв'язаної координатної системи для запису рівнянь динаміки обумовлене наступними обставинами:

- по-перше, рухомі осі з початком у центрі мас являють собою головні осі інерції об'єкта і моменти інерції відносно них не залежать від зміни кінематичних параметрів руху;
- по-друге, основні зовнішні сили, що діють на ПА, орієнтовані відносно корпусу (сила тяги рушіїв, гідродинамічні сили та моменти,

вітро-хвильові збурення) і найбільш просто виражаються в осях, жорстко з ним зв'язаних.

Завдяки цим обставинам форма рівнянь динаміки в рухомій координатній системі виявляється найбільш простою і зручною для подальшого розв'язку при досить повному відображенні процесів взаємодії рухомого тіла і навколишнього середовища.

Миттєві значення швидкостей руху твердого тіла підпорядковуються теоремам про зміни кількості руху та моменту кількості руху.

Особливість ПА полягає в тому, що в процес власного руху вони втягують прилеглі до них шари навколишнього середовища. Частини води, що знаходяться поблизу корпусу ПА, через в'язкість рідини починають рухатись, набуваючи певну кінетичну енергію. Так ПА та навколишнє середовище утворюють взаємозв'язану цілісну в енергетичному плані систему.

Тому для розрахунку параметрів руху ПА потрібно виходити з аналізу сумарної кінетичної енергії, що включає енергію твердого тіла (корпусу ПА) та приєднану кінетичну енергію навколишнього середовища.

В наближених інженерних розрахунках динаміки руху ПА виходять з максимально спрощуючих припущень.

Корпус ПА будемо розглядати як такий, що має форму еліпсоїда обертання. Для такого корпусу рівняння динаміки, записані через складові поступальної та кутової швидкостей в ЗСК, мають такий вигляд [21, 23]:

$$\left. \begin{aligned} m_{xa} \frac{dv_{xa}}{dt} + m_{za} \omega_{ya} v_{za} - m_{ya} \omega_{za} v_{ya} &= F_{xa}; \\ m_{ya} \frac{dv_{ya}}{dt} + m_{xa} \omega_{za} v_{xa} - m_{za} \omega_{xa} v_{za} &= F_{ya}; \\ m_{za} \frac{dv_{za}}{dt} + m_{ya} \omega_{xa} v_{ya} - m_{xa} \omega_{ya} v_{xa} &= F_{za}; \\ J_{xa} \frac{d\omega_{xa}}{dt} &= M_{xa}; \\ J_{ya} \frac{d\omega_{ya}}{dt} + \omega_{xa} \omega_{za} (J_{xa} - J_{za}) + v_{xa} v_{za} (m_{xa} - m_{za}) &= M_{ya}; \\ J_{za} \frac{d\omega_{za}}{dt} + \omega_{xa} \omega_{ya} (J_{ya} - J_{xa}) + v_{xa} v_{ya} (m_{ya} - m_{xa}) &= M_{za}, \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

де m_{xa}, m_{ya}, m_{za} – маса ПА з приєднаними масами води по відповідних осях ЗСК; v_{xa}, v_{ya}, v_{za} – проекції вектора швидкості поступального руху ПА $\vec{V}_{ПА}$ на відповідні осі ЗСК; $\omega_{xa}, \omega_{ya}, \omega_{za}$ – проекції вектора швидкості обертального руху ПА $\vec{\Omega}_{ПА}$ на відповідні осі ЗСК; F_{xa}, F_{ya}, F_{za} – проекції вектора рівнодіючої зовнішніх сил $\vec{F}_{ПА}$ на відповідні осі ЗСК; J_{xa}, J_{ya}, J_{za} – моменти інерції ПА з приєднаними моментами інерції відносно відповідних осей ЗСК; M_{xa}, M_{ya}, M_{za} – проекції вектора рівнодіючої зовнішніх моментів $\vec{M}_{ПА}$ на відповідні осі ЗСК.

Для ПА, що мають нульову плавучість і корпус у формі еліпсоїда обертання маси з приєднаними масами та моменти інерцій з приєднаними моментами інерції визначаються за такими рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} m_{xa} &= m + k_{11}\rho V_{dis}; \\ m_{ya} &= m_{za} = m + k_{22}\rho V_{dis}; \\ J_{xa} &= 0,4mb^2; \\ J_{ya} &= J_{za} = 0,2m\left(\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2\right)(1 + k_{55}); \end{aligned} \right\}$$

m – маса ПА; k_{11}, k_{22}, k_{55} – безрозмірні коефіцієнти приєднаних мас і моментів інерції; ρ – густина води; a і b – відповідно довжина і висота ПА.

Коефіцієнти k_{11}, k_{22}, k_{55} нелінійні і визначаються з графічних залежностей (рис. 3.2) [24].

Крім того, для ПА нульової плавучості, що має форму еліпсоїда обертання, мають місце наступні масо-габаритні співвідношення:

$$V_{dis} = \frac{4}{3}\pi ab^2; \quad m = \rho V_{dis}; \quad S_{ПАx} = \pi b^2; \quad S_{ПАy} = S_{ПАz} = \pi ab;$$

$$S_{ПА} = 2\pi b \left(b + \frac{a^2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \arcsin \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \right),$$

де V_{dis} – об'єм (водотоннажність) ПА; $S_{ПА}$ – площа поверхні ПА; $S_{ПАx}, S_{ПАy}, S_{ПАz}$ – площі проекцій ПА відповідно на площини $O_a y_a z_a, O_a x_a z_a, O_a x_a y_a$ ЗСК.

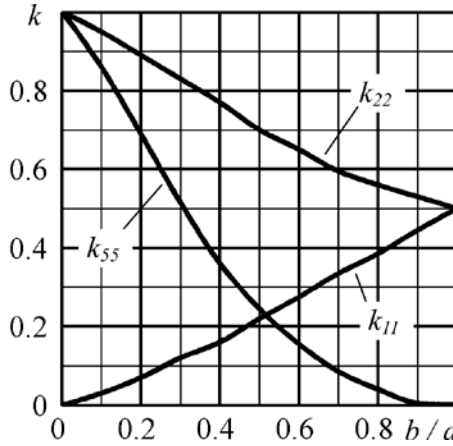


Рис. 3.2 – Залежність коефіцієнтів k_{11} , k_{22} , k_{55} від відносних розмірів ПА

Позиційні кінематичні параметри ПА визначаються на основі рівнянь зв'язку між ЗСК та БСК. Для розрахунку вектора кутової орієнтації $\vec{H}_{ПА}$ використовуються рівняння зв'язку обертового руху ПА.

При розрахунках складових вектора $\vec{P}_{ПА}$ (положення ПА в БСК) необхідно враховувати, що вектор $\vec{V}_{ПА}$ визначає швидкість руху ПА відносно товщі води. Тому слід враховувати швидкість течії:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{xb} + v_{tx} \\ v_{yb} + v_{ty} \\ v_{zb} + v_{tz} \end{bmatrix},$$

де x , y , z – проекції вектора $\vec{P}_{ПА}$ на відповідні осі БСК, v_{xb} , v_{yb} , v_{zb} – проекції вектора $\vec{V}_{ПА}$ на відповідні осі БСК; v_{tx} , v_{ty} , v_{tz} – проекції вектора швидкості течії $\vec{V}_t$ на відповідні осі БСК.

3.3 Гідродинамічні сили та моменти

Гідродинамічні сили та моменти з'являються на корпусі ПА внаслідок його руху відносно водної товщі [21]. Потік води, що викликає гідродинамічні впливи, виникає в результаті підсумовування власного руху ПА та руху води (течія, хитація). Основна особливість цих впливів полягає в тому, що вони орієнтовані відносно корпусу ПА. Тому можна безпосередньо виразити вектори сили $\vec{F}_{ГВ} = \{F_{xa}, F_{ya}, F_{za}\}_A$ і моменту $\vec{M}_{ГВ} = \{M_{xa}, M_{ya}, M_{za}\}_A$ гідродинамічного походження в проекціях на вісі ЗСК (в базисі А):

$$\left. \begin{aligned} F_{xa} &= -0,5k_{Fx}\rho S_{ПАx}v_{xa}^2; \\ F_{ya} &= -0,5k_{Fy}\rho S_{ПАy}v_{ya}^2; \\ F_{za} &= -0,5k_{Fz}\rho S_{ПАz}v_{za}^2; \\ M_{xa} &= -0,5k_{Mx}\rho S_{ПАx}L_{ПАx}\omega_{xa}^2; \\ M_{ya} &= -0,5k_{My}\rho S_{ПАy}L_{ПАy}\omega_{ya}^2; \\ M_{za} &= -0,5k_{Mz}\rho S_{ПАz}L_{ПАz}\omega_{za}^2, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

де $k_{Fx,y,z}$ та $k_{Mx,y,z}$ – відповідно коефіцієнти проекцій сил і моментів гідродинамічного походження на вісі ЗСК; ρ – густина води; $S_{ПАx,y,z}$ – характерна площа ПА; $L_{ПАx,y,z}$ – характерна довжина ПА.

Знаки «мінус» в рівняннях (3.3) вказують на те, що гідродинамічні сили $\vec{F}_{ГВ}$ і моменти $\vec{M}_{ГВ}$ протидіють руху ПА.

Коефіцієнти $k_{Fx,y,z}$ та $k_{Mx,y,z}$ визначаються шляхом модельних випробувань в дослідницьких басейнах і мають нелінійний характер. Знаки складових векторів $\vec{V}_{ПА}$ та $\vec{\Omega}_{ПА}$ впливають на відповідні знаки гідродинамічних коефіцієнтів: $k_{Fx,y,z} > 0$ при $v_{xa,xy,za} > 0$, $k_{Fx,y,z} \leq 0$ при $v_{xa,xy,za} \leq 0$, $k_{Mx,y,z} > 0$ при $\omega_{xa,xy,za} > 0$, $k_{Mx,y,z} \leq 0$ при $\omega_{xa,xy,za} \leq 0$. Для спрощення процесу моделювання можна прийняти $k_{Fx,y,z} = \text{const}$ та $k_{Mx,y,z} = \text{const}$, але в цьому випадку необхідно враховувати знаки складових векторів $\vec{V}_{ПА}$ та $\vec{\Omega}_{ПА}$ і в рівняннях (3.3) замість $(v_{xa,xy,za})^2$ та $(\omega_{xa,xy,za})^2$ записувати відповідно $v_{xa,xy,za} \cdot |v_{xa,xy,za}|$ та $\omega_{xa,xy,za} \cdot |\omega_{xa,xy,za}|$.

3.4 Сили і моменти ваги та плавучості ПА

На ПА будь-якого класу діє сила ваги, яка орієнтована по вертикальній осі БСК, прикладена до його центру мас і не створює моментів крену і диференту, але при довільній орієнтації ПА розкладається на три складові ЗСК. Розділення сили ваги на складові ЗСК виконується трьома послідовними обертами ЗСК з початкового положення, суміщеного з БСК, так само, як і при визначенні кутів Ейлера, або користуючись рівняннями зв'язку БСК та ЗСК з урахування того, що вектор сили ваги $\vec{F}_B = \{0, F_{Byb}, 0\}_B = \{F_{Bxa}, F_{Bya}, F_{Bza}\}_A$ [21]:

$$\left. \begin{aligned} F_{Bxa} &= -F_B \sin \psi; \\ F_{Bya} &= -F_B \cos \psi \cos \theta; \\ F_{Bza} &= F_B \cos \psi \sin \theta, \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

де F_B – модуль вектора сили ваги, $F_B = |\vec{F}_B|$.

Сила плавучості $\vec{F}_A = \{0, F_{Ayb}, 0\}_B = \{F_{Axa}, F_{Aya}, F_{Aza}\}_B$ – це підйомна сила витисненої корпусом води, яка орієнтована по вертикальній осі БСК. Проекції вектора сили плавучості на вісі ЗСК визначаються по аналогії з проекціями вектора сили ваги з урахуванням того, що напрям дії сили плавучості протилежний напрямку дії сили ваги:

$$\left. \begin{aligned} F_{Axa} &= F_A \sin \psi; \\ F_{Aya} &= F_A \cos \psi \cos \theta; \\ F_{Aza} &= -F_A \cos \psi \sin \theta, \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

де F_A – модуль вектора сили ваги, $F_A = |\vec{F}_A|$.

Сумарний вплив сил ваги і плавучості $\vec{F}_{\text{БП}} = \{F_{xa}, F_{ya}, F_{za}\}_A$ визначається додаванням їх проекцій:

$$\left. \begin{aligned} F_{xa} &= (F_A - F_B) \sin \psi; \\ F_{ya} &= (F_A - F_B) \cos \psi \cos \theta; \\ F_{za} &= -(F_A - F_B) \cos \psi \sin \theta, \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

де різниця $F_A - F_B$ визначає плавучість ПА. Для повністю зануреного під воду ПА якщо $F_A - F_B > 0$ то плавучість додатна, якщо $F_A - F_B < 0$ плавучість від'ємна, якщо $F_A - F_B = 0$ то плавучість нульова.

На відміну від сили ваги точка прикладення сили плавучості не співпадає з центром мас, а займає положення, що визначається координатами x_A, y_A, z_A в ЗСК. Тому сила плавучості не тільки компенсує вагу ПА, але і створює момент $\vec{M}_{\text{БП}} = \{M_{xa}, M_{ya}, M_{za}\}_A$, котрий змінює його кутову орієнтацію в просторі і визначається з виразу

$$\vec{M}_{\text{БП}} = \vec{r}_A \times \vec{F}_A \quad (3.7)$$

де $\vec{r}_A = \{x_A, y_A, z_A\}_A$ – радіус-вектор точки прикладення сили плавучості.

Підставимо вираз (3.5) у векторний добуток (3.7) та знайдемо проекції вектора $\vec{M}_{\text{БП}}$ на вісі ЗСК:

$$\left. \begin{aligned} M_{xa} &= -F_A z_A \cos \psi \cos \theta - F_A y_A \cos \psi \sin \theta; \\ M_{za} &= F_A x_A \cos \psi \cos \theta - F_A y_A \sin \psi; \\ M_{ya} &= F_A x_A \cos \psi \sin \theta + F_A z_A \sin \psi, \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

де M_{xa} – момент крену, M_{za} – момент диференту, M_{ya} – момент рискання.

Підводні апарати, зазвичай, будуються таким чином, щоб мати нульову плавучість, тому сили ваги компенсуються силою виштовхування і з розгляду виключаються.

3.5 Математична модель рушійного комплексу ПА

Рушійний комплекс (РК) типового самохідного ПА складається з декількох рушійних пристроїв (РП), кожний з яких за допомогою електродвигуна (ЕД) приводить в дію рушій – гребний гвинт (ГГ).

В залежності від кількості РП, їх розташування на корпусі ПА та керуючих впливів РК може формувати відповідні вектори сили $\vec{F}_{\text{РК}}$ і моменту $\vec{M}_{\text{РК}}$. В свою чергу кожний РП виробляє відповідний вектор сили $\vec{F}_{\text{РП}}$ та вектор моменту:

$$\vec{M}_{\text{РП}} = \vec{r}_{\text{РП}} \times \vec{F}_{\text{РП}} \quad (3.9)$$

де $\vec{r}_{\text{РП}}$ – радіус-вектор точки прикладення сили $\vec{F}_{\text{РП}}$ відносно центра мас ПА.

Всі сили і моменти рушійного комплексу підпорядковуються принципу суперпозицій:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_{\text{РК}} &= \sum_{i=1}^n \vec{F}_{\text{РП}i}; \\ \vec{M}_{\text{РК}} &= \sum_{i=1}^n \vec{M}_{\text{РП}i}, \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

де i – індекс, що вказує номер РП, n – загальна кількість РП в РК.

Зазвичай РК ПА складається з чотирьох РП: РП вертикального руху, РП лагового (бокового) руху, два РП маршового руху. Маршові РП розташовуються в горизонтальній площині симетрично відносно діаметральної площини ПА. Такий РК забезпечує керований рух ПА в чотирьох ступенях свободи: поступальний рух в просторі та обертовий рух в горизонтальній площині ЗСК (рис. 3.3).

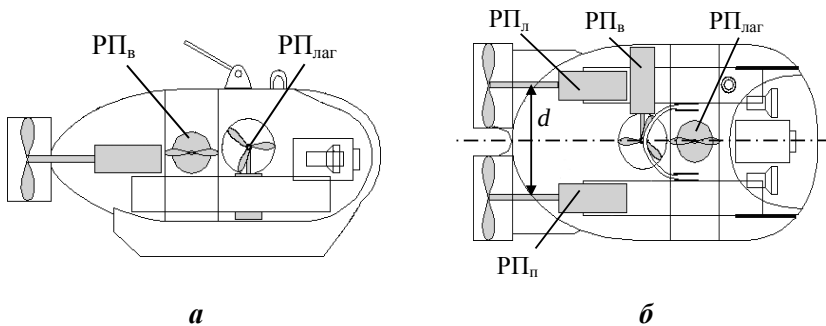


Рис. 3.3 – Рушійний комплекс ПА: *а* – вид збоку, *б* – вид зверху

На рисунку позначено: РП_л – рушійний пристрій маршового руху лівий, РП_п – рушійний пристрій маршового руху правий, РП_в – рушійний пристрій вертикального руху, РП_{лаг} – рушійний пристрій лагового руху.

Для такого рушійного комплексу дія сил лівого та правого маршових рушіїв спрямована по осі $O_a x_a$ ЗСК, дія сили вертикального рушія спрямована по осі $O_a y_a$ ЗСК, дія сили лагового рушія спрямована по осі $O_a z_a$ ЗСК:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_{\text{РПл}} &= \{F_{\text{л}}, 0, 0\}_A; \\ \vec{F}_{\text{РПп}} &= \{F_{\text{п}}, 0, 0\}_A; \\ \vec{F}_{\text{РПв}} &= \{0, F_{\text{в}}, 0\}_A; \\ \vec{F}_{\text{РПлаг}} &= \{0, 0, F_{\text{лаг}}\}_A, \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

де $F_{\text{л,п,в,лаг}}$ – упори відповідно лівого та правого маршових, вертикального та лагового рушіїв.

Визначимо з (3.10) вектор сили такого РК:

$$\vec{F}_{\text{РК}} = \{F_{\text{л}} + F_{\text{п}}, F_{\text{в}}, F_{\text{лаг}}\}_A. \quad (3.12)$$

Вертикальний та лагові рушії розташовуються якомога ближче до центру мас ПА так, щоб моменти, які ними створюватимуться, були незначні і компенсувались моментом блоку плавучості $\vec{M}_{\text{П}}$. З таким припущенням вектор моментів РК визначимо з рівняння

$$\vec{M}_{\text{РК}} = \vec{M}_{\text{РКл}} + \vec{M}_{\text{РКп}} \quad (3.13)$$

Якщо для лівого та правого РП знайти векторні добутки за формулою (3.9) та результат підставити у (3.13), то отримаємо

$$\vec{M}_{\text{РК}} = \{0, 0,5d(F_{\text{п}} - F_{\text{л}}), 0\}_A,$$

де d – відстань між центрами гребних гвинтів маршових РП (див. рис. 3.3, *б*).

3.6 Математична модель рушійного пристрою ПА

Основними складовими рушійного пристрою (РП) ПА є електродвигун (ЕД), редуктор-валопровід (РВ) та гребний гвинт (ГГ), які моделюються системою нелінійних диференціальних рівнянь [25] (рис. 3.4).

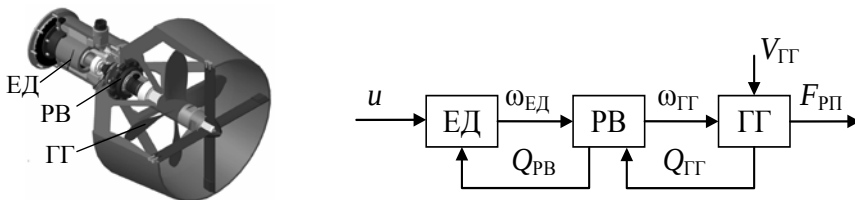


Рис. 3.4 – Конструкція (а) та структура (б) РП ПА

Сигнал керування u надходить до ЕД постійного струму, ротор якого обертається з відповідною швидкістю $\omega_{\text{ЕД}}$. Швидкість обертання ГГ $\omega_{\text{ГГ}}$ визначається коефіцієнтом передачі редуктора k_g і якщо $k_g < 1$, то швидкість обертання ГГ буде в k_g разів менша швидкості обертання робота ЕД:

$$\omega_{\text{ГГ}} = \omega_{\text{ЕД}} k_g. \quad (3.14)$$

Гребний гвинт при обертанні створює упор $F_{\text{РП}}$ та гальмівний момент $Q_{\text{ГГ}}$, який через РВ надходить до ЕД і визначається за формулою

$$Q_{\text{ЕД}} = Q_{\text{ГГ}} k_g. \quad (3.15)$$

Швидкість обертання ГГ визначається законом динаміки обертового руху:

$$J_{\text{РП}} \frac{d\omega_{\text{ГГ}}}{dt} = M_{\text{ГГ}} - Q_{\text{ГГ}}; \quad (3.16)$$

$$M_{\text{ГГ}} = \frac{M_{\text{ЕД}}}{k_g}, \quad (3.17)$$

де $J_{\text{РП}}$ – сумарний момент інерції системи "ЕД – РВ – ГГ", приведений до ГГ; $M_{\text{ГГ,ЕД}}$ – рушійні моменти відповідно ГГ та ЕД.

Величину $J_{\text{рп}}$ для системи, яка містить редуктор, знаходимо за рівнянням

$$J_{\text{рп}} = k_g^2 J_{\text{р}} + J_{\text{в}} + J_{\text{гг}}, \quad (3.18)$$

де $J_{\text{р,в,гг}}$ – моменти інерції відповідно ротора ЕД, валопроводу та гребного гвинта.

Внутрішній простір ЕД для захисту від дії зовнішнього середовища заповнюється рідким діелектриком (мінеральним маслом або ін.), тому його рушійний момент визначається формулами

$$M_{\text{ЕД}} = M_{\text{ем}} - Q_{\text{р}}; \quad (3.19)$$

$$M_{\text{ем}} = c\Phi i; \quad (3.20)$$

$$Q_{\text{р}} = 4\mu\pi r_{\text{р}}^3 \omega_{\text{ЕД}} \left(\frac{L_{\text{р}}}{r_{\text{р}}} + \frac{L_{\text{р}}}{2\delta_1} + \frac{r_{\text{р}}}{4\delta_2} \right), \quad (3.21)$$

де $M_{\text{ем}}$ – електромагнітний момент ЕД; c , Φ – електромагнітні параметри ЕД; i – миттєве значення електричного струму якоря ЕД; $Q_{\text{р}}$ – гальмівний момент, який виникає при обертанні ротора в середовищі діелектрика, що заповнює ЕД; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості діелектрика; $L_{\text{р}}$, $r_{\text{р}}$ – відповідно довжина та радіус ротора ЕД; δ_1 – зазор між ротором і статором; δ_2 – зазор між торцевими поверхнями ротора і кришками ЕД.

Струм якоря ЕД визначається диференціальним рівнянням

$$L_{\text{я}} \frac{di}{dt} = K_{\text{у}} u - R_{\text{я}} i - c\Phi \omega_{\text{ЕД}}, \quad (3.22)$$

де $L_{\text{я}}$ – індуктивність якоря ЕД; $K_{\text{у}}$ – коефіцієнт підсилення регулятора напруги ЕД; u – керуючий сигнал регулятора напруги ЕД; $R_{\text{я}}$ – електричний опір якоря ЕД.

Якщо об'єднати рівняння (3.14 – 3.22), то отримаємо математичну модель системи «ЕД – РВ»:

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{я}} \frac{di}{dt} &= K_u u - R_{\text{я}} i - \frac{c\Phi\omega_{\Gamma\Gamma}}{k_g}; \\ J_{\text{пп}} \frac{d\omega_{\Gamma\Gamma}}{dt} &= \frac{c\Phi i - Q_{\text{п}}}{k_g} - Q_{\Gamma\Gamma}; \\ Q_{\text{п}} &= 4\mu\pi r_{\text{п}}^3 \frac{\omega_{\Gamma\Gamma}}{k_g} \left(\frac{L_{\text{п}}}{r_{\text{п}}} + \frac{L_{\text{п}}}{2\delta_1} + \frac{r_{\text{п}}}{4\delta_2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Математична модель ГГ визначається рівняннями [24]

$$Q_{\Gamma\Gamma} = \begin{cases} \frac{K_Q \rho D_{\Gamma\Gamma}^5}{4\pi^2} \omega_{\Gamma\Gamma}^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_q \rho D_{\Gamma\Gamma}^3 V_{\Gamma\Gamma}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \quad (3.24)$$

$$F_{\text{пп}} = \begin{cases} \frac{K_F \rho D_{\Gamma\Gamma}^4}{4\pi^2} \omega_{\Gamma\Gamma}^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_f \rho D_{\Gamma\Gamma}^2 V_{\Gamma\Gamma}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \quad (3.25)$$

$$J = \frac{2\pi V_{\Gamma\Gamma}}{\omega_{\Gamma\Gamma} D_{\Gamma\Gamma}}, \quad (3.26)$$

де $K_Q = f(J)$ та $K_q = f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують момент гребного гвинта; $K_F = f(J)$ та $K_f = f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують упор гребного гвинта; J – відносний поступ ГГ; $D_{\Gamma\Gamma}$ – діаметр ГГ; ρ – густина води; $V_{\Gamma\Gamma}$ – проекція вектора швидкості переміщення РП відносно води на вісь прямого ходу ГГ.

Коефіцієнти K_Q , K_q , K_F , K_f є нелінійними і визначаються із графічних залежностей, які наведені на рис. 3.5 для ГГ з такими параметрами:

$$P_{\Gamma\Gamma}/D_{\Gamma\Gamma} = 1,2;$$

$$A_E/A_0 = 0,8,$$

де $P_{\Gamma\Gamma}$ – крок перерізу лопаті (крок гвинтової координати), A_E – площа випрямленої поверхні лопатей, A_0 – площа диска ГГ.

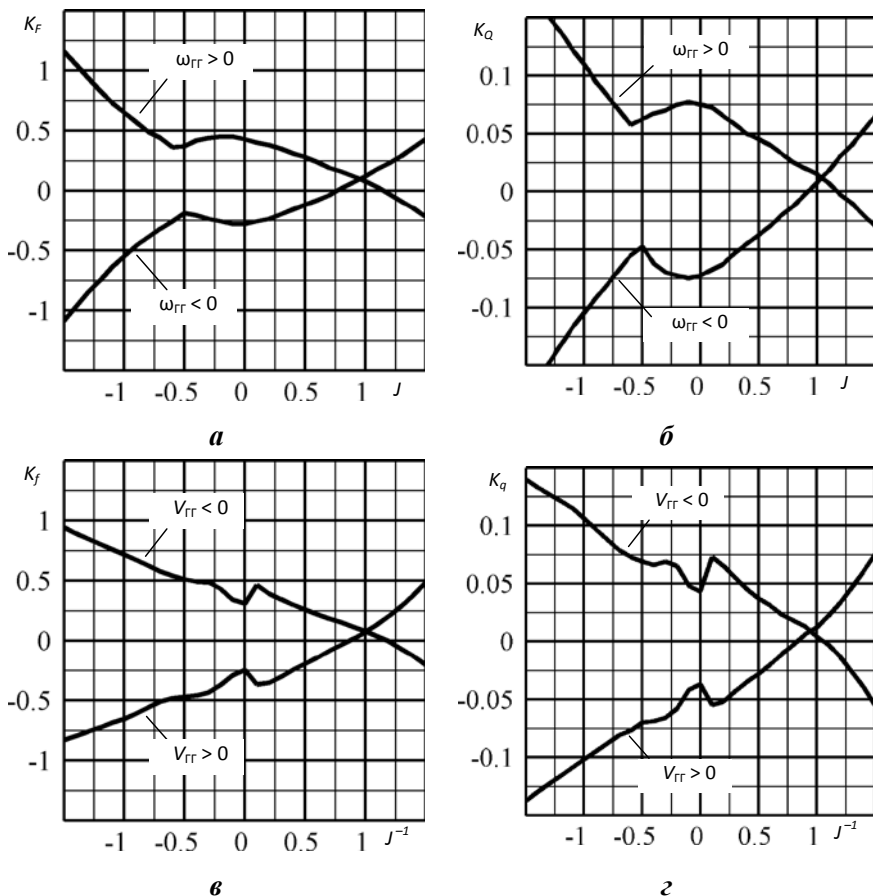


Рис. 3.5 – Криві дії гребного гвинта: **а, б** – для прямого режиму роботи; **в, г** – для реверсивного режиму роботи

Величина $V_{гг}$ для кожного рушійного пристрою визначається як проекція вектора $\vec{V}_{ПА}$ на вісь обертання його гребного гвинта.

3.7 Математична модель кабель-троса

Рух ПА при застосуванні СППС зазвичай відбувається малими прискореннями, особливо при позиціонуванні в околі деякої точки

підводного простору при виконанні ідентифікації або інспекції підводних об'єктів.

Для моделювання таких режимів з огляду на складність КТ як об'єкта моделювання, допускається моделювати рух ПА під квазістаціонарним впливом КТ із застосуванням апробованої математичної моделі усталеного руху КТ [2].

Кабель-трос моделюється абсолютно гнучкою ниткою з нульовою плавучістю, яка має форму круга в перерізі і рухається відносно водної товщі в квазістаціонарному режимі. При русі в потоці води на такому КТ виникають сили гідродинамічного опору. Розтяжністю КТ нехтуємо. В більшості випадків ПА працюють при швидкості течії $V_f < 3$ м/с, тому визначення конфігурації КТ в просторі зводиться до розв'язання плоскої задачі, оскільки вплив бокових гідродинамічних сил незначний [19].

Самохідні прив'язні підводні апарати проектується таким чином, щоб забезпечити мінімальний збурюючий момент від КТ. Це досягається шляхом кріплення вузла вводу в центрі мас ПА на спеціальних шарнірах. Тому при моделюванні ПА допускається приймати $\vec{M}_{\text{КТ}} = 0$.

Розрахунок силових характеристик КТ в площині виконується методом дугової апроксимації, який реалізується за допомогою спеціалізованого алгоритму. В диференційній формі цей алгоритм представляється системою рівнянь [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dL_{\text{КТ}}} &= \cos(\alpha); & \frac{dy}{dL_{\text{КТ}}} &= \sin(\alpha); \\ \frac{d\alpha}{dL_{\text{КТ}}} &= \frac{1}{2} \rho \cdot C_n \cdot D \cdot \frac{V_f \cdot |V_f| \cdot |\sin(\alpha)| \cdot \sin(\alpha)}{F}; \\ \frac{dF}{dL_{\text{КТ}}} &= -\frac{1}{2} \rho \cdot C_t \cdot D \cdot V_f \cdot |V_f| \cdot |\cos(\alpha)| \cdot \cos(\alpha), \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

де x – координата елемента КТ по осі абсцис; $L_{\text{КТ}}$ – довжина випущеної частини КТ; α – кут між дотичною до елемента КТ і віссю абсцис; y – координата елемента КТ по осі ординат; ρ – густина води; C_n – коефіцієнт нормальної складової гідродинамічного опору КТ; C_t – кое-

фіцієнт тангенціальної складової гідродинамічного опору КТ; D – діаметр КТ; V_f – абсолютне значення швидкості потоку води відносно КТ; F – модуль сили натягу на елементі КТ.

Розрахунок силових характеристик та конфігурації КТ в площині виконується чисельним методом. Для цього необхідно задати початкові умови для розрахунку – вектор сили натягу на корінному кінці КТ $\vec{F}_0$ в полярних координатах: α_0 – кут між дотичною до елемента КТ на корінному кінці і віссю абсцис, F_0 – модуль вектора сили натягу на корінному кінці КТ (рис. 3.6).

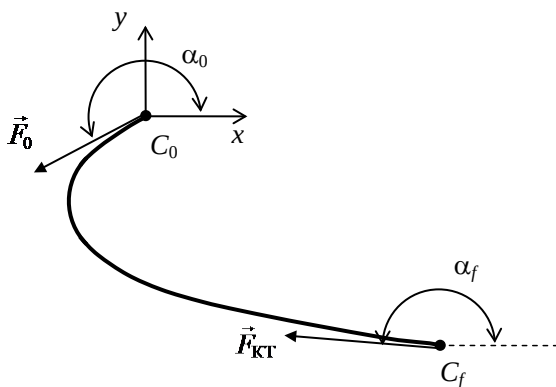


Рис. 3.6 – Кабель-трос в площині

Традиційно вважається що точка розташування корінного кінця КТ C_0 збігається з початком НСК: $C_0 = \{0, 0\}$. Головним результатом розрахунку є координати точки розташування ходового кінця КТ C_f в НСК, додатковим результатом є значення складових вектора сили натягу на ходовому кінці КТ $\vec{F}_{КТ} = \{F_{КТ}, \alpha_f\}$, де $F_{КТ}$ – його модуль, α_f – кут між вектором і віссю абсцис, а також координати точок розташування елементів КТ, на основі яких можна аналізувати його конфігурацію.

Але практичну цінність має дещо інша постановка задач моделювання:

- пряма задача: розрахунок координат ходового кінця КТ в залежності від сили натягу на його ходовому кінці;
- обернена задача: розрахунок сили натягу на ходовому кінці КТ в залежності від координат його ходового кінця.

Такі постановки виникають через те, що вплив КТ на СН незначний через суттєву масу СН у порівнянні з системою «КТ – ПА». Тому всі розрахунки концентруються навколо ПА та ходового кінця КТ.

Пряму задачу моделювання нескладно розв'язати, якщо в ролі вхідних даних задавати вектор $\vec{F}_{\text{КТ}}$. Тоді на виході моделі отримаємо координати корінного кінця відносно ходового $C_0 = \{x_0, y_0\}$, а ходовий кінець C_f при цьому буде збігатись з початком НСК. Для того, щоб розрахунки мали сенс, необхідно виконати паралельний перенос – точку C_0 перенести в початок НСК, тоді координати ходового кінця визначатимуться на основі координат корінного кінця:

$$C_f = \{x_f, y_f\} = \{-x_0, -y_0\}.$$

Обернена задача моделювання КТ ускладнена тим, що рівняння прямої моделі не розв'язуються в оберненій постановці. Тому застосовуються інверсні моделі КТ, побудовані на основі:

- спеціалізованих алгоритмів розрахунку прямої моделі КТ [26];
- апроксимованих табличних даних прямого моделювання КТ, при цьому застосовуються аналітичні вирази [27] або нейронні мережі [28].

Розглянуті прямі та інверсні моделі КТ придатні для його моделювання не тільки в діаметральній площині СН, а й у тривимірному просторі, для цього застосовуються рівняння, описані в [29]. В прикладних розрахунках пропонується використовувати програмне забезпечення QUASTEC [30], в якому реалізовані описані підходи.

Крім квазістаціонарного руху КТ набуває актуальності його моделювання в динаміці [31]. Не зважаючи на відносно ресурсоемний розрахунок, програмна реалізація моделі динаміки КТ успішно використовується для розв'язку прикладних задач [32, 33].

3.8 Математична модель кабельної лебідки

Як об'єкт керування КЛ містить мотор-редуктор (МР) і кабельний барабан (Б). Лебідка шляхом випускання-підбирання КБ забезпечує досягнення апаратом заданої точки підводного простору. Керування КЛ виконується з використанням сенсорів швидкості випускання/підбирання кабель-троса v_L та фактичної довжини випущеної частини КТ $L_{\text{КТ}}$, а також сенсора натягу КТ F_k на його корінному кінці.

Зазвичай, для ефективного керування СППС на всьому діапазоні режимів роботи КЛ може мати дві швидкості обертання барабану: малу швидкість – для спуско-підйомних операцій з підводним апаратом; велику швидкість – при виконанні підводної роботи. Структуру математичної моделі КЛ наведено на рис. 3.7.

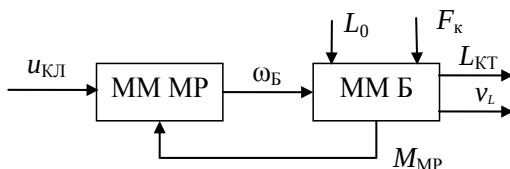


Рис. 3.7 – Структура ММ КЛ

На вхід математичної моделі мотор-редуктора подається сигнал керування $u_{\text{КЛ}}$, за яким розраховується кутова швидкість обертання барабану КЛ $\omega_{\text{Б}}$. Довжина випущеної частини КТ $L_{\text{КТ}}$ розраховується в математичній моделі Б. Таким чином, роботу КЛ описуємо системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\text{КТ}} = R \int \omega_{\text{Б}} dt + L_0; \\ M_{\text{МР}} = RF_{\text{к}}; \\ J \frac{d\omega_{\text{Б}}}{dt} = M_{\text{ЕД}} k_{\text{МР}} - M_{\text{МР}}; \\ M_{\text{ЕД}} = f(u_{\text{КЛ}}); \\ v_L = \frac{dL_{\text{КТ}}}{dt}, \end{array} \right.$$

де R – радіус барабану КЛ; L_0 – початкове значення довжини випущеної частини КТ; $M_{\text{МР}}$ – гальмівний момент МР, який виникає внаслідок дії сили натягу $F_{\text{к}}$ на Б від КБ; J – момент інерції системи "МР – Б", приведений до осі Б; $M_{\text{ЕД}}$ – крутильний момент електродвигуна МР; $k_{\text{МР}}$ – коефіцієнт передачі МР.

При використанні електродвигуна постійного струму його крутильний момент розраховується за рівняннями, аналогічними тим, які використовуються в математичній моделі рушійного пристрою.

При використанні моделі квазістаціонарного руху КТ допускається моделювати роботу КЛ також в квазістаціонарному режимі, коли довжина КТ або не змінюється, або змінюється з малою швидкістю v_L . В такому випадку довжину КТ можна задати константою: $L_{КТ} = \text{const}$, або використовувати квазістаціонарну модель КЛ:

$$\begin{cases} L_{КТ} = \int v_L dt + L_0; \\ v_L = K_u u_{КЛ}, \end{cases}$$

де K_u – передатний коефіцієнт КЛ.

4 АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПІДВОДНОГО АПАРАТА

Типовими задачами керування ПА є автоматичне регулювання його маршової швидкості, автоматична стабілізація заданого курсу, глибини та/або висоти ходу ПА над ґрунтом, автоматичне керування довжиною випущеної частини КТ в цих режимах стабілізації та при вільному русі СН на якірній стоянці під впливом вітру і поверхневої течії. Регулятори, які виконують такі задачі автоматичного керування, є базовими елементами автопілоту сучасних ПА.

4.1 Математична модель маршового руху ПА

Розглянемо поступальний прямолінійний рух ПА вздовж осі абсцис базової системи координат Ox .

Такий рух називають маршовим і виникає він під дією упорів рушіїв, що прикладаються до корпусу ПА. Структуру математичної моделі (ММ) маршового руху ПА наведено на рис. 4.1.

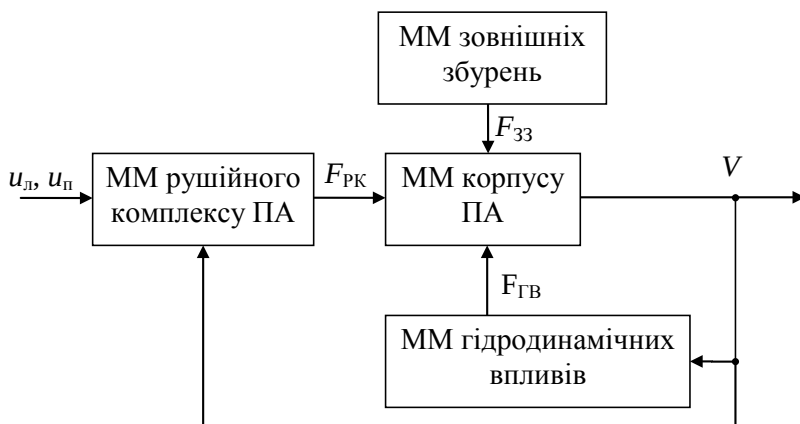


Рис. 4.1 – Структура ММ маршового руху ПА

В даному випадку сила ваги ПА компенсується силою плавучості, а зовнішні збурення включають також вплив сили натягу від КТ, якщо ПА є прив'язним.

Описується такий рух диференціальним рівнянням:

$$m \frac{dV}{dt} = F_{\text{РК}} + F_{\text{ГВ}}(V) + F_{\text{ЗЗ}}, \quad (4.1)$$

де m – маса ПА, V – швидкість маршового руху ПА, $F_{\text{РК}}$ – сила упору рушійного комплексу (РК), тобто керуюча сила, яку можна представити як суму упорів маршових гребних гвинтів ПА (якщо їх декілька), $F_{\text{ГВ}}$ – гідродинамічна сила опору набігаючого потоку води, $F_{\text{ЗЗ}}$ – сила зовнішніх збурень.

Силу опору корпусу ПА знайдемо з рівняння [24]:

$$F_{\text{ГВ}} = -0,5k_F \rho S V^2, \quad (4.2)$$

де k_F – коефіцієнт гідродинамічного опору ПА по осі абсцис зв'язаної з ПА системи координат, ρ – густина води, S – характерна площа ПА. Знак «мінус» в рівнянні вказує на те, що гідродинамічна сила $F_{\text{ГВ}}$ протидіє руху ПА.

Коефіцієнт k_F в загальному випадку залежить від швидкості V і враховує напрямок руху ПА (вперед/реверс). Для спрощення розрахунків пропонується досліджувати ММ ПА, прийнявши $k_F = \text{const}$ (наприклад, 0,1), але в такому випадку треба замінити V^2 в рівнянні (4.2) на $|V|$, для того, щоб при реверсі ПА знак « $\leftarrow$ » змінювався на « $\rightarrow$ » і сила $F_{\text{ГВ}}$ завжди протидіяла руху ПА.

$$F_{\text{ГВ}} = -0,5k_F \rho S V |V|, \quad (4.3)$$

Базова конфігурація РК ПА містить два маршових рушійних пристрої (РП): лівий РП та правий РП. Лівий РП в залежності від сигналу керування $u_{\text{л}}$ генерує силу $F_{\text{РПл}}$, правий РП в залежності від сигналу керування $u_{\text{п}}$ генерує силу $F_{\text{РПп}}$. Якщо $u_{\text{л}} \neq u_{\text{п}}$ то $F_{\text{РПл}} \neq F_{\text{РПп}}$, при цьому створюється момент навколо вертикальної осі ПА, який дає йому змогу виконувати правий або лівий розворот.

При маршовому русі ПА сигнали керування для лівого і правого РП задаються однаковими $u = u_{\text{п}} = u_{\text{л}}$, отже $F_{\text{РПл}} = F_{\text{РПп}}$, тому силу рушійного комплексу, виходячи з $F_{\text{РК}} = F_{\text{РПл}} + F_{\text{РКп}}$, можна записати відношенням

$$F_{\text{PK}} = 2F_{\text{PI}}. \quad (4.4)$$

Сила рушійного пристрою F_{PI} визначається на основі системи нелінійних диференціальних рівнянь (3.23–3.26) і залежить від швидкості руху ПА та сигналу керування u :

$$F_{\text{PI}} = f(u, V, t). \quad (4.5)$$

На основі математичної маршового руху ПА можна виконувати синтез регулятора його швидкості.

4.2 Розробка структури САК швидкістю маршового руху ПА

Систему автоматичного керування побудуємо на основі підходів, які використовуються при синтезі ПІД-регуляторів, на основі математичної моделі маршового руху ПА.

Незважаючи на різноманітність та складність реальних об'єктів керування в ПІД-регуляторах використовуються, як правило, тільки дві структури математичних моделей: модель першого порядку та модель другого порядку. Вищі порядки моделюються затримкою, наприклад, модель другого порядку апроксимується моделлю першого порядку з затримкою. Маршовий рух ПА описується моделлю третього порядку, але оскільки вона відома, то в ній можна виділити окремі елементи, кожен з яких описується диференціальним рівнянням першого порядку і застосувати принцип підпорядкованого керування [34] замість апроксимації транспортною затримкою.

Виділимо елементи математичної моделі маршового руху ПА, кожен з яких описується диференціальним рівнянням першого порядку:

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

Кожен з цих елементів представимо в типовій формі:

$$k_1 \frac{dy}{dt} = x - k_2 y + x_{33}, \quad (4.6)$$

де x – керуючий вплив, y – керована величина, x_{33} – зовнішні збурення, k_1 та k_2 – коефіцієнти моделі. Зовнішні збурення, які діють на об’єкт керування, зазвичай мають розподілений характер, проте їх інтегральний вплив на об’єкт керування представляють зосередженим параметром x_{33} , який може бути константним, лінійно або нелінійно залежати від часу, керованої величини та/або інших параметрів об’єкта керування або зовнішнього середовища.

Розглянемо модель електродинамічних процесів в ЕД рушійного пристрою (перше рівняння в (3.23)):

$$L_{\text{я}} \frac{di}{dt} = K_u u - R_{\text{я}} i - \frac{c\Phi\omega}{k_g},$$

де i – миттєве значення електричного струму якоря ЕД; $L_{\text{я}}$ – індуктивність якоря ЕД; K_u – коефіцієнт підсилення регулятора напруги ЕД; u – керуючий сигнал регулятора напруги ЕД; $R_{\text{я}}$ – електричний опір якоря ЕД; c, Φ – електромагнітні параметри ЕД; ω – швидкість обертання гребного гвинта (ГГ); k_g – коефіцієнт передачі редуктора ЕД.

Запишемо її у вигляді (4.6):

$$k_{i1} \frac{di}{dt} = u - k_{i2} i + u_{33}; \quad (4.7)$$

$$k_{i1} = \frac{L_{\text{я}}}{K_u}; \quad k_{i2} = \frac{R_{\text{я}}}{K_u}; \quad u_{33} = u_{33}(\omega) = -\frac{c\Phi\omega}{k_g K_u},$$

де k_{i1} та k_{i2} – коефіцієнти моделі, u_{33} – зовнішні збурення, які представлені в розмірності керуючого впливу.

Розглянемо модель динаміки механічних процесів в ЕД рушійного пристрою (друге рівняння в (3.23)):

$$J_{\text{РП}} \frac{d\omega}{dt} = \frac{c\Phi i - Q_p}{k_g} - Q_{\Gamma\Gamma} =$$

$$= \frac{c\Phi}{k_g} i - 4\mu\pi r_p^3 \frac{\omega}{k_g^2} \left(\frac{L_p}{r_p} + \frac{L_p}{2\delta_1} + \frac{r_p}{4\delta_2} \right) - Q_{\Gamma\Gamma},$$

де $J_{\text{РП}}$ – сумарний момент інерції системи "ЕД – редуктор-валопровід – ГГ"; Q_p – гальмівний момент, який виникає при обертанні ротора в середовищі діелектрика, що заповнює ЕД; $Q_{\Gamma\Gamma}$ – гальмівний момент гребного гвинта; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості діелектрика; L_p , r_p – відповідно довжина та радіус ротора ЕД; δ_1 – зазор між ротором і статором; δ_2 – зазор між торцевими поверхнями ротора і кришками ЕД. Струм якоря в цій моделі є керуючим впливом.

Запишемо її у вигляді лінійного диференціального рівняння першого порядку зі складовою, яка представляє зовнішні збурення:

$$J_{\text{РП}} \frac{d\omega}{dt} = k_a i - k_b \omega + M_{33}; \quad (4.8)$$

$$k_a = \frac{c\Phi}{k_g}; \quad k_b = \frac{4\mu\pi r_p^3}{k_g^2} \left(\frac{L_p}{r_p} + \frac{L_p}{2\delta_1} + \frac{r_p}{4\delta_2} \right); \quad M_{33} = -Q_{\Gamma\Gamma}(\omega, V),$$

де k_a та k_b – коефіцієнти моделі, M_{33} – момент зовнішніх збурень.

Розділимо обидві частини рівняння (4.8) на коефіцієнт k_a , це дасть змогу привести його до виду (4.6):

$$k_{\omega 1} \frac{d\omega}{dt} = i - k_{\omega 2} \omega + i_{33}; \quad (4.9)$$

$$k_{\omega 1} = \frac{J_{\text{РП}}}{k_a}; \quad k_{\omega 2} = \frac{k_b}{k_a}; \quad i_{33} = i_{33}(\omega, V) = \frac{M_{33}}{k_a},$$

де $k_{\omega 1}$ та $k_{\omega 2}$ – коефіцієнти моделі, i_{33} – зовнішні збурення.

Розглянемо модель динаміки маршового руху корпусу ПА. В диференціальне рівняння (4.1) підставимо рівняння сили опору набігаючого потоку води (4.3):

$$m \frac{dV}{dt} = F_{PK} - 0,5k_F \rho S |V|V + F_{33}.$$

Як бачимо, рівняння корпусу ПА нелінійне, але ми можемо привести його до виду (4.6), якщо штучно приховаємо нелінійність – додучимо $|V|$ до складу коефіцієнту k_{V2} :

$$k_{V1} \frac{dV}{dt} = F_{PK} - k_{V2}V + F_{33}; \quad (4.10)$$

$$k_{V1} = m; \quad k_{V2} = k_{V2}(V) = 0,5k_F \rho S |V|,$$

де k_{V1} та k_{V2} – відповідно лінійний та нелінійний коефіцієнти моделі.

Зв'язок між виходом моделі динаміки механічних процесів в ЕД рушійного пристрою ω та входом моделі динаміки маршового руху корпусу ПА F_{PK} здійснюється за допомоги математичної моделі гребного гвинта (3.24 – 3.26):

$$\frac{1}{2} F_{PK} = F_{ПГ} = f(V, \omega); \quad (4.11)$$

На основі математичних моделей елементів ПА складемо структурну схему ПА як об'єкта керування (рис. 4.2).

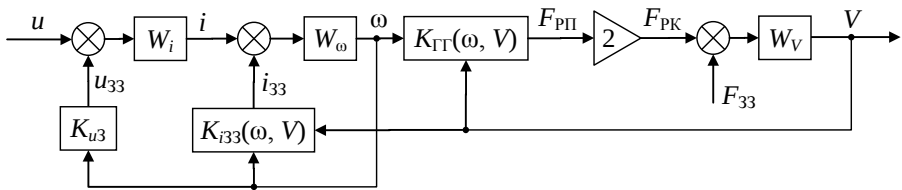


Рис. 4.2 – Структура математичної моделі маршового руху ПА

На рисунку позначено:

W_i – передатна функція моделі електродинамічних процесів в ЕД рушійного пристрою;

W_ω – передатна функція моделі динаміки механічних процесів в ЕД рушійного пристрою;

W_V – передатна функція моделі динаміки маршового руху корпусу ПА;
 $K_{ГГ} = K_{ГГ}(\omega, V)$ – нелінійний коефіцієнт передачі гребного гвинта;
 $K_{i33} = K_{i33}(\omega, V)$ – нелінійний коефіцієнт передачі, за допомоги якого моделюються зовнішні збурення i_{33} моделі динаміки механічних процесів в ЕД рушійного пристрою;

$K_{u33} = c\Phi/(k_g K_u)$ – коефіцієнт передачі, за допомоги якого моделюються зовнішні збурення u_{33} моделі електродинамічних процесів в ЕД рушійного пристрою.

Введемо контур керування зі зворотним зв'язком для кожної складової ПА, яка моделюється диференціальним рівнянням першого порядку. В результаті САК буде містити регулятор струму якоря електродвигуна R_i , регулятор швидкості обертання гребного гвинта R_ω та регулятор швидкості корпусу ПА R_V (рис. 4.3).

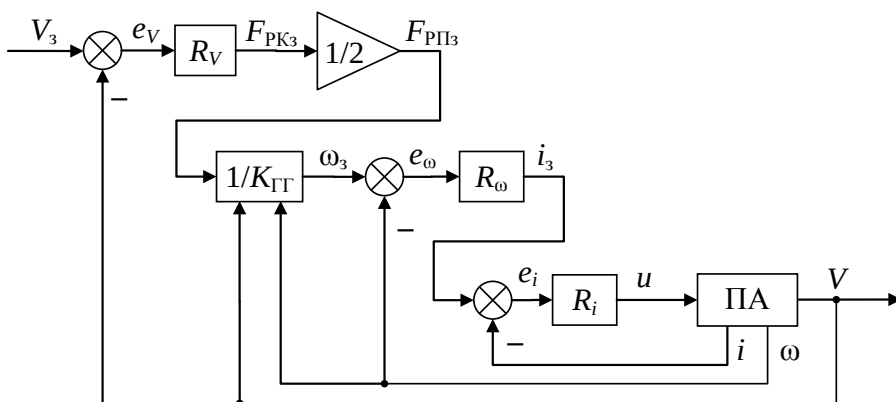


Рис. 4.3 – Структурна схема САК маршовим рухом ПА з трьома підпорядкованими регуляторами

На вхід R_V надходить похибка керування швидкістю e_V , на виході регулятора отримуємо упор F_{PK3} , який має забезпечити рушійний комплекс. Похибка керування швидкістю обертання гребного гвинта e_ω є задаючим впливом для регулятора R_ω , який виробляє значення струму електродвигуна i_3 . Похибка керування струмом є задаючим впливом для регулятора R_i , який виробляє сигнал керування ПА u .

Оскільки моделі всіх елементів ПА вдалося привести до виду лінійного диференціального рівняння першого порядку (4.6), то регулятори

САК можна будувати за однаковою структурою і відрізнятимуться вони коефіцієнтами, а також контуром компенсації зовнішніх збурень.

При цьому зовнішні збурення u_{33} та i_{33} в регуляторах відповідно R_i та R_ω можна визначати на основі коефіцієнтів передачі відповідно K_{u33} та K_{i33} . Невизначеною в такій САК залишається зовнішнє збурення F_{33} , тому регулятор R_V має забезпечувати якісне керування в умовах невизначеності зовнішнього збурення F_{33} .

Дослідження математичної моделі ПА з певними параметрами свідчать, що електродинамічні перехідні процеси, які протікають в ЕД рушійного комплексу ПА, значно швидші, ніж механічні перехідні процеси. З урахуванням цього прийемо припущення, що $di/dt = 0$:

$$L_{\text{я}} \frac{di}{dt} = K_u u - R_{\text{я}} i - \frac{c\Phi\omega}{k_g} = 0.$$

Таке припущення дає змогу представити струм якоря i як лінійну функцію двох змінних u та ω :

$$i = \frac{K_u}{R_{\text{я}}} u - \frac{c\Phi}{k_g R_{\text{я}}} \omega.$$

Об'єднаємо отриманий вираз для i з моделлю динаміки механічних процесів електродвигуна рушійного пристрою:

$$J_{\text{рп}} \frac{d\omega}{dt} = k_a \left(\frac{K_u}{R_{\text{я}}} u - \frac{c\Phi}{k_g R_{\text{я}}} \omega \right) - k_b \omega - Q_{\text{ГГ}}.$$

Підставимо в рівняння вирази для коефіцієнтів k_a та k_b , виконаємо алгебраїчні перетворення та отримаємо математичну модель динаміки електромеханічних процесів рушійного пристрою у вигляді лінійного диференціального рівняння першого порядку (4.6) з лінійними коефіцієнтами та нелінійним зовнішнім збуренням:

$$\left. \begin{aligned} k_{\omega 1} \frac{d\omega}{dt} &= u - k_{\omega 2} \omega + u_{33}; \\ k_{\omega 1} &= \frac{k_g R_{\text{я}} J_{\text{ПП}}}{c \Phi K_u}; \\ k_{\omega 2} &= \frac{c \Phi}{k_g K_u} + \frac{R_{\text{я}}}{c \Phi K_u} \frac{4 \mu \pi r_p^3}{k_g} \left(\frac{L_p}{r_p} + \frac{L_p}{2 \delta_1} + \frac{r_p}{4 \delta_2} \right); \\ u_{33} &= - \frac{k_g R_{\text{я}}}{c \Phi K_u} Q_{\Gamma \Gamma}(\omega, V). \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

Застосування такої моделі дає змогу спростити структуру САК маршовим рухом ПА (рис. 4.4).

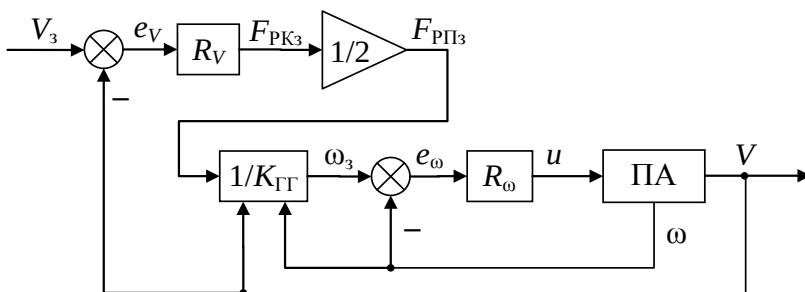


Рис. 4.4 – Структурна схема САК маршовим рухом ПА з двома підпорядкованими регуляторами

Система містить два регулятори: R_V та R_ω , з'єднані за принципом підпорядкованого керування, а також зв'язуючий блок $K_{\Gamma \Gamma}^{-1}$.

4.3 Розробка структури регулятора для об'єкта керування першого порядку

Оскільки математичні моделі елементів ПА, для яких передбачаються регулятори, вдалося звести до виду (4.6), то для керування ними можна використати однакові за структурою регулятори, які відрізнятимуться тільки коефіцієнтами.

Розробимо структуру регулятора для керування об'єктом першого порядку, який описується диференціальним рівнянням (4.6), при нульових початкових умовах та у відсутності зовнішніх збурень.

Для цього в рівняння (4.6) введемо оператор Лапласа $p = d/d$ та прийнемо $y_0 = 0$, $x_{33} = 0$:

$$k_1 p y = x - k_2 y. \quad (4.13)$$

Виконаємо алгебраїчні перетворення та запишемо передатну функцію об'єкта керування:

$$W_{obj} = \frac{y}{x} = \frac{K_{obj}}{T_{obj} p + 1};$$

$$K_{obj} = \frac{1}{k_2}; \quad T_{obj} = \frac{k_1}{k_2}, \quad (4.14)$$

де K_{obj} – коефіцієнт підсилення об'єкта керування, T_{obj} – постійна часу об'єкта керування.

Складемо структурну схему САК за принципом керування по помилці e_y (рис. 4.5).

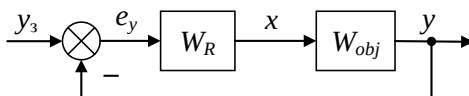


Рис. 4.5 – Структурна схема САК лінійним об'єктом першого порядку при нульових початкових умовах та у відсутності зовнішніх збурень

Визначимо передатну функцію регулятора W_R виходячи з того, що перехідний процес САК має протікати в експоненціальному вигляді з заданою постійною часу $T_{САК}$. Для цього представимо передатну функцію САК аперіодичною ланкою:

$$W_{\text{CAK}} = \frac{y}{y_3} = \frac{1}{T_{\text{CAK}} p + 1}. \quad (4.15)$$

Оскільки W_{CAK} представляє собою добуток $W_R W_{\text{obj}}$, охоплений від'ємним зворотним зв'язком, то передатну функцію САК можна записати також рівнянням

$$W_{\text{CAK}} = \frac{W_R W_{\text{obj}}}{W_R W_{\text{obj}} + 1}. \quad (4.16)$$

Зрівнявши обидва вирази для W_{CAK} знайдемо передатну функцію регулятора:

$$W_R = \frac{x_R}{e_y} = \frac{1}{T_{\text{CAK}} W_{\text{obj}} p} = \frac{T_{\text{obj}} p + 1}{T_{\text{CAK}} K_{\text{obj}} p} = \frac{T_{\text{obj}}}{T_{\text{CAK}} K_{\text{obj}}} + \frac{1}{T_{\text{CAK}} K_{\text{obj}} p}, \quad (4.17)$$

або

$$\left. \begin{aligned} W_R &= \frac{x_R}{e_y} = k_p + k_i \frac{1}{p}; \\ k_p &= \frac{T_{\text{obj}}}{T_{\text{CAK}} K_{\text{obj}}} = \frac{k_1}{T_{\text{CAK}}}; \\ k_i &= \frac{1}{T_{\text{CAK}} K_{\text{obj}}} = \frac{k_2}{T_{\text{CAK}}}, \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

де x_R – вихід регулятора, який поступає на вхід x об'єкта керування.

Отримана передатна функція містить пропорційну та інтегральну складові та представляє собою ПІ-регулятор з пропорційним коефіцієнтом k_p та інтегральним коефіцієнтом k_i . Налаштування ПІ-регулятора полягає в ідентифікації коефіцієнтів k_1 та k_2 і вибори постійної часу T_{CAK} . Параметр T_{CAK} обирається якомога менший для забезпечення найкоротшого перехідного процесу, але не занадто малим, щоб система була стійкою.

Запишемо передатну функцію регулятора в інтегральній формі та розв'яжемо відносно керуючого впливу x_R :

$$x_R = k_p e_y + k_i \left(\int e_y dt + C_R \right), \quad (4.19)$$

де C_R – константа, яка вносить поправку в роботу регулятора при ненульових початкових умовах.

Коректна робота регулятора можлива при правильному визначенні величини C_R . Для того, щоб її знайти, уявімо, що САК почала працювати при нульових початкових умовах і через деякий час керована величина прийняла деяке значення $y = y_0 \neq 0$, при цьому помилка керування прийняла значення $e_y = 0$. Пропорційна складова ПІ-регулятора також дорівнює нулю, а сигнал керування x залежить тільки від інтегральної складової регулятора, яка не змінюється при $e_y = 0$, тобто перехідний процес завершено і система працює в усталеному режимі.

Зв'язок між керованою величиною та керуючим впливом в усталеному режимі описується рівнянням:

$$x = \frac{y_0}{K_{obj}} = y_0 k_2.$$

Запишемо рівняння сигналу керування, який виробляє регулятор в усталеному режимі:

$$x_R = k_i C_R.$$

Порівнявши обидва вирази, отримаємо:

$$C_R = \frac{y_0 k_2}{k_i},$$

або

$$C_R = y_0 T_{CAK}. \quad (4.20)$$

Завдання величини C_R забезпечить роботу регулятора при ненульових початкових умовах у відсутності зовнішнього збурення. Але для керування елементами ПА цього недостатньо, оскільки зовнішні збурення є невід'ємною складовою його функціонування.

4.4 Компенсація невизначених зовнішніх збурень

Для компенсації невизначених зовнішніх збурень модифікуємо підхід, запропонований в [35], суть якого полягає у використанні моделі САК для вимірювання зовнішніх збурень, і застосуємо модель об'єкта керування як складову контуру компенсації (рис. 4.6).

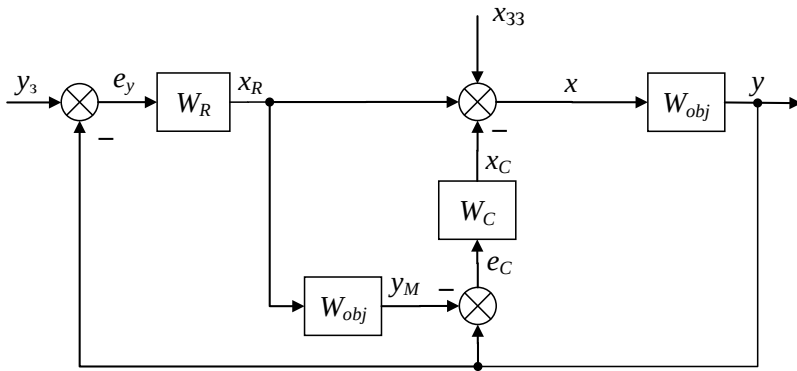


Рис. 4.6 – Структурна схема САК лінійним об'єктом першого порядку з компенсацією невизначених зовнішніх збурень

На рисунку позначено:

x_R – сигнал керування регулятора;

x_C – сигнал компенсації зовнішніх збурень;

y_M – керована величина у відсутності зовнішніх збурень (модельоване значення керуючої величини);

e_C – помилка компенсації;

W_C – передатна функція пристрою компенсації зовнішніх збурень.

Для знаходження передатної функції пристрою компенсації виділимо контур компенсації в окрему структурну схему, зобразивши x_{z3} у ролі задаючого впливу, тоді x_C опиниться в контурі від'ємного зворотного зв'язку (рис. 4.7).

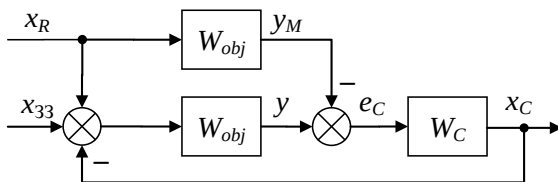


Рис. 4.7 – Структурна схема контуру компенсації

Нескладно довести, що структурну схему, зображену на рис. 4.7, можна замінити еквівалентною структурною схемою, зображеною на рис. 4.8, на основі якої можна знайти передатну функцію пристрою компенсації.

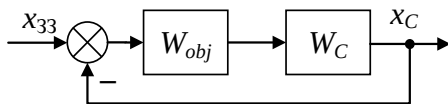


Рис. 4.8 – Скорочена структурна схема контуру компенсації

Як бачимо, така структурна схема аналогічна структурній схемі САК лінійним об'єктом першого порядку без впливу зовнішніх збурень (рис. 4.5). Тому, якщо прийняти, що перехідний процес в контурі компенсації має протікати в експоненціальному вигляді з заданою постійною часу T_C , то передатну функцію пристрою компенсації можна записати рівнянням, аналогічним рівнянню (4.18):

$$\begin{aligned}
 W_C &= \frac{x_C}{y - y_M} = \frac{x_C}{e_C} = k_{Cp} + k_{Ci} \frac{1}{p}; \\
 k_{Cp} &= \frac{T_{obj}}{T_C K_{obj}} = \frac{k_1}{T_C}; \\
 k_{Ci} &= \frac{1}{T_C K_{obj}} = \frac{k_2}{T_C},
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

або в інтегральній формі:

$$x_C = k_{Cp}e_C + k_{Ci}\left(\int e_C dt + C_C\right). \quad (4.22)$$

При цьому пропорційний k_{Cp} та інтегральний k_{Ci} коефіцієнти відрізняються тільки величиною T_C , що є дуже зручним, оскільки після налаштування ПІ-регулятора немає необхідності проводити додаткове налаштування пристрою компенсації. Контур компенсації працює при нульових початкових умовах, тому $C_C = 0$.

Постійна часу T_C пристрою компенсації обирається такою, щоб він встигав розраховувати величину зовнішнього збурення до того, як воно суттєво зміниться, тобто для контуру компенсації зовнішнє збурення має здаватись квазістаціонарним.

4.5 Усунення нелінійності типу «інтегральне насичення»

Відомо, що реальні об'єкти керування обов'язково містять нелінійність типу «обмеження». Контур регулювання в системі, яка знаходиться в насиченні (коли змінна досягла обмеження), опиняється розімкнутим, оскільки вихід такої ланки не реагує на вхідну змінну.

Типовим проявом режиму обмеження є так зване інтегральне насичення, яке виникає в процесі виходу системи на режим. Його суть полягає в тому, що якщо інтеграл на вході об'єкта керування увійшов в зону насичення (обмеження) при ненульовій помилці керування, то інтегратор продовжує інтегрувати, тобто сигнал на його виході збільшується, але цей сигнал не приймає участі у процесі регулювання і не впливає на об'єкт внаслідок ефекту насичення. Система керування в такому випадку стає еквівалентною розімкнутій системі, сигнал на вході якої дорівнює рівню насичення сигналу керування.

Існують різні методи усунення інтегрального насичення: обмеження швидкості збільшення вхідного впливу, алгоритм заборони інтегрування або його узагальнення – умовне інтегрування, компенсація насичення за допомоги додаткового зворотного зв'язку, інтегратор з блоком обмеження та ін. [36].

Сучасні підходи до побудови ПА [37] дають змогу реалізовувати елементи автопілоту повністю в програмному вигляді. Тому для усунення нелінійностей типу «обмеження» в САК ПА пропонується використовувати умовне інтегрування (рис. 4.9).

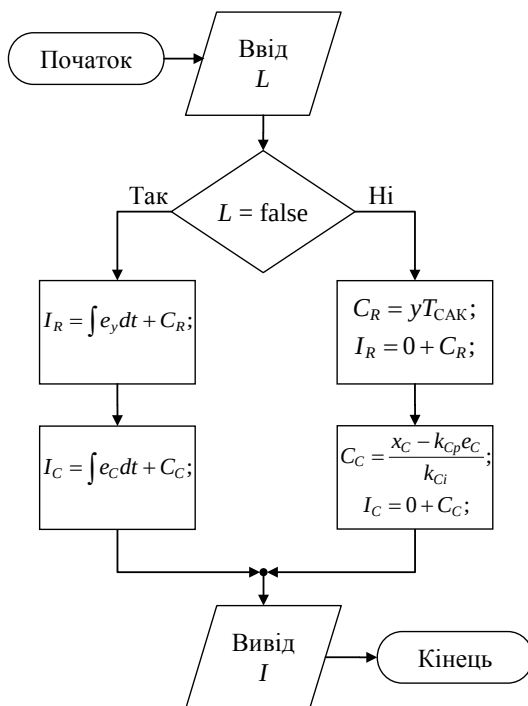


Рис. 4.9 – Блок-схема алгоритму усунення нелінійності типу «обмеження»

При вході та перебуванні САК в режимі насичення програма виконує скидання інтегратору ПІ-регулятора до початкового значення C_R , яке розраховується на базі формули (4.20), але замість y_0 використовується поточне значення y .

Інтегратор контуру компенсації також рекомендується скидати, щоб забезпечити рівність $x = x_R - x_C$:

$$C_C = \frac{x_C - k_{cp} e_C}{k_{Ci}}. \quad (4.23)$$

Логічна змінна L є показником, чи система знаходиться в режимі насичення. В найпростішому випадку її можна визначити на основі допустимих меж, які може приймати керуючий вплив:

$$L = \begin{cases} \text{false,} & \text{при } x \in [x_{\min}, x_{\max}]; \\ \text{true,} & \text{інакше.} \end{cases} \quad (4.24)$$

Але при складних структурах САК необхідно враховувати інші умови. Так, наприклад, при наявності контуру компенсації невизначених зовнішніх збурень показник насичення можна визначити, використовуючи логічне рівняння:

$$L = L_x \wedge L_{xM} \quad (4.25)$$

де L_x – показник насиченості керуючого впливу об'єкта керування, L_{xM} – показник насиченості керуючого впливу моделі об'єкта керування.

Для САК маршовим рухом ПА цілком достатньо розраховувати показник L на базі обмеження керуючого впливу ПА u та керуючого впливу моделі ПА u_M в контурах регулятора швидкості обертання гребного гвинта R_ω та використовувати його для скидання інтеграторів у контурах регуляторів R_ω та швидкості корпусу ПА R_V .

4.6 Налаштування регулятора швидкості обертання гребного гвинта

Математична модель підводного ЕД рушійного пристрою містить більше 10 параметрів. Якщо вони відомі, то коефіцієнти регулятора R_ω розраховуються на основі рівнянь з (4.12).

Розглянемо випадок, коли параметри електродвигуна невідомі. В цьому разі пропонується провести активну параметричну ідентифікацію об'єкта керування. Оскільки об'єкт керування лінійний і не містить прихованих нелінійностей в коефіцієнтах, то в ролі тестового сигналу можна обрати одиничний стрибок. За умови відсутності зовнішніх збурень він дасть змогу достатньо точно визначити ефективну сталу часу $T_{obj\omega}$ та коефіцієнт підсилення $K_{obj\omega}$ рушійного пристрою як об'єкта керування. Коефіцієнт підсилення $K_{obj\omega}$ визначається з рівняння.

$$K_{obj\omega} = \frac{\omega_{уст}}{u}. \quad (4.26)$$

Ефективну сталу часу $T_{obj\omega}$ можна визначити графічним способом з умови, що в момент $t = T_{obj\omega}$ вихід об'єкта $\omega \approx 0,632\omega_{уст}$.

З системи (4.12) видно, що зовнішнє збурення залежить від гребного гвинта. Якщо увімкнути рушійний пристрій за межами робочого середовища (наприклад, у повітрі), то збурюючий вплив від гребного гвинта буде майже нульовим. Перехідний процес рушійного пристрою з ЕД потужністю 400 Вт за відсутності зовнішніх збурень при $u = 100$ В, отриманий на основі моделюючого комплексу [32], зображено на рис. 4.10.

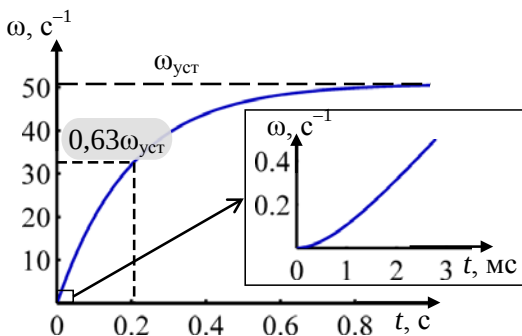


Рис. 4.10 – Графік перехідного процесу рушійного пристрою

По графіку визначимо $\omega_{уст} \approx 50 \text{ с}^{-1}$, отже $K_{obj\omega} \approx 0,5$ та $T_{obj\omega} \approx 0,2 \text{ с}$. Звідси отримаємо $k_{\omega 1} = 0,4$ та $k_{\omega 2} = 2$. Крім того, на виносці ми бачимо, що дійсно перехідний процес електродинамічних процесів в ЕД не перевищує декількох мілісекунд і на порядки менше динаміки механічних процесів в ЕД, отже припущення про можливість розглядати рушійний пристрій як об'єкт першого порядку цілком обґрунтоване.

Постійні часу пристрою регулювання $T_{САК\omega}$ та пристрою компенсації $T_{C\omega}$ регулятора R_{ω} оберемо, виходячи з умови, що швидкодія пристрою компенсації має бути в декілька разів більшою, ніж пристрою регулювання. Звідси виходить, що самим швидкодійним пристроєм САК ПА має бути пристрій компенсації регулятора R_{ω} , оскільки регулятор R_{ω} має працювати швидше, ніж регулятор R_V , через підпорядковану структуру САК ПА.

Оберемо такі постійні часу регулятора R_{ω} : $T_{САК\omega} = 0,02 \text{ с}$, $T_{C\omega} = 0,002 \text{ с}$. На їх основі розраховуються пропорційний та інтегральний коефіцієнти пристроїв регулювання та компенсації.

4.7 Налаштування регулятора швидкості руху корпусу ПА

Оскільки математична модель маршового руху корпусу ПА містить нелінійність – коефіцієнт $k_{V2}(V)$, то інтегральний коефіцієнт регулятора R_V потрібно перераховувати при кожній зміні швидкості руху ПА. В такому випадку регулятор R_V стає адаптивним.

Коефіцієнт k_{V2} залежить від таких параметрів: густини води ρ , характерної площі ПА S , коефіцієнту гідродинамічного опору ПА по маршовій осі k_F та маршової швидкості ПА.

Константним параметром є S , коефіцієнт k_F нелінійний і може залежати від V , але допускається приймати його константою. Густина води ρ рідко коли змінюється більше, ніж на 3 % і її також можна прийняти константою, тому з певною мірою наближення в k_{V2} можна виділити константну складову K :

$$k_{V2}(V) = K|V|; \quad K = 0,5k_F\rho S.$$

Малогабаритний ПА проекту «Інспектор» має такі параметри: маса $m = 50$ кг, $S = 0,3$ м², $k_F = 0,1$, густину морської води приймемо $\rho = 1024$ кг/м³.

На основі параметрів ПА розрахуємо коефіцієнти для регулятора: $k_{V1} = 50$, $k_{V2} = 15,36|V|$.

Коефіцієнт k_{V2} характеризує силу опору корпусу ПА. Оскільки розмірності сили опору і зовнішніх збурень співпадають, то неточності у визначенні k_{V2} будуть проявлятися як складова сили зовнішніх збурень, яку компенсуватиме відповідний контур регулятора R_V .

Оберемо такі постійні часу регулятора R_V : $T_{CAKV} = 0.2$ с, $T_{CV} = 0,02$ с. Таким чином, регулятор R_V матиме набагато меншу швидкодію, ніж регулятор R_ω , для коректної роботи САК ПА з підпорядкованою структурою, а пристрій компенсації встигатиме розраховувати компенсаційний сигнал для нормальної роботи пристрою регулювання регулятора R_V .

Для нормальної роботи контуру компенсації регулятора R_V модель об'єкта керування в ньому має складатись з моделі регулятора R_ω , вихід якої має бути з'єднано зі входом моделі маршового руху ПА.

4.8 Синтез інверсної моделі гребного гвинта

Виходом регулятора R_V є величина F_{PK3} , входом регулятора R_ω є величина ω_3 , для їх узгодження пропонується синтезувати інверсну модель гребного гвинта $\omega = f(F_{ГГ}, V_{ГГ})$, де $F_{ГГ}$ – упор гребного гвинта, $V_{ГГ}$ – швидкість поступального переміщення гребного гвинта в потоці. На рис. 4.4 її зображено як зв'язуючий блок $K_{ГГ}^{-1}$.

При маршовому русі ПА можна прийняти $V_{ГГ} = V$. З урахуванням того, що упор гребного гвинта відповідає упору рушійного пристрою $F_{ГГ} = F_{РП}$, інверсну модель синтезуватимемо у виді

$$\omega = f(F_{РП}, V).$$

Математична модель ГГ містить графічні залежності та умовні переходи і отримати її інверсну модель в аналітичному виді складно, тому пропонується апроксимувати її набором табличних значень.

Дослідження математичної моделі рушійного пристрою ПА показують, що в робочих режимах вал рушійного пристрою обертається зі швидкістю $\omega \in [-150, 150] \text{ с}^{-1}$, а ПА рухається з швидкостями, які не виходять з діапазону $V \in [-2, 2] \text{ м/с}$. Виконавши моделювання гребного гвинта за допомогою його прямої моделі $F_{РП} = f(\omega, V)$ для діапазонів ω та V знайдемо відповідні $F_{РП}$. Отримані значення і утворять табличну модель гребного гвинта. Її графічне зображення утворює тривимірну поверхню (рис. 4.11).

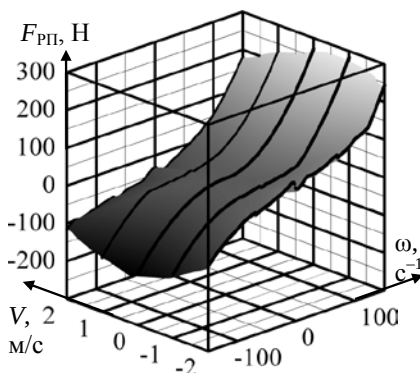


Рис. 4.11 – Графічне представлення табличної моделі РП

У складі регуляторів САК ПА можна використовувати табличну модель та модель, отриману засобами апроксимації табличних даних, наприклад, на основі штучної нейронної мережі [38].

4.9 Дослідження САК маршовим рухом ПА

Математичну модель та регулятори маршової швидкості ПА було реалізовано в середовищі Simulink пакету Matlab [39].

4.9.1 Тестування САК упором рушійного пристрою.

Дослідимо роботу регулятора швидкості обертання гребного гвинта R_ω . Якщо об'єднати регулятор R_ω та інверсну модель гребного гвинта, то отримаємо САК упором рушійного пристрою ПА з регулятором упору R_F та від'ємним зворотним зв'язком за ω . Дослідимо САК упором рушійного пристрою при ступінчастій зміні заданого упору $F_{РПЗ}$ з 0 Н до 50 Н (рис. 4.12).

Після закінчення перехідного процесу виникає статична похибка $e_{Fст} = F_{РПЗ} - F_{РП} = 1,7$ Н, обумовлена неточністю інверсної моделі гребного гвинта. Тому тривалість перехідного процесу τ_ω будемо оцінювати за критерієм $|e_\omega| \leq 1 \text{ c}^{-1}$, де $e_\omega = \omega_3 - \omega$.

Перші 0,17 с система знаходиться в режимі насичення. Після виходу з режиму насичення тривалість перехідного процесу складає $\tau_\omega = 0,027$ с.

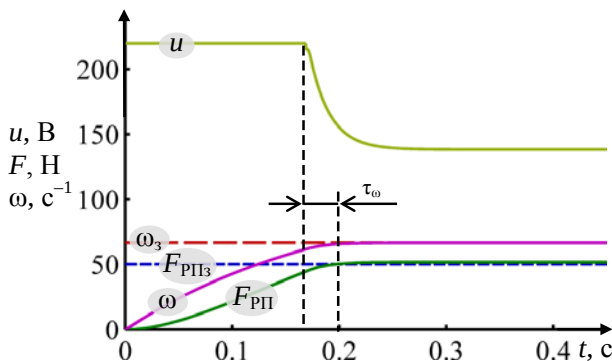


Рис. 4.12 – Моделювання роботи САК упором рушійного пристрою при ступінчастій зміні заданого упору

Моделювання регулятора R_F було виконано для різних ступінчастих змін $F_{\text{РПЗ}}$ і встановлено, що τ_ω не перевищує декількох десятків мілісекунд.

Усталені стани САК дають змогу оцінити e_{FCT} (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Усталені стани САК упором рушійного пристрою

N	V, м/с	$F_{\text{РПЗ}}$, Н	$F_{\text{РП}}$, Н	$ e_{\text{FCT}} $, Н	ω , с^{-1}	u, В
1	0	105	113,9	8,9	98,6	210,6
2		50	51,7	1,7	66,4	138,3
3		-50	-53,3	3,3	-83,6	-176,1
4		-70	-72,8	2,8	-97,7	-208
5	2	60	58,5	1,5	103,2	211,4
6		-100	-86,46	13,54	-99,2	-210,4
7	-2	122	114,4	7,6	96,4	205,2
8		-12	-12	0	-100,9	-203,4

Серія комп'ютерних експериментів показала, що статична похибка e_{FCT} регулятора R_F складає декілька ньютонів і не перевищує 15 Н. При цьому вона залежить виключно від точності інверсної моделі гребного гвинта і при необхідності може бути зменшена шляхом її уточнення.

Наявність статичної похибки e_{FCT} не створює умов для некоректної роботи САК маршовою швидкістю ПА, оскільки вона компенсуватиметься регулятором R_V .

Дослідимо САК упором рушійного пристрою при змінах заданого упору $F_{\text{РПЗ}}$ та параметру V за гармонійним законом (рис. 4.13).

Як бачимо, регулятор демонструє стійку роботу і забезпечує відповідність ω до величини ω_z (див. рис. 4.13, *а*) навіть при інтенсивній зміні параметру V . Спостерігаються певні невідповідності $F_{\text{РП}}$ з $F_{\text{РПЗ}}$, (див. рис. 4.13, *б*), які, як було зазначено раніше, обумовлені неточністю інверсної моделі гребного гвинта і компенсуватимуться регулятором R_V .

4.9.2 Тестування САК швидкістю маршового руху ПА

Тестування підпорядкованої САК ПА виконаємо при:

– ступінчастій зміні V_z , що відповідає виходу ПА на маршову швидкість;

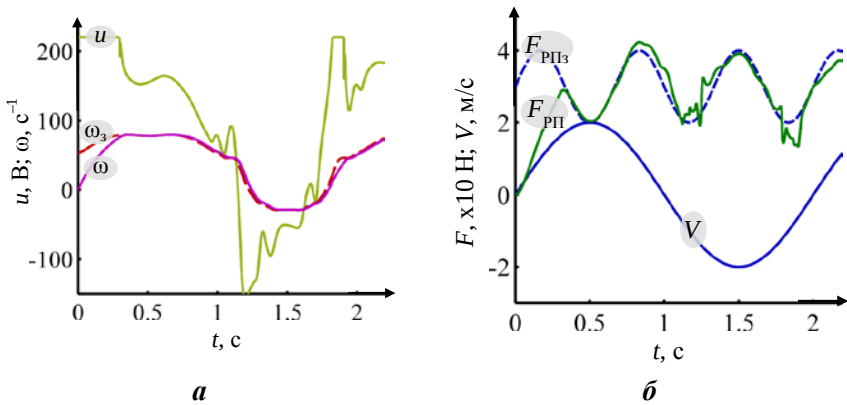


Рис. 4.13 – Моделювання роботи САК упором рушійного пристрою при змінах F_{PP3} та V за гармонійним законом

– зміні V_3 за гармонічним законом, що відповідає руху ПА за деякою траєкторією або у слідкувальному режимі.

При цьому на ПА будуть діяти:

– ступінчасте зовнішнє збурення, що відповідає одиничним силовим ривкам від КТ, або зміні гідродинамічних параметрів ПА, наприклад при виведенні націпного обладнання (маніпулятора) в робочий режим;

– гармонічне зовнішнє збурення, що відповідає основному режиму зовнішнього збурення – плавному силовому впливу від КТ.

Якість САК будемо оцінювати за такими критеріями:

– τ_V – тривалість перехідного процесу при ступінчастій зміні V_3 , перехідний процес вважатимемо завершеним при $|e_V| \leq 0,05 \text{ м/с}$, де $e_V = V_3 - V$;

– t_V – запізнення V у порівнянні з V_3 при зміні V_3 за гармонійним законом.

Ступінчасту зміну V_3 задаватимемо $0..1 \text{ м/с}$, що відповідає режиму інтенсивного набору швидкості ПА. Зміну V_3 за гармонічним законом виконуватимемо з амплітудою 1 м/с та частотою $0,25 \text{ Гц}$, що відповідає інтенсивному маневруванню ПА на прямій.

Ступінчасту зміну F_{33} виконуватимемо в межах значень -50 Н та 50 Н , зміну F_{33} за гармонійним законом виконуватимемо з амплітудою

50 Н та частотою 0,3 Гц, що відповідає жорстким та інтенсивним невизначеним зовнішнім збуренням, характерним для ПА прив'язної підводної системи.

Для зручності візуального сприйняття на графіках керуючий вплив u та зовнішнє збурення F_{33} приведемо до діапазону $[-0,5, 0,5]$.

Дослідимо САК при ступінчастій зміні заданої швидкості V_3 (рис. 4.14).

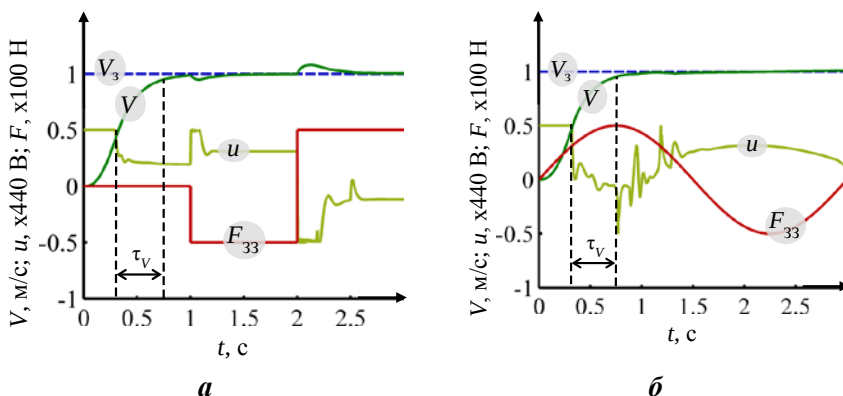


Рис. 4.14 – Моделювання роботи САК ПА при ступінчастій зміні V_3 та ступінчастій (а) та гармонійній (б) зміні зовнішнього збурення F_{33}

При відсутності зовнішнього збурення перші 0,3 с система знаходиться в режимі насичення. Після виходу з режиму насичення тривалість перехідного процесу складає $\tau_v = 0,45$ с. В моменти часу $t = 1$ с та $t = 2$ с починає діяти інтенсивне ступінчасте зовнішнє збурення $F_{33} = -50$ Н та $F_{33} = 50$ Н відповідно (див. рис. 4.14, а), які виводять систему з рівноваги. Після виходу з режиму насичення САК вдається повернути систему в діапазон $|e_v| \leq 0,05$ м/с за час, менший ніж 0,02 с у першому випадку, та за час, менший ніж 0,1 с у другому випадку.

При інтенсивному гармонійному зовнішньому збуренні перші 0,32 с система знаходиться в режимі насичення, після виходу з режиму насичення тривалість перехідного процесу складає $\tau_v = 0,32$ с (див. рис. 4.14, б).

В цілому при різних V_3 та F_{33} за межами режиму насичення тривалість перехідних процесів не перевищує 0,5 с.

Дослідимо САК при зміні заданої швидкості V_3 за гармонійним законом (рис. 4.15).

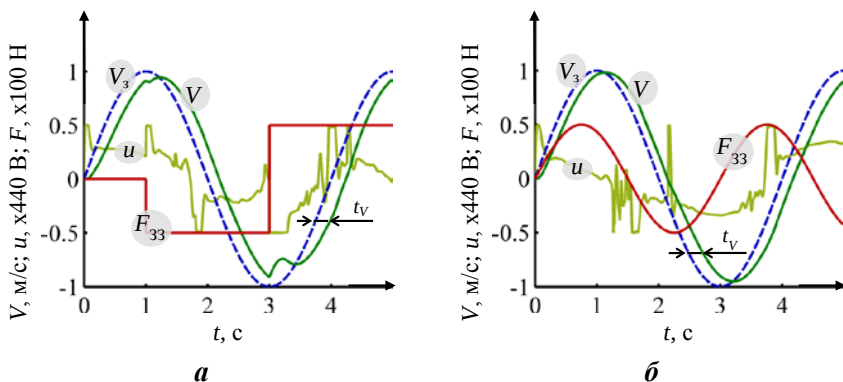


Рис. 4.15 – Моделювання роботи САК ПА при зміні V_3 за гармонійним законом та ступінчасті (а) та гармонійній (б) змінах зовнішнього збурення F_{33}

Як бачимо, запізнення V у порівнянні з V_3 не перевищує 0,3 с, якщо система не знаходиться в режимі насичення.

При цьому на ступінчасту зміну зовнішнього збурення (див. рис. 4.15, а) САК реагує досить швидко і, якщо не враховувати зону насичення, за час, менший 0,3 с повертає систему в режим нормальної роботи – із запізненням $t_V \leq 0,3$ с. При гармонійному зовнішньому збуренні САК не виходить з режиму нормальної роботи – $t_V \leq 0,3$ с.

Отримані результати показують, що САК впевнено реагує на одиничні ривки та на плавну зміну невизначеного зовнішнього збурення як при ступінчастій, так і при гармонійній зміні V_3 , що цілком відповідає сучасним вимогам до автоматичного керування ПА і дає змогу рекомендувати розроблену САК до застосування на діючих зразках ПА НУК.

4.10 Синтез нечіткого регулятора курсу ПА

Конструктивною особливістю більшості ПА є наявність у складі їх рушійних комплексів (РК) двох маршових пристроїв, що дає змогу

ПА виконувати обертовий рух навколо вертикальної осі (рискання). Для утримання ПА на курсі необхідно обчислювати значення керуючих впливів з урахуванням різниці сигналів керування маршових рушійних пристроїв (РП) Δu_{rl} :

$$u_r = (u_x + \Delta u_{rl}) / 2; \quad u_l = (u_x - \Delta u_{rl}) / 2,$$

де u_r , u_l – відповідно напруги живлення правого і лівого РП, u_x – сигнал керування маршовими РП, який в загальному випадку визначає сумарний упор маршових РП для забезпечення поступального руху ПА.

Величина Δu_{rl} в САК зі зворотним зв'язком обчислюється як функція кута рискання φ . Застосування підходів класичної теорії автоматичного керування в даному випадку суттєво ускладнене, оскільки об'єкт керування містить два маршових РП, кожен з яких описується системою, яка містить у своєму складі два диференціальних рівняння та коефіцієнти, що визначаються з графічних залежностей, крім того обертовий рух ПА також описується диференціальним рівнянням.

Розв'язувати поставлену задачу керування будемо на основі теорії нечітких множин [40, 41]. Згідно з правилами синтезу нечітких регуляторів (НР) спочатку виділимо входи та виходи регулятора. До входів регулятора віднесемо відхилення $\Delta\varphi$ між заданим φ_z і фактичним φ курсами ПА, $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_z$, та кутову швидкість ω_y обертання ПА навколо вертикальної осі. Вихідна змінна – різниця сигналів маршових РП Δu_{rl} . Для кожної змінної задамо лінгвістичні терми, відповідні деяким діапазонам чітких значень.

Для означених змінних пропонується використовувати сім лінгвістичних термів: від'ємне велике (ВВ); від'ємне середнє (ВС); від'ємне мале (ВМ); нуль; додатне мале (ДМ); додатне середнє (ДС); додатне велике (ДВ).

Функції приналежності для вхідних та вихідної змінної обрано трикутної форми і представлено на рис. 4.16.

Задамо правила керування у вигляді табл. 4.2.

Рядки таблиці відповідають вхідній змінній «відхилення». Стовпці таблиці відповідають вхідній змінній «кутова швидкість». Значення в перехресті рядків і стовпців відображають значення вихідної змінної «різниця».

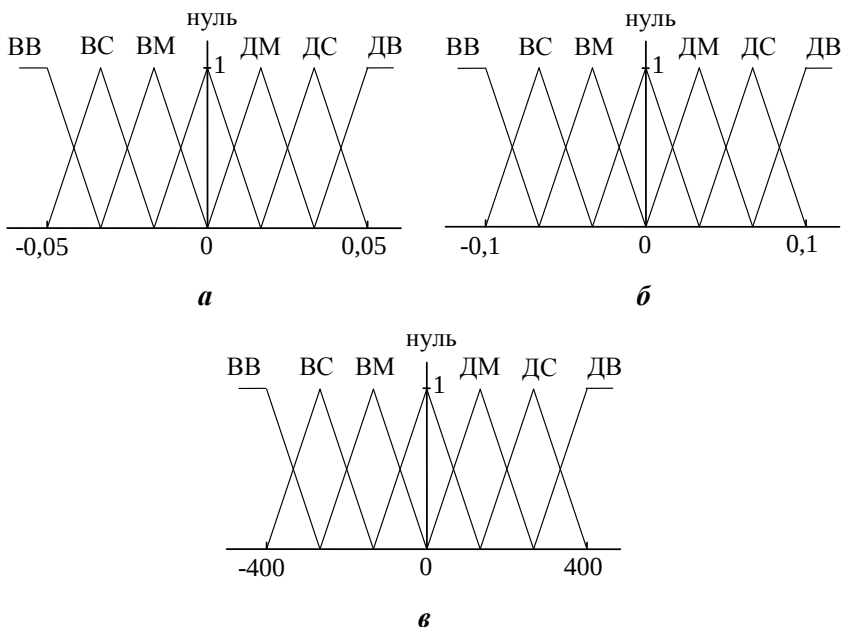


Рис. 4.16 – Функції приналежності нечіткого регулятора курсу ПА:
a – відхилення ($\Delta\varphi$, рад), ***б*** – кутова швидкість (ω_y , рад/с),
в – різниця (Δu_{rl} , В)

Таблиця 4.2 – База правил нечіткого регулятора

		Кутова швидкість						
		ВВ	ВС	ВМ	нуль	ДМ	ДС	ДВ
Відхилення	ДВ	нуль	ВМ	ВС	ВВ	ВВ	ВВ	ВВ
	ДС	ДМ	нуль	ВМ	ВС	ВВ	ВВ	ВВ
	ДМ	ДС	ДМ	нуль	ВМ	ВС	ВВ	ВВ
	нуль	ДВ	ДС	ДМ	нуль	ВМ	ВС	ВВ
	ВМ	ДВ	ДВ	ДС	ДМ	нуль	ВМ	ВС
	ВС	ДВ	ДВ	ДВ	ДС	ДМ	нуль	ВМ
	ВВ	ДВ	ДВ	ДВ	ДВ	ДС	ДМ	нуль

В ролі регулятора оберемо контролер на базі алгоритму Мамдані та методу центра ваги для виконання дефазифікації.

Оцінимо роботу регулятора при $\varphi_3 = 0$ та початковому відхиленні курсу $\Delta\varphi = 0,4$ рад ($\approx 24^\circ$). Результат роботи регулятора свідчить, що перехідний процес не перевищує 4 с (рис. 4.17).

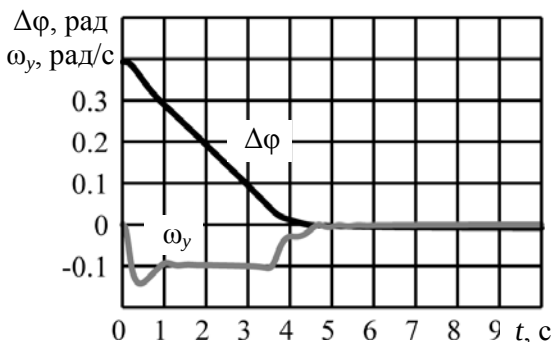


Рис. 4.17 – Моделювання роботи нечіткого регулятор курсу ПА

При цьому РП задіяні на максимум потужності при $\Delta\varphi > 0,05$ рад ($\approx 2,9^\circ$), для зменшення часу перехідного процесу в даному випадку необхідно встановлювати більш потужні РП.

Перевагою такого підходу синтезу регуляторів є відносна простота та достатня якість керування об'єктом, математична модель якого описується системою нелінійних диференціальних рівнянь або взагалі невідома.

Недоліком такого підходу є необхідність залучення експерта або проведення серії басейнових або морських натурних випробувань ПА для розробки бази правил регулятора.

Як бачимо, в робочому діапазоні заданих швидкостей ПА від 0 до 2,5 м/с тривалість перехідних процесів не перевищує декількох, що є достатнім для керування швидкістю маршового ходу ПА.

Перевагою такого підходу синтезу регуляторів є достатньо широка розвиненість методів класичної теорії автоматичного керування, відносна простота синтезу та достатня точність САК об'єктами, які описуються диференціальними рівняннями невисокого (першого та другого) порядку.

Недоліком такого підходу є складність або взагалі неможливість синтезу регуляторів при відсутності достовірних моделей об'єкта керування, погіршення точності керування об'єктами, які описуються

системами з трьох та більше диференціальних рівнянь внаслідок наявності похибок диференціального числення.

Для синтезу САК такими складними об'єктами застосовуються сучасні підходи до синтезу регуляторів на основі штучного інтелекту.

4.11 Просторова стабілізація ПА з маніпулятором

Головним інструментом багатьох ПА при виконанні складних підводно-технічних робіт є підводний маніпулятор (ПМ), встановлений на рамі ПА, керування яким виконується з ПЕК оператором вручну [5]. У розгорнутому стані прив'язна підводна система з ПА та ПМ має вигляд, показаний на рис. 4.18.

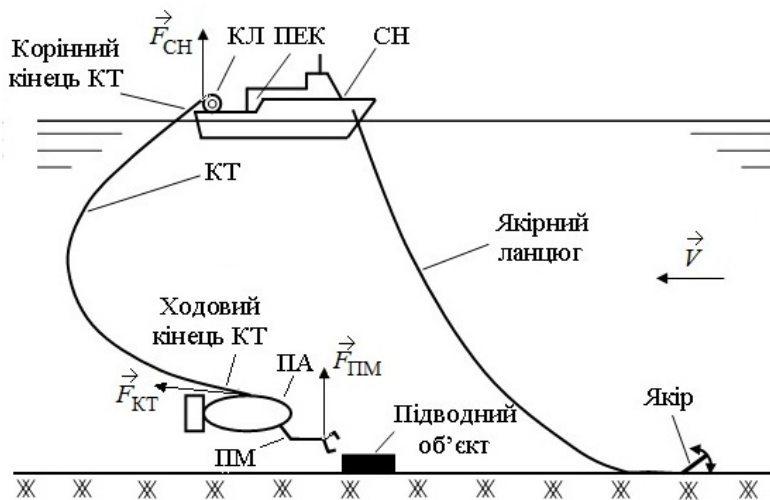


Рис. 4.18 – СППС з підводним апаратом і маніпулятором

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

Крім того, на ПА як платформу ПМ діє збурююча сила $\vec{F}_{\text{ПМ}}$ від роботи власне ПМ, обумовлена зміною просторового положення ланок ПМ, взаємодією маніпулятора з підводними предметами тощо.

Постійно зростаючі вимоги до якості підводно-технічних робіт взагалі та, зокрема, до точності підводних операцій з застосуванням ПМ вимагають забезпечення просторової стабілізації ПА, оскільки від цього суттєво залежить ефективність застосування підводних маніпуляторів. Система автоматичної просторової стабілізації ПА у підводному просторі є складовою інтегрованої системи автоматичного керування (САК) ППС у цілому [42]. Її узагальнена структура показана на рис. 4.19.

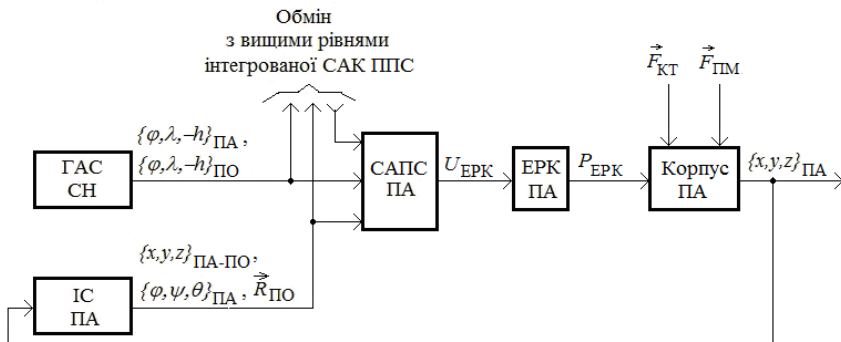


Рис. 4.19 – Узагальнена структура системи автоматичної просторової стабілізації ПА

Система автоматичної просторової стабілізації (САПС) функціонує на основі:

даних від гідроакустичної системи (ГАС) СН, яка подає первинну інформацію про взаємне просторове положення ПА та підводного об'єкту (ПО) в умовах хитавиці, необхідну для наведення підводного апарату на ціль – поточні географічні координати ПА (широта φ , довгота λ і глибина $-h$ ПА) та географічні координати ПО (широта φ , довгота λ і глибина $-h$ ПО);

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

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

Виконавчим механізмом САПС є ЕРК ПА, від характеристик якого залежить ефективність просторової стабілізації підводного апарату як платформи для ПМ. До головних характеристик ЕРК ПА віднесемо: кількість $n_{\text{ЕРП}}$ та просторове положення електрорушійних пристроїв (ЕРП) ПА, які утворюють ЕРК ПА;

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

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

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

Прив'язний підводний апарат з позицій керування представляє собою вільноплаваючий об'єкт із шістьма ступенями свободи – три лінійних переміщення та три обертання відносно осей системи координат, зв'язаної з корпусом ПА. Всі просторові еволюції ПА у водному середовищі можуть бути зведені до трьох основних режимів руху – переміщення від вихідної позиції до ПО, локального маневрування над об'єктом та просторової стабілізації у заданій точці підводного простору (зависання) біля ПО з метою забезпечення стійкої роботи ПМ. У перших двох режимах роботи превалюють поступальні та квазілінійні просторові переміщення ПА. У третьому режимі ПА повинен мати можливість розвивати упори ЕРК та виконувати малі переміщення по всіх шести ступенях свободи апарату, а при наявності течії – одночасно реалізовувати цим же ЕРК компенсацію зовнішніх збурюючих сил, які з'являються на корпусі та на кабель-тросі ПА. Крім цих сил, ЕРК ПА має нейтралізовувати збурюючі сили, які з'являються на рамі ПА в результаті взаємодії ПМ з ПО.

Для просторової стабілізації ПА біля ПО необхідно забезпечити стійкість і керованість по всім шести ступеням свободи ПА в просторі. Тобто, ПА повинен автоматично повертатися у вихідний стан (просторове положення відносно ПО) після виведення її із цього стану під дією зовнішнього збурювання та припинення впливу зовнішнього

збурювання, а також переходити з одного просторового положення до іншого шляхом автоматичної зміни вектора упорів ЕРК.

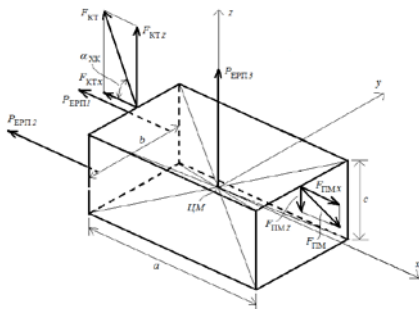
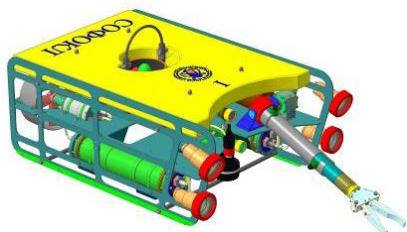
Сформульовані вимоги можуть бути виконані за умови правильного вибору та розподілу динамічних характеристик ЕРК. Швидкодія ЕРП стає основою реалізації необхідної швидкодії реакції ПА по кожній координаті. При цьому необхідно враховувати, що гідродинамічні характеристики ПА по кожній координаті різні,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

Для формування просторового вектора сумарного упору ПА повинен мати не менше шести ЕРП, а їх розташування має забезпечувати формування сумарного вектора упору в повній сфері простору. Однак через ряд функціональних і конструктивних причин складно розмстити шість рушіїв на ПА так, щоб вони контролювали будь-які переміщення апарата в просторі. На практиці для розв'язку цієї задачі необхідна більша кількість рушіїв, що визначає певну надмірність ЕРК. Крім того, необхідно врахувати, що крім контролю переміщення ПА існує вимога до швидкодії всього ЕРК.

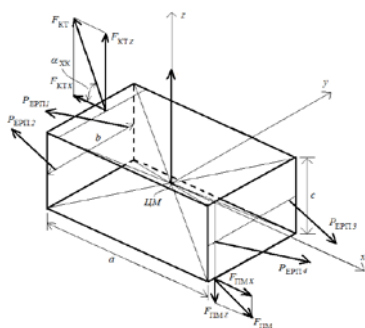
Істотним обмеженням надмірності ЕРК є критерій економічної доцільності. Процес вибору надмірності ЕРК повинен бути компромісним і враховувати задачі функціонування, характеристики підводного середовища, надійність ПА як технічної системи. Вибору достатнього рівня надмірності ЕРК присвячено низку наукових досліджень. Так, у роботі [43] запропоновано узагальнений підхід до вибору структури ЕРК ПА у вигляді опуклих правильних багатогранників: тетраедр, куб, октаедр, додекаедр і т.д.

Проте, сучасна практика побудови ППС провідних країн світу та досвід науково-дослідного інституту підводної техніки НУК свідчать, що на сьогодні одним з найбільш поширених архітектурно-конструктивних типів прив'язних ПА є прямокутний паралелепіпед довжиною a , шириною $b < a$ і висотою $c < a$, рис. 4.20.

Такі ПА мають 3-5 ЕРП, які створюють упори по осях декартової системи координат, зв'язаної з корпусом ПА та з центром у точці центру мас апарату ЦМ (рис. 4.20, *а*), або під деяким кутом до них (рис. 4.20, *б*). Зазвичай, на таких ПА встановлюється один вертикальний ЕРП, який забезпечує рух апарату по вертикалі та компенсує вертикальну складову F_{Kz} ($|\vec{F}_{KT}| = \sqrt{F_{KTx}^2 + F_{Kz}^2}$).



a



б

Рис. 4.20 – Сучасні прив'язні ПА та сили, що прикладаються до їх корпусів: **a** – ПА проекту «Інспектор» з двома маршовими ЕРП (Україна, НУК); **б** – ПА проекту «Falcon» з чотирма ЕРК для маршового і лагового руху (Швеція, “SAAB”).

Практика застосування ПА проекту «Інспектор» на глибинах більше 100 метрів свідчить, що в умовах хитавиці СН та за наявності морської течії застосування ПМ є неефективним, оскільки з-за коливань апарату біля ПО його важко застабілізувати так, щоб точно захопити об'єкт і швидко та надійно затиснути його кінцівкою маніпулятора. Приблизно такі ж обмеження існують і в експлуатаційних документах ПА проекту «Falcon» [44].

Розглянемо можливості удосконалення конструкції ПА такого класу та побудови відповідної САПС з метою розширення діапазону гідрокліматичних умов виконання підводних робіт маніпуляційного типу. Далі розглядаємо типовий розрахунковий варіант просторового

положення ППС, коли СН, ПА та його КТ знаходяться в одній площині – діаметральній площині СН.

Основною робочою гіпотезою такого завдання приймемо твердження, що при роботі на течії ПА завжди розташовують носом проти течії. Це обумовлено тим, що в усталеному (квазістаціонарному) режимі ходовий кінець КТ у потоці води підходить до ПА з корми під деяким кутом $\alpha_{\text{ХК}}$ (див. рис. 4.20). Така просторова орієнтація ПА є найбільш простою в реалізації та стійкою з позицій керування СППС.

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

Як видно з рис. 4.20, зовнішні збурення, що діють на ПА з боку ходового кінця КТ, прикладаються до апарату під кутом $\alpha_{\text{ХК}}$, а їх характер має вид:

$$|\vec{F}_{\text{КТ}}| = F_{\text{КТs}} + F_{\text{КТd}}, \quad (4.27)$$

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

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

При цьому мають місце відношення:

$$F_{\text{КТd}} = F_{\text{КТv}} + F_{\text{КТw}}, \quad (4.28)$$

$$F_{\text{КТv}} = F_{\text{КТs}} + F_{\text{КТv}}; \quad (4.29)$$

$$F_{\text{КТ}} = F_{\text{КТv}} + F_{\text{КТw}}; \quad (4.30)$$

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

У рівняннях (4.28)–(4.30) символи векторів у позначенні сил $F_{\text{КТv}}$ і $F_{\text{КТ}}$ опущені, оскільки їх складові співпадають з результуючими векторами і діють вздовж КТ.

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

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

Оскільки для компенсації сили $F_{\text{КТ}z}$ на всіх типах ПА застосовується базовий РРК у складі РРП горизонтального і вертикального руху, розглянемо шляхи компенсації динамічної складової збурення $F_{\text{КТ}d}$. Така компенсація можлива у наступних варіантах:

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

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

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

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

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

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

Тому у роботі пропонується встановити два СРП:

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

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

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

Узагальнена структура удосконаленої системи автоматичної просторової стабілізації ПА, який оснащений двома СРП для компенсації збурень $\vec{F}_{КТd}$ і $\vec{F}_{ПМz}$, наведена на рис. 4.21.

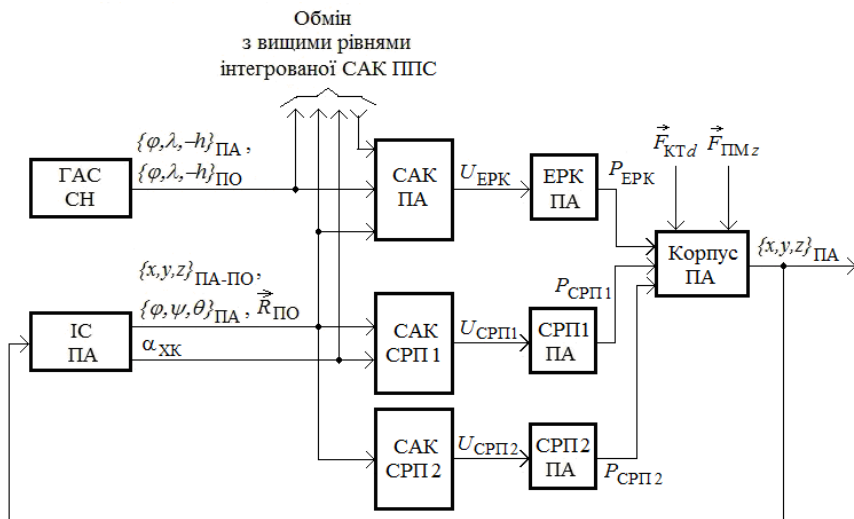


Рис. 4.21 – Узагальнена структура удосконаленої системи автоматичної просторової стабілізації підводного апарату

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

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

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

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

пристрою (ПП), який за допомогою вантажної лебідки (ВЛ) з вантажним тросом (ВТ) забезпечує підйом ПО на палубу СН (рис. 5.1).

Опишемо головні режими роботи СППС для цієї підводної технології:

допошук D та ідентифікація I підводного об'єкту, з яким необхідно виконувати підводні маніпуляції;

підхід P підводного апарату до ПО, просторове позиціонування P_3 і стабілізація C_3 підводного апарату відносно ПО з метою проведення підводних маніпуляцій;

захоплення (зажим) Z підводного об'єкту кінцівкою ПМ з заданим зусиллям F_3 ;

відрив B підводного об'єкту від ґрунту;

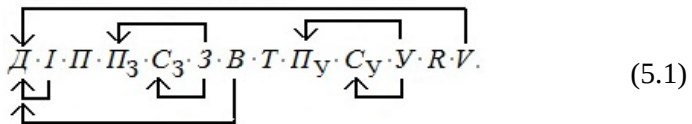
транспортування T підводного об'єкту у задану точку підводного простору до ПП з заданими динамічними характеристиками;

просторове позиціонування підводного апарату P_y біля ПП і його стабілізація C_y відносно ПП з метою забезпечення умов для укладання ПО на платформу з заданими просторовими та динамічними характеристиками;

укладання U підводного об'єкту у заданій точці підводного простору на підводну платформу ПП з заданими динамічними характеристиками та характеристиками просторової орієнтації;

відведення R підводного апарату на відстань, безпечну для роботи ПП, та відеосупровід V роботи ПП.

Таким чином, узагальнений алгоритм автоматичного керування СППС у режимі застосування ПМ можна представити символьною мовою алгоритмів у вигляді:



Зворотні зв'язки алгоритму (5.1) описують реалізації повтору режимів у випадку невиконання режимів ідентифікації, захоплення та укладання ПО.

З позицій динаміки власне ПМ є кінцевим елементом системи «СН – КЛ – КТ – ПА – ПМ». Специфіка практичного виконання підводних робіт такої системи характеризується наступними чинниками:

високими вимогами до точності просторового положення та динаміки руху всіх ланок ПМ, оскільки роботи виконуються, зазвичай, у стиснених умовах підводної навігації при дефіциті операційного часу; візуальною оцінкою оператором взаємного положення кінцівки (захвату) ПМ і ПО на основі встановлених на ПА і маніпуляторі відеокамер, які одночасно є одним з головних джерел інформації та похибок керування;

необхідністю адаптації механічного впливу захвату ПМ (сил і моментів, які розвиваються захватом) до фізичних характеристик ПО з метою збереження його цілісності в результаті виконання підводних маніпуляцій;

наявністю зовнішніх збурень (підводна течія, змінна прозорість води), які активно впливають на ланки ПМ, впливають на якість відеозображення робочої зони та вимагають застосування сучасних систем керування ПМ;

рухливість точки закріплення ПМ, обумовлена тим, що ПА як носій ПМ має нестационарні просторові характеристики через дію течії на корпус апарата та механічних впливів від кабель-тросу через вплив епюри течії в районі підводних робіт і хитавиці СН.

Функціонування СППС протікає в умовах нестационарності власних параметрів $P_{ПА}$ і невизначеності характеристик зовнішнього середовища P_C :

зміни маси $m_{ПА}$, метацентричної висоти h та гідродинамічних характеристик ПА (коефіцієнтів гідродинамічного опору $C_{хПА}$, $C_{уПА}$, $C_{zПА}$), обумовленої роботою ПМ;

невизначеності швидкості та напрямку течії на поверхні моря $\vec{v}_П$, яка впливає на просторове положення СН;

невизначеності вітрових $\vec{v}_В$ та хвильових збурень $\vec{v}_Х$, які діють на корпус СН і через КТ передаються на корпус ПА;

невизначеності епюри швидкості потоку води по глибині $\vec{v}_Т$, що набігає на елементи СППС, та питомої густини води ρ , які обумовлюють невизначеності сил гідродинамічної природи $\vec{F}_{ПА}$, $\vec{F}_{КТ}$, що виникають на КТ і корпусі ПА.

Таким чином, функціонування СППС з ПМ характеризується наступними двома множинами невизначеностей:

$$P_{\text{ПА}} = [m_{\text{ПА}}, h, C_{x\text{ПА}}, C_{y\text{ПА}}, C_{z\text{ПА}}]; \quad (5.2)$$

$$P_{\text{С}} = [\vec{v}_{\text{П}}, \vec{v}_{\text{В}}, \vec{v}_{\text{Х}}, \vec{F}_{\text{ПА}}, \vec{F}_{\text{КТ}}], \quad (5.3)$$

які суттєво ускладнюють процес синтезу високоефективних систем керування СППС.

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

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

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

автоматизованого або автоматичного приводу кінцівки (захвату) ПМ для надійного захоплення ПО та перенесення його в задану точку підводного простору.

Підсистема керування СН тут не розглядається, оскільки судно стоїть на якорі.

Структурно інтегровану САК комплексом «КЛ – ПА – ПМ» пропонується будувати по ієрархічному принципу як багаторівневу керуючу структуру, що містить наступні рівні:

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

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

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

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

стратегічний – аналізує поставлене завдання, розробляє план функціонування комплексу «КЛ – ПА – ПМ» для його виконання, формує траєкторії пошуку заданого ПО та реалізує алгоритми його ідентифікації, формує алгоритми позиціонування ПА біля ПО, виведення затискача ПМ на позицію надійного захоплення об'єкта та алгоритми роботи затискача, формує траєкторію транспортування захопленого об'єкта по оптимальній траєкторії до заданої точки підводного простору.

Аналіз принципів побудови систем автоматики рухомих об'єктів, які функціонують в умовах невизначеності, свідчить, що для їхньої ефективної роботи доцільно застосовувати елементи штучного інтелекту – нечітку логіку та штучні нейронні мережі. Тому в пропонованій інтегрованій САК комплексом «КЛ – ПА – ПМ» передбачається застосування зазначених підходів як на стратегічному рівні керування, так і на виконавчому рівні для безпосереднього керування механізмами ПА і маніпулятора, рис. 5.2.

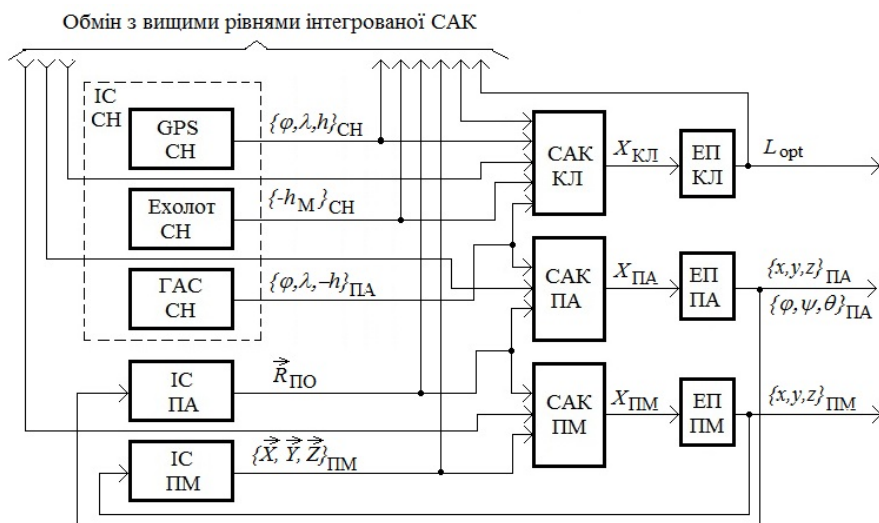


Рис. 5.2 – Узагальнена структура виконавчого рівня інтегрованої САК

На виконавчому рівні функціонують три САК електроприводами КЛ, рушійним комплексом ПА та окремих ланок ПМ. Перша САК на основі GPS-інформації про географічні координати СН (широта φ , довгота λ і висота h над рівнем моря), даних про глибину моря $-h_M$ та про географічні координати ПА (широта φ , довгота λ і глибина $-h$ за даними гідроакустичної системи (ГАС) СН і сенсора глибини ПА) контролює взаємне положення СН і ПА в умовах хитавиці та забезпечує оптимальну довжину КТ L_{opt} та динамічне попускання-вибирання, зменшуючи, таким чином, силовий вплив КТ на ПА.

Друга САК функціонує на основі даних від інтелектуальних сенсорів (ІС) про просторові координати ПА $\{x, y, z\}_{ПА}$ і його кути курсу, крену та диферента $\{\varphi, \psi, \theta\}_{ПА}$ в декартовій системі координат, з урахуванням динаміки руху ПА, забезпечує його стабілізацію відносно підводного об'єкта, відслідковуючи радіус-вектор $\vec{R}_{ПО}$ (дистанцію до підводного об'єкта).

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

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

Інтелектуальні сенсори (ІС) ПА та ПМ являють собою сукупність датчиків механічних, електричних та гідромеханічних величин, схем перетворення сигналів і мікропроцесорної техніки, які забезпечують первинну обробку, накопичення та узагальнення інформації про поточні і прогнозовані властивості об'єктів керування з можливістю самоконтролю технічного стану та широкі комунікаційні властивості.

Застосування інтегрованої САК СППС з націпним обладнанням, яка забезпечує мінімізацію впливу хитавиці СН і просторову стабілізацію ПА як платформи маніпулятора забезпечить підвищену точність підводних робіт в умовах дії зовнішніх збурень та нестационарності власних параметрів підводного апарата [45].

5.2 Система автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи

При експлуатації СППС на малих глибинах (до 100 метрів), зазвичай, використовують морські водолазні судна з постановкою їх на якір [46]. 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 поздовжніх гармонійних зусиль від хитавиці СН на ходовому кінці КТ додається зміна напрямку вектора сили його стаціонарного обтікання, породжена зміною проторового положення КТ з-за 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'єкту та застосування підводного маніпулятора необхідно регулювати довжину КТ таким чином, щоб збурення від переміщення заякореного судна та від хитавиці, які передаються по КТ на підводний апарат, були мінімальними. Тому важливо створити систему автоматичного керування (САК) кабельною лебідкою (КЛ) СППС в умовах переміщень судна-носія та його хитавиці.

Розглянемо основні режими роботи системи «СН – СППС» для випадку, коли судно не має динамічного позиціонування. У якості зовнішніх збурювань будемо розглядати тільки вітровий вплив на СН (розу вітрів акваторії $\vec{V}$) та підводну течію $\vec{V}_{\text{пт}}$, 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 (РРК) ПА [11].

З досвіду авторів, система «СН – СППС» може функціонувати у трьох основних режимах (рис. 5.3):

- судно-носії стоїть на якорі (Я) над робочою зоною (РЗ) донної поверхні, де знаходиться ПО, і під дією вітру виконує повільні переміщення по траєкторії $S_{\text{я}}$ у радіусі дії якірного ланцюга (ЯЛ), що викликає переміщення корінного кінця КТ ППС; підводний апарат при цьому, як і в наступних режимах, позиціонується біля ПО (рис. 5.3, *а*);

- судно-носії лежить у дрейфі та піддається впливу вітру, з-за чого повільно зміщується (зазвичай, лінійно, по траєкторії $S_{\text{д}}$) над РЗ донної поверхні, де знаходиться ПО (рис. 5.3, *б*);

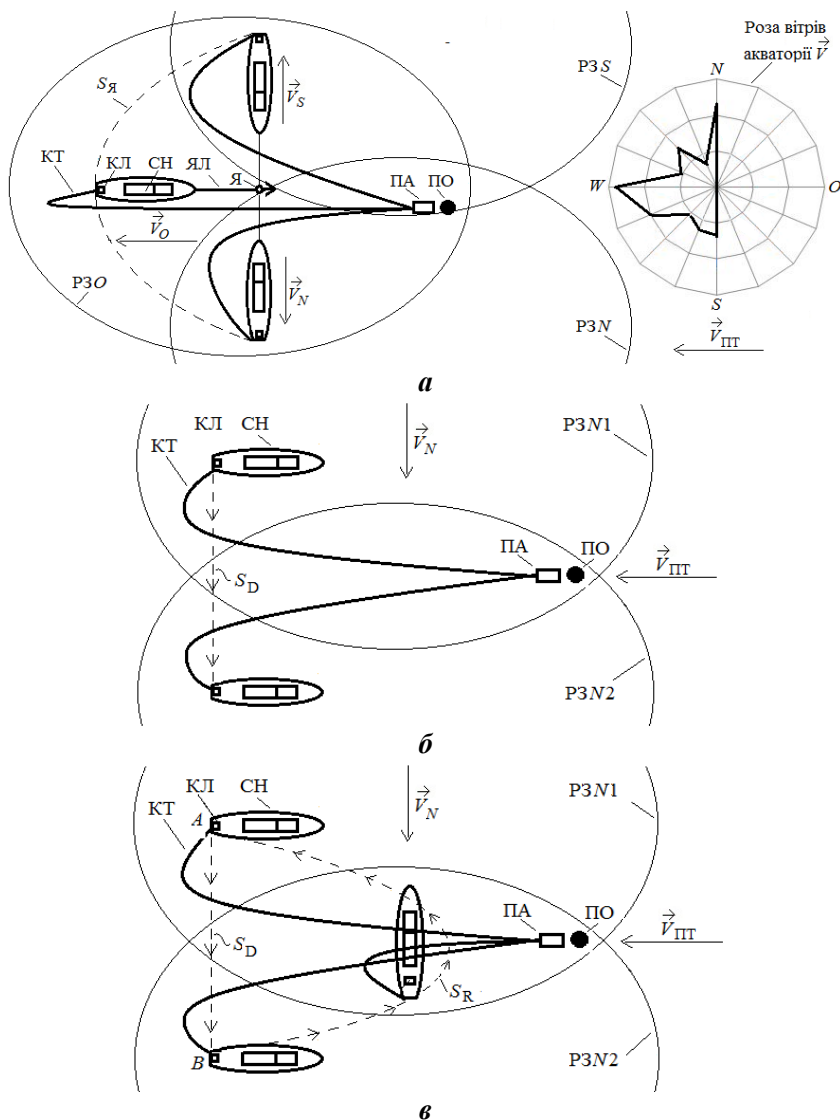


Рис. 5.3 – Основні режими роботи системи «судно-носії – прив'язна підводна система»: P3S, P3O, P3N – робочі зони ППС при дії вітрів, відповідно, з півдня, сходу і півночі; P3N1, P3N2 – робочі зони початкової і кінцевої точок дрейфу СН.

– 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_R (рис. 5.3, *в*); при цьому ПА постійно позиціонується біля ПО;

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

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

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

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

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

мінімізація статичної складової $\vec{F}_{KTS}$ сили $\vec{F}_{KT}$ на ходовому кінці КТ, обумовленої його гідродинамічним обтіканням, для всього діапазону можливих переміщень СН під дією рози вітрів $\vec{V}$, шляхом встановлення за допомогою КЛ оптимальної довжини $L_{KT_{opt}}$ попущеної частини КТ для кожної точки траєкторій S_A , S_D та S_R (стаціонарна постановка задачі обтікання КТ потоком води);

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

При цьому, мають місце наступні залежності:

$$\vec{F}_{KT} = \vec{F}_{KTS} + \vec{F}_{KTd}; \quad (5.4)$$

$$\vec{F}_{KTS} = f(\vec{V}_{ПТ}; d_{KT}; \vec{L}_{KT_{opt}}; C_{KT}); \quad (5.5)$$

$$\vec{F}_{KTd} = \vec{F}_{KTV} + \vec{F}_{KTW}, \quad (5.6)$$

де $d_{\text{КТ}}$ – діаметр КТ; $\vec{L}_{\text{КТопт}}$ – просторова форма КТ нульової плавучості, керована довжина попущеної частини якого $L_{\text{КТопт}}$ у потоці води залежить від взаємного розташування СН і ПА та забезпечує мінімально можливе значення сили гідродинамічного опору КТ $\vec{F}_{\text{КТ}}$; $C_{\text{КТ}}\{C_{\text{КТн}}, C_{\text{КТб}}, C_{\text{КТт}}\}$ – множина коефіцієнтів гідродинамічного опору КТ – відповідно, нормальної n , дотичної t та бокової b складових гідродинамічних сил.

Розглянемо питання синтезу САК кабельною лебідкою у першій постановці, виходячи з відомого твердження [29], що для кожної пари точок $\{\varphi; \lambda; h\}_{\text{СН}}$ 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 $L_{\text{КТопт}}$ КТ нульової плавучості, при якій сили гідродинамічного опору КТ мінімальні. Задача САК полягає в обчисленні значення $L_{\text{КТопт}}$ для кожного поточного положення ППС у просторі та генерації керуючого впливу на виконавчий привод КЛ для фактичного встановлення обчисленого значення $L_{\text{КТопт}}$.

Поставлена задача є подальшим розвитком викладеного в [38] «Режиму мінімізації гідродинамічного опору КТ» з метою його інсталяції до задачі мінімізації статичної складової $\vec{F}_{\text{КТс}}$ 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. 5.4 [47].

Дамо опис блоків алгоритму у порядку їх функціонування:

Б1 – блок введення інформації про ПО (географічні координати $\{\varphi; \lambda; h\}_{\text{ПО}}$), інформації про поточні та 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 $\vec{V}_{\text{ПТ}}$, яка діятиме на КТ і ПА;

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

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

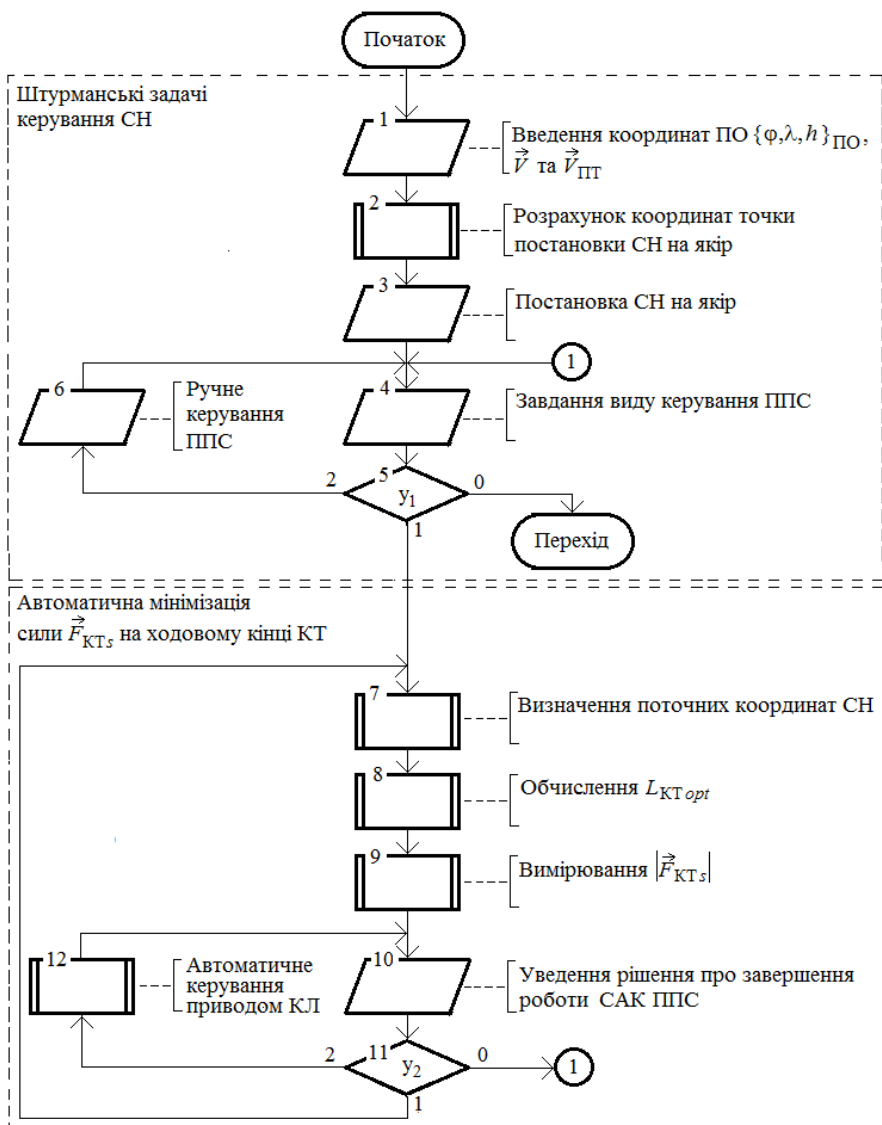


Рис. 5.4 – Блок-схема узагальненого алгоритму роботи системи керування ППС у режимі якорної стоянки

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

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

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

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

$y_1=2$ при реалізації ручного керування ППС;

Б6 – блок ручного керування прив'язною підводною системою з метою виведення підводного апарата до ПО та утримання його у цій позиції до завдання іншого виду керування ППС (блок Б4); Б7 – блок визначення поточних координат СН $\{\varphi; \lambda; h\}_{\text{СН}}$ за допомогою власної бортової (супутникової) системи навігації;

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

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

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

Б11 – умовний перехід, який приймає наступні значення:

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

$y_2=1$ при виконанні умови $(L_{\text{КТopt}} - e) \leq L_{\text{КТi}} \leq (L_{\text{КТopt}} + e)$, де e – відносна похибка встановлення довжини КТ (задається оператором);

$L_{\text{КТi}}$ – поточне значення попущеної довжини КТ; у цьому випадку зміна довжини $L_{\text{КТi}}$ не виконується, а підводний апарат працює в умовах мінімально можливої сили від КТ $\vec{F}_{\text{КТs}}$;

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

Б12 – блок автоматичного керування приводом КЛ для виконання умови $y_2=2$.

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

Реалізацію описаного алгоритму у частині автоматичної мінімізації сили $\vec{F}_{\text{КТs}}$ пропонується виконувати у вигляді САК судновою кабельною лебідкою ППС, у якій для обчислення $L_{\text{КТopt}}$ використовується спеціалізоване програмне забезпечення “QUASTEC” [26].

Структурна схема САК наведена на рис. 5.5.

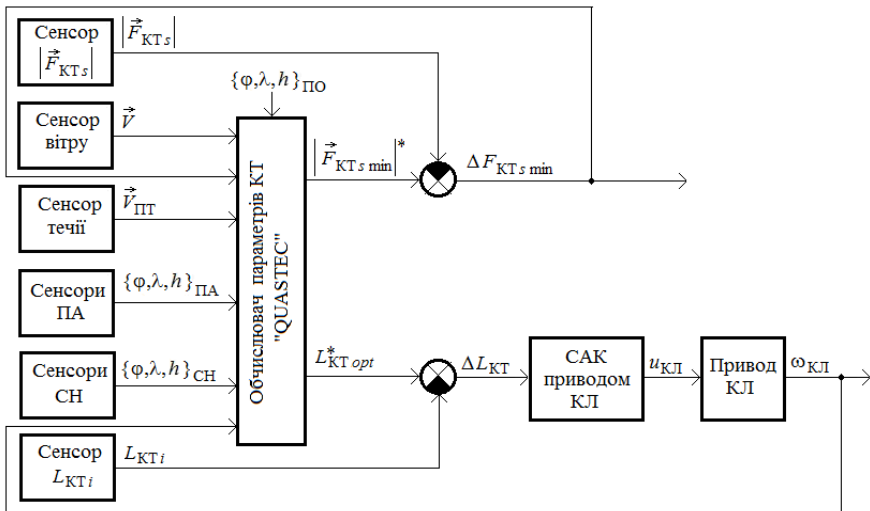


Рис. 5.5 – Структура САК мінімізації сили $\vec{F}_{\text{КТs}}$ на ходовому кінці КТ

На рис. 5.5 позначено: $\left| \vec{F}_{\text{КТs min}} \right|^*$ – обчислений програмою “QUASTEC” модуль статичної складової $\vec{F}_{\text{КТs}}$, мінімально можливий для поточного взаємного розташування СН і ПА; $L_{\text{КТopt}}^*$ – обчислена програмою “QUASTEC” оптимальна довжина попущеної частини КТ, яка забезпечує мінімально можливе значення статичної складової $\vec{F}_{\text{КТs}}$ для поточного взаємного розташування СН і ПА; $\omega_{\text{КЛ}}$, $\omega_{\text{КЛ}}$ – відповідно, сигнал керування і кутова частота обертання барабану КЛ.

Як видно з рис. 5.5, запропонована САК має два контури зворотнього зв'язку: контур коригування параметрів моделі КТ в обчислювачі “QUASTEC” та контур керування приводом КЛ, який, власне, і забезпечує оптимальну довжину попущеної частини КТ.

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

Другий контур у залежності від знаку похибки $\Delta L_{\text{КТ}}$ між фактичною довжиною попущеної частини КТ та обчисленою за допомогою програми “QUASTEC” оптимальною довжиною попущеної частини КТ генерує сигнал керування приводом КЛ і, таким чином, забезпечує необхідну кутову швидкість обертання $\omega_{\text{КЛ}}$ приводу лебідки. При цьому фактичне значення поточної довжини попущеної частини КТ вимірюється відповідним сенсором $L_{\text{КТi}}$ (рис. 5.5) або обчислюється за залежністю $L_{\text{КТi}} = R \int \omega_{\text{КЛ}} dt$, де R – діаметр барабану КЛ, а напрямок обертання приводу КЛ визначається наступними умовами:

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

де ω_{H} – номінальне значення кутової частоти обертання барабана КЛ.

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

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

5.3 Оцінка рівня автоматизації СППС з маніпуляторами

Автоматизація керування СППС є важливим напрямком підвищення їх ефективності при виконанні підводних робіт як в мілкому морі, так і на великих глибинах, оскільки вивільняє операторів ПА від тривалої та напруженої роботи з ручного керування. Крім того, при роботі в умовах невизначеностей зовнішніх збурень та нестаціонарності власних параметрів СППС виключення людини-оператора з контуру керування (звичайно, при збереженні за ним функцій контролю виконання місії) підвищує точність керування у нормальних режимах та виключає «людський фактор» при аварійних режимах експлуатації підводної системи.

Сформулюємо наступні нові задачі автоматизації керування, розв'язок яких має суттєво скоротити час застосування СППС у цілому та підвищити якість його вихідної продукції:

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

- автоматизація керування комплексом обладнання СППС для забезпечення ефективної роботи пошукового фотовідеокomплексу ПА в умовах дії зовнішніх збурень;

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

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

автоматизація генерування звітної документації про результати виконання підводної місії.

Для обґрунтування необхідних обсягів автоматизації СППС взагалі та, зокрема, «інтелектуалізації» керування ними, розглянемо основні технології та режими роботи таких систем. Аналіз досвіду зарубіжних фірм та власний досвід НУК з експлуатації СППС свідчить, що типовими технологіями їх застосування є: робота з берегової лінії (причалу, греблі, необладнаного берега); робота з судна-носія (СН), який стоїть на якорі; робота з судна-носія (СН), який лежить у дрейфі; робота з судна-носія (СН), який рухається синхронно з ПА заданим курсом чи траєкторією зі швидкістю V_3 на заданій дистанції X_3 від СН.

Далі розглянемо схеми застосування СППС для вказаних технологій, які наведено на рис. 5.6.

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

перевірка працездатності СППС перед спуском ПА на воду R_T ;

спуск ПА на воду та перевірка керуваності на поверхні моря R_H ;

занурення ПА на задану глибину по заданій чи довільній траєкторії R_Z ;

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

просторовий рух ПА по заданій траєкторії R_W ;

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

робота зовнішнього начіпного обладнання (НО) ПА R_M ;

робота бортового пошуково-вимірювального обладнання ПА R_B ;

аварійний режим роботи СППС R_A (узагальнено);

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

підйом ПА на берег чи на борт СН R_O ;

перевірка працездатності СППС після виконання місії (підводно-го завдання) R_C .

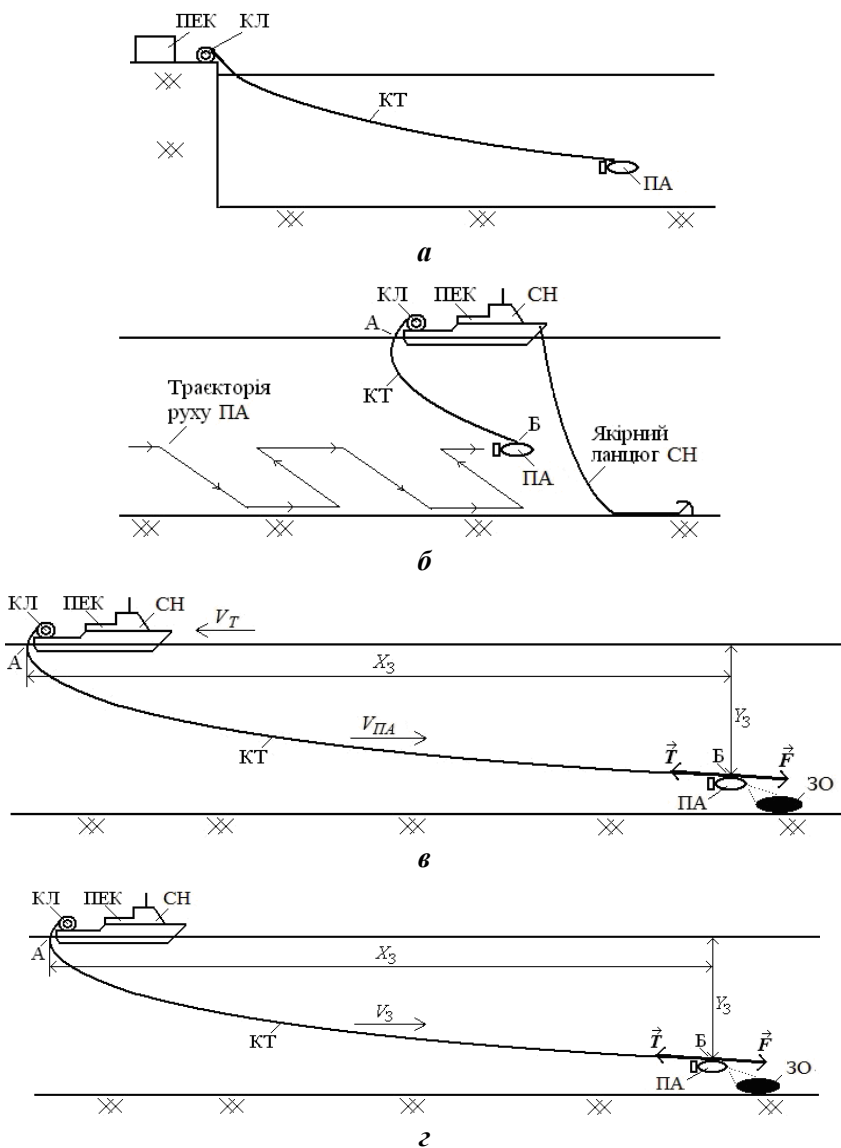


Рис.5.6 – Типові схеми застосування СППС:
a – з берегової лінії; **б** – на якірній стоянці СН;
в – з дрейфуючого СН; **г** – при синхронному русі СН і ПА.

Таким чином, у загальному випадку маємо наступну множину режимів роботи СППС [48]:

$$R = \{R_T; R_H; R_Z; R_L; R_W; R_S; R_M; R_B; R_A; R_R; R_O; R_C\}. \quad (5.7)$$

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

- автоматизація діагностування технічного стану обладнання СППС перед місією, під час її виконання та після закінчення A_D ;
- автоматизація режимів руху ПА A_R ;
- автоматизація режимів роботи зовнішнього начіпного обладнання ПА A_M ;
- автоматизація керування інформаційними потоками СППС A_I ;
- автоматизація керування СППС в аварійному режимі A_A .

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

$$A_{СППС} = \{A_D; A_R; A_M; A_I; A_A\}. \quad (5.8)$$

У свою чергу, рівень автоматизації задач для кожної з наведених у (2) підмножин визначається повнотою охоплення режимів роботи і функцій складових СППС. Наприклад, автоматизація діагностування технічного стану обладнання СППС A_D , у загальному випадку, буде визначатись множиною

$$A_D = \{A_{DT}; A_{DH}; A_{DZ}; A_{DL}; A_{DW}; A_{DS}; A_{DM}; A_{DB}; A_{DA}; A_{DR}; A_{DO}; A_{DC}\}, \quad (5.9)$$

де індекси “Т”, ... “С” відповідають використаним у (5.7).

Множина автоматизації режимів руху ПА A_R відображає ступінь автоматизації:

- режиму R_Z занурення ПА і виходу на стартову точку місії;
- режиму R_L лінійного руху ПА зі стабілізацією параметрів руху;
- режиму R_W просторового руху ПА по заданій траєкторії;
- режиму R_S стабілізації ПА у просторі;
- режиму R_N повернення ПА у точку підйому на СН;

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

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

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

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

$$A_R = \{A_{RZ}; A_{RL}; A_{RW}; A_{RS}; A_{RN}; A_{RY}; A_{RG1}; A_{RG2}\}. \quad (5.10)$$

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

$$A_M = \{A_{RM}; A_{RU}\}, \quad (5.11)$$

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

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

Досвід авторів у застосуванні СППС свідчить, що важливою складовою автоматизації такого виду морської техніки є автоматизація керування інформаційними потоками СППС A_I . До головних складових цього процесу належать:

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

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

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

автоматична генерація звіту про виконання місії A_{RP} .

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

$$A_I = \{A_{RK}; A_{RF}; A_{RQ}; A_{RP}\}. \quad (5.12)$$

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

У цьому випадку рівень автоматизації керування визначиться відношенням:

$$A_A = \{A_{AD}; A_{AC}; A_{AE}\}. \quad (5.13)$$

Відношення (5.7)-(5.13) структурують постановку задачі автоматизації СППС у цілому та оцінку рівня їх автоматизації, яка необхідна для обґрунтованого призначення проектно-конструкторських рішень на ранніх етапах створення СППС.

Кількісні показники рівнів автоматизації можуть бути отримані відомими методами експертного оцінювання [49] або прямим обчисленням частки режимів СППС, які автоматизовані. Наприклад, для режиму R_L лінійного руху ПА зі стабілізацією параметрів руху можна сформулювати наступні варіанти стабілізованого руху:

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

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

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

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

Рівень автоматизації режимів руху ПА A_R , згідно відношенню (5.10), може бути обчислений як добуток:

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

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

У цілому, рівень автоматизації СППС ят об'єкта морської техніки може бути обчислено, згідно (5.8), як добуток:

$$A_{СППС} = A_D \cdot A_R \cdot A_M \cdot A_I \cdot A_A.$$

Таким чином, відношення (5.71)-(5.13) дають змогу збудувати систему кількісної оцінки рівня автоматизації СППС, що створює теоретичне підґрунтя для прийняття технічних рішень на етапі проектування таких систем та надає можливість їх об'єктивного порівняння між собою з метою визначення ринкових переваг.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Принципы построения технических средств исследования океана [Текст] / АН СССР, Ин-т океанологии им П. П. Ширшова ; ред. В. С. Ястребов // – М. : Наука, 1982. – 328 с.

2. **Блинцов, В. С.** Проектирование самоходных привязных подводных систем. [Текст] / В. С. Блинцов, В. Э. Магула // – К.: Наукова думка, 1997. – 140 с.

3. **Рижков, С. С.** Створення універсальних транспортних суден і засобів океанотехніки: Монографія [Текст] / С. С. Рижков, В. С. Блінцов, Г. В. Єгоров, Ю. Д. Жуков, В. Ф. Квасницький, К. В. Кошкін, І. В. Кривцун, В. О. Некрасов, В. В. Севрюков, Ю. В. Солоніченко; за ред. С. С. Рижкова // – Миколаїв: Видавництво НУК, 2011. – 340 с.

4. Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. [Текст] – М. : Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. – 780 с.

5. **Ракитин, И. Я.** Подводные робототехнические системы для исследований океана [Текст] / И. Я. Ркитин // - М.: НИП "Море", 2002. – 191 с.

6. **Шостак, В. П.** Подводные аппараты-роботы и их манипуляторы [Текст] / В. П. Шостак // - Чикаго: Мегатрон, 2011. – 134 с.

7. **Molchan, M.** The Role of Micro-ROVs in Maritime Safety and Security. [Text] / M. Molchan // - Mochlan Marine Sciences, 2005. – 44 p.

8. Remotely Operated Vehicles of the World [Text] – Oilfield Publications Limited, 1996. – 273 P.

9. **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.

10. **Moore, S.** Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication [Text] / Steven W. Moore, Harry Bohm, Vickie Jensen // - **Publisher:** Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010. – 770 p.

11. **Блинцов, В. С.** Привязные подводные системы [Текст] / В. С. Блинцов // – К.: Наукова думка, 1998. – 232 с.

12. **Блінцов, О. В.** Сучасні задачі проектування прив'язних підводних систем [Текст] / О. В. Блінцов // Технологический аудит и резервы производства. – Харьков : ЧП «Технологический Центр», 2013. № 5/5 (13). – С. 38-40.

13. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия [Текст] / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана // – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – 429 с.

14. **Киселев, Л. В.** Навигация, управление и ориентирование в подводном пространстве [Текст] / Л. В. Киселев, Ю. В. Ваулин, А. В. Инзарцев, Ю. В. Матвиенко // - Мехатроника, автоматизация, управление, 2004. – № 11. – С. 35-42.

15. **Несенюк, Л. П.** Бесплатформенные инерциальные системы. Обзор состояния и перспектив развития. Гироскопия и навигация. [Текст] / Л. П. Несенюк // – СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ "Электроприбор", 2002. – № 1 (36). – С.13-21.

16. **Бугаенко, Б. А.** Динамика судовых спускоподъемных операций [Текст] / Б. А. Бугаенко // – К.: Наукова думка, 2004. – 320 с.

17. **Лукомский, Ю. А.** Системы управления морскими подвижными объектами: Учебник. [Текст] / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов // – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.

18. **Давидан, И. Н.** Математическая модель и метод оперативных расчетов ветрового волнения на морях СССР [Текст] / И. Н. Давидан, И. В. Лавренов, Т. А. Пасечник и др. // - Метеорология и гидрология, 1988. – № 11. – С. 81-90.

19. **Егоров, В. И.** Подводные буксируемые системы: Учебное пособие [Текст] / В. И. Егоров // – Л.: Судостроение, 1981. – 304 с.

20. **Девнин, С. И.** Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: Справочник. [Текст] / С. И. Девнин // – Л.: Судостроение, 1983. – 320 с.

21. **Лукомский, Ю. А.** Навигация и управление движением судов. Учебник. [Текст] / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов // – СПб.: "Элмор", 2002. – 360 с.

22. **Бронштейн, И. Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев; 13-е изд., исправленное // – М.: Наука, Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1986. – 544 с.

23. **Пантов, Е. Н.** Основы теории движения подводных аппаратов [Текст] / Е. Н. Пантов, Н. Н. Махин, Б. Б. Шереметов // – Л.: Судостроение, 1973. – 216 с.

24. Справочник по теории корабля: В 3-х т. [Текст] / Под ред. Я.И. Войткунского // – Л.: Судостроение, 1985. – Т.1. – 768 с.

25. **Ставинський, А. А.** Удосконалення математичної моделі самохідного підводного апарата для дослідження просторового руху [Текст] / А. А. Ставинський, С. В. Блінцов // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2004. – № 3 (396). – С. 161-166.

26. **Блінцов, О. В.** Підвищення ефективності розрахунків характеристик кабель-троса прив'язної підводної системи як об'єкта керування [Текст] / О. В. Блінцов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2008. – Вып. 2/2 (32). – С. 36-40.

27. **Блінцов, О. В.** Синтез інверсної математичної моделі кабель-троса як складової системи керування рухом прив'язного підводного апарата. «Комп'ютерні науки та інформаційні технології»: Матеріали III-ї Міжнародної конференції. [Текст] / О. В. Блінцов // – Львів: ПП «Вежа і Ко», 2008. – С. 357-359.

28. **Блінцов, О. В.** Автоматизація керування електрорушійною системою прив'язного підводного робота на основі штучної нейронної мережі [Текст] / О. В. Блінцов // Техн. електродинаміка. Тем. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. Ч. 7. – К.: ІЕД НАН України, 2008. – С. 54-57.

29. **Блінцов, О. В.** Синтез системи автоматичного керування упорами рушіїв прив'язного підводного апарата в режимі квазістаціонарного просторового руху [Текст] / О. В. Блінцов // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008. – № 1 (418). – С. 135-141.

30. **Блінцов, О. В.** Забезпечення програмне «Розрахунок гідродинамічних параметрів кабель-троса»: Опис застосування [Текст] / О. В. Блінцов // СТП 2066753-05.16-11. – Миколаїв: НУК, 2011. – 12 с.

31. **Блінцов, О. В.** Математична модель динаміки просторового руху кабель-троса прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блінцов // «Збірник наукових праць НУК». – Миколаїв: НУК, 2012. – №5-6(445). – С. 61-63.

32. **Блінцов, О. В.** Моделюючий комплекс для дослідження динаміки руху прив'язної підводної системи «судно-носії – підводний апарат – маніпулятор» [Електронний ресурс] / О. В. Блінцов, В. А. Надточій // Електронне видання «Вісник НУК». – Миколаїв: НУК, 2012. – №3. Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua/ru/publication?publicationId=19584>

33. **Блинцов, А. В.** Система автоматического управления специализированным морским комплексом с буксируемым подводным аппаратом [Текст] / А. В. Блинцов, Ч. Т. Дык // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2013. – Вып. 5/4 (65). – С. 23-27.

34. **Попович, М. Г.** Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посібник [Текст] / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін.; За ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського // – К.: Либідь, 2005. – 680 с.

35. **Бобриков, С. А.** Компенсация возмущений с использованием модели системы автоматического управления для измерения возмущений. [Текст] / С. А. Бобриков, Е. Д. Пичугин // - Электротехнические и компьютерные системы, 2011. – № 4 (80). – С. 15-18.

36. **Денисенко, В. В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст] / В. В. Денисенко // – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.

37. **Блінцов, О. В.** Концепція створення багатоцільових прив'язних підводних систем з централізованим інформаційним обміном [Текст] / О. В. Блінцов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2013. – Вып. 6/9 (66). – С. 31-35.

38. **Павлов, Г. В.** Синтез нейромережных моделей электрорушійного пристрою для задач керування квазістаціонарним рухом прив'язного підводного апарата [Текст] / Г. В. Павлов // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008. – № 5 (422). – С. 81-86.

39. **Герман-Галкин, С. Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [Текст] / С. Г. Герман-Галкин // – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

40. **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление. Пер. с англ. [Текст] / А. Пегат // – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.

41. **Гостев, В. И.** Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления [Текст] / В. И. Гостев // – К.: "Радиоаматор", 2008. – 972 с.

42. **Блінцов, В. С.** Сучасні задачі автоматизації керування СППС з начіпним обладнанням [Текст] / В. С. Блінцов, В. А. Надточій // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2012. – №2 – С. 79-83.

43. **Ястребов, В. С.** Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований. Справочник [Текст] / В. С. Ястребов, Г. П. Соболев, А. В. Смирнов и др.; под общ.ред. В.С. Ястребова // - Л.: Судостроение, 1981. - 304 с.

44. Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат «Фалкон». Инструкция по эксплуатации дополнительного оборудования. [Текст] / – М.: «Тетис-Про», 2009. – 58 с.

45. **Блінцов, В. С.** Сучасні задачі автоматизації керування самохідними прив'язними підводними системами з начіпним обладнанням. [Текст] / В. С. Блінцов, В. А. Надточій // «Збірник наукових праць НУК». – Миколаїв: НУК, 2012. – №2. – С. 79-83.

46. **Егоров, Г.В.** Концепция малых судов обеспечения на примере морских водолазных судов нового поколения [Текст] / Г. В. Егоров, В. И. Тонюк // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 – С. 104-115.

47. **Блінцов, О. В.** Система автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блінцов, В. А. Надточій // «Збірник наукових праць НУК». – Миколаїв: НУК, 2013. – №1. – С. 77-82.

48. **Блінцов, О. В.** Оцінка рівня автоматизації самохідних прив'язних підводних систем з маніпуляторами [Текст] / О. В. Блінцов, В. А. Надточій // «Збірник наукових праць НУК». – Миколаїв: НУК, 2012. – №3-4. – С. 66-70.

49. **Гнатієнко, Г. М.** Експертні технології прийняття рішень : монографія [Текст] / Г. М. Гнатієнко, В. Є. Снитюк // – К. : McLaut, 2008. – 444 с.

ЗМІСТ

Вступ	3
Перелік скорочень.....	4
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СППС.....	5
1.1 Класифікація та коротка характеристика СППС як об'єкта морської техніки.....	5
1.2 Типові конструкції ПА	10
1.3 Кабель-троси СППС	12
1.4 Кабельні лебідки СППС	18
1.5 Особливості керування СППС	20
2 САМОХІДНА ПРИВ'ЯЗНА ПІДВОДНА СИСТЕМА ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ.....	22
2.1 Базові режими експлуатації та задачі керування СППС	22
2.2 Характеристика зовнішніх збурень, які діють на СППС	25
2.3 Системи координат, що використовуються в задачах керування СППС.....	27
2.4 Кінематичні параметри руху ПА.....	30
2.5 Рівняння зв'язку між різними системами координат	32
2.6 Виконавчі механізми	34
2.7 Сенсори СППС	36
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРОВАНОВОГО ПРОЦЕСУ ПРОСТОРОВОГО РУХУ СППС.....	40
3.1 Структура математичної моделі ПА	40
3.2 Математична модель корпусу ПА.....	42
3.3 Гідродинамічні сили та моменти.....	46
3.4 Сили і моменти ваги та плавучості ПА	47
3.5 Математична модель рушійного комплексу ПА.....	48
3.6 Математична модель рушійного пристрою ПА.....	51
3.7 Математична модель кабель-троса	54
3.8 Математична модель кабельної лебідки.....	57
4 АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПІДВОДНОГО АППАРАТА	60
4.1 Математична модель маршового руху ПА.....	60
4.2 Розробка структури САК швидкістю маршового руху ПА	62
4.3 Розробка структури регулятора для об'єкта керування першого порядку.....	68

4.4 Компенсація невизначених зовнішніх збурень	72
4.5 Усунення нелінійності типу «інтегральне насичення»	74
4.6 Налаштування регулятора швидкості обертання гребного гвинта	76
4.7 Налаштування регулятора швидкості руху корпусу ПА	78
4.8 Синтез інверсної моделі гребного гвинта	79
4.9 Дослідження САК маршовим рухом ПА	80
4.10 Синтез нечіткого регулятора курсу ПА	84
4.11 Просторова стабілізація ПА з маніпулятором	88
5 АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ СППС З НАЧІПНИМ ОБЛАДНАННЯМ	96
5.1 Сучасні задачі автоматизації керування самохідними прив'язними підводними системами з начіпним обладнанням	96
5.2 Система автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи	102
5.3 Оцінка рівня автоматизації СППС з маніпуляторами	110
Перелік посилань	117

Навчальний посібник

**Блінцов Олександр Володимирович,
Надточій Віктор Анатолійович**

**АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ
ОДНОЛАНКОВИМИ САМОХІДНИМИ
ПРИВ'ЯЗНИМИ ПІДВОДНИМИ СИСТЕМАМИ**

Комп'ютерний набір: Трибулькевич В. В.
Макетування Мазанко В. Г.

Підписано до друку 19.12.2014 р. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 7,3. Тираж 350. Зам. № 293.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.