

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Мілководні акваторії з глибинами до 50-60 метрів складають переважну частину територіальних вод України. Ще менші глибини мають рекомендовані прибережні водні транспортні шляхи, акваторії морських та річкових портів. На цих акваторіях ведеться активна виробнича діяльність вітчизняних організацій морегосподарського комплексу, проводяться гідрографічні та природоохоронні дослідження, виконується пошук та нейтралізація підводних потенційно небезпечних об'єктів Державною службою надзвичайних ситуацій України, проводяться морські операції Держприкордонслужби України. Крім того, необхідність протистояння сучасним воєнним загрозам державі з морського напрямку вимагає виконання обстеження мілководних акваторій в рамках виконання протимінних та антитерористичних операцій.

Безпечне використання вказаних акваторій вимагає створення сучасного високопродуктивного обладнання для оперативного приладового моніторингу підводної обстановки, картографування донної поверхні, пошуку та класифікації підводних об'єктів. Ненаселені буксировані підводні системи (БПС) належать до найбільш продуктивних технічних засобів для виконання вказаного переліку підводних робіт, оскільки швидкість їх буксирування у 3-5 разів вища за швидкість руху автономних та самохідних прив'язних підводних апаратів, а сучасне приладове фото-, відео- та гідроакустичне та магнітометричне обладнання забезпечує високу якість отримуваної інформації на швидкостях буксирування до 6 вузлів.

На цей час організації України морського спрямування не мають у складі свого оснащення сучасних БПС, що знижує ефективність їх робіт з оперативного моніторингу підводної обстановки у територіальних водах держави, виконання природоохоронних та гідрографічних досліджень, гуманітарного розмінування акваторій та проведення протимінних і антитерористичних операцій.

Ефективність застосування БПС для вказаних задач оборонного характеру обумовлена високою їх продуктивністю та відносною простотою застосування за призначенням. Тому створення таких систем належить до актуальних завдань розвитку вітчизняною підводної техніки, а вдосконалення методів їх проектування – до актуальних прикладних наукових завдань вітчизняної науки.

Питаннями проектування БПС різного призначення постійно займаються науковці всіх провідних морських країн світу. Значний внесок у теорію БПС внесли Іконников І.Б., Кувшинов Г.Є., Єгоров В.І. (СРСР), Бугаєнко Б.А., Магула В.Е., Поддубний В.І., Шамарін Ю.Є. (Україна), Fossen Т. (Норвегія), Linklater А. (США), Buckham В., Lambert С. (Англія), Zhao Х. (Китай).

Однак сучасні вимоги щодо конкурентоспроможності створюваних нових зразків БПС на внутрішньому і зовнішньому ринках підводної техніки вимагають розробки нових інноваційних підходів до їх проектування і, зокрема, розробки методик проектування, які б забезпечили отримання достовірних конструкторських рішень вже на ранніх стадіях проектування. Такі методики мають ґрунтуватись на системному підході як теоретичній основі пошуку проектних рішень та залученні комп'ютерних та адитивних технологій проектування та виготовлення БПС.

Важливість прикладного наукового завдання удосконалення проектування БПС на вказаних засадах обумовлюють актуальність теми дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася як складова частина досліджень, проведених у Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова (НУК) по держбюджетним НДР №2047 «Розробка методик створення і використання в Україні безекіпажних підводних апаратів оборонного призначення», шифр «Апарат» (№ держ. реєстрації 0116U000004D) та №2167 «Роботизовані технології захисту акваторії» (номер державної реєстрації 0118U000036D), а також НДР №2197 «Розробка комплекту робочої конструкторської документації на малогабаритний буксирований підводний апарат» (замовник – ТОВ «КАСКАД-СПЕЦСТРОЙ») та у науково-дослідному інституті підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при розробці нових зразків підводної техніки в інтересах вітчизняних організацій.

Об'єкт дисертаційного дослідження – процес проектування ненаселених буксированих підводних систем для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій як окремого виду підводної техніки.

Предмет дисертаційного дослідження – методика проектування ненаселених буксированих підводних систем для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій на основі системного підходу та рівнянь існування для ранніх стадій створення таких систем.

Мета і завдання дослідження – удосконалення проектування ненаселених буксированих підводних систем для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій на основі системного підходу та рівнянь існування як теоретичного підґрунтя для пошуку ефективних проектних рішень на ранніх стадіях створення таких систем.

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

- виконано огляд основних напрямків застосування та режимів роботи БПС цивільного та подвійного призначення як складових загального напрямку впровадження безекіпажних систем у морську практику вітчизняних організацій;

- виконано аналіз сучасних підходів до проектування засобів буксированої морської техніки взагалі і, зокрема, БПС як високо продуктивної техніки для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій;

- обґрунтовано доцільність та можливість підвищення ефективності проектних робіт на ранніх стадіях розробки БПС шляхом застосування методології системного підходу та розроблених в НУК рівнянь існування для таких об'єктів підводної техніки;

- шляхом аналізу конструкцій та режимів роботи БПС удосконалено їх класифікацію на основі застосування системного підходу введенням чотирьох системних груп класифікаційних ознак – функціональних, енергетичних, інформаційних та конструктивних; для кожної групи розроблено множину додаткових ознак, які класифікують конструктивні та експлуатаційні особливості таких систем, що утворює інформаційне підґрунтя для підвищення продуктивності проектних робіт на ранніх стадіях їх проектування

- на базі відомої методики застосування рівнянь існування для оперативної

перевірки можливості досягнення вимог технічного завдання на ранніх стадіях проектування побудовано множину матриць обмежень технічного завдання на конструктивні, енергетичні, інформаційні та експлуатаційні характеристики складових БПС та множину матриць цих характеристик для поточного етапу їх проектування;

- розроблено структуру та основні складові узагальнених показників ефективності застосування БПС для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій, що утворює теоретичну основу для розробки методів їх кількісної оцінки на стадії зовнішнього проектування та методологічну основу для формування державного замовлення такого виду підводної техніки;

- запропоновано узагальнену методику проектування БПС для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій, яка ґрунтується на застосуванні системного підходу та рівнянь існування системи, що проектується;

- виконано перевірку працездатності розробленої узагальненої методики на прикладі проекту створення БПС для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій.

Методи дослідження. Для розв'язку поставлених у дисертаційній роботі завдань використано наступні методи дослідження: методи теорії проектування суден – для обґрунтування доцільності застосування рівнянь мас і об'ємів як складової методики проектування БПС; системний підхід – як теоретико-методологічну основу удосконалення методики проектування підводно-технічних систем; застосуванням теорії множин і матриць – для визначення режимів роботи та складових рівнянь існування БПС; адитивні технології – для як кінцеву складову технологій проектування і побудови нових зразків підводної техніки.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці теоретичного підґрунтя для удосконалення методики проектування ненаселених буксированих підводних систем цивільного та подвійного призначення на основі системного підходу та рівнянь існування для ранніх стадіях їх створення.

У дисертаційній роботі:

- **вперше** на основі аналізу існуючих методів проектування засобів морської техніки розроблено генезис технологій проектування ненаселених буксированих підводних систем для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій як науково-методологічну основу їх подальшого розвитку та залучення новітніх технологій інформаційного забезпечення конструкторських та виробничих робіт;

- **вперше** для перевірки можливості досягнення вимог технічного завдання вже на ранніх стадіях проектування буксированих підводних систем побудовано дві множини матриць їх технічних характеристик за конструктивним, енергетичним, інформаційним та експлуатаційним критеріями, попарне порівняння відповідних елементів яких після кожної ітерації проектних розрахунків дає можливість визначити рівень відповідності поточних конструкторських рішень щодо складових ненаселених буксированих підводних систем вимогам технічного завдання;

- на основі вивчення експлуатаційних характеристик та складу обладнання ненаселених буксированих підводних систем **удосконалено** їх класифікацію на основі застосування системного підходу шляхом уведення чотирьох системних груп класифікаційних ознак – функціональних, енергетичних, інформаційних та

конструктивних, для кожної з яких запропоновано множину додаткових ознак, які класифікують конструктивні та експлуатаційні особливості таких систем, що утворює інформаційне підґрунтя для підвищення продуктивності проектних робіт на ранніх стадіях розробки ненаселених буксированих підводних систем;

- **удосконалено** методику проектування ненаселених буксированих підводних систем на основі використання системного підходу та рівнянь існування для перевірки виконання вимог технічного завдання вже на ранніх стадіях проектування таких систем, що утворює науково обґрунтовану методологічну основу для створення конкурентоспроможних засобів підводної техніки.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 14 працях: 4 статтях, з яких 1 стаття у міжнародному виданні, яке включене до міжнародної наукометричної бази Scopus, та 3 статті у фахових наукових виданнях України (1 одноосібно).

Апробацію дисертаційної роботи підтверджують 8 публікацій (1 одноосібно) в матеріалах міжнародних (5) і всеукраїнських (3) науково-технічних конференцій.

Додатково наукові результати дисертації відображають 2 статті, одна з яких – у міжнародному виданні, що включене до міжнародної наукометричної бази Scopus.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації, що визначають її зміст і висновки, одержані та сформульовані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

у статті [1] – множини матриць технічних характеристик БПС за конструктивним, енергетичним, інформаційним та експлуатаційним критеріями для перевірки можливості досягнення вимог технічного завдання вже на ранніх стадіях проектування, а також узагальнений алгоритм проектування БПС, який реалізує системний підхід з використанням сучасних комп'ютерних технологій та рівнянь існування для перевірки виконання вимог технічного завдання; у статті [2] – генезис технологій проектування БПС як науково-методологічна основа їх подальшого розвитку та залучення новітніх технологій інформаційного забезпечення конструкторських та виробничих робіт, а також обґрунтування доцільності введення у проектну практику технології інформаційного моделювання основних режимів БПС на основі системного підходу, ВІМ-технології як інформаційної підтримки та адитивної технології для виробництва несерійних елементів БПС; у статті [4] – структура узагальнених показників ефективності застосування БПС пошукового призначення, які утворюють методологічну основу для формування державного замовлення, та розробка основних складових отриманих узагальнених показників ефективності застосування БПС; у статті [5] – розроблено основні складові отриманих узагальнених показників ефективності застосування БПС та описано практичне використання деяких узагальнених показників ефективності застосування БПС для моніторингу морських акваторій.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати досліджень, які викладені в дисертації, доповідались і обговорювались на 2-х міжнародних та 2-х всеукраїнських науково-технічних і науково-практичних конференціях:

міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 2016, 2017, 2020);

міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (м. Херсон, 2019, 2020);

всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (м. Миколаїв, 2020);

всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (м. Миколаїв, 2018, 2019).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 153 сторінки, у тому числі 133 сторінки основного тексту, 1 таблицю, 20 рисунків, 109 найменування використаних джерел.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційного дослідження впроваджені при проектуванні та створенні дослідного зразка ненаселеного буксирного підводного апарата «Глайдер» в ТОВ «КАСКАД-СПЕЦСТРОЙ» та у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова МОН України при розробці нових зразків підводної техніки в інтересах вітчизняних організацій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** представлена загальна характеристика дисертації: обґрунтування вибору теми дослідження; мета і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження; методи дослідження; наукова новизна отриманих результатів; апробація матеріалів дисертації та структура і обсяг дисертації.

В **першому розділі** розглянуто склад обладнання, типові технічні рішення та області застосування БПС як одного з видів високопродуктивної підводної техніки цивільного та подвійного призначення, а також наведено загальноживані класифікаційні ознаки таких систем. Типова одноланкова БПС розташовується на судні-буксирувальнику (СБ) і складається з буксирного підводного апарата (БПА), кабель-буксира (КБ), спуско-піднімального пристрою (СПП), кабельної лебідки (КЛ) та поста енергетики і керування (ПЕК), рис. 1.

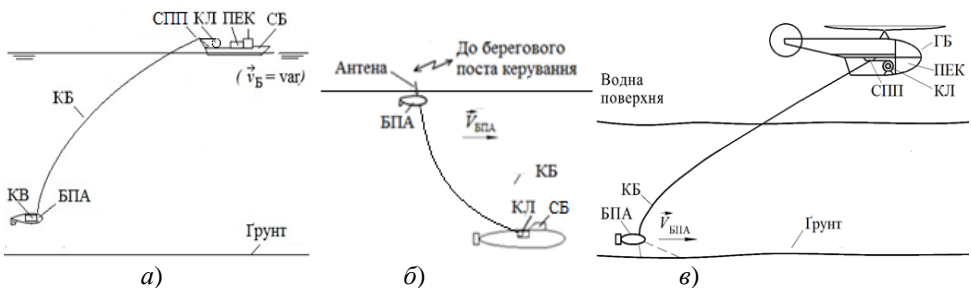


Рисунок 1 – Типові складові одноланкової БПС:
а – надводне СБ; б – підводне СБ; в – гелікоптер

Виконано аналіз методології проектування морських інженерних об'єктів та показано, що традиційним для стадій ескізного та технічного проектування є застосування методу послідовних наближень для визначення характеристик об'єкту проектування та методів оптимізації цих характеристик. Наведено коротку характеристику системного підходу до проектування об'єктів морської техніки та

визначено його переваги для отримання достовірних проектних рішень вже на ранніх стадіях створення таких систем і, як наслідок, скорочення часових ресурсів, що виділяються на такі проекти.

Обґрунтовано необхідність удосконалення проектування БПС для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій на основі системного підходу та шляхом застосування відомих рівнянь існування як теоретичного підґрунтя для пошуку ефективних проектних рішень на ранніх стадіях створення таких систем. Сформульовано основні задачі дисертаційного дослідження, розв'язок яких забезпечить досягнення поставленої мети.

У другому розділі описано методологію та основні методи дисертаційних досліджень. Розроблено генезис технологій проектування БПС як науково-методологічну основу їх подальшого розвитку у напрямку підвищення ефективності проектних робіт та зниження витрат часових і фінансових ресурсів. Показано, що розвиток методів проектування БПС відбувався за наступними укрупненими етапами, типовими для суднобудівної галузі у цілому:

- ручне проектування (MP), коли креслення елементів і вузлів БПС виконувались конструкторами вручну, а результатом роботи була проектна документація на паперових носіях;

- двовимірне (2D) проектування як початковий етап автоматизації ручної праці конструкторів, результатом якого була проектна документація в електронних форматах; для цього етапу характерною є реалізація принципів CAD-проектування (Computer Aided Designes) та водночас – відсутність повноцінних інформаційних зв'язків між проектантами БПС;

- тривимірне (3D) проектування, яке побудоване на принципах геометричного моделювання та управління цифровою впорядкованою проектною інформацією, згенерованою 2D/3D CAD-системами та збереженою у спільному середовищі даних (Common Desktop Environment, CDE);

- застосування систем комп'ютерної підтримки інженерних розрахунків (Computer-Aided Engineering, CAE) для розрахунків елементів, вузлів і систем БПС.

Аналіз розвитку інших галузей промисловості (будівельної, авіаційної тощо) дав змогу доповнити наведені вище чотири етапи проектування БПС наступними трьома етапами, які або вже реалізовані у практичній діяльності науково-дослідного інституту підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, або плануються до реалізації найближчим часом:

- етап інформаційного моделювання (Information Modeling, IM) БПС, який охоплює процеси створення та використання скоординованих між собою структурованих інформаційних моделей, які описують технічні та експлуатаційні характеристики об'єкта проектування та об'єктно-орієнтовані тривимірні геометричні характеристики його складових, що створюються різними учасниками протягом життєвого циклу об'єкта проектування в рамках CDE; відмінною особливістю етапу IM є широке використання методів комп'ютерного моделювання (computer simulations, CS) для дослідження режимів роботи майбутньої БПС в ustalених та динамічних режимах та використання отриманих даних у проектних рішеннях – від розробки спеціалізованих моделюючих комплексів (СМК) до використання програм обчислювальної гідродинаміки (computational fluid dynamics,

CFD); результатом інформаційного моделювання є нові знання про властивості створюваної БПС, які дають змогу уточнити експлуатаційні характеристики БПС вже на ранніх стадіях її проектування;

- етап BIM-технологій (Building Information Modelling, BIM), які передбачають використання спільного цифрового представлення об'єкту, що створюється, для інформаційної підтримки процесів проектування, будівництва та експлуатації з метою створення надійної основи для прийняття рішень; їх застосування у створенні БПС має передбачати збір і комплексну обробку конструкторської (CD), технологічної (TD) та економічної (ED) інформації про БПС у процесі її проектування; результатом цього етапу має бути спільне середовище даних CDE_{BIM}, яке дасть змогу вже на ранніх стадіях проектування оцінювати як технічні, так і економічні характеристики створюваного нового зразка підводної техніки;

- етап забезпечення адитивних технологій виробництва (Additive Production Technologies, АРТ), який передбачає інтеграцію проектних робіт з виготовленням спроектованих деталей, елементів та вузлів БПС шляхом їх 3D-друку; за ними продукують вироби за даними тривимірної цифрової моделі (етап 3D-проектування) методом пошарового додавання конструкційних матеріалів; результатом цього етапу є виготовлені за технологіями 3D-друку несерійні елементи та деталі конструкцій БПС, які мають суттєво нижчу собівартість у порівнянні з традиційними технологіями малосерійного виробництва.

Генезис (походження, становлення, розвитку) технологій проектування БПС (Technologies of Design, TD) наведено на рис. 2.

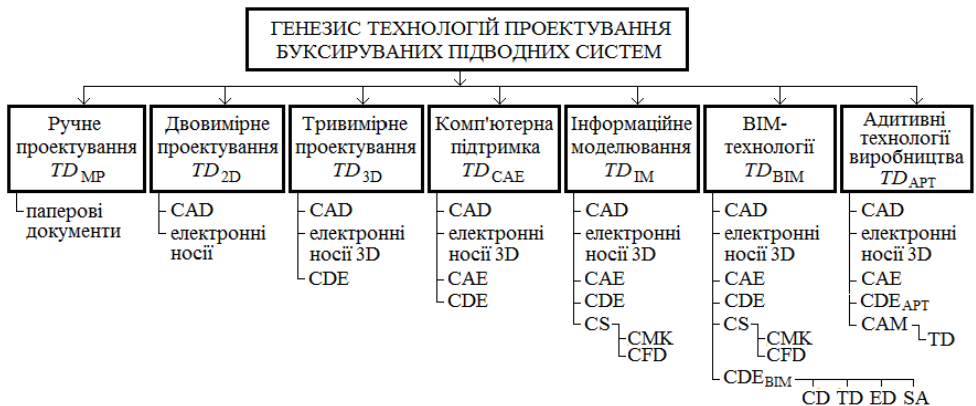


Рисунок 2 – Генезис технологій проектування БПС

На рис. 1 нижні індекси відповідають наведеним вище етапам розвитку методів проектування.

На етапі ІМ проводяться прикладні наукові дослідження для попередньої оцінки властивостей БПС в основних режимах роботи, виконується попередня перевірка гідродинамічних характеристик БПА тощо. До першочергових задач для створення технології *TD_{ІМ}* відносяться:

- розробка 3D-моделей IM_{3D} складових БПС; у якості інструментальних засобів тут доцільно використовувати прикладні пакети дво- і тривимірної інтерактивної САПР (CAD-пакети програм AutoCAD та/чи КОМПАС-3D);

- створення інформаційних (математичних) моделей $IM_{БПС}$ складових БПС (у першу чергу – БПА, КБ) як твердих і гнучких тіл у потоці води, які мають силову взаємодію між собою – для комп'ютерного дослідження усталених і динамічних режимів роботи БПС; інструментальним засобом тут необхідно використовувати пакет прикладних програм для розв'язку задач інженерних розрахунків Matlab або створювати спеціалізовані моделюючі комплекси для проведення масових багатоваріантних розрахунків;

- створення інформаційних (математичних) моделей $IM_{САК}$ систем автоматичного керування складовими БПС в основних робочих та аварійних режимах – для перевірки керованості БПС та якості виконуваної підводної роботи; у якості інструментальних засобів тут також доцільно використовувати пакети програм Matlab та/або спеціалізовані моделюючі комплекси;

- розробка 3D-моделей БПА IM_{CFD} для дослідження їх гідродинамічних характеристик; у якості інструментального засобу тут доцільно використовувати пакет прикладних програм FlowVision CFD.

Таким чином, основні задачі створення технології інформаційного моделювання TD_{IM} можна представити наступною множиною математичних моделей IM :

$$IM = \{IM_{3D}; IM_{БПС}; IM_{САК}; IM_{CFD}\}. \quad (1)$$

Узагальнена структура БПС як об'єкту інформаційного моделювання на ранніх стадіях проектування показана на рис. 3.

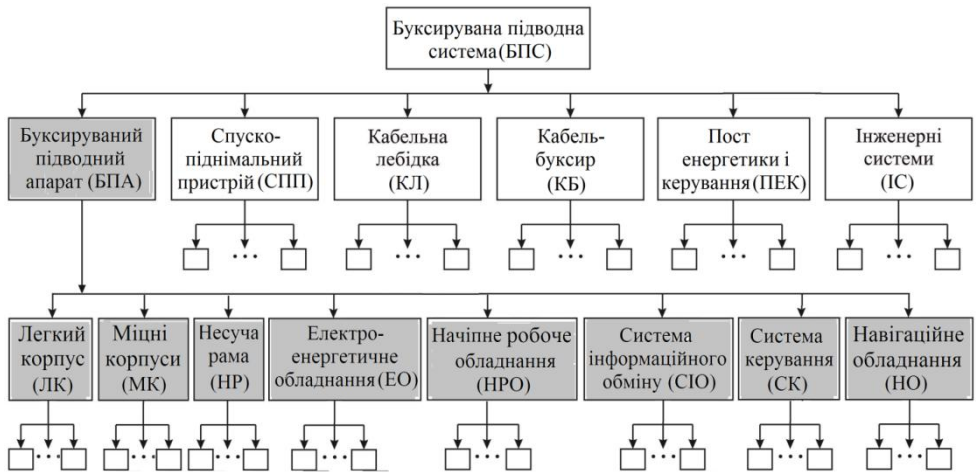


Рисунок 3 – Узагальнена структура БПС як об'єкту інформаційного моделювання на ранніх стадіях проектування

Особливості реалізації технології інформаційного моделювання TD_{IM} (рис. 2) у розділі розглянуто на прикладі інформаційного моделювання БПА ($TD_{IM-БПА}$) як найбільш наукоємної складової створюваної системи.

На рис. 3 затемненням виділено БПА як складова частина процесу проектування БПС та основні його елементи:

- конструктивні елементи – легкий корпус (ЛК), функції якого виконує гідродинамічний обтічник БПА; міцні корпуси електрообладнання (МК); несуча рама (НР) як силовий конструктив БПА;

- енергетичні елементи – електроенергетичне обладнання (ЕО), до якого входять система електроживлення БПА, електроприводи повороту рулів БПА, підводні світильники тощо; начіпне робоче обладнання БПА (НРО), до якого входять пошукові відео- та гідроакустичні прилади, пробовідбірники води, сенсори гідрофізичних та гідрохімічних приладів тощо;

- інформаційні елементи – система інформаційного обміну (СІО), яка забезпечує двосторонній зв'язок ПЕК з БПА; система керування (СК), яка забезпечує ручне, автоматизоване чи автоматичне керування просторовим рухом БПА та керує його начіпним робочим обладнанням; навігаційне обладнання (НО), яке включає сенсори просторового положення БПА та сенсори його лінійних і кутових швидкостей і прискорень.

У цілому, технологія інформаційного моделювання БПА $TD_{\text{ІМ-БПА}}$ згідно (1) складається з наступних груп інформаційних моделей:

$$ІМ_{\text{БПА}} = \{ІМ_{\text{ЗД-БПА}}, ІМ_{\text{БПС-БПА}}, ІМ_{\text{САК-БПА}}, ІМ_{\text{СФД-БПА}}\}. \quad (2)$$

Створення інформаційних моделей БПА $ІМ_{\text{БПС-БПА}}$ як складової БПС має на меті, у першу чергу, дослідження його властивостей в усталених та перехідних режимах. Зазвичай, такі моделі створюють на основі систем нелінійних диференціально-алгебраїчних рівнянь та використовують у складі спеціалізованих моделюючі комплексів, де також присутні математичні моделі КБ, СПП, КЛ та моделі зовнішніх збудень (вітро-хвильових, течії, хитавиці СБ).

У дисертації для інформаційного моделювання БПС було використано математичні моделі наукової школи «Підводна техніка» НУК, які описують силову взаємодію БПА та КБ як твердого та гнучкого тіл у потоці води:

$$\frac{d_A \vec{P}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{P} = \vec{F}; \quad (3) \quad \frac{d_A \vec{L}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{L} + \vec{v} \times \vec{P} = \vec{M}; \quad (4)$$

$$\vec{F}_i = \vec{f} \left(\vec{r}_{i-1}, \vec{r}_i, \vec{r}_{i+1}, \frac{d\vec{r}_i}{dt}, L \right); \quad (5) \quad m_i \ddot{\vec{r}}_i = \vec{F}_i, \quad (6)$$

де \vec{P} – кількість руху (імпульс) твердого тіла [кг·м/с]; \vec{F} – головний вектор зовнішніх сил [Н]; \vec{L} – момент кількості руху (момент імпульсу) твердого тіла відносно його полюсу [кг·м²/с]; \vec{M} – головний момент зовнішніх сил відносно полюсу твердого тіла [Н·м]; індекс A знака диференціала означає, що похідна вектора розраховується відносно базису A , тобто базису системи координат, зв'язаної з корпусом БПА; \vec{F}_i – вектор рівнодіючої сили, яка діє на елементарну ділянку КБ, [Н]; $i = 1, 2, \dots, n$; \vec{r}_i – координати елементарної ділянки КБ, [м]; L – довжина випущеної частини КБ, [м].

Координати корінного \vec{r}_1 та ходового \vec{r}_n кінців ГЗ визначаються на основі позиційних кінематичних параметрів СПУ та БПА, до яких вони під'єднані.

Крім того, у розділі наведено результати створення інформаційних (математичних) моделей ІМ_{САК-БПА} системи автоматичного керування (САК) БПА та кабель-буксира ММ_{БПС-КБ}, що дає змогу суттєво скоротити витрати часу на розробку ефективних регуляторів просторового руху БПА.

Розробка 3D-моделей БПА ІМ_{CFD-БПА} для дослідження їх гідродинамічних характеристик відноситься до задач обчислювальної гідродинаміки і передбачає чисельний розв'язок диференціальних рівнянь в'язкої рідини (рівнянь Нав'є - Стокса). Вказана технологія вимагає значних обчислювальних ресурсів, а її застосування для задач проектування БПА є окремим напрямком досліджень.

Сутність етапу ВІМ-технологій у проектуванні БПС полягає в забезпеченні інформаційної підтримки процесів проєктування, будівництва та подальшої експлуатації створюваної БПС. У роботі розглядаються можливі напрямки вдосконалення процесів проєктування та будівництва БПС на основі системного підходу (System Approach) з використанням рівнянь існування складових БПС за відомими конструктивним A , енергетичним P , інформаційним I та експлуатаційним J критеріями.

Згідно цьому підходу для кожної складової БПС (БПА, КЛ, КБ, СПП, ПЕК) вводяться у розгляд наступні дві множини матриць, кожна з яких містить технічні характеристики БПС за вказаними критеріями:

- $ET_{\text{БПС}} = \{ET_{\text{БПА}}; ET_{\text{КБ}}; ET_{\text{КЛ}}; ET_{\text{СПП}}; ET_{\text{ПЕК}}\}$ – множина матриць обмежень технічного завдання (ТЗ) на конструктивні, енергетичні, інформаційні та експлуатаційні характеристики складових створюваної БПС;

- $EE_{\text{БПС}} = \{EE_{\text{БПА}}; EE_{\text{КБ}}; EE_{\text{КЛ}}; EE_{\text{СПП}}; EE_{\text{ПЕК}}\}$ – множина матриць конструктивних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних характеристик складових БПС, отриманих на поточному етапі проектування.

Кожна складова множини матриць ET представляє собою матрицю–стовпець вимог ТЗ або сформульованих на основі ТЗ більш детальних вимог до конструктивних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних характеристик відповідних складових БПС:

$$ET_{\text{БПА}} = \begin{pmatrix} A_{\text{БПА}} \\ P_{\text{БПА}} \\ I_{\text{БПА}} \\ J_{\text{БПА}} \end{pmatrix}; \quad ET_{\text{КБ}} = \begin{pmatrix} A_{\text{КБ}} \\ P_{\text{КБ}} \\ I_{\text{КБ}} \\ J_{\text{КБ}} \end{pmatrix}; \quad ET_{\text{КЛ}} = \begin{pmatrix} A_{\text{КЛ}} \\ P_{\text{КЛ}} \\ I_{\text{КЛ}} \\ J_{\text{КЛ}} \end{pmatrix}; \quad ET_{\text{СПП}} = \begin{pmatrix} A_{\text{СПП}} \\ P_{\text{СПП}} \\ I_{\text{СПП}} \\ J_{\text{СПП}} \end{pmatrix}; \quad ET_{\text{ПЕК}} = \begin{pmatrix} A_{\text{ПЕК}} \\ P_{\text{ПЕК}} \\ I_{\text{ПЕК}} \\ J_{\text{ПЕК}} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Кожна складова множини матриць $EE_{\text{БПС}}$ представляє собою матрицю–стовпець, відповідно, конструктивних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних характеристик відповідних складових БПС, отриманих на i -й поточній ітерації проєктних розрахунків:

$$EE_{\text{БПА}i} = \begin{pmatrix} A_{\text{БПА}i} \\ P_{\text{БПА}i} \\ I_{\text{БПА}i} \\ J_{\text{БПА}i} \end{pmatrix}; \quad EE_{\text{КБ}i} = \begin{pmatrix} A_{\text{КБ}i} \\ P_{\text{КБ}i} \\ I_{\text{КБ}i} \\ J_{\text{КБ}i} \end{pmatrix}; \quad EE_{\text{КЛ}i} = \begin{pmatrix} A_{\text{КЛ}i} \\ P_{\text{КЛ}i} \\ I_{\text{КЛ}i} \\ J_{\text{КЛ}i} \end{pmatrix}; \quad EE_{\text{СПП}i} = \begin{pmatrix} A_{\text{СПП}i} \\ P_{\text{СПП}i} \\ I_{\text{СПП}i} \\ J_{\text{СПП}i} \end{pmatrix}; \quad EE_{\text{ПЕК}i} = \begin{pmatrix} A_{\text{ПЕК}i} \\ P_{\text{ПЕК}i} \\ I_{\text{ПЕК}i} \\ J_{\text{ПЕК}i} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Попарне порівняння відповідних елементів матриць–стовпців (7) і (8) після кожної ітерації проектних розрахунків (аналіз рівнянь існування БПС) дає можливість конструктору вже на ранніх стадіях проектування визначити рівень відповідності поточних технічних рішень щодо складових БПС вимогам ТЗ згідно критеріям A , P , I та J .

Виходячи з сутності ВІМ-технологій пропонується до відомих матричних рівнянь (7)-(8) увести дві групи критеріїв для попередньої оцінки витрат ресурсів, відповідно, на будівництво (критерій B) та експлуатацію (критерій O) БПС. Це

Уведення у проектну практику зазначених критеріїв дасть змогу вже на ранніх стадіях проектування БПС оцінити її собівартість створення як об'єкту малосерійного виробництва, та конкурентоздатність на ринку засобів морської робототехніки, а також оцінити витрати на експлуатацію БПС.

Тоді матричні відношення (7)-(8) будуть доповнені вищезазначеними критеріями та будуть мати вид:

$$ET_{БПА} = \begin{vmatrix} A_{БПА} \\ P_{БПА} \\ I_{БПА} \\ J_{БПА} \\ B_{БПА} \\ O_{БПА} \end{vmatrix}; ET_{КБ} = \begin{vmatrix} A_{КБ} \\ P_{КБ} \\ I_{КБ} \\ J_{КБ} \\ B_{КБ} \\ O_{КБ} \end{vmatrix}; ET_{КЛ} = \begin{vmatrix} A_{КЛ} \\ P_{КЛ} \\ I_{КЛ} \\ J_{КЛ} \\ B_{КЛ} \\ O_{КЛ} \end{vmatrix}; ET_{СПП} = \begin{vmatrix} A_{СПП} \\ P_{СПП} \\ I_{СПП} \\ J_{СПП} \\ B_{СПП} \\ O_{СПП} \end{vmatrix}; ET_{ПЕК} = \begin{vmatrix} A_{ПЕК} \\ P_{ПЕК} \\ I_{ПЕК} \\ J_{ПЕК} \\ B_{ПЕК} \\ O_{ПЕК} \end{vmatrix}. \quad (9)$$

$$EE_{БПАi} = \begin{vmatrix} A_{БПАi} \\ P_{БПАi} \\ I_{БПАi} \\ J_{БПАi} \\ B_{БПАi} \\ O_{БПАi} \end{vmatrix}; EE_{КБi} = \begin{vmatrix} A_{КБi} \\ P_{КБi} \\ I_{КБi} \\ J_{КБi} \\ B_{КБi} \\ O_{КБi} \end{vmatrix}; EE_{КЛi} = \begin{vmatrix} A_{КЛi} \\ P_{КЛi} \\ I_{КЛi} \\ J_{КЛi} \\ B_{КЛi} \\ O_{КЛi} \end{vmatrix}; EE_{СПPi} = \begin{vmatrix} A_{СПPi} \\ P_{СПPi} \\ I_{СПPi} \\ J_{СПPi} \\ B_{СПPi} \\ O_{СПPi} \end{vmatrix}; EE_{ПЕКi} = \begin{vmatrix} A_{ПЕКi} \\ P_{ПЕКi} \\ I_{ПЕКi} \\ J_{ПЕКi} \\ B_{ПЕКi} \\ O_{ПЕКi} \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Наприклад, собівартість будівництва i -го варіанту БПА $B_{БПАi}$ можна оцінити як суму витрат ресурсів на проектування $B_{БПА-ЗД}$, інформаційного моделювання $B_{БПА-ІМ}$ та виготовлення $B_{БПА-АРТ}$ БПА. Експлуатаційні витрати на протязі життєвого циклу i -го варіанту БПА укрупнено можна оцінити сумою витрат на технічне обслуговування БПА $O_{БПА-ТОi}$ та капітальні ремонти $O_{БПА-КРi}$. Розробка змістовної частини рівнянь (9)-(10) є окремою інженерною задачею і тут не розглядається.

Зазначимо, що залежності (9)-(10) утворюють повну множину оцінок щодо спроможності створення (проектування, побудови та експлуатації) БПС у відповідності до вимог ТЗ.

Етап забезпечення адитивних технологій виробництва БПС дає змогу суттєво скоротити витрати ресурсів (часу, фінансів тощо) на створення як діючих макетів, так і дослідних та серійних зразків БПС. Фактично з появою 3D-принтерів забезпечується стрімкий перехід від класичної САМ-технології (Computer-Aided Manufacture, САМ) керування станками з числовим програмним управлінням до безвідходної технології адитивного виготовлення деталей БПА.

Практичний досвід використання адитивних технологій у виробництві БПС свідчить, що до першочергових об'єктів для такої технології можна віднести легкі корпуси (ЛК) та несучі рамні конструкції (НР) БПА, а також міцні корпуси (МК) для електрообладнання БПА.

Далі у розділі на основі системного підходу запропоновано удосконалену класифікацію БПС як інформаційне підґрунтя проектування на ранніх стадіях їх розробки. Розроблена класифікація передбачає чотири системні групи класифікаційних ознак: функціональні Φ , енергетичні E , інформаційні I та конструктивні K .

$$KO = \{\Phi; E; I; K\}. \quad (11)$$

Для кожної з груп класифікаційних ознак розроблено множину додаткових ознак, які утворюють інформаційне підґрунтя для організації високопродуктивного проектування БПС вже на ранніх стадіях розробки.

У розділі також наведено узагальнений алгоритм організації проектних робіт із застосуванням запропонованої системи класифікаційних ознак БПС на ранніх стадіях їх проектування. Практика його застосування у роботі НДІ підводної техніки НУК свідчить про скорочення витрат часу на підготовку попередніх проектних рішень для ескізного проекту БПС на 7-10%, що знижує загальні витрати проектних ресурсів і, тим самим, підвищує конкурентоздатність новостворюваних БПС на внутрішньому ринку.

У **третьому розділі** виконано розробку узагальненої методики застосування системного підходу на ранніх стадіях проектування БПС, які призначені для моніторингу мілководних акваторій. Виходячи з зарубіжного досвіду та практичного досвіду автора у проектуванні та застосуванні БПС, виділено наступні основні режими їх функціонування: режим R_{Beg} перевірки працездатності всіх складових БПС; режим R_{Rel} опускання БПА на воду (виконується за допомогою СПП на стопі СБ або при його прямолінійному русі з мінімальною швидкістю v_{min} ; режим R_I занурення БПА на задану глибину виконується після досягнення СБ робочої швидкості ходу v_j ; режим R_{JL} прямолінійного руху СБ заданим курсом φ зі швидкістю v_j ; БПА може рухатись у режимах стабілізації глибини R_{JLH} , висоти над ґрунтом R_{JLA} , по плоскій R_{JLP} чи просторовій R_{JLS} траєкторіях; режим R_A спливання БПА на поверхню при одночасному підбиранні КБ; режим R_T підведення БПА до СБ виконується за допомогою КЛ на стопі чи малому ходу СБ; режим R_{Rec} підйому БПА на борт СБ виконується за допомогою СПП з одночасним підбиранням КБ кабельною лебідкою; режим R_{End} – перевірка технічного стану БПА після виконання підводної місії.

Таким чином, перед проектувальником постає завдання розробки конструкторської документації для БПА, КБ, КЛ, СПП та ПЕК як окремих складових БПС, які узгоджено функціонують на всій множині режимів:

$$R_{UTUS} = R_{Beg}; R_{Rel}; R_I; R_{JL} R_{JLH}; R_{JLA}; R_{JLP}; R_{JLS} ; R_A; R_T; R_{Rec}; R_{End} . \quad (11)$$

На наступному етапі проектування визначаються найбільш важкі експлуатаційні режими $R_{UTUS_{Ext}}$ з множини (11) для кожної складової БПС – БПА, КБ, КЛ, СПП та ПЕК. Вибір вказаних режимів виключає необхідність проектних розрахунків складових БПС для всієї множини режимів (11) і, таким чином, знижує загальні

витрати часу на проектування. Зазвичай, для БПА та ПЕК – це режими R_I , R_{JL} та R_A , для КБ та КЛ – це режими R_I , R_{JL} , R_A та R_T , для СПП – це режими R_{Rel} та R_{Rec} .

Таким чином, множину режимів $R_{UTUS\ Ext}$ можна записати у вигляді:

$$R_{UTUS\ Ext} = \{R_{TUV\ Ext} \in R_{UTUS}; R_{TC\ Ext} \in R_{UTUS}; R_{CW\ Ext} \in R_{UTUS}; R_{CD\ Ext} \in R_{UTUS}; R_{PCS\ Ext} \in R_{UTUS}\}. \quad (12)$$

Потужність множини $R_{UTUS\ Ext}$ позначимо як $|R_{UTUS\ Ext}|$, а потужність множини R_{UTUS} – як $|R_{UTUS}|$. Очевидно, що множина $R_{UTUS\ Ext}$ містить лише ті режими із множини R_{UTUS} , які є найбільш важкими з позицій експлуатації. Тоді має місце відношення $|R_{UTUS\ Ext}| \ll |R_{UTUS}|$, що обумовлює зниження витрат проектних ресурсів (часу, залучених людських ресурсів тощо) вже на ранніх стадіях проектування.

Для режимів множини (12) необхідно визначити попередні технічні характеристики S складових БПС, які забезпечують роботу кожної зі складових згідно вимогам ТЗ $S_{UTUS\ TT}$, у першу чергу, масогабаритні, енергетичні та інформаційні дані щодо складових БПС (БПА, КБ, КЛ, СПП та ПЕК):

$$S_{UTUS0} = \{S_{TUV}; S_{TC}; S_{CW}; S_{CD}; S_{PCS}\}_{R_{UTUS\ Ext}}. \quad (13)$$

Отримана множина технічних характеристик S_{UTUS0} є першою ітерацією етапу ескізного проектування БПС і відрізняється від характеристик множини $S_{UTUS\ TT}$ більшою конкретизацією технічних рішень. Вона утворює основу для подальших ітерацій ескізного проектування складових БПС у найбільш важких режимах.

У розділі сформульовано основні вимоги C_{UTUS} до проектування та побудови конкурентоздатних БПС, обумовлені дією ринкових механізмів та високою конкуренцією на ринку засобів підводної техніки.

У сукупності отримана множина технічних характеристик (13) та множина сучасних вимог C_{UTUS} утворюють інформаційне підґрунтя для розробки узагальненої схеми проектування БПС для мілководних акваторій.

У розділі розглянуто також питання адаптації методології системного підходу для ранніх стадій проектування БПС.

Сутність застосування системного підходу у проектуванні БПС полягає у застосуванні рівнянь існування для перевірки можливості виконання вимог ТЗ вже на ранніх стадіях проектування БПС. Згідно з цим підходом для кожної складової вводимо у розгляд наступні дві множини матриць, кожна з яких містить технічні характеристики БПС за конструктивним A , енергетичним P , інформаційним I та експлуатаційним J критеріями:

- $ET_{UTUS} = \{ET_{TUV}; ET_{TC}; ET_{CW}; ET_{CD}; ET_{PCS}\}$ – множина матриць вимог (обмежень ТЗ) на конструктивні, енергетичні, інформаційні та експлуатаційні характеристики складових БПС:

$$EE_{TUVi} = \begin{bmatrix} A_{TUVi} \\ P_{TUVi} \\ I_{TUVi} \\ J_{TUVi} \end{bmatrix}; \quad EE_{TCi} = \begin{bmatrix} A_{TCi} \\ P_{TCi} \\ I_{TCi} \\ J_{TCi} \end{bmatrix}; \quad EE_{CWi} = \begin{bmatrix} A_{CWi} \\ P_{CWi} \\ I_{CWi} \\ J_{CWi} \end{bmatrix}; \quad EE_{CDi} = \begin{bmatrix} A_{CDi} \\ P_{CDi} \\ I_{CDi} \\ J_{CDi} \end{bmatrix}; \quad EE_{PCSi} = \begin{bmatrix} A_{PCSi} \\ P_{PCSi} \\ I_{PCSi} \\ J_{PCSi} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

- $EE_{UTUS} = \{EE_{TUV}; EE_{TC}; EE_{CW}; EE_{CD}; EE_{PCS}\}$ – множина матриць конструктивних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних характеристик складових БПС, отриманих на поточному етапі проектування (13):

$$EE_{TUVi} = \begin{pmatrix} A_{TUVi} \\ P_{TUVi} \\ I_{TUVi} \\ J_{TUVi} \end{pmatrix}; \quad EE_{TCi} = \begin{pmatrix} A_{TCi} \\ P_{TCi} \\ I_{TCi} \\ J_{TCi} \end{pmatrix}; \quad EE_{CWi} = \begin{pmatrix} A_{CWi} \\ P_{CWi} \\ I_{CWi} \\ J_{CWi} \end{pmatrix}; \quad EE_{CDi} = \begin{pmatrix} A_{CDi} \\ P_{CDi} \\ I_{CDi} \\ J_{CDi} \end{pmatrix}; \quad EE_{PCSi} = \begin{pmatrix} A_{PCSi} \\ P_{PCSi} \\ I_{PCSi} \\ J_{PCSi} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Зазначимо, що кожний елемент матриць–стовпців (18) являє собою суму, відповідно, конструктивних A , енергетичних P , інформаційних I та функціональних J характеристик тої чи іншої складової БПС.

Попарне порівняння відповідних елементів матриць–стовпців (14) і (15) після кожної ітерації проектних розрахунків дає можливість конструктору визначити рівень відповідності поточних технічних рішень щодо складових БПС вимогам ТЗ згідно критеріям A , P , I та J .

Зазначимо, що вказані чотири критерії $\{A; P; I; J\}$ є узагальненими і при розв'язку конкретних проектних задач можуть складатися з декількох локальних критеріїв, які більш детально розкривають вимоги до складових БПС. Так, на практиці критерій A , зазвичай, містить принаймні два локальних критерії – маси M та габаритних розмірів K чи об'ємів V відповідної складової БПС. Критерії P та I дають змогу перевірити, чи можливо створити БПС, не виходячи за обмеження ТЗ щодо енергетичного та інформаційного обладнання складових створюваної БПС.

Важливим є також четвертий критерій існування J , яке дає змогу перевірити можливість побудови БПС із заданими експлуатаційними характеристиками. До таких характеристик, у першу чергу, відносяться: для БПА – спроможність занурюватись та рухатись на робочій глибині і забезпечувати продуктивність СППА при виконанні пошукової підводної місії; для КБ – спроможність живлення БПА електричною енергією з заданою потужністю та якістю та двохстороннього інформаційного обміну з заданою пропускну здатністю каналів інформаційних провідників КБ та інш.; для КЛ – спроможність забезпечувати лінійну швидкість вибирання/попускання КБ у заданому діапазоні, який обумовлений режимами роботи (11); для СПП – спроможність виконувати спуско-піднімальні операції з БПА у заданому діапазоні швидкостей вантажного гаку згідно режимів (11); для ПЕК – спроможність забезпечувати енергоживлення БПА, керування режимами його роботи згідно (11) та документування процесів і результатів роботи БПС (відповідно, локальні критерії J_{PCSE} , J_{PCSI} та J_{PCSD}).

У цілому, система множин матриць (14)-(15) утворює математичну основу узагальненої схеми проектування БПС на основі системного підходу. У якості прикладу, який розкриває особливості застосування відношень (14)-(15) на ранній стадії проектування БПС, у дисертації розглянуто проектування БПА.

У результаті проведених у розділі досліджень отримано узагальнену методику проектування БПС на основі системного підходу та комп'ютерних технологій, подану на рис. 5 у вигляді алгоритму.

На рисунку позначено:

блок 1 – аналіз вимог ТЗ на створення БПС та формування попередніх технічних характеристик її складових $S_{UTUS TT}$ для автоматизованої обробки;

блок 2 – визначення множини R_{UTUS} значущих режимів функціонування БПС та формування множини $R_{UTUS Ext}$ найбільш важких режимів для кожної її складової;

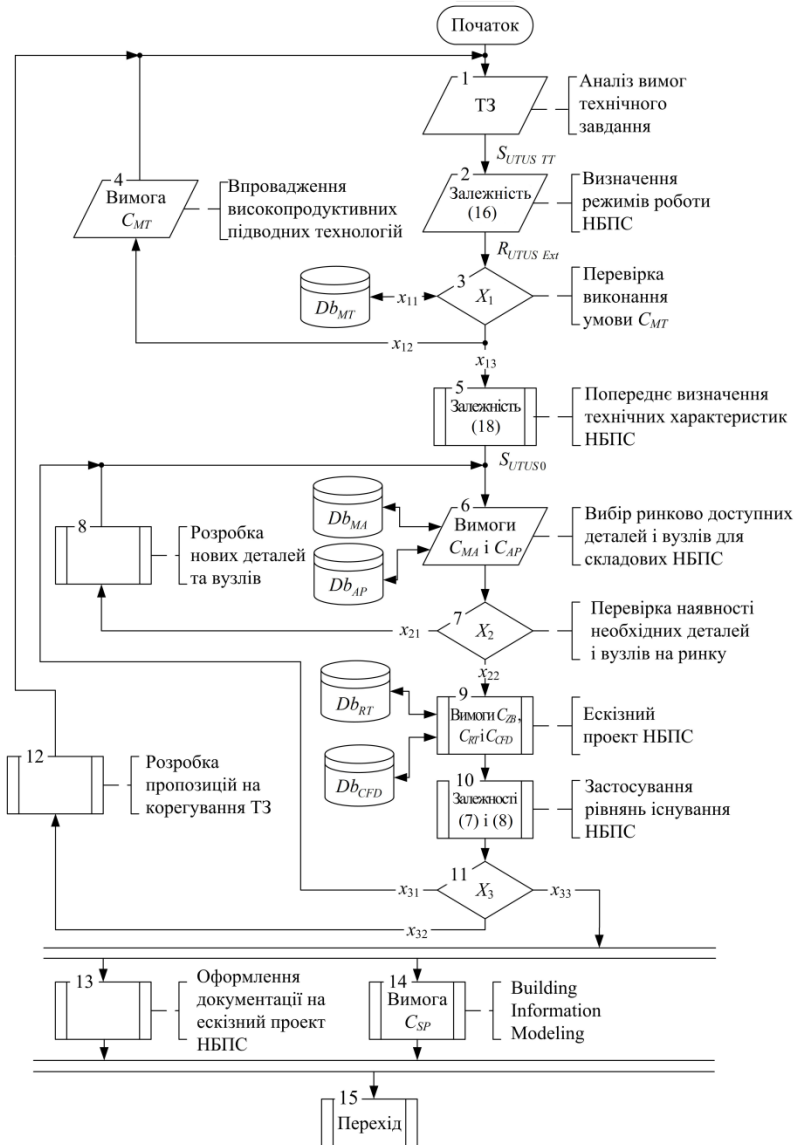


Рисунок 5 – Узагальнена схема проектування БПС

режими множини $R_{UTUS Ext}$ визначають найбільш напружені експлуатаційні режими, в яких мають працювати відповідні складові БПС, що проектується;
 блок 3 – перевірка відповідності ТЗ сучасним досягненням підводних технологій;
 умова X_1 має наступні предикати:
 – x_{11} – звернення до бази даних Db_{MT} сучасних підводних технологій;

– x_{12} – перехід до блоку 4 для розробки пропозицій на коригування ТЗ з метою впровадження сучасних технологій згідно до вимоги $C_{MT} \in C_{UTUS}$;

– x_{13} – перехід до блоку 5 за умови використання у проєкті сучасних підводних технологій;

блок 5 – визначення попередніх технічних характеристик S_{UTUS0} складових БПС, виходячи з вимог ТЗ;

блок 6 – вибір конструкційних матеріалів, деталей та вузлів для складових проєкту БПС, які є у наявності в базі даних Db_{MA} матеріалів та в базі даних Db_{AP} вузлів і систем підводної робототехніки згідно до вимог $C_{MA} \in C_{UTUS}$ та $C_{AP} \in C_{UTUS}$;

блок 7 – перевірка наявності необхідних конструкційних матеріалів, деталей і вузлів на ринку наукоємної продукції; умова X_2 має наступні предикати:

– x_{21} – перехід до блоку 8 формування замовлення на розробку нових матеріалів, деталей і вузлів, які відсутні на ринку такої продукції;

x_{22} – перехід до блоку 9 у разі наявності необхідної інформації щодо вибраних конструкційних матеріалів, деталей і вузлів для проєкту БПС;

блок 9 – ескізне проєктування БПС із застосуванням вибраних конструкційних матеріалів, деталей і вузлів; важливим тут є обов'язкове використання сучасних CAD/CAM/CAE-технологій проєктування (вимога $C_{RT} \in C_{UTUS}$) та CFD-пакетів програм (вимога $C_{RT} \in C_{UTUS}$), які містяться у відповідних базах даних Db_{RT} та Db_{CFD} ; це обумовлене можливістю вже на ранній стадії проєктування отримати достовірні дані про технічні характеристики складових БПС, у тому числі й у динамічних режимах. Вихідною інформацією блоку 9 є варіант S_{UTUS1} ескізного проєкту БПС;

блок 10 – виявлення відхилень конструктивних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних характеристик відповідних складових i -го варіанту БПС від вимог ТЗ шляхом попарних порівнянь матриць-стовпців (17) і (18);

блок 11 – перевірка відповідності конструктивних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних характеристик відповідних складових i -го варіанту БПС EE_{UTUSi} вимогам ТЗ ET_{UTUS} ; умова X_3 має наступні предикати:

– x_{31} – перехід до блоку 6 з метою вибору інших матеріалів, деталей і вузлів для складових БПС, які б покращили проєктні характеристики складових i -го варіанту буксированої системи;

– x_{32} – перехід до блоку 12 для формування пропозицій щодо зміни вимог ТЗ через неможливість реалізації його вимог у повному обсязі;

– x_{33} – перехід до блоку 13 підготовки документації ескізного проєкту БПС;

блок 14 – створення інформаційної моделі проєкту БПС, яка включає збір та комплексну обробку конструкторської, технологічної та економічної інформації про створюваний об'єкт підводної техніки цивільного чи подвійного призначення (вимога C_{SP}); вказана вимога передбачає застосування технології “Building Information Modeling” – моделювання процесу проєктування БПА як основи для швидкого розгортання серійного виробництва БПС;

блок 15 – перехід до стадії технічного проєктування БПС.

Таким чином, розроблений узагальнений алгоритм проєктування використовує принципи системного підходу у вигляді рівнянь існування БПС і забезпечує достовірне визначення її технічних характеристик вже на ранніх стадіях її розробки.

В четвертому розділі розроблено структуру та основні складові узагальнених показників ефективності застосування ненаселених буксируваних підводних систем, що утворює теоретичну основу їх кількісної оцінки на стадії зовнішнього проектування такого виду морської техніки. Наведено приклад застосування створеної методики проектування БПА проекту «Глайдер» на основі системного підходу та комп'ютерних технологій.

На рис. 5 показано у якості результату застосування комп'ютерних технологій показано 2D- і 3D-моделі запроєктованого легкого корпусу БПА проекту «Глайдер».

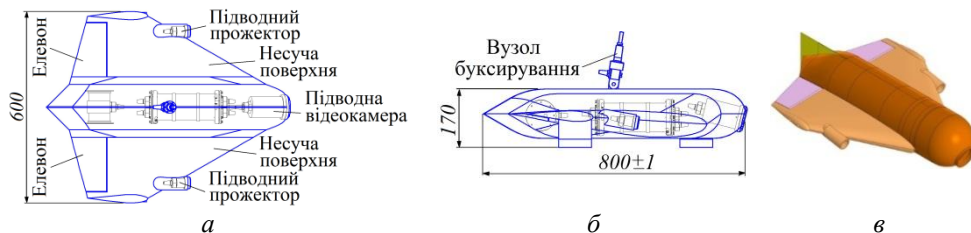


Рисунок 5 – 2D-модель (а – вид збоку, б – вид зверху) і 3D-модель (в) легкого корпусу БПА проекту «Глайдер» (САD-пакет КОМПАС-3D)

У рамках апробації адитивних технологій виробництва елементів БПС у розділі наведено результати виготовлення на 3D-принтері елементів легкого корпусу БПА проекту «Глайдер» та його несучих поверхонь (рис. 6), встановлено особливості вибору конструкційних матеріалів для виготовлення елементів легкого корпусу БПА.

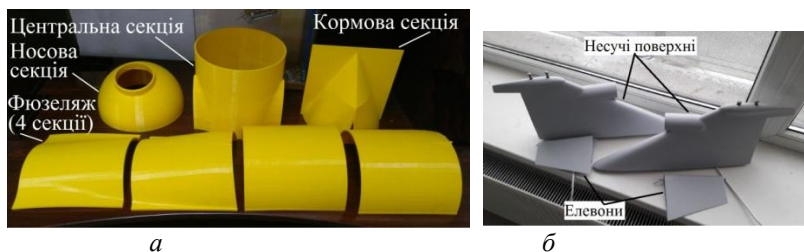


Рисунок 6 – Виготовлені за допомогою 3D-принтера елементи легкого корпусу (а), несучих поверхонь та елевонів БПА проекту «Глайдер» (б)

Досвід застосування адитивних технологій виробництва зазначених елементів БПА проекту «Глайдер» показав, що витрати часу на їх виготовлення знизились у 15-20 разів у порівнянні з традиційною технологією ручного виготовлення матриць цих елементів та їх обклеювання склопластиком. При цьому, собівартість виконаних виробничих робіт знизилась у 12-15 разів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі системного підходу та рівнянь існування розв'язано актуальне прикладне наукове завдання удосконалення проектування ненаселених буксируваних підводних систем цивільного та подвійного призначення для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій. Отримані

результати утворюють теоретичне підґрунтя для пошуку ефективних проектних рішень на ранніх стадіях створення таких систем.

При цьому отримано наступні наукові та практичні результати.

1. На основі огляду основних напрямків застосування та аналізу режимів роботи ненаселених буксированих підводних систем цивільного та подвійного призначення встановлено, що такі системи належать до найбільш продуктивних при оперативному обстеженні мілководних захищених акваторій держави, а їх створення є актуальним завданням у напрямку впровадження безекіпажних систем у морську практику.

2. На основі аналізу сучасних підходів до проектування засобів морської техніки взагалі і, зокрема, ненаселених буксированих підводних апаратів і систем, обґрунтовано доцільність створення нових конкурентоздатних зразків такої техніки та можливість підвищення ефективності проектних рішень на ранніх стадіях їх розробки шляхом застосування методології системного підходу та розроблених в НУК рівнянь існування для таких об'єктів підводної техніки.

3. У результаті аналізу існуючих методів проектування засобів морської техніки **вперше** розроблено генезис технологій проектування ненаселених буксированих підводних систем для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій, на основі якого обґрунтовано залучення новітніх технологій інформаційного забезпечення конструкторських та виробничих робіт.

4. На основі аналізу конструкцій та режимів роботи ненаселених буксированих підводних систем **удосконалено** їх класифікацію на основі застосування системного підходу шляхом уведення чотирьох системних груп класифікаційних ознак – функціональних, енергетичних, інформаційних та конструктивних; для кожної групи розроблено множини додаткових ознак, які класифікують конструктивні та експлуатаційні особливості таких систем, що утворює інформаційне підґрунтя для підвищення продуктивності проектних робіт на ранніх стадіях їх проектування.

5. Для перевірки можливості досягнення вимог технічного завдання вже на ранніх стадіях проектування буксированих підводних систем **вперше** побудовано множини матриць обмежень технічного завдання на конструктивні, енергетичні, інформаційні та експлуатаційні характеристики складових БПС та множини матриць цих характеристик для поточного етапу їх проектування; попарне порівняння відповідних елементів цих матриць після кожної ітерації проектних розрахунків дає можливість оперативно визначити рівень відповідності поточних конструкторських рішень вимогам технічного завдання.

6. На основі методології системного підходу розроблено структуру та основні складові узагальнених показників ефективності застосування ненаселених буксированих підводних систем для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій, що утворює теоретичну основу для розробки методів їх кількісної оцінки на стадії зовнішнього проектування та методологічну основу для формування державного замовлення такого виду підводної техніки;

7. **Удосконалено** методику проектування ненаселених буксированих підводних систем на основі використання системного підходу та рівнянь існування, яка дає змогу оцінювати ступінь виконання вимог технічного завдання вже на ранніх стадіях проектування, що утворює науково обґрунтовану методологічну основу для створення конкурентоспроможних засобів підводної техніки.

8. У результаті апробації створеної методики проектування ненаселених буксированих підводних систем на прикладі проектування і будівництва буксированого підводного апарата проекту «Глайдер» доведено ефективність та промислову перспективність її використання при реалізації державних завдань створення і впровадження безпекопажних систем у морську практику.

9. Теоретичні результати дисертаційних досліджень впроваджено при проектуванні та створенні дослідного зразка ненаселеного буксированого підводного апарата «Глайдер» в ТОВ «КАСКАД-СПЕЦСТРОЙ», а також НУК МОН України при розробці нових зразків підводної техніки в інтересах вітчизняних організацій.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. V. Blintsov, **Р. Кученко**. Application of systems approach at early stages of designing unmanned towed underwater systems for shallow water areas. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, №5/9 (101) 2019). – С. 15-26. DOI: 10.15587 / 1729-4061.2019.179486 (*Міжнародне фахове наукометричне видання, SCOPUS*)

2. Блінцов В.С., **Кученко П.С.** Генезис технологій та шляхи удосконалення проектування та побудови буксированих підводних систем для мілководних акваторій /В. С. Блінцов, П. С. Кученко // Технологічний аудит та резерви виробництва, 2020, – №3. – С. 19-27. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.202109 *Фахове видання*

3. **Кученко П.С.** Класифікаційні ознаки буксированих підводних систем як інформаційна складова ранніх стадій їх проектування // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2020. – №4(482). – С. 3-11. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2020.2\(482\)/4](https://doi.org/10.15589/znp2020.2(482)/4) *Фахове видання*

4. Блінцов В.С., Ключков О.П., **Кученко П.С.** Класифікаційні ознаки ненаселених прив'язних підводних систем як складова підвищення ефективності їх проектування. // Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2020. №1. С. 86-98. DOI: 10.33815/2313-4763.2020.086-098

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Блінцов В.С., **Кученко П.С.**, Надточій А.В., Соколов В.В. Сучасні завдання проектування та створення засобів морської робототехніки. – Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудування та океанотехніці». – Миколаїв, НУК, 2016. – С. 338-339.

6. Блінцов В.С., Бабкін Г.В., Блінцов О.В., Буруніна Ж.Ю., **Кученко П.С.** Сучасні завдання проектування та застосування засобів морської робототехніки. – Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудування та океанотехніці». – Миколаїв, НУК, 2017. – С. 46-47.

7. Буруніна Ж.Ю., **Кученко П.С.** Математична модель безпекопажного буксированого підводного комплексу як теоретична основа його автоматизованого проектування. – Підводна техніка і технологія: матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю : в 2 ч. – Миколаїв : НУК, 2018. – Ч. 1. – С. 22-26.

8. Блінцов В.С., **Куценко П.С.**, Майданюк П.В., Соколов В.В. Щодо створення інтегрованої системи роботизованого моніторингу надводної та підводної обстановки у територіальних водах України. – Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 2019. – С. 228-231.

9. Блінцов В.С., Клочков О.П., **Куценко П.С.** Методика визначення архітектурно-конструктивного типу прив'язних підводних систем для виконання пошукових, інспекційних і технічних підводних робіт. Підводна техніка і технологія: матеріали ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю: в 2 ч.. Миколаїв: НУК, 2019. Ч. 1. С. 3-22.

10. Блінцов В.С., **Куценко П.С.** Удосконалення проектування та побудови ненаселених буксируваних підводних систем для мілководних акваторій. – Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Миколаїв, 2020. – С. 6-17.

11. **Куценко П.С.** Удосконалення проектування ненаселених буксируваних підводних систем на основі системного підходу та комп'ютерних технологій. – Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 2020. С. 155-158.

12. Блінцов В.С., Клочков О.П., **Куценко П.С.** Класифікаційні ознаки ненаселених прив'язних підводних систем: системний підхід. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали ХІ Міжнародної науково-технічної конференції: в 2 ч. Миколаїв: НУК, 2020. Ч. 1. С. 168-175.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

13. Oleksandr Blintsov, Volodymyr Sokolov, **Pavel Kucenko**. Formulation of Design Tasks of Towed Underwater Vehicles Creation for Shallow Water and Automation of their Motion Control. – «EUREKA: Physics and Engineering», 2019. – Number 2. – Pages 30-42. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00854 (*Міжнародне фахове наукометричне видання, SCOPUS*)

14. Блінцов В.С., **Куценко П.С.** Застосування системного підходу під час зовнішнього проектування ненаселених буксируваних підводних систем. // *Механіка гіроскопічних систем*. 2020. №39 С. 105-132. **Фахове видання** DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771>

АНОТАЦІЯ

Куценко П.С. Удосконалення проектування ненаселених буксируваних підводних систем для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 – конструювання та будування суден. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2021.

У дисертації на основі застосування системного підходу та рівнянь існування розв'язано актуальне прикладне наукове завдання удосконалення проектування ненаселених буксируваних підводних систем цивільного та подвійного призначення

для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій. На основі аналізу існуючих методів проектування засобів морської техніки розроблено генезис технологій проектування ненаселених буксируваних підводних систем та обґрунтовано залучення новітніх технологій інформаційного забезпечення конструкторських та виробничих робіт. Побудовано множину матриць обмежень технічного завдання на конструктивні, енергетичні, інформаційні та експлуатаційні характеристики складових ненаселеної буксируваної підводної системи та множину матриць цих характеристик для поточного етапу їх проектування, попарне порівняння відповідних елементів яких після кожної ітерації проектних розрахунків дає можливість оперативно визначити рівень відповідності поточних конструкторських рішень вимогам технічного завдання. За отриманими результатами досліджень удосконалено методіку проектування ненаселених буксируваних підводних систем на основі використання системного підходу та рівнянь існування, яка дає змогу оцінювати ступінь виконання вимог технічного завдання вже на ранніх стадіях проектування, що утворює науково обґрунтовану методологічну основу для створення конкурентоспроможних засобів підводної техніки.

Ключові слова: ненаселена буксирувана підводна система, системний підхід, рівняння існування, методіка проектування.

АННОТАЦИЯ

Куценко П.С. Усовершенствование проектирования необитаемых буксируемых подводных систем для оперативного обследования мелководных защищенных акваторий. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 – Конструирование и строительство судов. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2021.

В диссертационной работе на основе системного подхода и уравнений существования решена актуальная прикладная научная задача усовершенствования проектирования необитаемых буксируемых подводных систем гражданского и двойного назначения для оперативного обследования мелководных защищенных акваторий.

В работе выполнен анализ основных направлений применения и режимов работы необитаемых буксируемых подводных систем гражданского и двойного назначения, по результатам которого сформулирована актуальность их создания с целью внедрения безэкипажных систем в морскую практику.

Выполнен анализ современных подходов к проектированию средств морской техники вообще и, в частности, необитаемых буксируемых подводных аппаратов и систем, обоснована целесообразность создания новых конкурентоспособных образцов такой техники и возможность повышения эффективности проектных решений на ранних стадиях их разработки путем применения методологии системного подхода и разработанных в Национальном университете кораблестроения имени адмирала Макарова уравнений существования для таких объектов подводной техники.

В результате анализа существующих методов проектирования средств морской техники разработан генезис технологий проектирования необитаемых буксируемых подводных систем для оперативного обследования мелководных защищенных акваторий, на основе которого обосновано привлечение новейших технологий информационного обеспечения конструкторских и производственных работ.

В результате анализа конструкций и режимов работы необитаемых буксируемых подводных систем предложена их классификация на основе применения системного подхода путем введения четырех системных групп классификационных признаков - функциональных, энергетических, информационных и конструктивных; для каждой группы разработано множество дополнительных признаков, которые классифицируют конструктивные и эксплуатационные особенности таких систем. Полученные результаты образуют информационную основу для повышения производительности проектных работ на ранних стадиях проектирования необитаемых буксируемых подводных систем.

Для проверки возможности достижения требований технического задания уже на ранних стадиях проектирования необитаемой буксируемой подводной системы построено множество матриц ограничений технического задания на конструктивные, энергетические, информационные и эксплуатационные характеристики составляющих проектируемой системы и множество матриц этих характеристик для текущего этапа их проектирования; попарное сравнение соответствующих элементов этих матриц после каждой итерации проектных расчетов дает возможность оперативно определить уровень соответствия текущих конструкторских решений требованиям технического задания.

На основе методологии системного подхода разработана структура и основные составляющие обобщенных показателей эффективности применения необитаемых буксируемых подводных систем для оперативного обследования мелководных защищенных акваторий, которое образует теоретическую основу для разработки методов их количественной оценки на стадии внешнего проектирования и методологическую основу для формирования государственного заказа на разработку и создание такого вида подводной техники.

В работе предложена обобщенная методика проектирования необитаемых буксируемых подводных систем на основе использования системного подхода и уравнений существования, которая дает возможность оценивать степень выполнения требований технического задания уже на ранних стадиях проектирования, что образует научно обоснованную методологическую основу для создания конкурентоспособных средств подводной техники.

В результате апробации созданной методики проектирования на примере проектирования и строительства исследовательского образца необитаемого буксируемого подводного аппарата доказана эффективность и промышленная перспективность ее использования при реализации задачи создания и внедрения безэкипажных подводных систем в морскую практику. Теоретические результаты диссертационного исследования использованы при разработке новых образцов подводной техники в интересах отечественных организаций.

Ключевые слова: необитаемая буксируемая подводная система, системный подход, уравнения существования, методика проектирования.

Kucenko P.S.. Improvement of the design of unmanned towed underwater systems for operational survey of shallow protected water areas. *Qualifying scientific work on the rights of the manuscript*.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.08.03 — *Design and construction of vessels*. - Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2021.

In the dissertation on the basis of application of the system approach and equations of existence the actual applied scientific task of improvement of designing of uninhabited towed underwater systems of civil and dual purpose for operative inspection of shallow protected water areas is solved. Based on the analysis of existing methods of designing marine equipment, the genesis of technologies for designing uninhabited towed underwater systems has been developed and the involvement of the latest technologies of information support of design and production works has been substantiated. A set of matrices of technical task constraints on structural, energy, information and operational characteristics of components of uninhabited towed underwater system and a set of matrices of these characteristics for the current stage of their design are constructed. requirements of the technical task. According to the obtained research results, the method of designing uninhabited towed underwater systems based on the use of a systems approach and equations of existence has been improved, which allows to assess the degree of fulfillment of technical task requirements at early stages of design.

Keywords: unmanned towed underwater system, system approach, equation of existence, design method.