

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**Ж. Ю. БУРУНІНА, А.М. ВОЙТАСИК,
О.П. КЛОЧКОВ, А.С. СІРІВЧУК**

**ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БЕЗЕКІПАЖНИХ ПРИВ'ЯЗНИХ
ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ**

Під загальною редакцією д.т.н. Блінцова В.С.

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв. НУК. 2018

УДК 629
ББК 39

Укладачі: Ж. Ю. Буруніна,
А.М. Войтасик
О.П. Клочков,
А.С. Сірівчук,
Рецензент Г. В. Бабкін, канд. техн. наук

Ж. Ю. Буруніна

Визначення технічних характеристик безекіпажних прив'язних підводних апаратів: Методичні вказівки / Ж. Ю. Буруніна, А.М. Войтасик, О.П. Клочков, А.С. Сірівчук // Під загальною редакцією д.т.н. Блінцова В.С. – Миколаїв: НУК, 2018. – 44 с.

Учбовий посібник присвячено розгляду підходів до створення складових прив'язної підводної системи як елементів, технічні характеристики яких взаємно впливають один на одного.

Призначений для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізація «Морська робототехніка»

УДК 629
ББК 39

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2018

ВСТУП

Розглядається система висвітлення підводної обстановки (СВПО), до складу якої входить прив'язна підводна система (ППС) на базі безекіпажного підводного апарата-робота (ПАР). ПАР є носієм спеціалізованого обладнання: гідроакустичних засобів, систем відеоспостереження, засобів відеообстеження та освітлення у видимому діапазоні для висвітлення підводної обстановки та додаткового обладнання (маніпулятори, різак і т.д.) для виконання суміжних задач.

Підводний апарат (ПА) ПАР обладнується рушійним комплексом (РК) та має можливість самостійно рухатись відносно корабля-носія (КН). Кабель-трос забезпечує можливість оперативної обробки отриманої інформації та керування ПАР. Таким чином забезпечується збільшення ефективної зони дії спеціалізованого обладнання, ніж при його встановленні безпосередньо на КН. Висвітлення підводної обстановки необхідно забезпечувати як на якірній стоянці корабля, так і при його русі. В першому випадку ПА може рухатись відносно корабля, в другому ще і синхронно з ним.

Сучасні постановки задачі висвітлення підводної обстановки потребують розробки нових ПАР з властивостями, яких не завжди можна досягти на практиці. Одним з актуальних

прикладних завдань у цьому напрямку є оцінка можливості реалізації усталеного синхронного руху ПА з його КН при заданих в оперативно-тактичних вимогах значеннях швидкості руху, глибини та дистанції ПА до КН. Цей експлуатаційний режим є ключовим в оцінках ефективності ПАР при виконанні ним моніторингу акваторії за призначенням [1]. Його успішна реалізація можлива за умови науково обґрунтованого вибору експлуатаційних та конструктивних характеристик КТ, який забезпечує енергоживлення рушійного комплексу та іншого обладнання ПА. Питання теорії та практики створення і застосування підводних роботів активно розробляються у вітчизняній і закордонній науково-технічній літературі.

Проте, питання проектування самохідних прив'язних підводних систем військового призначення відносно слабо представлені у джерелах, а наявні публікації висвітлюють лише окремі сторони задачі енергопостачання та впливу КТ на робочу зону ПАР і не враховують взаємного впливу гідродинамічних та електроенергетичних залежностей елементів ПАР.

В даному навчальному посібнику розроблено методику кількісного визначення реально досяжних конструктивних параметрів кабель-троса та рушійного комплексу прив'язної підводної системи для заданого режиму усталеного синхронного руху ПАР з КН.

1 МЕТОДИКИ СИНТЕЗУ ТА МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ-РОБОТІВ

Синтез ПАР, як метод досліджень, передбачає моделювання окремих його елементів з наступним вивченням ПАР в цілісності, єдності та взаємозв'язку його частин. Основні з них це: підводний апарат, кабель-трос (КТ), а також пост енергетики і керування (ПЕК) та кабельна лебідка (КЛ).

Пост енергетики і керування. Синтез ПЕК зводиться до опрацювання ергономічності робочого місця оператора ПАР, операторів додаткового обладнання і не є предметом досліджень, оскільки ПЕК не впливає на експлуатаційні характеристики ПАР.

Тому масо-габаритні параметри ПЕК $D_{\text{ПЕК}}$ та максимальну споживану потужність ПЕК $P_{\text{ПЕК}}$ приймемо незмінними: $D_{\text{ПЕК}} = \text{const}$ та $P_{\text{ПЕК}} = \text{const}$.

Далі розглянемо решту елементів у спрощеному форматі, достатньому для розв'язку поставленої задачі.

2 ПРОЦЕС СИНТЕЗУ ПІДВОДНОГО АПАРАТА

Синтез ПА складається з оціночних розрахунків корпусу ПА, РК та решти обладнання і виконується в такій послідовності.

Відповідно до складу обладнання ПА враховуються його масо-габаритні параметри $D_{\text{ОБЛ}}$ та споживана потужність $P_{\text{ОБЛ}}$, яка залежить від режиму експлуатації. В даній постановці задачі ці величини приймаються константами: $D_{\text{ОБЛ}} = \text{const}$ та $P_{\text{ОБЛ}} = \text{const}$.

Далі на основі власного досвіду обираємо склад, кількість електрорушійних пристроїв (ЕРП) та їх розташування на ПА, що в сукупності повинне утворити конфігурацію РК – $K_{\text{РК}}$. В залежності від конфігурації отримуємо його масо-габаритні параметри $D_{\text{РК}}$ та визначаємо його повну споживану потужність $P_{\text{РК}}$:

$$D_{\text{РК}} = f(K_{\text{РК}}) \quad (1)$$

$$P_{\text{РК}} = P_{\text{ЕРП1}} + \dots + P_{\text{ЕРП}i} + \dots + P_{\text{ЕРП}N} \quad (2)$$

де $P_{\text{ЕРП}i} = f(K_{\text{РК}})$ – повна споживана потужність i -го ЕРП;

N – загальна кількість ЕРП в РК.

Також розраховуються діапазони зміни кожної складової вектора $\vec{F}_{PK} = \{F_{PKx}, F_{PKy}, F_{PKz}\}$, які підпорядковуються таким виразам:

$$\left. \begin{aligned} F_{PKx} &\in [F_{PKxmin}, F_{PKxmax}]; \\ F_{PKy} &\in [F_{PKymin}, F_{PKymax}]; \\ F_{PKz} &\in [F_{PKzmin}, F_{PKzmax}]; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Індексами *min* та *max* позначені відповідно мінімальні та максимальні значення упорів РК за кожною віссю декартової системи координат.

Відомо, що величини $F_{PKx,y,z}$ залежать від сигналів керування, конфігурації РК та параметрів руху $\vec{V}$ та середовища ρ , а їх максимальні та мінімальні значення можна представити такими залежностями:

$$F_{PKx,y,z,min,max} = f(K_{PK}, \vec{V}, \rho); \quad (4)$$

Споживана потужність ПА $P_{ПА}$ визначається за такою формулою:

$$P_{\text{ПА}} = P_{\text{ОБЛ}} + P_{\text{РК}}.$$

В залежності від $D_{\text{ОБЛ}}$ та $D_{\text{РК}}$ отримуємо масо-габаритні параметри ПА $D_{\text{ПА}}$ та силу лобового опору корпусу ПА $F_{\text{ПА}}$:

$$D_{\text{ПА}} = f(D_{\text{ОБЛ}}, D_{\text{РК}});$$

$$F_{\text{ПА}} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot c_{\text{ПР}} \cdot S_{\text{ПР}};$$

де $c_{\text{ПР}}$, $S_{\text{ПА}}$ – відповідно гідродинамічний коефіцієнт та характерна площа корпусу ПА.

3 СИНТЕЗ КАБЕЛЬ-ТРОСА

Синтез системи КТ на даному етапі зводиться до електроенергетичного розрахунку з метою:

вибору або розрахунку повної довжини КТ L ;

вибору параметрів електроживлення: кількості фаз електроживлення n , напруги живлення $u_{\text{ж}}$, цей вибір виконується згідно з параметрами основного споживача енергії на ПА – параметрами РК;

вибору параметрів інформаційного обміну: формату інформаційних жил та розрахунку їх сумарного діаметру d ;

вибору параметрів вантажонесучого елементу, його

матеріалу й конфігурації та розрахунку його діаметру d_b ;

розрахунку діаметру силової жили в ізоляції $d_c = f(P_{\text{ПР}}, u_{\text{ж}}, n)$;

розрахунку сумарного діаметру КТ $d_{\text{КТ}}$ з забезпеченням нульової плавучості та розрахунку мінімально допустимого радіусу згинання КТ r_{min} , який знадобиться при проектуванні КЛ. Таким чином, величину $d_{\text{КТ}}$ можна представити:

$$d_{\text{КТ}} = f(d_c, n, L, d_i, d_b) = f(P_{\text{ПР}}, u_{\text{ж}}, n, L, d_i, d_b).$$

Пропускна здатність жил інформаційного обміну та розривна міцність вантажонесучого елемента зазвичай обираються достатніми для поставленої задачі, а основні розміри приходяться на силові жили, тому в розрахунках приймаються $d_i = \text{const}$ та $d_b = \text{const}$ і діаметр КТ розраховується за такою залежністю:

$$d_{\text{КТ}} = f(P_{\text{ПР}}, u_{\text{ж}}, n, L) \quad (5)$$

Також необхідно встановити гідродинамічні коефіцієнти КТ c_n та c_t , які залежать від матеріалу зовнішньої оболонки КТ, та мінімально допустимий радіус згинання КТ r_{min} , який залежить від конструкції КТ.

4 ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ КАБЕЛЬНОЇ ЛЕБІДКИ

Розрахунок КЛ виконується на основі параметрів КТ та обертових швидкостей попускання-вибирання КТ. Цікавість представляють масо-габаритні параметри КЛ $D_{\text{КЛ}}$, які можна представити такою узагальненою залежністю:

$$D_{\text{КЛ}} = f(L, d_{\text{КТ}}, r_{\text{min}}),$$

де r_{min} – мінімально допустимий радіус згинання КТ. В результаті дослідник отримує величину споживаної потужності КЛ $P_{\text{КЛ}}$. Масо-габаритні параметри ПАР у цілому можна представити залежністю:

$$D_{\text{ПАР}} = f(D_{\text{ПР}}, D_{\text{КЛ}}, D_{\text{ПЕК}}).$$

Повна споживана потужність ПАР розраховується за такою формулою:

$$P_{\text{ПАР}} = P_{\text{ПА}} + P_{\text{КЛ}} + P_{\text{ПЕК}}$$

На цьому розрахунок ПАР закінчується і основні параметри ПАР становляться визначеними.

5 ВИЗНАЧЕННЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІДВОДНОГО АПАРАТА

Основою визначення експлуатаційних характеристик ПА є інверсна модель КТ:

$$\vec{F}_f = \vec{f}(r_i, \vec{V}, \rho, L_{\text{КТ}}, d_{\text{КТ}}, c_n, c_t) \quad (6)$$

де r_i – точка робочої зони R , для якої розраховується вектор сили натягу на ходовому кінці КТ $\vec{F}_f$, $L_{\text{КТ}}$ – довжина попущеної частини КТ.

Розрахунок оптимальних довжин кабель-тросу для точок робочої зони підводного апарата розглянемо з позицій визначення множини оптимальних довжин КТ L_R для множини точок робочої зони R . Відомо, що при заданих величинах c_n , c_t для кожної точки розташування ПА відносно КН існує тільки одна довжина КТ, при якій гідродинамічний опір КТ буде мінімальним, незалежно від інших змінних:

$$l_{ri} = f(r_i, c_n, c_t).$$

Приймемо $c_n = \text{const}$ та $c_t = \text{const}$, тому що ці величини

визначаються при проектування ПАР і залежать в основному від матеріалу зовнішньої оболонки КТ. Звідси кожній r_i однозначно відповідає l_{ri} :

$$l_{ri} = f(r_i)$$

Обчислення l_{ri} виконується шляхом інверсного моделювання КТ як залежності виду (3.6), із семи аргументів якої змінюються тільки два, оскільки всі інші враховуються як константи:

$$\vec{F}_f = \vec{f}(r_i, l_i)$$

де l_{ri} – довжина попущеної частини КТ. При цьому при переборі величини l_{ri} модуль вектора $\vec{F}_f$ буде спочатку зменшуватись, а потім збільшуватись, перетнувши точку мінімуму. Саме в цій точці величина $l_{ri} = l_{ri}$.

Так, для всіх точок множини R визначаються оптимальні довжини КТ l_{ri} , тобто множина $L_R = \{l_{r1}, \dots, l_{ri}, \dots, l_{rN}\}$. Слід зазначити, що значення деяких з l_{ri} можуть співпадати між собою. Очевидно, що розрахунок точок множини L_M є поодиноким випадком розрахунку L_R і виконується за такою самою методикою. Слід зазначити, що найбільша з l_{ri} і є

основним показником для вибору повної довжини КТ L , тобто в загальному випадку $L = \max(L_R)$, якщо інше не оговорюється в ТЗ.

Визначимо тепер фактичну робочу зону підводного апарата як одну з ключових тактико-технічних характеристик ППА.

Робочу зону ПА визначаємо у такій послідовності.

Формуємо множину $R = \{r_1, \dots r_i, \dots r_N\}$, яка гарантовано буде містити всі точки робочої зони.

Для кожної точки множини R розраховуємо оптимальну довжину попущеної частини КТ, ці довжини утворять множину $L_R = \{l_{r1}, \dots l_{ri}, \dots l_{rN}\}$.

Для кожної точки множин R і L_R та для заданих умов руху V і ρ розраховуємо вектор сили натягу на ходовому кінці КТ $\vec{F}_f$ за залежністю на базі виразу (6):

$$\vec{F}_f = \{F_{fx}, F_{fy}, F_{fz}\} = \vec{f}(r_i, l_{ri}, \vec{V}, \rho, d_{KT}, c_n, c_t)$$

Далі визначаємо, чи здатен ЕРК урівноважити силу натягу від КТ, тобто РК має забезпечити вектор упорів $\vec{F}_{PK} = -\vec{F}_f$: якщо кожна складова вектора $-\vec{F}_f$ потрапляє у відповідний діапазон складових вектора $\vec{F}_{PK}$ (3), то точка r_i залишається у

складі множини R , інакше – видаляється з неї. Позначимо умову забезпечення рівноваги $\vec{F}_{PK} = -\vec{F}_f$ змінною C , тоді можна записати:

$$\left. \begin{aligned} C &= c_x \wedge c_y \wedge c_z; \\ c_x &= \begin{cases} \text{true, якщо } -(F_{fx} + F_{IP}) \in [F_{PKxmin}, F_{PKxmax}]; \\ \text{false інакше;} \end{cases} \\ c_y &= \begin{cases} \text{true, якщо } -F_{fy} \in [F_{PKymin}, F_{PKymax}]; \\ \text{false інакше;} \end{cases} \\ c_z &= \begin{cases} \text{true, якщо } -F_{fz} \in [F_{PKzmin}, F_{PKzmax}]; \\ \text{false інакше;} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

де $c_{x,y,z}$ – умови забезпечення рівноваги по кожній осі координат. В умові c_x присутня складова F_{IP} , оскільки по цій осі РК повинен долати не тільки складову сили натягу КТ, а й силу лобового опору корпусу ПА.

Таким чином множина R після відкидання зайвих точок складатиме робочу зону ПА.

Перевірити, чи здатна ППС виконувати поставлену задачу руху, можна у такій самій послідовності, тільки замість множин R і L_R використаємо M і L_M :

– для кожної точки множин M і L_M та для заданих умов руху V і ρ розраховуємо вектор сили натягу на ходовому кінці КТ $\vec{F}_f$ за формулою (6):

$$\vec{F}_f = \{F_{fx}, F_{fy}, F_{fz}\} = \vec{f}(m_j, l_{mj}, \vec{V}, \rho, d_{KT}, c_n, c_t);$$

– визначаємо, чи здатен ЕРК урівноважити силу натягу від КТ: якщо кожна складова вектора $-\vec{F}_f$ потрапляє у відповідний діапазон складових вектора $\vec{F}_{PK}$ (3), то точка m_j є досяжною для ПА. Якщо хоча б одна m_j виявляється недосяжною, то поставлена задача руху ПАР не виконується, або виконується не повністю і є необхідність у переоцінці параметрів елементів ПАР.

Як бачимо, результат синтезу при такому підході не завжди є задовільним.

Основні співвідношення та опис методик для здійснення розрахунків конструктивних параметрів окремо ПА та ПАР у цілому зведено до табл. 1, 2.

Таблиця 1 – Методики розрахунку конструктивних параметрів підводного апарата

Елемент ПР	Шукані величин и	Вхід ні дані	Залежності	Методика розрахун ку
Обладна ння	$D_{\text{ОБЛ}}$, $P_{\text{ОБЛ}}$	—	$D_{\text{ОБЛ}} = \text{const}; P_{\text{ОБЛ}} = \text{const}$	—
РК	$D_{\text{РК}}$	$K_{\text{РК}},$ $\vec{V}, \rho$	$D_{\text{РК}} = f(K_{\text{РК}})$	—
	$P_{\text{РК}}$		$P_{\text{ЕРП}i} = f(K_{\text{РК}})$	Математи чні моделі або паспортні хар-ки обраних ЕРП
			$P_{\text{РК}} = \sum_{i=1}^N P_{\text{ЕРП}i}$	Аналітич на залежніст ь
	$F_{\text{РК}x,y,z;\min}$ $,\max$		$F_{\text{РК}x,y,z;\min,\max} = f(K_{\text{РК}}, \vec{V}, \rho)$	

Таблиця 2 – Методики розрахунку конструктивних параметрів підводного апарата-робота

Елемент ПАР	Шукані величини	Вхідні дані	Залежності	Методика розрахунку
ПЕК	$D_{\text{ПЕК}},$ $P_{\text{ПЕК}}$	–	$D_{\text{ПЕК}} = \text{const}; P_{\text{ПЕК}} = \text{const}$	–
ПА	$D_{\text{ПА}},$	$D_{\text{обл}},$ $D_{\text{РК}}$	$D_{\text{ПА}} = f(D_{\text{ОБЛ}}, D_{\text{РК}})$	–
	$P_{\text{ПА}},$	$P_{\text{обл}},$ $P_{\text{РК}}$	$P_{\text{ПА}} = P_{\text{ОБЛ}} + P_{\text{РК}}$	Аналітична залежність
	$F_{\text{ПА}}$	$V, \rho,$ $c_{\text{ПР}},$ $S_{\text{ПА}}$	$F_{\text{ПА}} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot c_{\text{ПА}} \cdot S_{\text{ПА}}$	Математична модель
КТ	L	L_R	$L = \max(L_R)$	Пошук максимального числа з множини
	$d_{\text{КТ}}$	$P_{\text{ПА}},$ $u_{\text{ж}}, n,$ L	$d_{\text{КТ}} = f(P_{\text{ПА}}, u_{\text{ж}}, n, L)$	Аналітична залежність
	$c_n, c_t, r_{\min}$	В роботі не розглядаються		Довідникові дані
КЛ	$D_{\text{КЛ}}$	$L, d_{\text{КТ}},$ $r_{\min}$	$D_{\text{КЛ}} = f(L, d_{\text{КТ}}, r_{\min})$	Математичні або табличні моделі
	$P_{\text{КЛ}}$	В роботі не розглядається		
ПАР	$D_{\text{ПАР}}$	$D_{\text{ПА}},$ $D_{\text{КЛ}},$ $D_{\text{ПЕК}}$	$D_{\text{ПАР}} = f(D_{\text{ПР}}, D_{\text{КЛ}}, D_{\text{ПЕК}})$	
	$P_{\text{ПАР}}$	$P_{\text{ПАР}},$ $P_{\text{КЛ}},$ $P_{\text{ПЕК}}$	$P_{\text{ПАР}} = P_{\text{ПА}} + P_{\text{КЛ}} + P_{\text{ПЕК}}$	Аналітична залежність

Основні співвідношення та опис методик для здійснення обчислень експлуатаційних параметрів ПАР зведено до табл. 3.

Таблиця 3 – Методики розрахунку експлуатаційних характеристик підводного апарата-робота

Експлуатаційні параметри	Шукані величини	Вхідні дані	Залежності	Методика розрахунку
Оптимальна довжина КТ	L_R	c_n, c_t, R	$l_{ri} = f(r_i, c_n, c_t);$ $\vec{F}_f = \vec{f}(r_i, l_i)$	Методика перебору
Робоча зона	R	$L_R, \vec{V},$ $\rho, d_{КТ},$ $c_n, c_t,$ $F_{PKxmin},$ $F_{PKxmax},$, $F_{PKymin},$ $F_{PKymax},$, $F_{PKzmin},$ F_{PKzmax}	$\vec{F}_f = \vec{f}(r_i, l_{ri}, \vec{V},$ $\rho, d_{КТ}, c_n, c_t)$	Методика перебору

Визначимо тепер реально досяжні параметри ПАР як одну з ключових тактико-технічних характеристик.

Методика визначення реально досяжних параметрів ПАР перш за все має відповідати на питання чи взагалі поставлену задачу руху можливо реалізувати сучасними технічними засобами та, якщо можливо, то які при цьому параметри матиме ПАР. Інакше кажучи, чи можливо ПА дістатись всіх точок множини M при обмеженнях $D_{\text{ПАР}}$ й $P_{\text{ПАР}}$ та заданих V і ρ .

Аналіз ПАР показує, що для отримання відповіді на такі питання необхідно спільно розглядати дві особливості КТ, які мають різну фізичну природу, проте їх взаємозв'язок має вирішальний вплив на можливість виконання вимог ТЗ. Це гідродинамічні та електроенергетичні характеристики КТ.

Створення методики кількісного визначення реально досяжних параметрів ПАР для заданого режиму усталеного синхронного руху з КН потребує розрахунку окремих її параметрів як єдиного сило-енергетичного комплексу, де враховується вказаний взаємозв'язок.

Так, електроенергетичні та гідродинамічні характеристики КТ зв'язані між собою його діаметром $d_{\text{КТ}}$. Чим більше діаметр КТ, тим більшу потужність можна передати на ПАР, але при цьому гідродинамічний опір КТ також зростає.

Задача синтезу такої ПАР включає в себе пошук та вибір

такого діаметру КТ, при якому потужності, що передається до ЕРК ПАР, вистачало б для подолання гідродинамічного опору КТ з обраним діаметром $d_{\text{КТ}}$.

Послідовність розрахунків за методикою наступна:

а) Задаємо дані для розрахунку, виходячи з умов оперативно-тактичних вимог: межі робочої зони ПА М, швидкість синхронного руху системи «КН – ПАР» V та питому густину води ρ . Також визначаємо гідродинамічні коефіцієнти КТ c_n та c_t , оскільки вони залежать в основному від матеріалу зовнішньої оболонки КТ, який зазвичай обирається зі стандартного переліку.

б) Для кожної точки множини М розраховуємо множину LM та отримуємо повну довжину КТ L.

в) Обираємо діапазон можливих діаметрів КТ $d_{\text{КТ}} \in [d_{\text{КТmin}}, d_{\text{КТmax}}]$, в межах якого будемо виконувати розрахунок. Вибір $d_{\text{КТmin}}$, $d_{\text{КТmax}}$ обумовлюється досвідом, обмеженнями тактико-технічних вимог, тощо.

г) Для обраного діапазону діаметрів КТ та для точок множини М розраховується вектор сили натягу на корінному кінці КТ, тобто отримуються залежності виду (3.6)

$$\vec{F}_f = \vec{f}(d_{\text{КТ}}, m_j, l_{mi}) \quad (8)$$

Таким чином, на даному етапі маємо залежності сили натягу КТ $\vec{F}_f$ від діаметрів $d_{KT} \in [d_{KTmin}, d_{KTmax}]$ в кожній точці множини M .

Якщо точок багато, то обсяг розрахунків суттєво збільшується.

е) Визначаємо можливі конфігурації РК, які будуть відрізнятись одна від одної моделями використаних ЕРП, їх кількостями та розташуванням на ПА.

ф) Отримуємо залежності максимальних та мінімальних упорів РК при заданих умовах руху V та ρ від діаметрів КТ d_{KT} :

$$F_{PKx,y,z,min,max} = f(d_{KT}) \quad (9)$$

На наступному кроці треба виділити діапазони діаметрів КТ, для яких умова виконання поставленої задачі синхронного руху з КН буде істинною (3.7).

Якщо для жодного діаметру умова (3.7) не виконується, тоді поставлену задачу руху із заданими обмеженнями виконати не можливо.

При сприятливих результатах розрахунку оцінюється $D_{ПАР}$ та $P_{ПАР}$, порівнюється із заданими і виконується остаточний вибір d_{KT} .

Таким чином, поставлену задачу розв'язано.

Методика розрахунку залежності між силою натягу кабель - тросу та його діаметром

Розв'язання задачі за рівнянням (8) потребує перебору всіх точок m_j для кожного діаметру d_{KT} . Витрати часу на такий перебір будуть відносно великі. Проте є можливість виділити ті точки m_j , для яких задача керування не буде виконуватися, і якщо це не суперечить вимогам до ПАР видалити їх з множини M .

У випадку неможливості перегляду вимог пропонується не виконувати перебір всіх точок m_j для кожного діаметру в рівнянні (8), а вибрати шість таких точок, в яких кожна складова вектора сили натягу набуває свого максимального або мінімального значення. Зміна d_{KT} на перелік точок m_j не вплине, оскільки зміна d_{KT} викликає пропорційну зміну $\vec{F}_f$.

В даному посібнику такі m_j пропонується виділяти комп'ютерним перебором, який ґрунтується на інверсному моделюванні КТ (6).

Блок-схема алгоритму розрахунків за методикою наведена на рис. 1.

Дамо опис алгоритму в порядку нумерації його блоків.

Блок 1. Введення даних для розрахунку:

- параметри КТ d_{KT} , c_n , c_b , L_M ;
- параметри руху V й середовища ρ ;

– межі робочої зони $M = \{m_1, \dots m_j, \dots m_Q\}$.

Блок 2. Виконання операцій присвоєння:

– задання номеру точки з множини $j := 1$;

– задання поточної точки $m := M(j) = m_j$;

– задання поточної довжини КТ $l := L_M(j) = l_{mj}$;

– задання початкових значень складових вектора сили натягу та номерів точок, в яких ця сила виникає:

$F_{xmin} := 0, j_{xmin} = 0; F_{xmax} := 0, j_{xmax} = 0; F_{ymin} := 0, j_{ymin} = 0; F_{ymax} := 0, j_{ymax} = 0;$

$F_{zmin} := 0, j_{zmin} = 0; F_{zmax} := 0, j_{zmax} = 0.$

Блок 3. Розрахунок сили натягу на ходовому кінці КТ в точці m при довжині попущеної частини КТ l :

$$\vec{F}_f = \{F_{fx}, F_{fy}, F_{fz}\} = \vec{f}(m, V, \rho, l, d_{\hat{E}\hat{O}}, c_n, c_t).$$

Блок 4. Перевірка умови $F_{fx} < F_{xmin}$.

Блок 5. Виконання операцій $F_{xmin} := F_{fx}, j_{xmin} = j$;

Блок 6. Перевірка умови $F_{fx} > F_{xmax}$.

Блок 7. Виконання операції $F_{xmax} := F_{fx}, j_{xmax} = j$;

Блок 8. Перевірка умови $F_{fy} < F_{ymin}$.

Блок 9. Виконання операцій $F_{ymin} := F_{fy}, j_{ymin} = j$;

Блок 10. Перевірка умови $F_{fy} > F_{ymax}$.

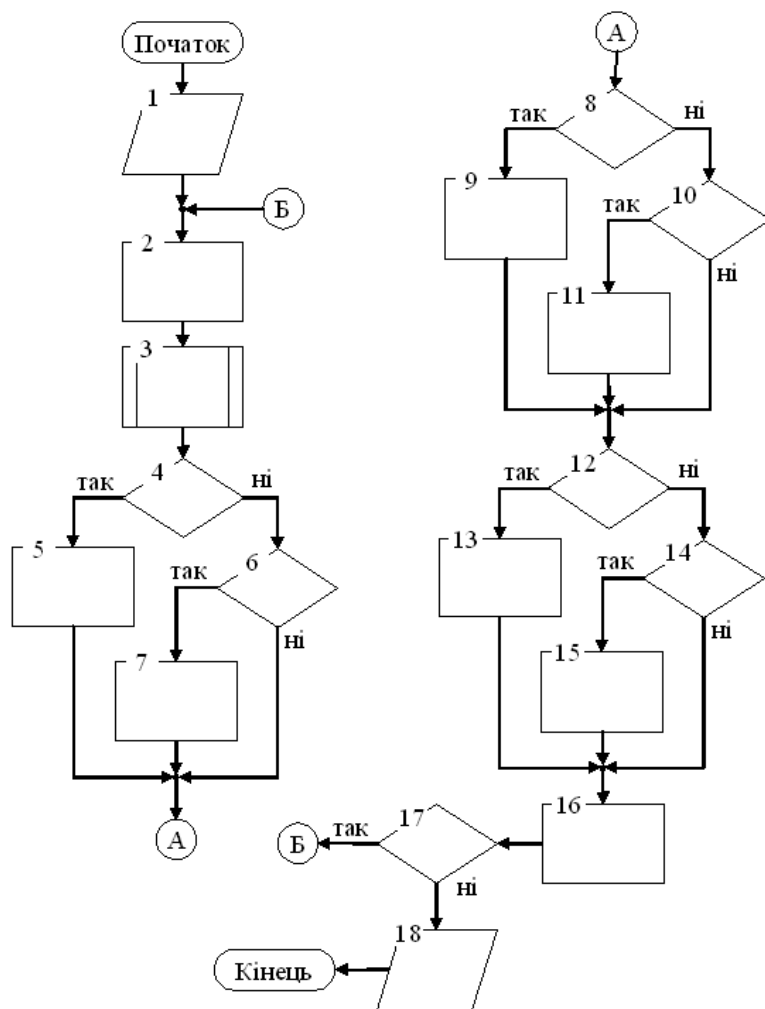


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму розрахунків

Блок 11. Виконання операції $F_{ymax} := F_{fy}, j_{ymax} = j$;

Блок 12. Перевірка умови $F_{fz} < F_{zmin}$.

Блок 13. Виконання операцій $F_{zmin} := F_{fz}, j_{zmin} = j$;

Блок 14. Перевірка умови $F_{fz} > F_{zmax}$.

Блок 15. Виконання операції $F_{zmax} := F_{fz}, j_{zmax} = j$;

Блок 16. Виконання операції $j := j + 1$.

Блок 17. Перевірка умови $j \leq Q$.

Блок 18. Вивід результатів розрахунку: $F_{x,y,z;min,max}, j_{x,y,z;min,max}$.

Так, маємо, що:

$$F_{fx} \in [F_{xmin}, F_{xmax}];$$

$$F_{yx} \in [F_{ymin}, F_{ymax}];$$

$$F_{zx} \in [F_{zmin}, F_{zmax}].$$

Розрахунок залежностей $\vec{F}_f = \vec{f}(d_{KT}, m_j, l_{mi})$ тепер необхідно виконати тільки для точок з номерами $j_{x,y,z;min,max}$, а система рівнянь (7) набуває такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 C &= c_x \wedge c_y \wedge c_z; \\
 c_x &= \begin{cases} \text{true, якщо } [-(F_{xmin} + F_{\text{ПР}}), -(F_{xmax} + F_{\text{ПР}})] \in [F_{\text{PKxmin}}, F_{\text{PKxmax}}]; \\ \text{false інакше;} \end{cases} \\
 c_y &= \begin{cases} \text{true, якщо } [-F_{ymin}, -F_{ymax}] \in [F_{\text{PKymin}}, F_{\text{PKymax}}]; \\ \text{false інакше;} \end{cases} \\
 c_z &= \begin{cases} \text{true, якщо } [-F_{zmin}, -F_{zmax}] \in [F_{\text{PKzmin}}, F_{\text{PKzmax}}]; \\ \text{false інакше.} \end{cases}
 \end{aligned} \right\}$$

Запропонована методика дає змогу науково обґрунтовано вибирати елементи рушійного комплексу ПАР на ранніх етапах його створення та суттєво зменшити обсяг розрахунків залежностей між силою натягу на ходовому кінці КТ та його діаметром для визначення можливості виконання апаратом поставленої задачі руху.

Розглянемо тепер методику визначення діапазонів упорів рушійного комплексу в залежності від діаметру кабель-троса.

Встановити залежність між упорами рушійного комплексу та діаметром КТ виду (9) можливо, якщо взяти у ролі вхідних даних для розрахунку змінні K_{PK} , $\vec{V}$ та ρ . Тоді співвідношення (9) встановлюється за відповідною схемою рис. 2.

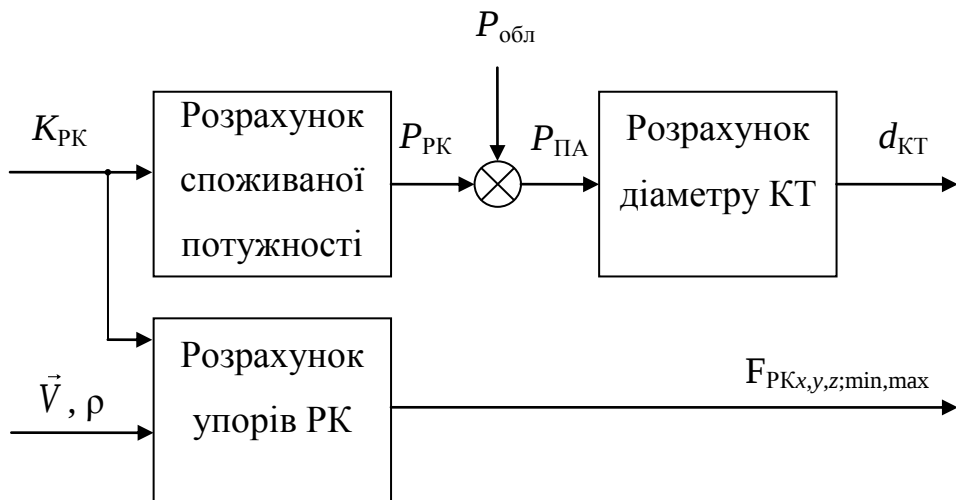


Рисунок 2 – Схема розрахунку залежності між упорами рушійного комплексу та діаметром кабель-троса

Розрахунок споживаної потужності РК виконується згідно (2), діапазонів упорів РК – як залежність (4), діаметр КТ – як залежність (5). Так, виконавши серію розрахунків, отримуємо однозначну відповідність між величиною $d_{КТ}$ та величинами $F_{РКx,y,z;min,max}$, яка і буде представляти собою залежність виду (9).

Розрахунок діаметру кабель – тросу виду (5) виконується з використанням встановленої вище залежності:

$$d_{KT} = 2 \left(k_{PW} \sqrt{\frac{P_{\Pi P}}{\pi j_W n u_{ж}}} + \delta_T + k_{PW} \delta_i \right) \quad (10)$$

де j_W – максимально припустима густина струму у силових жилах КТ (наприклад, з попередніх вимог до температурного режиму КТ);

n , $u_{ж}$ – відповідно, число фаз і величина фазної напруги живлення ПА;

$k_{PW}(n)$ – коефіцієнт укладення силових жил у сердечнику КТ;

δ_i – товщина електричної ізоляції силової жили КТ;

δ_T – товщина зовнішньої оболонки КТ;

Розрахунок діапазонів упорів рушійного комплексу.

Розрахунок діапазонів упорів РК виконується в залежності від розташування ЕРП на ПА. Конфігурації РК – кількість ЕРП та варіації їх розташування на ПА – можуть суттєво відрізнятись для різних ПА. Виділяють такі основні конфігурації:

- два маршових ЕРП та один вертикальний ЕРП забезпечують поздовжній та вертикальний поступальний рух ПА та обертовий рух навколо вертикальної осі (рискання);

- додавання бокового (лагового) ЕРП забезпечує поступальний рух ПА по поперченій осі;

- розташування ЕРП по кутах рами ПА під кутом

забезпечують додаткову маневреність ПА за рахунок зменшення поступальної швидкості руху;

– інші.

Розглянемо класичну конфігурацію РК, до складу якого входять два маршових ЕРП: лівий ЕРП_л та правий ЕРП_п; один вертикальний ЕРП_в та один бокового руху ЕРП_б.

Тоді:

$$F_{PKxmin} = F_{лmin} + F_{пmin};$$

$$F_{PKxmax} = F_{лmax} + F_{пmax};$$

$$F_{PKymin} = F_{вmin};$$

$$F_{PKymax} = F_{вmax};$$

$$F_{PKzmin} = F_{бmin};$$

$$F_{PKzmax} = F_{бmax},$$

де $F_{л,п,в,б}$ – упори лівого маршового, правого маршового, вертикального та бокового ЕРП відповідно.

Як бачимо, основною задачею у виділенні діапазонів упорів є розрахунок упору кожного окремого ЕРП, при цьому маршові ЕРП рухаються в потоці зі швидкістю V , а вертикальний і боковий – зі швидкістю 0 , оскільки при їх розрахунках враховується швидкість руху по повздовжній осі ЕРП.

Величини $F_{л,п,в,б}$ обираються за паспортними

характеристиками, які для своїх ЕРП наводить виробник. Як приклад, дані по ЕРП виробництва компанії Tescadune (США) для $V = 0$ та 2 м/с наводяться в табл. 4.

З паспортних даних реальних ЕРП можна отримати їх табличні моделі. Недоліком таких моделей є обмежені діапазони змінних, для яких виробник наводить дані.

Якщо для заданих параметрів руху дані не наводяться або планується використання ЕРП власної розробки, то діапазони упорів встановлюються методами моделювання. Розглянемо особливості моделювання РК та ЕРП.

РК створює вектор упору $\vec{F}_{РК}$ для забезпечення поступального руху ПА та вектор моменту $\vec{M}_{РК}$ для забезпечення обертowego руху ПА.

В залежності від вектору сигналів керування $\vec{U}_{РК}$, конфігурації РК $K_{РК}$ та поточних параметрів руху ($\vec{V}$) і середовища (ρ) вектори $\vec{F}_{РК}$ та $\vec{M}_{РК}$ можуть приймати різні значення.

Таблиця 4 – Характеристики електрорушійного пристроїв
виробництва компанії Tescadyne

Модель ЕРП	260	300	520	560	1020	1060	2010	2020	8020
Напруга живлення, В	150	150	150	150	150	300	260	260	300
Сила струму, А	2,5	3,1	3,1	6,5	7,0	9,0	17,0	20,0	42,0
Потужність, Вт	300	315	315	975	1050	2700	4420	5200	12600
Упор, при $V = 0$ м/с, Н	53,0	80,3	102,0	170	222	467	911	1137	2254
Упор, при $V = 2$ м/с, Н	34,3	44,1	55,6	89	155	290	556	757	1470

Вектор моментів $\vec{M}_{PK}$ представляє інтерес при дослідженні динаміки руху ПАР, а при усталеному русі він, як правило дорівнює нулю. Вектор $\vec{F}_{PK}$ не нульовий, урівноважується вектором сили натягу на ходовому кінці КТ $\vec{F}_f$ та має ключову роль при розрахунках ПАР. Таким чином, роботу РК можна виразити залежністю

$$\vec{F}_{PK} = \vec{f}(\vec{U}_{PK}, K_{PK}, \vec{V}, \rho) \quad (11)$$

Представимо роботу кожного ЕРП залежністю

$$F_{\text{ЕРП}} = f(u_{\text{ЕРП}}, \vec{V}, \rho) \quad (12)$$

де $F_{\text{ЕРП}}$, $u_{\text{ЕРП}}$ – відповідно упор та сигнал керування ЕРП. Тоді структура РК прийме вигляд, зображений нижче на рис. 3.

Для різних типів ЕРП сигнали керування $u_{\text{ЕРП}}$ можуть відрізнятись. Так для ЕРП з електродвигуном (ЕД) постійного струму сигнал керування $u_{\text{ЕРП}}$ представляє собою напругу живлення, при цьому ЕРП споживає електричний струм $i_{\text{ЕРП}}$ або потужність $p_{\text{ЕРП}}$.

Для РК вектор сигналів керування $\vec{U}_{\text{РК}}$ складається з напруг живлення кожним ЕРП, упори кожного ЕРП утворюють вектор $\vec{F}_{\text{РК}}$, при цьому РК споживає електричну потужність або струм

$$I_{\text{РК}} = \sum_{n=1}^j i_{\text{ЕРП}n}$$

де j – кількість ЕРП в РК, n – індекс кожного окремого ЕРП.

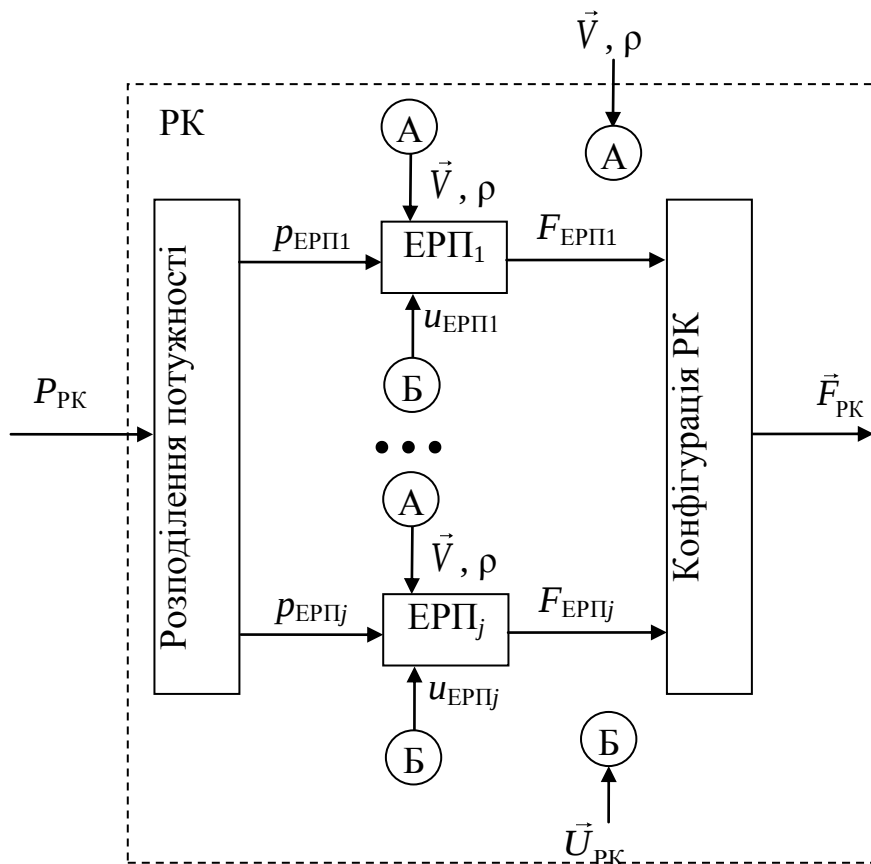


Рисунок 3 – Електрорушійний пристрій в складі рушійного комплексу

Оскільки в даній роботі інтерес представляють потужності, а величини струму й потужності взаємозалежні і зв'язані напругою живлення, тому далі будемо користуватися величинами потужності.

Розподілення потужності виконується згідно з рівнянням (1), а вектор $\vec{F}_{PK}$ визначається в залежності від обраної конфігурації рушійного комплексу K_{PK} .

Змінна K_{PK} не має розмірності і не є коефіцієнтом, вона визначає за якими рівняннями необхідно розраховувати $\vec{F}_{PK}$. Так, наприклад, якщо для ПАР, обладнаного двома маршовими, одним вертикальним і одним боковим ЕРП, прийняти $K_{PK} = 1$, то залежність (11) прийме такий вигляд:

$$\vec{F}_{PK} = \vec{f}(\vec{U}_{PK}, 1, \vec{V}, \rho) \Rightarrow \{F_L + F_P, F_B, F_G\};$$

$$\text{де } \vec{U}_{PK} = \{u_L, u_P, u_B, u_G\};$$

$u_{L,P,B,G}$ – сигнали керування відповідно лівим маршовим, правим маршовим, вертикальним та боковим ЕРП;

$$F_L = f(u_L, \vec{V}, \rho) \text{ – упор лівого маршового ЕРП;}$$

$$F_P = f(u_P, \vec{V}, \rho) \text{ – упор правого маршового ЕРП;}$$

$$F_B = f(u_B, \vec{V}, \rho) \text{ – упор вертикального ЕРП;}$$

$$F_G = f(u_G, \vec{V}, \rho) \text{ – упор бокового ЕРП.}$$

На рис. 3 величини $p_{ЕРП}$ показані як входи (індекс номеру ЕРП опущено), проте з математичної точки зору вони, як і

величини упорів $F_{\text{ЕРП}}$, визначаються в результаті розрахунку, а з практичної точки зору – приймають свої значення в результаті роботи ЕРП:

$$p_{\text{ЕРП}} = f(u_{\text{ЕРП}}, \vec{V}, \rho) \quad (13)$$

При цьому для визначення максимального та мінімального значення упору кожного ЕРП необхідно сигнал керування також встановити в одне з граничних значень – максимальне або мінімальне. Таким чином в (13) величина $u_{\text{ЕРП}}$ замінюється відповідною константою. Об'єднавши вирази (12) та (13) отримаємо зв'язок між упором та споживаною потужністю для ЕРП:

$$F_{\text{ЕРП}} = f(p_{\text{ЕРП}}, \vec{V}, \rho)$$

та для РК:

$$\vec{F}_{\text{РК}} = \vec{f}(P_{\text{РК}}, K_{\text{РК}}, \vec{V}, \rho).$$

Також практичний інтерес можуть представляти інверсні

залежності, розв'язані відносно інших змінних, наприклад,

$$P_{\text{ЕРП}} = f(F_{\text{ЕРП}}, V, \rho);$$

$$P_{\text{РК}} = f(\vec{F}_{\text{РК}}, V, \rho).$$

Упори РК розраховуються за принципом суперпозицій, моменти РК (при необхідності) – на основі відомих співвідношень з урахуванням плечей сили. Основну складність при розрахунку РК складає розрахунок ЕРП, оскільки вони моделюються системами диференціальних рівнянь та мають в складі формул коефіцієнти, які отримують в дослідницьких басейнах і представляють в графічному або табличному вигляді. Звідси виникають складності моделювання усталених режимів роботи та інверсного моделювання – розв'язання рівнянь відносно інших змінних.

Розглянемо застосування методики на прикладі виконання Дослідно-проектним центром кораблебудування (м. Миколаїв) Державного оборонного замовлення зі створення перспективного корабля класу «корвет» (проекту 58250) із залученням Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова здійснюється створення дистанційно керованого підводного апарату робота для надводного корабля (шифр теми

«КНПА–58250»). ПАР, що розробляється, повинен:

маневрувати на глибинах до 150 м при віддалені від корабля до 300 м при вирішенні поставлених йому задач;

виконувати пошукові роботи міноподібних об'єктів еквівалентним радіусом $R_e = 0,3$ м з ймовірністю 0,9 на дуальностях до 40 м від ПАР на всіх швидкостях руху;

доставляти підривні патрони масою до 10 кг та діаметром до 150 мм, встановлювати їх з метою подальшої активації для знешкодження виявленого об'єкта;

проводити відео огляд підводної частини корабля чи поверхні дна та виконувати водолазно–технічні роботи за допомогою навісного обладнання;

документувати процеси виконання робіт.

Для реалізації зазначених робіт ПАР, як носій спеціального приладового оснащення, повинен забезпечувати головні режими функціонування, у тому числі синхронний рух ПАР з кораблем по заданій траєкторії.

Як приклад, виконаємо оцінку можливості виконання ПАР поставленої задачі синхронного руху з КН, коли множина M містить одну робочу точку $m_1 = \{300, -150, 0\}$. Вхідні дані для розрахунку зведено до табл. 5.

Таблиця 4 – Дані для розрахунку підводного апарата-робота

Дані	Значення
Розташування ПАР відносно КН, м	{300, -150, 0}
Повна довжина КТ L , м	500
Швидкість набігаючого потоку води v , м/с	2
Споживна потужність обладнання ПА $P_{\text{обл}}$ (без урахування потужності РК), Вт	300

Спочатку виконаємо електроенергетичний розрахунок КТ на основі даних по ЕРП виробництва корпорації Tescadyne (США), які наводяться в табл. 4.

Приймаємо, що на ПАР встановлено два маршових та один вертикальний ЕРП однакової моделі, для такої конфігурації приймемо $K_{\text{РК}} = 1$. Результати розрахунку діаметрів КТ (10) та максимальних упорів, які здатен забезпечити такий РК ПАР, зведено до табл. 6. Оскільки задана тільки одна точка робочої зони, то достатньо розрахувати тільки величини $F_{\text{хmax}}$ та $F_{\text{уmax}}$.

Таблиця 5 – Залежності упорів рушійного комплексу від діаметрів кабель-троса

Модель ЕРП	260	300	520	560	1020	1060	2010	2020	8020
Діаметр КТ $d_{КТ, мм}$	9	9	9	9,2	9,2	11,4	13,0	14,4	19,8
Маршовий упор $F_{хmax}, Н$	68,6	88,2	111,2	178	310	580	1112	1514	2940
Вертикальний упор $F_{уmax}, Н$	53,0	80,3	102,0	170	222	467	911	1137	2254

Далі виконаємо гідродинамічний розрахунок КТ: для точки m_1 та для кожного діаметру КТ з табл. 6 отримаємо вектор сили натягу на ходовому кінці КТ. Результати електроенергетичного та гідродинамічного розрахунку КТ зведено до табл. 7.

Як бачимо, умова виконання задачі руху є істиною тільки в одному випадку – при використанні моделі ЕРП 8020. При використанні всіх інших моделей ЕРП сила натягу КТ перевищує упори РК і ПАР не буде спроможним дістатися заданої точки m_1 відносно КН.

Таблиця 6 – Результати електроенергетичного та гідродинамічного розрахунку кабель-троса

Модель ЕРП	260	300	520	560	1020	1060	2010	2020	8020
Діаметр КТ $d_{КТ}$, мм	9	9	9	9,2	9,2	11,4	13,0	14,4	19,8
Маршовий упор $F_{хmax}$, Н	68,6	88,2	111,2	178	310	580	1112	1514	2940
Горизонтальна складова сили натягу $F_{КТх}$, Н	1122	1122	1122	1147	1147	1421	1621	1795	2468
Вертикальний упор $F_{РКу}$, Н	53,0	80,3	102,0	170	222	467	911	1137	2254
Вертикальна складова сили натягу $F_{КТу}$, Н	108	108	108	110	110	137	156	173	232

Також за результатами розрахунку видно, що при використанні моделі ЕРП 8020 вертикальний упор $F_{РКу}$ в декілька разів перевищує силу натягу, тому досліднику варто розглянути іншу конфігурацію РК, можливо, обрати менш потужний вертикальний ЕРП і, тим самим, зменшити сумарну потужність ПАР, а значить і діаметр КТ.

Таким чином, запропонований підхід дає змогу науково обґрунтовано виконувати оцінки характеристик ПАР, виходячи з умов поставленої задачі усталеного руху системи «КН – ПАР».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Блінцов В.С. Сучасні задачі автоматизації керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм [Текст] / В.С. Блінцов, А.С. Сірівчук // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2017. – № 3 (470). – С. 56–63.

2. Воєнна доктрина України. Затверджено Указом Президент України від 24 вересня 2015 року № 555/2015.

3. Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик / В.М. Ильюшко, М.М. Митрахович, А.В. Самков, В.И. Силков, О.В. Соловьев, В.И. Стрельников; Под общ. Ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. – 302 с.

4. Блінцов, В.С. Створення та застосування засобів морської робототехніки для знешкодження підводних потенційно небезпечних об'єктів. Наукова монографія / В. С. Блінцов, О. В. Блінцов, Г. В. Бабкін, М. Г. Грицаєнко // Миколаїв : НУК, – 2016. – 108 с. (Для службового користування).

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Методики синтезу та моделі визначення конструктивних параметрів підводних апаратів	5
2 Процес синтезу підводного апарата.....	6
3 Синтез кабель-троса.....	8
4 Особливості синтезу кабельної лебідки.....	10
5 Визначення тактико-технічних характеристик підводного апарата.....	11
Перелік посилань.....	41

ДЛЯ НОТАТОК

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Навчальне видання

Ж. Ю. БУРУНІНА, А.М. ВОЙТАСИК,
О.П. КЛОЧКОВ, А.С. СІРІВЧУК,

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БЕЗЕКІПАЖНИХ ПРИВ'ЯЗНИХ
ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

Під редакцією д.т.н., В.С. Блінцова
Комп'ютерне верстання А.С. Сірівчук

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2018

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 6,6. Тираж 100 прим. Зам. № 128.
Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025, E-mail : publishing@nuos.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.