

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОСТОРОВОГО РУХУ ВАНТАЖНОГО САМОХІДНОГО ПІДВОДНОГО НОСІЯ

Войтасик А. М., старший викладач кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна; e-mail: andrii.voitasyk@nuos.edu.ua; ORCID: 0000-0002-9409-6108

Розробка та виготовлення наявних зразків прив'язних телекерованих підводних апаратів є дуже дорогим та трудомістким процесом. Дороге обладнання, котре застосовується при їх виготовленні, може бути випадково пошкоджено під час морських натурних випробувань. Отже, актуальною є задача попереднього комп'ютерного моделювання об'єкту дослідження з метою підтвердження працездатності запропонованої системи автоматичного керування.

В роботі розглянуто сучасні підходи до моделювання динаміки підводних апаратів з кабель-тросовим зв'язком та доведено необхідність в розробці спеціалізованої математичної моделі прив'язного телекерованого вантажного самохідного підводного апарата з корисним вантажем. Запропоновано математичну модель динаміки руху вантажного самохідного підводного носія призначеного для доставки, установки та згортання корисного вантажу на морському дні, яка враховує конструктивні особливості даного типу апаратів. Розроблено 3D-модель захватного пристрою вантажного самохідного підводного носія для роботи з корисним вантажем. Розроблена 3D-модель буде враховуватися при розробці та попередньому налаштуванню системи автоматичного керування підводним апаратом та його корисним вантажем.

Ключові слова: підводний апарат, корисний вантаж, захватний пристрій, математична модель.

DOI: 10.33815/2313-4763.2018.2.19.14–24

Постановка задачі. Основні операції, що здатні вирішувати телекеровані підводні апарати (ТПА) транспортного типу – доставка, установка та повернення корисного вантажу (КВ). В залежності від конструктивних та експлуатаційних особливостей корисного вантажу технології роботи з ними можуть суттєво відрізнятися (скидання дистанційно-керованого заряду для знешкодження вибухонебезпечних одиниць, розміщення гідроакустичних станцій, доставка будівельних матеріалів, тощо). В роботі [15] запропоновано вантажний самохідний підводний носій (ВСПН) як інструмент для вирішення такого роду задач. Проте, при роботі з КВ існує необхідність у підвищеній маневреності ТПА.

В [14] запропоновано архітектурно-конструктивний тип ВСПН, що передбачає наявність восьми рушійних пристроїв (РП) типу «гребний гвинт в трубі». Застосовуючи чотири рушійні пристрої, які розташовані в горизонтальній площині, можливо об'єднати функції маршового та лагового руху. Лаговий рух ВСПН є необхідним при виконанні спеціалізованих робіт з КВ. Інші чотири пристрої, встановлюються у вертикальній площині на осях симетрії ВСПН. Два вертикальні рушійні пристрої розміщені на лівому та правому бортах ВСПН забезпечують регулювання крену. Два вертикальні рушійні пристрої розташовані в носовій та кормовій частинах ВСПН забезпечують регулювання диференту. Регулювання крену та диференту є необхідним для компенсації зовнішніх збурень від наявності КВ, яким ВСПН маніпулює.

Застосування великої кількості РП та складна структура ВСПН як об'єкта керування ускладнюють процеси його виготовлення, басейнових та натурних випробувань. Шляхом комп'ютерного моделювання керованого руху ВСПН та його КВ в процесі розробки та виготовлення апарата можна заощадити час на налаштування запропонованої системи автоматичного керування об'єктом, а також уникнути можливого пошкодження дорогого обладнання. Отже, актуальною є задача розробки математичної моделі (ММ) просторового руху комплексу «ВСПН – КВ».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ММ ТПА включають ММ їх корпусів, гідродинамічних впливів, рушійних комплексів (РК), несучих поверхонь та інших

елементів. В науковій літературі досить широко висвітлені питання комп'ютерного моделювання РК ТПА.

Так в роботі [1] запропоновано ММ руху ТПА, яка враховує асиметричність корпусів, інфільтраційні процеси та поверхневі хвилі у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь. Однак в запропонованій реалізації рух ТПА моделюється у загальному вигляді. Тобто, без врахування типів рушійних пристроїв, що входять до складу РК та наявності додаткового начіпного обладнання, або КВ, який необхідно транспортувати.

В роботі [2] розроблено ММ руху для програми симулятора автономного підводного апарата (АПА). Для апаратів такого типу впливи гнучкого зв'язку (ГЗ) кабель-тросу (КТ) відсутні. Через наявність автономного джерела живлення на борту АПА необхідності в застосуванні КТ не має. Модель враховує вплив на рух апарата приєднаних мас води. Запропонована модель реалізує динаміку АПА, що рухається маршем завдяки електричному одногвинтовому рушію. Проте ММ не враховує зміну центру мас апарата при установці додаткових модулів КВ.

Таким чином, моделювання руху ТПА більш складне ніж АПА через врахування ГЗ при роботі з його ММ. Хоча зазвичай дослідники нехтують цим впливом. В роботах [3] та [4] представлені ММ ТПА без врахування впливу КТ. Їх застосування придатне лише для дослідження повільних рухів та позиціонування ТПА за відсутності течії. РП, що розглядаються в роботі [3] це електродвигуни постійного струму обладнані планетарними редукторами на валах яких розташовані чотирьох лопатеві гребні гвинти в насадках. Загалом представлений РК ТПА складається з одного вертикального та двох маршових РП. Номінальна постійна напруга їх живлення 48 В. Більш маневрений та потужний ТПА представлений в роботі [4]. До складу його РК входять один вертикальний, один лаговий та два маршових РП. В якості рушія також застосовуються гребні гвинти в насадках. Номінальна постійна напруга живлення даних РП становить 150 В.

Проте існують ММ ТПА, що мають відповідні входи для врахування зовнішніх збурень від КТ, але не мають їх математичного вигляду представлені в роботі [5].

Розроблена гідродинамічна ММ ТПА з шістьма ступенями свободи з урахуванням усталеного впливу ГЗ наведена в роботі [6]. Для пошуку граничних умов на кінцях КТ використовується багатокроковий пошук. Він реалізується у відповідності до системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, якими представлено ГЗ. В роботі [7] запропоновано ММ КТ, яка враховує нерівномірність течії та дає змогу оцінити вплив кабелю на маневреність ТПА. В роботі [8] запропонована ММ КТ із змінною довжиною випущеної частини, але без врахування динаміки, що обмежує їх застосування для дослідження окремих режимів руху ТПА (синхронний рух надводного судна та ТПА, позиціонування ТПА на течії).

В [9] запропоновано ММ електричного водометного РП. Рівняння динаміки руху, застосовані в моделі, дозволяють реалізувати три режими руху: маршовий, спливання та ризикання. Недоліками ММ є відсутність врахування впливу КТ та неможливість реверсу маршових РП. Тобто, при виконанні маршового руху два з трьох РП працюють спільно, третій застосовується лише для гальмування та повної зупинки. При такій розстановці РП для того, щоб виконати реверсивний рух необхідно спочатку виконати обертання апарата на 90 градусів і лише тоді розпочати реверсивний рух.

ММ, яку запропоновано в [10], призначена саме для поліпшення маневрового руху ТПА при виконанні складних підводних задач. Автор роботи пропонує у складі РК застосовувати п'ять РП, а саме двох вертикальних, двох маршових та одного лагового. Відмінною особливістю лагового РП від інших, встановлених на даному ТПА, є наявність двох співвісних гребних гвинтів розміщених на різних кінцях його корпусу. Номінальна зміна напруга їх живлення становить 220 В при частоті мережі 50 Гц. Така конфігурація РК більш раціональна для застосування на ТПА робочого класу. Однак, запропонована ММ не враховує вплив КТ апарата на процес його керованого руху.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз літератури з питань моделювання РК ТПА вказує на необхідність в розробці спеціалізованої ММ динаміки руху телекерованого ВСПН призначеного для доставки, установки та згортання КВ на морському дні, яка б враховувала конструктивні особливості даного типу апаратів.

Метою дослідження є розробка математичної моделі просторового руху телекерованого ВСПН, обладнаного вісьмома електричними рушійними пристроями типу «гвинт в трубі», з урахуванням впливу на процес керованого руху носія його корпусу, корисного вантажу та КТ.

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

– розробити 3D-модель захватного пристрою для виконання операцій з захвату, утримання та відпускання корисного вантажу відносно корпусу вантажного самохідного підводного носія;

– удосконалити математичну модель телекерованого вантажного самохідного підводного носія шляхом врахування впливу корисного вантажу на динаміку руху носія.

Викладення основного матеріалу. Структуру ВСПН з КВ зображено на рис. 1.

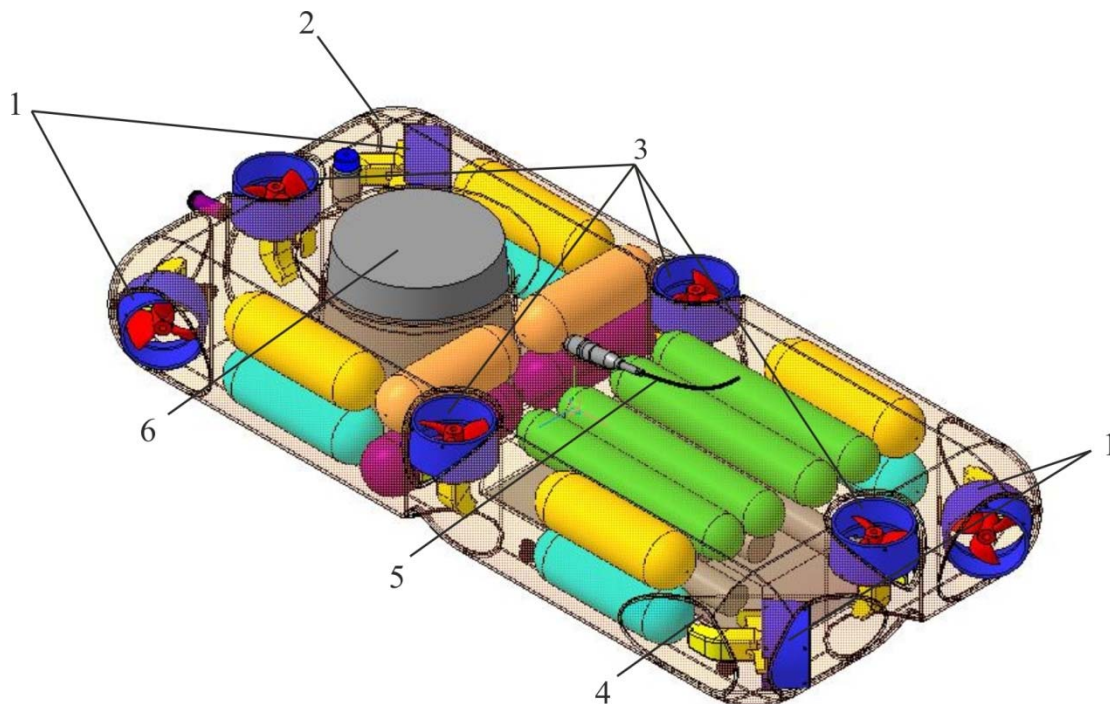


Рисунок 1 – Структура ВСПН з КВ

На рис. 1 позначено наступні елементи: 1 – горизонтальні електрорушійні пристрої; 2 – платформа забезпечення поступального руху; 3 – вертикальні електрорушійні пристрої; 4 – модуль-2 корисного вантажу; 5 – кабель-трос; 6 – модуль-1 корисного вантажу.

Згідно [11] для маневреності РК ВСПН обладнано вісьмома електрорушійними пристроями (ЕРП). ВСПН за допомогою горизонтальних та вертикальних ЕРП здатен реалізувати операції доставки, установки, розгортання та згортання КВ на морському дні та забезпечити при цьому стабілізацію власного просторового положення за допомогою баластно-вирівнюючої системи (БВС). Корпус ВСПН з'єднано з судном-носієм за допомогою КТ, задачами якого є забезпечення електроживлення носія та його інформаційного обміну з постом енергетики та керування.

В даній роботі в якості КВ буде розглянуто систему автономної радіогідроакустичної станції типу «Олімп-3К». Дана система розподіляється на два модулі, які сполучені між собою за допомогою кабельного зв'язку. Оскільки під час транспортування КВ його застосування не передбачається, пропонується розмістити його в двох вантажних відділеннях, що дозволить захистити вартісне обладнання від пошкодження та зберегти гідродинамічні властивості комплексу «ВСПН – КВ». Система

захвату КВ (СЗКВ) реалізує дистанційний захват, утримання та відчеплення КВ. Алюмінієвий каркас захватного пристрою має прямокутну форму та виготовлений із алюмінієвих трубок. Механізм відкриття та закриття замків спрацьовує при обертанні валу виконавчого електродвигуна в прямому та оберненому напрямку. В середині герметичних міцних корпусів розташовуються виконавчі електродвигуни, які закріплюються за допомогою гвинтів. Зовнішній вигляд захватного пристрою для ВСПН зображено на рис. 2.

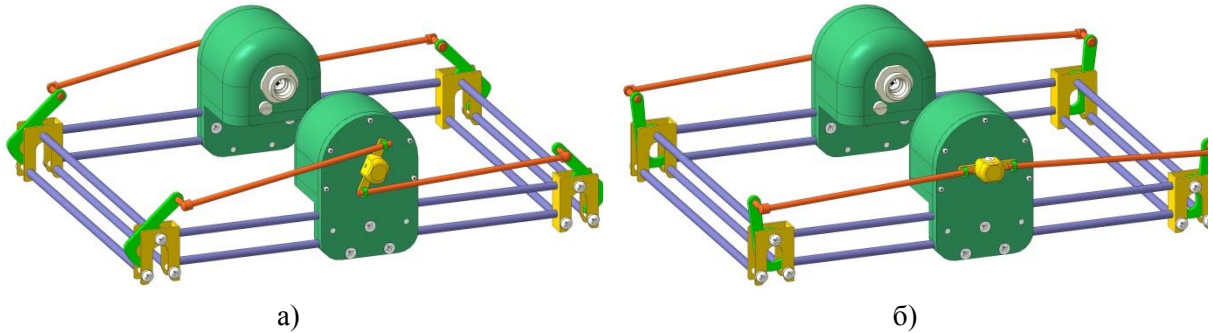


Рисунок 2 – 3D-модель захватного пристрою ВСПН для модуля-1: а) у відкритому положенні; б) у закритому положенні

Захватний пристрій може мати два базових положення:

1) відкрите положення – в такому положенні КВ може бути установлений на морському дні для подальшого відпрацювання підводного завдання, а ВСПН може повернутися до судна носія.

2) закрите положення – в такому положенні КВ надійно закріплений та може бути транспортований за допомогою маневрування ВСПН у водній товщі.

Виходячи з особливостей комплексу «ВСПН – КВ», математичну модель його просторового руху пропонується організувати за структурою, яку зображено на рис. 3.

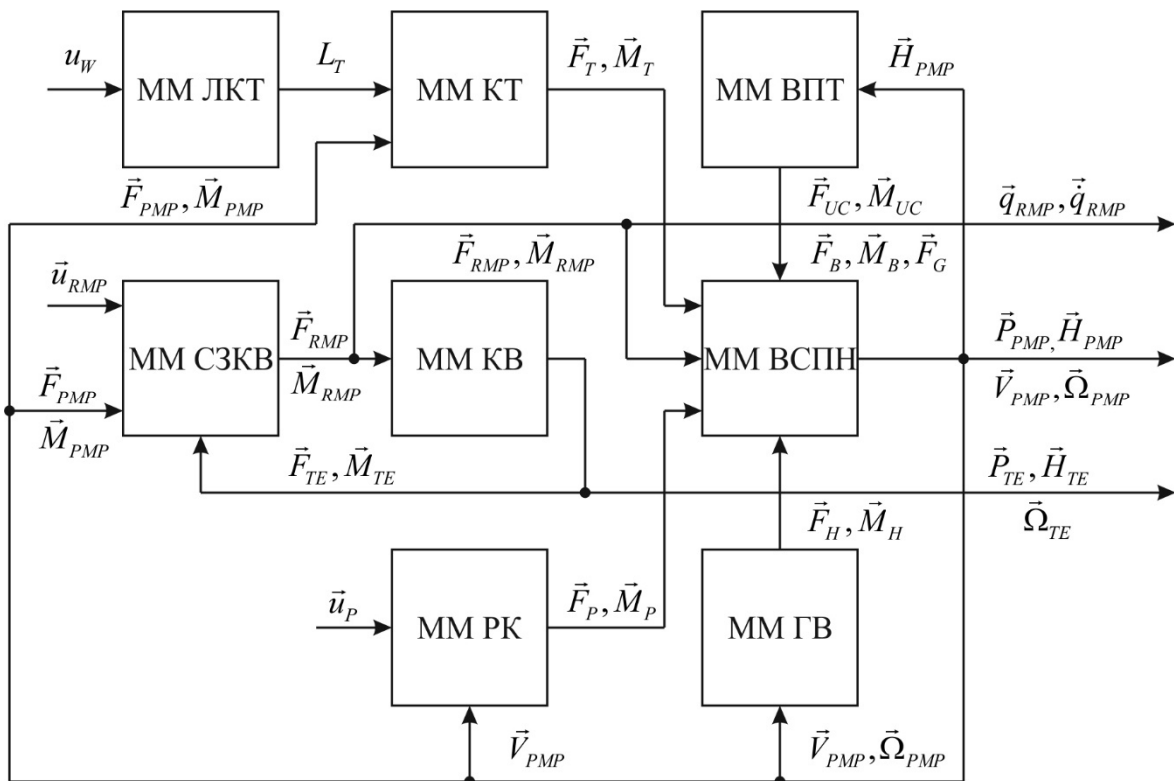


Рисунок 3 – Структура ММ просторового руху ВСПН з КВ

ММ РК за вектором керуючих впливів \vec{u}_P розраховує вектори керуючих сил \vec{F}_P та моментів \vec{M}_P , дія яких приводить корпус ВСПН до руху. В якості РП використано модель гребного гвинта, упор якого залежить від швидкостей поступальних рухів ВСПН, що враховується зворотним зв'язком у вигляді вектора \vec{V}_{PMP} .

На рух корпусу ВСПН впливають сили \vec{F}_B та моменти \vec{M}_B виштовхування, а також сила тяжіння \vec{F}_G . Дані сили та моменти розраховуються математичною моделлю впливів плавучості та тяжіння (ВПТ). Вектори сил \vec{F}_{UC} та моментів \vec{M}_{UC} , розраховані ММ ВПТ враховують наявність модулів з КВ на борту ВСПН та їхній вплив на його динаміку руху.

Розподіл сил та моментів плавучості залежить від вектора просторової орієнтації корпусу $\vec{H}_{PMP} = [\theta \ \varphi \ \psi]^T$, де θ, φ, ψ – відповідно кути крену, курсу та диференту корпусу ВСПН. ММ гідродинамічних впливів (ГВ) враховує опір води рухові корпусу ВСПН. Гідродинамічні впливи позначено векторами сил \vec{F}_H та моментів \vec{M}_H , які квадратично залежать від швидкостей поступальних \vec{V}_{PMP} та обертових $\vec{\Omega}_{PMP}$ переміщень ВСПН. ММ КТ розраховує вектори сил \vec{F}_T та моментів \vec{M}_T натягу ходового кінця КТ на рух ВСПН. Довжина випущеної частини КТ L_T контролюється лебідкою кабель-троса (ЛКТ) за допомогою сигналу u_W .

ММ СЗКВ за вектором керуючих впливів \vec{u}_{RMP} , а також рівнодіючими сил \vec{F}_{PMP} та моментів \vec{M}_{PMP} ВСПН визначає вектори сил \vec{F}_{RMP} та моментів \vec{M}_{RMP} , які спричинюють рух КВ відносно корпусу ВСПН. А вектори сил \vec{F}_{TE} та моментів \vec{M}_{TE} , розраховані ММ КВ впливають на динаміку руху СЗКВ.

Виходами ММ ВСПН з КВ є вектори положення ($\vec{P}_{PMP}, \vec{P}_{TE}$), просторової орієнтації ($\vec{H}_{PMP}, \vec{H}_{TE}$), швидкостей обертових рухів ($\vec{\Omega}_{PMP}, \vec{\Omega}_{TE}$) відповідно ВСПН та КВ, вектори кутів повороту \vec{q}_{RMP} та швидкостей обертання $\vec{\dot{q}}_{RMP}$ обертових ланок СЗКВ, а також вектор швидкостей поступальних рухів ВСПН \vec{V}_{PMP} .

ММ ВСПН реалізує основний закон динаміки руху підводного носія [13]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_{PMPa}}{dt} &= I_{PMP}^{-1} (T_{PMP} - KI_{PMP}V_{PMPa}); \\ \frac{dR_{PMP}}{dt} &= K_V (V_{PMPa} + V_s). \end{aligned} \right\}$$

Тут $V_{PMPa} = [v_{PMPxa} \ v_{PMPya} \ v_{PMPza} \ \omega_{PMPxa} \ \omega_{PMPya} \ \omega_{PMPza}]^T$ – матриця проєкцій поступальної та обертової швидкостей руху ВСПН на осі зв'язаної системи координат (ЗСК); $R_{PMP} = [\vec{P}_{PMP} \ \vec{H}_{PMP}]^T$ – матриця поступальних та кутових координат ВСПН в базовій системі координат (БСК); $T_{PMP} = [\vec{F}_{PMP} \ \vec{M}_{PMP}]^T$ – матриця сил та моментів, які впливають на динаміку руху ВСПН; I_{PMP} – матриця власних та приєднаних мас ВСПН; V_s – матриця швидкостей течії, виражених в ЗСК; K_V – матриця зв'язку позиційних та швидкісних кінематичних параметрів ВСПН; K – матриця, яка враховує переносний рух при взятті похідної по відношенню до ЗСК.

Матриця $I_{PMP} = M + \Lambda$ визначається матрицею мас та моментів інерції ВСПН M та матрицею приєднаних мас та моментів інерції води Λ :

$$M = \text{diag}\{m, m, m, j_x, j_y, j_z\};$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{61} & \cdots & \lambda_{66} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В (1) m – маса ВСПН; j_x, j_y, j_z – моменти інерції ВСПН; λ_{ij} – приєднані маси води, $i = 1 \dots 6, j = 1 \dots 6$. Матриця K має вигляд:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{PMPza} & \omega_{PMPya} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{PMPza} & 0 & -\omega_{PMPxa} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_{PMPya} & \omega_{PMPxa} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -v_{PMPza} & v_{PMPya} & 0 & -\omega_{PMPza} & \omega_{PMPya} \\ v_{PMPza} & 0 & -v_{PMPxa} & \omega_{PMPza} & 0 & -\omega_{PMPxa} \\ -v_{PMPya} & v_{PMPxa} & 0 & -\omega_{PMPya} & \omega_{PMPxa} & 0 \end{bmatrix}.$$

Матриця зв'язку позиційних та швидкісних кінематичних параметрів ВСПН має наступний вигляд:

$$K_V = \begin{bmatrix} K_v & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & K_\omega \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В (2) K_v – матриця зв'язку між ЗСК та БСК наступного виду:

$$K_v = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \theta - & (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \\ \cos \varphi \sin \psi \cos \theta) & + \sin \varphi \cos \theta) \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + & (\cos \varphi \cos \theta - \\ + \cos \varphi \sin \theta) & -\sin \varphi \sin \psi \sin \theta) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Кінематична матриця зв'язку обертового руху K_ω з (2) має такий вигляд:

$$K_\omega = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}^{-1}.$$

Рівнодіюча сил та моментів, які впливають на рух ВСПН визначається виразом:

$$T_{PMP} = T_H + T_{GB} + T_{UC} + T_P + T_T + T_{RMP}, \quad (4)$$

де $T_H = [\bar{F}_H \quad \bar{M}_H]^T$ – матриця сил та моментів гідродинамічної природи;

$T_{GB} = [\bar{F}_{GB} \quad \bar{M}_{GB}]^T$ – матриця сил та моментів ваги та плавучості корпусу ВСПН;

$T_{UC} = [\bar{F}_{UC} \quad \bar{M}_{UC}]^T$ – матриця сил та моментів ваги та плавучості модулів з КВ;

$T_P = [\bar{F}_P \quad \bar{M}_P]^T$ – матриця сил та моментів, вироблених РК ВСПН;

$T_T = [\bar{F}_T \quad \bar{M}_T]^T$ – матриця сил та моментів натягу КТ; $T_{RMP} = [\bar{F}_{RMP} \quad \bar{M}_{RMP}]^T$ – матриця сил та моментів, прикладених СЗКВ в точці її кріплення.

Розберемо кожну складову виразу (4) окремо. Матриця гідродинамічних впливів має такий вигляд:

$$T_H = \begin{bmatrix} \overline{F}_H \\ \overline{M}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,5k_{F_x}\rho S_x v_{PM Px a}^2 \\ -0,5k_{F_y}\rho S_y v_{PM Py a}^2 \\ -0,5k_{F_z}\rho S_z v_{PM Pz a}^2 \\ -0,5k_{M_x}\rho V \omega_{PM Px a}^2 \\ -0,5k_{M_y}\rho V \omega_{PM Py a}^2 \\ -0,5k_{M_z}\rho V \omega_{PM Pz a}^2 \end{bmatrix},$$

де $k_{F_x}, k_{F_y}, k_{F_z}$ – коефіцієнти проєкцій гідродинамічних сил на осі ЗСК; $k_{M_x}, k_{M_y}, k_{M_z}$ – коефіцієнти проєкцій гідродинамічних моментів на осі ЗСК; S_x, S_y, S_z – характерна площа корпусу ВСПН; ρ – густина води; V – водотоннажність ВСПН.

ММ ВПТ реалізує наступний вираз:

$$T_{GB} = \begin{bmatrix} F_{GBx} \\ F_{GBy} \\ F_{GBz} \\ M_{GBx} \\ M_{GBy} \\ M_{GBz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (F_B - F_G) \sin \psi \\ (F_B - F_G) \cos \psi \cos \theta \\ -(F_B - F_G) \cos \psi \sin \theta \\ -F_B z_B \cos \psi \cos \theta - F_B y_B \cos \psi \sin \theta \\ F_B x_B \cos \psi \sin \theta + F_B z_B \sin \psi \\ F_B x_B \cos \psi \cos \theta - F_B y_B \sin \psi \end{bmatrix},$$

де $F_B = \rho \Omega g$ – модуль сили плавучості; $F_G = mg$ – модуль сили тяжіння; x_B, y_B, z_B – координати точки прикладання сили плавучості; Ω – об'єм ВСПН, який занурено у воду; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння Землі.

На основі аналізу запропонованої 3D-моделі захватного пристрою ВСПН (див. рис. 2) тепер представимо матрицю сил та моментів ваги та плавучості модулів КВ у вигляді:

$$T_{UC} = \begin{bmatrix} \overline{F}_{UC} & \overline{M}_{UC} \end{bmatrix}^T = \sum_i T_u, \quad u = 1, 2, \dots, n;$$

$$T_u = \begin{bmatrix} \overline{F}_u & \overline{M}_u \end{bmatrix}^T; \quad \overline{F}_u = m_u g; \quad \overline{M}_u = \vec{r}_u \times \overline{F}_u,$$

де T_u – матриця сил та моментів, створюваних наявністю КВ; n – кількість модулів КВ; m_u – маса, створена наявністю модулів КВ; \overline{F}_u – проєкції сили, створеної наявністю КВ на осі ЗСК ВСПН; g – прискорення вільного падіння; \vec{r}_u – координати точки розташування модулів КВ в ЗСК ВСПН; \overline{M}_u – проєкції моменту, створеного наявністю КВ на осі ЗСК ВСПН.

Динаміка РК ВСПН визначається виразом:

$$T_P = \begin{bmatrix} \overline{F}_P & \overline{M}_P \end{bmatrix}^T = \sum_i T_i, \quad i = 1, 2, \dots, I;$$

$$T_i = \begin{bmatrix} \overline{F}_i & \overline{M}_i \end{bmatrix}^T; \quad \overline{F}_i = F_i \hat{d}_i; \quad \overline{M}_i = \vec{r}_i \times \overline{F}_i,$$

де T_i – матриця рушійних сил та моментів, створюваних ЕРП РК; I – кількість ЕРП, які входять до складу РК; F_i – упор, створений ЕРП; \overline{F}_i – проєкції упору, створеного ЕРП на осі ЗСК ВСПН; \hat{d}_i – координати вектору, який характеризує напрямок прикладання упору ЕРП; \vec{r}_i – координати точки розташування ЕРП в ЗСК ВСПН; \overline{M}_i – проєкції моменту, створеного ЕРП на осі ЗСК ВСПН.

В якості ЕРП в даній роботі пропонується застосовувати електродвигуни постійного струму з гребним гвинтом, оскільки пристрої даного типу прості у виготовленні та використанні, а їх динамічні властивості відомі. ММ ЕРП на базі електродвигуна з гребним гвинтом детально описано в [13].

Задачею ММ КТ є розрахунок матриці сил та моментів натягу ходового кінця T_T . КТ розділяється на n елементів, з'єднаних $n-1$ зв'язком. Динаміка елемента КТ представляється виразом:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_i &= \vec{f}\left(\vec{r}_{i-1}, \vec{r}_i, \vec{r}_{i+1}, \frac{d\vec{r}_i}{dt}, L_T\right); \\ m\ddot{\vec{r}}_i &= \vec{F}_i, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де \vec{F}_i – вектор рівнодіючої сили, яка діє на елементарну ділянку КТ, $i = 1, 2, \dots, n$; \vec{r}_i – координати елементарної ділянки КТ; L_T – довжина випущеної частини КТ.

Складові виразу (5) пропонується визначати за допомогою методу автоматичного контролю осового руху елементів КТ [12]. Елементи матриці T_T визначаються з виразу:

$$T_T = \begin{bmatrix} \vec{F}_T \\ \vec{M}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\vec{F}_n \\ -(\vec{r}_T \times \vec{F}_n) \end{bmatrix},$$

де \vec{r}_T – координати точки кріплення ходового кінця КТ.

Випускання-підбирання КТ моделюється на основі ММ динаміки ЛКТ, яку в згорнутому виді можна представити у виді системи [13]:

$$\left. \begin{aligned} M_{EM} &= f(u_w, \omega); \\ \dot{\omega} &= f(M_{EM}, M_L); \quad M_L = RF_1; \\ \dot{L}_T &= R\omega, \end{aligned} \right\}$$

де u_w – сигнал керування приводом ЛКТ, M_{EM} – рушійний момент електродвигуна ЛКТ, ω – кутова швидкість обертання барабана ЛКТ, M_L – гальмівний момент на барабані ЛКТ, R – радіус барабана ЛКТ; F_1 – модуль сили натягу КТ на корінному кінці.

Висновки. Розроблено 3D-модель захватного пристрою для виконання операцій з захвату, утримання та відпускання корисного вантажу відносно корпусу вантажного самохідного підводного носія. Конструкцію представлено у вигляді алюмінієвого прямокутного каркаса з чотирма гачками по кутах. Механізм приводиться в дію за допомогою обертання вала виконавчого електродвигуна. Представлену конструкцію виготовлено та застосовано у складі робочого макету вантажного самохідного підводного носія для підтвердження можливості виконання операцій з корисним вантажем.

Удосконалено математичну модель телекерованого вантажного самохідного підводного носія шляхом врахування впливу корисного вантажу на динаміку руху носія. Модель пропонується застосовувати для синтезу та дослідження систем автоматичного керування апаратами такого типу.

Подальші наукові дослідження у напрямку автоматизації просторового руху вантажного самохідного підводного носія доцільно виконувати шляхом удосконалення методу оберненої динаміки, яка б забезпечувала високу динамічну точність керування в умовах структурної та параметричної невизначеностей моделі об'єкта керування та під впливом невизначених збурень від кабель-троса.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Trunov, O. Improving the mathematical model of the dynamics for underwater vehicle with asymmetrical hulls [Text] / O. M. Trunov, O. O. Novosadovskiy, D. P. Kikhtenko // *Наукowi праці. Комп'ютерні технології*. – 2014. – Vol. 237, Issue 225. – Pp. 90–98.
2. Fedorenko, R. Investigation into the Dynamics and Control of an Underwater Vehicle-Manipulator System [Text] / R. Fedorenko, B. V. Gurenko // *ACM*. – 2016. – 5 p. – Access Mode: DOI: 10.1145/3029610.3029639
3. Rua, S. Development of a low-level control system for the ROV Visor3 [Text] / S. Rua, R. E. Vasquez // *International Journal of Navigation and Observation*. – 2016. – Vol. 2016. – P. 1–12. DOI: 10.1155/2016/8029124
4. Garcia-Valdovinos, L. G. Modeling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle [Text] / L. G. Garcia-Valdovinos, T. Salgado-Jimenez, M. Bandala-Sanchez, L. Nava-Balanzar, R. Hernandez-Alvarado, J. A. Cruz-Ledesma // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2014. – №. 11 (1). – P. 1–16. DOI: 10.5772/56810
5. Deng, W. Study on simulation of remotely operated underwater vehicle spatial motion [Text] / W. Deng, D. Han // *Journal of Marine Science and Application*. – 2013. – Vol. 12, Issue 4. – P. 445–451. DOI: 10.1007/s11804-013-1215-9
6. Fang, M. C. On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect [Text] / M. C. Fang, C. S. Hou, J. H. Luo // *Ocean Engineering*. – 2007. – Vol. 34, Issue 8-9. – P. 1275–1289. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2006.04.014
7. Костенко, В. В. Исследование влияния кабеля связи на маневренность телеуправляемого подводного аппарата [Текст] / В. В. Костенко, И. Г. Макеева // *Подводные исследования и робототехника*. – 2009. – №. 1 (17). – С. 22–27.
8. Вельтищев, В. В. Упрощенное представление гибкого кабеля переменной длины для моделирования динамики телеуправляемого подводного комплекса [Текст] / В. В. Вельтищев // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. – 2012. – С. 32–39.
9. Nuno Cruz, A. Autonomous Underwater Vehicles [Text] / A. Nuno Cruz // *Open access peer-reviewed Edited Volume*. – 2011. – 258 p. – Access Mode: DOI: 10.5772/923
10. Fernandes, Daniel de A. Output feedback motion control system for observation class ROVs based on a high-gain state observer: Theoretical and experimental results [Text] / Daniel de A. Fernandes, Asgeir J. Sorensen, Kristin Y. Pettersen, Decio C. Donha // *Control Engineering Practice*. – 2015. – № 39. – P. 90–102. DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.12.005
11. Войтасик А. М. Сучасні задачі автоматизації керування підводним апаратом-роботом спеціального призначення [Текст] / А.М. Войтасик // *Збірник наукових праць НУК*. – Миколаїв: НУК, 2016. – №5 (467). – С. 53–59 (Для службового користування).
12. Blintsov, O. Development of the mathematical modeling method for dynamics of the flexible tether as an element of the underwater complex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 1/7, Pp. 4–14. (doi: 10.15587/1729-4061.2017.90291)
13. Blintsov, O. Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 1/9, Pp. 4–16. (doi: 10.15587/1729-4061.2017.93291)
14. Блінцов, В. С. Сучасні задачі автоматичного керування самохідною прив'язною підводною вантажною системою [Текст] / В. С. Блінцов, А. М. Войтасик // *Збірник наукових праць НУК*. – 2017. – № 3. – С. 49–55.
15. Блінцов В. С. Підводна роботизована технологія установки корисного вантажу на морське дно [Текст] / В.С. Блінцов, А.М. Войтасик // *Міжнародний науково-виробничий журнал «Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія»* – К. : КНУБА, 2016. – № 4. – С. 50–59.

REFERENCES

1. Trunov, O. Improving the mathematical model of the dynamics for underwater vehicle with asymmetrical hulls [Text] / O. M. Trunov, O. O. Novosadovskiy, D. P. Kikhtenko // Naukovi praci. Komp'yuterni tekhnologii. – 2014. – Vol. 237, Issue 225. – Pp. 90–98.
2. Fedorenko, R. Investigation into the Dynamics and Control of an Underwater Vehicle-Manipulator System [Text] / R. Fedorenko, B. V. Gurenko // ACM. – 2016. – 5 p. – Access Mode: DOI: 10.1145/3029610.3029639
3. Rua, S. Development of a low-level control system for the ROV Visor3 [Text] / S. Rua, R. E. Vasquez // International Journal of Navigation and Observation. – 2016. – Vol. 2016. – P. 1-12. DOI: 10.1155/2016/8029124
4. Garcia-Valdovinos, L. G. Modeling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle [Text] / L. G. Garcia-Valdovinos, T. Salgado-Jimenez, M. Bandala-Sanchez, L. Nava-Balanzar, R. Hernandez-Alvarado, J. A. Cruz-Ledesma // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2014. – №. 11 (1). – P. 1-16. DOI: 10.5772/56810
5. Deng, W. Study on simulation of remotely operated underwater vehicle spatial motion [Text] / W. Deng, D. Han // Journal of Marine Science and Application. – 2013. – Vol. 12, Issue 4. – P. 445–451. DOI: 10.1007/s11804-013-1215-9
6. Fang, M. C. On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect [Text] / M. C. Fang, C. S. Hou, J. H. Luo // Ocean Engineering. – 2007. – Vol. 34, Issue 8-9. – P. 1275-1289. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2006.04.014
7. Kostenko, V. V. Issledovanie vlijanija kabelja svjazi na manevrennost' teleupravljajemogo podvodnogo apparata [Tekst] / V. V. Kostenko, I. G. Makeeva // Podvodnye issledovanija i robototehnika. – 2009. – №. 1 (17). – P. 22–27
8. Vel'tishhev, V. V. Uproshhennoe predstavlenie gibkogo kabelja peremЕННОj dlina modelirovanija dinamiki teleupravljajemogo podvodnogo kompleksa [Tekst] / V. V. Vel'tishhev // Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». – 2012. – S. 32-39
9. Nuno Cruz, A. Autonomous Underwater Vehicles [Text] / A. Nuno Cruz // Open access peer-reviewed Edited Volume. – 2011. – 258 p. – Access Mode: DOI: 10.5772/923
10. Fernandes, Daniel de A. Output feedback motion control system for observation class ROVs based on a high-gain state observer: Theoretical and experimental results [Text] / Daniel de A. Fernandes, Asgeir J. Sorensen, Kristin Y. Pettersen, Decio C. Donha // Control Engineering Practice. – 2015. – №. 39. – P. 90-102. DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.12.005
11. Voitasyk, A. M. Suchasni zadachi avtomatizacii keruvannja pidvodnim aparatom-robotom special'nogo priznachennja [Tekst] / A. M. Voitasyk // Zbirnik naukovih prac' NUK. – Mikolaiv: NUK, 2016. – №5 (467). – S. 53-59 (Dlja sluzhbovogo koristuvannja)
12. Blintsov, O. Development of the mathematical modeling method for dynamics of the flexible tether as an element of the underwater complex. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017, Vol. 1/7, Pp. 4–14, doi: 10.15587/1729-4061.2017.90291
13. Blintsov, O. Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017, Vol. 1/9, Pp. 4–16, doi: 10.15587/1729-4061.2017.93291
14. Blintsov, V. S. Suchasni zadachi avtomatichnogo keruvannja samohidnoju priv'jaznoju pidvodnoju vantazhnoju sistemoju [Tekst] / V. S. Blintsov, A. M. Voitasyk // Zbirnik naukovih prac' NUK. – 2017. – № 3. – S. 49-55.
15. Blintsov, V. S. Pidvodna robotizovana tehnologija ustanovki korisnogo vantazhu na mors'ke dno [Tekst] / V. S. Blintsov, A. M. Voitasyk // Mizhnarodnij nauково-virobnichij zhurnal «Pidvodni tekhnologii. Promislova ta civil'na inzhenerija» – K.: KNUBA №4, 2016. – S. 50-59.

Войтасик А. Н. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВОГО САМОХОДНОГО ПОДВОДНОГО НОСИТЕЛЯ

В работе предложена математическая модель динамики движения телеуправляемого грузового самоходного подводного носителя предназначенного для доставки, установки и свертывания

полезного груза на морском дне, которая учитывает конструктивные особенности данного типа аппаратов. Разработано 3D-модель захватного устройства грузового самоходного подводного носителя для работы с полезным грузом.

Ключевые слова: подводный аппарат, полезный груз, захватное устройство, математическая модель.

Voitasyk A. M. THE IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF A SELF-PROPELLED UNDERWATER CARGO CARRIER

Developing and manufacturing operating samples of tethered remotely operated vehicle is expensive and laborious process. The expensive equipment used in their manufacture may be accidentally damaged during full-scale sea experiments. Thus the task of the previous computer simulation of the object of research is urgent with the aim to verify the performance of the proposed automatic control system.

In this paper modern approaches to the simulation of the dynamics of the motion of underwater vehicles with a cable connection are considered and the necessity in the development of specialized mathematical model of tethered remotely a self-propelled underwater cargo carrier with useful cargo is proved. The mathematical model of dynamics of movement a self-propelled underwater cargo carrier which intended for delivery, installation and removal of useful cargo on the sea bottom takes into account the design features of this type of underwater vehicles. 3D model of a gripper mechanism is designed for a self-propelled underwater cargo carrier with the use of useful cargo. The designed 3D model will be used during the design and preliminary configuration of the automated control system of underwater vehicle and its useful cargo.

Keywords: *underwater vehicle, useful cargo, gripper mechanism, mathematical model.*

© Войтасик А.М.

Статтю прийнято
до редакції 1.12.18