УДК 629.127, 681.51

Математичне моделювання динаміки руху кабель-троса прив'язної підводної системи

Автор: *Блінцов О. В., Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Прив'язні підводні системи (ППС) широко застосовуються при дослідженні та освоєнні Світового океану, а також при виконанні підводних робіт на внутрішніх водоймищах – ріках, озерах і т.п. Математичне моделювання руху ППС та інших засобів підводної техніки є одним з основних, а, при неможливості проведення басейнових або натурних випробувань, взагалі єдиним методом їх дослідження [1].

Математичні моделі окремих елементів ППС, наприклад, судна-носія (СН), підводного апарата (ПА), рушійного пристрою, на сьогоднішній день розроблені в достатній кількості та широко застосовуються для дослідження динаміки їх роботи [1-3]. Квазістаціонарні режими їх роботи нескладно отримати, прийнявши динамічну складову рівній нулю. В окремих випадках використовуються спеціалізовані моделі дослідження квазістаціонарних станів елементів ППС [4].

Основну проблему представляє моделювання гнучкого зв'язку – кабель-троса (КТ) – як складової ППС. На сьогоднішній день синтезовано та досліджено математичні моделі квазістаціонарного руху КТ [1, 5], які використовуються у складі моделюючих комплексів. Так, наприклад, емулятор ROV-1 [6] дає змогу розраховувати динаміку руху прив'язного ПА в околі деякої робочої точки під квазістаціонарним впливом КТ.

В працях [7, 8] пропонуються математичні моделі, з використанням яких можна розрахувати деякі окремі випадки динаміки руху КТ, наприклад, контурний рух гнучкого зв'язку, рух гнучкого зв'язку в режимах буксирування ПА. Проте, розробка повноцінної моделі динаміки руху ППС неможлива без відповідної моделі динаміки руху КТ.

В даній роботі пропонується моделювати рух КТ як сукупність певної кількості елементів, кожний з яких взаємодіє з набігаючим потоком води згідно з законами гідромеханіки та з сусідніми елементами через сили пружної деформації. Чим більшою кількістю елементів буде представлено КТ, тим точнішу модель отримаємо, але тим більшими будуть витрати комп'ютерного часу на моделювання.

Розглянемо рух ППС в діаметральній площині СН. Приймемо, що перший елемент КТ – корінний кінець – жорстко закріплений на СН і рухається разом з ним з деякою швидкістю, заданою вектором $\boldsymbol{V}_r(t)$. В напівзв'язаній з СН системі координат його розташування – вектор $\boldsymbol{P}_r$ – буде незмінним і співпадатиме з початком координат: $\boldsymbol{P}_r = \{0, 0\}$. Останній елемент КТ – ходовий кінець – розташуємо в деякій точці $\boldsymbol{P}_f$ та надамо швидкість $\boldsymbol{V}_f(t)$.

Стан кожного i-го проміжного елемента КТ буде характеризуватися поточними поступальними координатами – вектором $\boldsymbol{P}_i$, обертовою координатою β_i та поточною швидкістю – вектором $\boldsymbol{V}_i$.

Рух кожного i-го елемента КТ підпорядковується другому закону Ньютона:

$$m_i\boldsymbol{a}_i = \boldsymbol{F}_{p(i-1)} + \boldsymbol{F}_{p(i+1)} + \boldsymbol{F}_{wi},$$

де m_i – маса i-го елемента КТ, $\boldsymbol{a}_i$ – вектор прискорення i-го елемента КТ, $\boldsymbol{F}_{p(i-1)}$ – вектор сили натягу від попереднього (i-1) елемента КТ, $\boldsymbol{F}_{p(i+1)}$ – вектор сили натягу від наступного (i+1) елемента КТ, $\boldsymbol{F}_{wi}$ – вектор сили опору руху i-го елемента КТ в потоці води.

Складові вектора $\boldsymbol{F}_{wi}$ в натуральних координатах визначаються з [1]:

$$F_{win} = 0{,}5\rho D c_n (V_{in})^2 l;$$
$$F_{wit} = 0{,}5\rho D c_t (V_{it})^2 l,$$

де F_{win}, F_{wit} – відповідно нормальна та дотична складові вектора сили опору i-го елемента КТ, ρ – густина води, D – діаметр КТ, c_n, c_t – відповідно нормальний та тангенціальний гідродинамічні коефіцієнти КТ, V_{in}, V_{it} – відповідно нормальна та тангенціальна складові швидкості набігаючого на i-й елемент КТ потоку води, l – довжина елементарної частини КТ. Перехід між декартовими та натуральними координатами виконується шляхом нескладних перетворень із застосуванням кутової координати β_i.

Абсолютні значення векторів сил натягу розраховуються на основі закону Гука:

$$F_{p(i-1)} = -k\Delta l_{i-1};$$
$$F_{p(i+1)} = -k\Delta l_{i+1},$$

де k – коефіцієнт пружності КТ, Δl_{i-1}, Δl_{i+1} – видовження відповідно попереднього та наступного елементів КТ.

Видовження елементів КТ визначатимемо за формулами

$$\Delta l_{i-1} = s_{i-1} - l;$$

$$\Delta l_{i+1} = s_{i+1} - l,$$

де s_{i-1} – відстань між поточним та попереднім елементом КТ, s_{i+1} – відстань між поточним та наступним елементом КТ.

Вектори сил натягу розраховуються за наступними формулами:

$$\boldsymbol{F}_{p(i-1)} = \mathrm{ort}(\boldsymbol{P}_i - \boldsymbol{P}_{i-1})\cdot F_{p(i-1)};$$
$$\boldsymbol{F}_{p(i+1)} = \mathrm{ort}(\boldsymbol{P}_i - \boldsymbol{P}_{i+1})\cdot F_{p(i+1)}.$$

Таким чином, математична модель динаміки КТ складається з рівнянь руху кожного його елемента та рівнянь силової взаємодії між ними та потоком води.

Висновок.

На основі представлення кабель-троса сукупністю певної кількості елементів, кожний з яких взаємодіє з набігаючим потоком води згідно з законами гідромеханіки та з сусідніми елементами через сили пружної деформації, розроблено математичну модель динаміки кабель-троса як складової прив'язної підводної системи.

Список літератури.

1. Блинцов В.С., Магула В.Э. Проектирование самоходных привязных подводных систем. – К.: Наукова думка, 1997. – 140 с.

2. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. Учебник. – СПб.: "Элмор", 2002. – 360 с.

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

4. Павлов Г.В., Блінцов О.В. Синтез нейромережних моделей електрорушійного пристрою для задач керування квазістаціонарним рухом прив'язного підводного апарата. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008. – № 5 (422). – С. 81-86.

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

6. Блінцов О.В., Сірівчук А.С., Клочков О.П. Розробка програми-емулятора просторового руху підводного апарата-робота. // «Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів»: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. –

Миколаїв: НУК, 2011. – С. 79-82.

7. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 240 с.

8. Динамика подводных буксируемых систем / Поддубный В.И., Шамарин Ю.Е., Черненко Д.А., Астахов Л.С. – СПб: Судостроение, 1995. – 200 с.