УДК 681.532.5:629.584
Б 69

ОНЛАЙН-ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПІДВОДНОГО АПАРАТА ЯК НЕСТАЦІОНАРНОГО ОБ’ЄКТА В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ ІНВЕРСНОЇ МОДЕЛІ

С. В. Блінцов, канд. техн. наук, доц.

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розглянуто динаміку руху підводного апарата як нестаціонарного об’єкта першого порядку. Розроблено підхід до ідентифікації параметрів такого об’єкта та синтезу на їх основі закону керування, при цьому ідентифікація не потребує великої кількості вимірювань і може бути проведена за необхідності в будь-який момент при роботі апарата, тобто в онлайн-режимі.
Ключові слова: підводний апарат, ідентифікація параметрів, система автоматичного керування, інверсна модель.

Аннотация. Рассмотрена динамика движения подводного аппарата как нестационарного объекта первого порядка. Разработан подход к идентификации параметров такого объекта и синтезу на их основе закона управления, при этом идентификация не требует большого количества измерений и может быть проведена при необходимости в любой момент при работе аппарата, то есть в онлайн-режиме.
Ключевые слова: подводный аппарат, идентификация параметров, система автоматического управления, инверсная модель.

Abstract. The dynamics of underwater vehicle motion is considered as a first-order non-stationary object. An approach to identification of parameters of such an object, and control law synthesis developed on the parameters base is developed. This identification does not require a large number of measurements and can be carried out if necessary at any time in vehicle operation, that is, in the online mode.
Keywords: underwater vehicle, identification of parameters, automatic control system, inversion model.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Підводні апарати (ПА) є важливим інструментом для широкого кола задач, які виконуються під водою [1, 6]. Усе більше з’являється апаратів, які замінюють людину-водолаза, а також дають змогу здійснювати роботи на великих глибинах, недосяжних для людини. Постійно підвищуються вимоги до точності виконуваних робіт і, відповідно, до систем керування ПА.

Рух ПА в товщі води описується системою нелінійних диференціальних рівнянь [6], які містять багато невизначеностей. Крім того, самі по собі вони є достатньо приблизними та спрощеними. У зв’язку з цим синтез точних систем керування ПА є складною задачею.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Як відомо, сьогодні для побудови систем керування ПА використовуються як класичні ПІД-регулятори [1], так і деякі більш розвинені підходи, наприклад на базі еталонної моделі за методом Ляпунова [6]. Але вони базуються на математичній моделі руху ПА, яка, як вже сказано, є неточною.

Більш доцільним, на думку автора, є застосування елементів штучного інтелекту та побудова на їх основі регуляторів на базі інверсної моделі об’єкта [3]. При такому підході отримується апроксимаційна модель на основі експериментальних даних, яка більш точно відтворює поведінку об’єкта. Але для цього необхідно провести серію експериментів, що не завжди можливо.

У даній роботі розробляється підхід, що дозволив би на основі відносно невеликої кількості замірів стану об’єкта, тобто в режимі онлайн, сформувати інверсну модель, яка була б адекватною в даній точці та її околі.

МЕТА РОБОТИ — розробка підходу до ідентифікації параметрів підводного апарата в процесі його роботи та побудова на основі цих параметрів інверсної моделі для розрахунку керуючого впливу.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розглянемо об’єкт керування, динаміку якого можна відобразити диференціальним рівнянням першого порядку

$$k_1\dot{x} = u - k_2 x + D, \quad (1)$$

де u — керуючий вплив; x — керована величина; $\dot{x} = dx/dt$ — перша похідна за часом t від керованої величини; D — зовнішнє збурення; $k_{1,2} = f(u, x, \dot{x}, t)$ — нелінійні, нестаціонарні (в загальному випадку) коефіцієнти об’єкта керування.

Для спрощення спочатку будемо вважати, що останні коефіцієнти є сталими.

Автоматичне керування на основі інверсної моделі об’єкта виконується за законом

$$u = k_1\dot{x}_d + k_2 x - D,$$

де $\dot{x}_d$ — бажане (desired) значення першої похідної керованої величини, що визначається за формулою

$$\dot{x}_d = \frac{e_x}{\Delta t} = \frac{x_d - x}{\Delta t}, \quad (2)$$

де e_x — похибка керування; x_d — задане (desired) значення керованої величини; Δt — стала часу системи керування (заданий проміжок часу, за який керована величина x має набути задане значення x_d).

У такий спосіб можливо керувати при відомих (у кожен момент часу) значеннях коефіцієнтів k_1 та k_2. При цьому величина зовнішнього збурення D на кожному кроці керування визначається з формули (1) за фактичними значеннями u, x та $\dot{x}$ за умови відносно повільної зміни D.

Для застосування системи автоматичного керування (САК) на основі інверсної моделі об'єкта при невизначених k_1 та k_2 необхідно розв'язати задачу їх ідентифікації. Для цього візьмемо, що величина зовнішніх збурень не змінюється або змінюється повільно, тобто $D \approx \text{const}$ на інтервалі Δt. Тоді об'єкт керування можна записати у вигляді деякої функції двох змінних з невідомими коефіцієнтами k_1 та k_2:

$$u = f(x, \dot{x}) = k_1 \dot{x} + k_2 x - D. \qquad (3)$$

Розглянемо залежність u від $\dot{x}$ при $x = \text{const}$. Деякому значенню $\dot{x}_1$ відповідає u_1, а $\dot{x}_2$ — u_2. Знайдемо різницю між u_2 та u_1 — величину Δu:

$$u_2 - u_1 = k_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 x - k_2 x - D + D;$$

$$\Delta u = k_1 \Delta \dot{x}. \qquad (4)$$

Розглянемо залежність u від x при $\dot{x} = \text{const}$. Деякому значенню x_1 відповідає u_1, а x_2 — u_2. Знайдемо різницю u_2 та u_1:

$$u_2 - u_1 = k_2(x_2 - x_1) + k_1 \dot{x} - k_1 \dot{x} - D + D;$$

$$\Delta u = k_2 \Delta x. \qquad (5)$$

Коефіцієнти k_1 та k_2 на основі (4) і (5) можна записати як частинні похідні функції $u = f(x, \dot{x})$:

$$k_1 = \frac{\partial u}{\partial \dot{x}}; \qquad (6)$$

$$k_2 = \frac{\partial u}{\partial x}. \qquad (7)$$

Аналогічно частинною похідною можна відобразити відношення коефіцієнтів k_1 та k_2 при $u = \text{const}$:

$$\frac{k_1}{k_2} = -\frac{\partial x}{\partial \dot{x}}. \qquad (8)$$

Таким чином, взагалі для повної ідентифікації об'єкта керування в його робочих межах потрібно виконати необхідну кількість вимірювань керованої величини $x(u, t)$ при $D = \text{const}$ та за рівняннями (6) і (7) знайти коефіцієнти у вигляді залежностей $k_1 = f(x, \dot{x})$ та $k_2 = f(x, \dot{x})$. Маючи такі повні залежності, потім у процесі керування можна для будь-якої змінної точки простору станів, в якій знаходиться об'єкт, визначити ці коефіцієнти і використовувати їх у складі САК на основі інверсної моделі для розрахунку необхідного керуючого впливу.

Розглянемо як об'єкт керування корпус підводного апарата, що рухається прямолінійно в товщі води. Його динаміка описується нелінійним диференціальним рівнянням першого порядку [4]:

$$m\dot{V} = F - 0{,}5\rho c S V^2 + F_D, \qquad (9)$$

де V — швидкість руху ПА (керована величина); $\dot{V} = dV/dt$ — її перша похідна за часом t; F — упор рушіїв ПА (керуючий вплив); F_D — зовнішнє збурення; m — маса ПА з приєднаними масами води; ρ — густина води; S — характерна площа корпусу ПА; c — нелінійний гідродинамічний коефіцієнт.

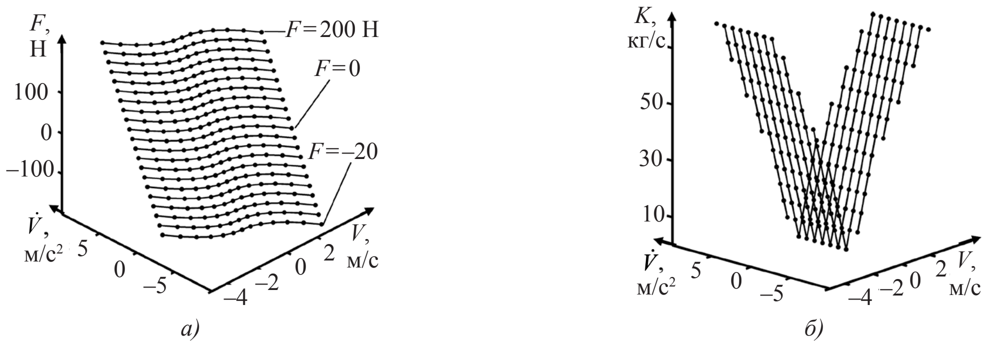
Невизначеними є коефіцієнти об'єкта керування m та $K = 0{,}5\rho c S|V|$.

Очевидно, що рівняння (1) та (9) є аналогічними: x відповідає V, $\dot{x}$ — $\dot{V}$, k_1 — m, k_2 — K, D — F_D. Оскільки k_1 та k_2 можуть змінюватися в часі (k_1 — при зміні приєднаних мас води, k_2 — при зміні швидкості), то в даному випадку ми можемо розглядати рівняння динаміки руху ПА не як нелінійне, а як лінійне нестаціонарне першого порядку.

Величина m майже не змінюється при русі ПА [5]. Нелінійності проявляються в коефіцієнті K, оскільки він залежить від керованої величини V.

Задамо такі параметри моделі ПА [2]: $m = 50$ кг, $\rho = 1024$ кг/м^3, $c = 0{,}1$, $S = 0{,}5$ м^2, $F_D = 0$ Н; розрахуємо точки, які утворюють залежність вигляду (3) $F = f(V, \dot{V})$ при $F \in [-200, 200]$ Н та $V \in [-3, 3]$ м/с (рис. 1, *а*). Лініями з'єднано точки, для яких $F = \text{const}$.

Якщо розрахувати коефіцієнт $m = f(V, \dot{V})$, то отримаємо плоску горизонтальну поверхню, тобто $m = \text{const}$, оскільки в ідеалізованій моделі (9) величина m не змінюється.



а) *б)*

Рис. 1. Зображення залежностей $F = f(V, \dot{V})$ (*а*) та $K = f(V, \dot{V})$ (*б*)

Якщо розрахувати коефіцієнт $K=f(V, \dot{V})$, то отримаємо поверхню, утворену двома площинами (див. рис. 1, *б*). Лініями з'єднано точки, для яких $\dot{V}=\mathrm{const}$. На рисунку ці лінії прямі, оскільки згідно з ідеалізованою моделлю корпусу ПА (9) K лінійно залежить тільки від V. Також видно, що K не залежить від $\dot{V}$, що відповідає формулі (9).

У реальних умовах отримання моделі об'єкта керування як залежності $u=f(x, \dot{x})$ становить деяку складність, оскільки для цього необхідно створити штучні умови роботи:

– забезпечити $D=0$ протягом усього експерименту;

– задавати $u=\mathrm{const}$ та виконувати заміри $x=f(t)$ і $\dot{x}=f(t)$ при $x_0=x_{max}$ та $x_0=x_{min}$, де $[x_{max}, x_{min}]$ — робочий діапазон керованої величини;

– виконати вказані заміри для діапазону сигналів керування $u \in [u_{max}, u_{min}]$ із заданим кроком.

Для ПА, оскільки він має незмінний параметр k_1, достатньо для керуючого впливу $u_1=\mathrm{const}$ провести заміри $x_1=f(t)$ і $\dot{x}_1=f(t)$ та для одного значення u_2 заміряти по одному значенню $x_2=f(t)$ і $\dot{x}_2=f(t)$. Порядок ідентифікації при цьому буде наступний: спочатку знаходимо k_1 за рівнянням (6), а далі, використовуючи рівняння (8), можна знайти $k_2=f(x)$ у будь-якій точці. Нагадаємо, що рівняння (6) і (8) виводилися при сталих коефіцієнтах k_1 і k_2. У випадку з ПА k_1 дійсно можна вважати сталим, k_2 — приблизно сталим за умови незначної зміни швидкості V, тобто точки, що беруться для розрахунку, повинні знаходитися поруч.

На рис. 2, *а – в* зображено результати моделювання руху ПА для ідентифікації його параметрів. Заміри, виконані через кожні $\Delta t=0{,}1$ с, позначено точками.

Для ідентифікації достатньо при $F=200$ Н заміряти параметри в одній точці, наприклад у точці Б. Усі результати замірів об'єднано в залежність $F=f(V, \dot{V})$, зображену на рис. 2, *г*. На ньому точка В розділяє криві *1* і *2*, які відповідають замірам при $V_0=-3$ та $V_0=+3$ м/с відповідно.

Для знаходження коефіцієнта k_1 об'єкта керування було визначено, яке прискорення відповідає швидкості $V=1$ м/с при $F_1=100$ Н (точка А) та при $F_2=200$ Н (точка Б). За рівнянням (4) було отримано значення, що дійсно дорівнює масі ПА m, яка відповідає коефіцієнту k_1, тобто розрахунки підтвердили правильність методу.

Коефіцієнт $K=f(V)$ у будь-якій точці можливо знайти за рівнянням (8) та залежністю $\dot{V}=f(V)$ при відповідному значенні V. Насправді, отримати дійсне значення K в умовах, коли швидкість і сам коефіцієнт змінюються, не можна. Але для керування важливо, щоб знайдене «фіктивне» значення залишилося таким самим і на наступному інтервалі керування, тоді розрахований керуючий вплив буде мати очікувану дію. А ця вимога дійсно виконується за умови достатньо малого кроку дискретизації.

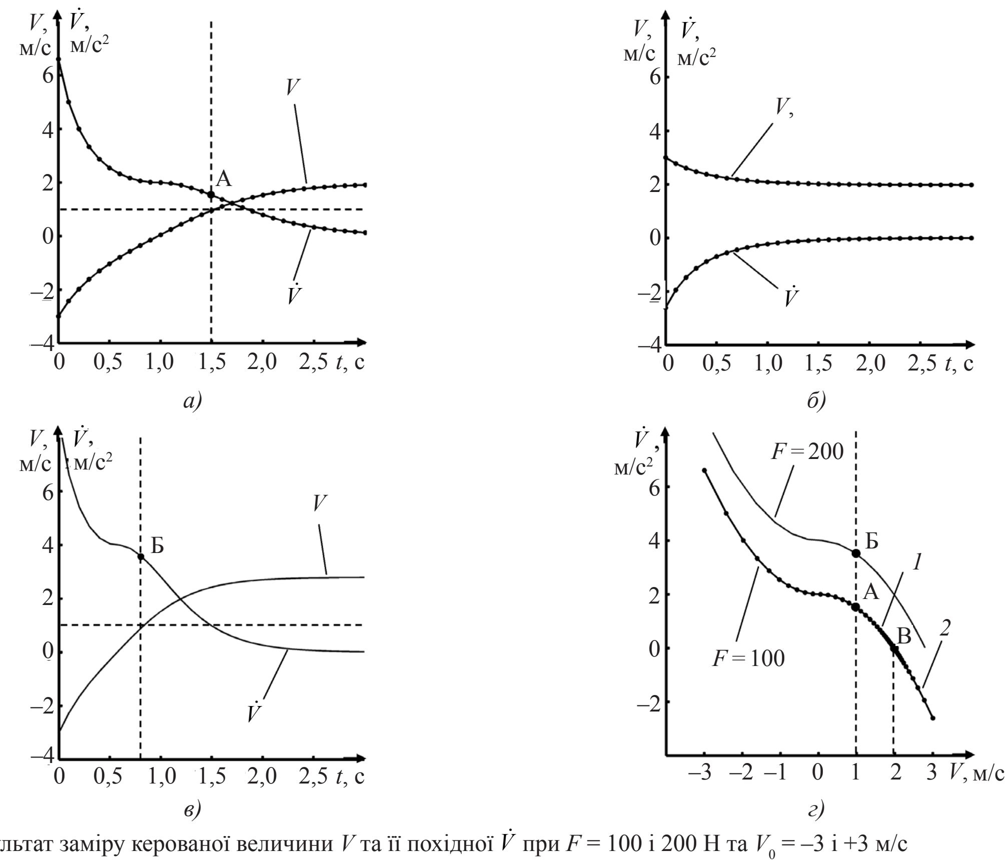


Рис. 2. Результат заміру керованої величини V та її похідної $\dot{V}$ при F = 100 і 200 Н та V_0 = –3 і +3 м/с

Аналіз залежності $u=f(x, \dot{x})$ показує, що застосування рівняння (4) як складової закону керування дає змогу ефективно керувати підводним апаратом. При цьому достатньо визначити k_1, а коефіцієнт k_2 узагалі можна не ідентифікувати.

Новий сигнал керування будемо розраховувати за формулою

$$u_n = u + \Delta u_d, \tag{10}$$

де u — змінний сигнал керування; Δu_d — бажаний (desired), тобто необхідний для виправлення похибки керування, приріст сигналу.

Величина Δu_d визначається за формулою (4):

$$\Delta u_d = k_1 \Delta \dot{x}_d, \tag{11}$$

де $\Delta \dot{x}_d = \dot{x}_d - \dot{x}$ — бажаний приріст першої похідної керованої величини ($\dot{x}_d$ — бажана величина першої похідної керованої величини, яка визначається за формулою (2), $\dot{x}$ — змінне значення першої похідної керованої величини).

У строгому математичному сенсі формулу (4) використовувати не можна, оскільки вона виведена при x=const та k_2=const, що в даному випадку не виконується. Але якщо крок дискретизації значно менший за сталу часу динаміки системи, то можна вважати, що на двох сусідніх точках $V \approx$const, тоді, відповідно, будемо мати і $K \approx$const. Таке припущення значно спрощує задачу: відпадає необхідність ідентифікувати коефіцієнт K, але при цьому, як показало подальше моделювання, система керування залишається працездатною і достатньо точною.

Об’єднавши (2), (10) та (11), отримаємо закон керування:

$$u_n = u + k_1\left(\frac{x_d - x}{\Delta t} - \dot{x}\right), \tag{12}$$

де Δt — стала часу САК.

Такий закон буде однаково добре працювати при будь-якому значенні величини зовнішніх збурень D, якщо $D \approx$const у межах сусідніх замірів. Це нескладно показати, взявши величину D відомою. Припустимо, що при деякому сигналі керування u під дією зовнішніх збурень D та змінному значенні керованої величини x об’єкт отримав прискорення $\dot{x}$. Сумарний вплив на об’єкт керування можна охарактеризувати деякою величиною $S=u+D$. Для досягнення бажаного прискорення $\dot{x}_d$ розрахуємо новий сумарний вплив $S_n=u_n+D$ за законом (12):

$$S_n = S + k_1\left(\frac{x_d - x}{\Delta t} - \dot{x}\right);$$

$$u_n + D = u + D + k_1\left(\frac{x_d - x}{\Delta t} - \dot{x}\right).$$

Як бачимо, зовнішні збурення D скорочуються, що і потрібно було довести.

Таким чином, отриманий закон керування дає змогу виконувати автоматичне керування за умови визначення коефіцієнта k_1 об’єкта керування без необхідності ідентифікувати коефіцієнт k_2 та розрахунку зовнішніх збурень D.

ВИСНОВКИ

1. На основі відображення сигналу керування як функції керованої величини та її першої похідної розроблено метод ідентифікації коефіцієнтів об’єкта керування — підводного апарата, динаміка якого описується нелінійним диференціальним рівнянням першого порядку. Це дає змогу виконувати його ідентифікацію в задачах автоматичного керування в умовах невизначеності власних параметрів об’єкта та зовнішнього збурення, причому ідентифікація не потребує проведення складної серії експериментів і може бути виконана безпосередньо перед початком роботи або, за необхідності уточнення чи при зміні параметрів, у процесі роботи, тобто в онлайн-режимі.

2. На базі основних співвідношень розробленого методу ідентифікації синтезовано закон керування, який дозволяє виконувати ефективне керування підводним апаратом лише за даними зворотного зв’язку без необхідності повної ідентифікації параметрів об’єкта та величини зовнішніх збурень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Автономные подводные роботы: системы и технологии [Текст] / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко [и др.] ; под общ. ред. М.Д. Агеева. — М. : Наука, 2005. — 398 с.

[2] **Блінцов, О.В.** Моделюючий комплекс для дослідження динаміки просторового руху підводного апарата [Текст] / О.В. Блінцов, А.С. Сірівчук // Комп’ютерні науки: освіта, наука, практика : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. — Миколаїв : НУК, 2012. — С. 31–34.

[3] **Блінцов, С.В.** Застосування елементів штучного інтелекту в системах керування рухом самохідних підводних апаратів [Текст] / С.В. Блінцов // Технічна електродинаміка. — Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». — 2006. — Ч. 6. — С. 108–111.

[4] **Лукомский, Ю. А.** Навигация и управление движением судов [Текст] / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. — С.Пб. : Элмор, 2002. — 360 с.

[5] Справочник по теории корабля [Текст] : в 3 т. / под ред. Я. И. Войткунского. — Л. : Судостроение, 1985. — Т. 1. — 768 с.

[6] **Филаретов, В. Ф.** Устройства и системы управления подводных роботов [Текст] / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец. — М. : Наука, 2005. — 270 с.

Надійшла до редколегії 17.04.2012
Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *Г. В. Павлов*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2012