

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ ЯК ОБ'ЄКТОМ ДРУГОГО ПОРЯДКУ НА БАЗІ ІНВЕРСНОЇ МОДЕЛІ З ОНЛАЙН-ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ

С. В. Блінцов, канд. техн. наук, доцент

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розроблено алгоритм роботи регулятора, який дозволяє в процесі роботи виконувати онлайн-ідентифікацію параметрів об'єкта при плавній зміні керуючого сигналу, що дає змогу об'єднувати послідовно з'єднані такі регулятори для керування об'єктами другого порядку. На основі вказаних регуляторів побудовано систему автоматичного керування швидкістю руху підводного апарата на базі його інверсної моделі. Шляхом комп'ютерного моделювання підтверджено її високу ефективність.

Ключові слова: підводний апарат, ідентифікація параметрів, система автоматичного керування, інверсна модель.

Аннотация. Разработан алгоритм работы регулятора, который позволяет в процессе работы выполнять онлайн-идентификацию параметров объекта при плавном изменении управляющего сигнала, что дает возможность объединять последовательно соединенные такие регуляторы для управления объектами второго порядка. На основе указанных регуляторов построена система автоматического управления скоростью движения подводного аппарата на базе его инверсной модели. Путем компьютерного моделирования подтверждена ее высокая эффективность.

Ключевые слова: подводный аппарат, идентификация параметров, система автоматического управления, инверсная модель.

Abstract. The algorithm of the regulator is developed, which allows to carry out the process of on-line parameters identification of an object with smooth change of the control signal. It makes it possible to combine such sequentially connected regulators in order to control second-order objects. On the basis of these regulators the automatic control system of underwater vehicle velocity has been developed considering the vehicle inverse model. Its efficiency is proved by computer simulation.

Keywords: underwater vehicle, parameters identification, automatic control system, inverse model.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Перелік задач, який виконується підводними апаратами (ПА), постійно розширюється, підвищуються вимоги до точності виконуваних робіт, а разом з тим і до точності їх систем керування [1, 6]. При цьому синтез точних систем керування ПА є складною задачею, оскільки, як відомо, рух ПА в товщі води описується системою нелінійних диференціальних рівнянь [6], які містять багато невизначеностей. Тому пошук шляхів удосконалення систем керування ПА є актуальною задачею.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У роботах [3, 4] було розроблено регулятор для керування рухом ПА, який розраховує керуючий сигнал на базі інверсної моделі об'єкта. При цьому коефіцієнти, присутні в інверсній моделі, можуть ідентифікуватися безпосередньо в процесі роботи ПА в онлайн-режимі. Але в них розглядається лише останній рівень моделі об'єкта — рівняння динаміки руху. Керуючим сигналом при цьому є упор гребного гвинта, а як його забезпечити на необхідному рівні — це вже наступна задача, яку в даній роботі будемо вирішувати в той самий спосіб: за допо-

могою інверсної моделі з онлайн-ідентифікацією параметрів.

МЕТА РОБОТИ — розробка системи керування рухом підводного апарата на базі інверсної моделі та алгоритмів роботи регуляторів, з яких вона складається, з можливістю онлайн-ідентифікації необхідних для моделі параметрів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У роботах [3, 4] розглядається об'єкт керування, динаміка якого описується 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, нестационарні (в загальному випадку) коефіцієнти об'єкта керування.

Для спрощення взято, що останні коефіцієнти є приблизно сталими. За умови достатньо малого кроку дискретизації системи їх змінами на двох сусідніх точках можна знехтувати.

Якщо динаміка об'єкта керування описується диференціальним рівнянням більш високого порядку,

тобто являє собою дві (або більше) послідовно з'єднані аперіодичні ланки, то для автоматичного керування цілком логічно використовувати відповідно два (або більше) послідовно з'єднаних регуляторів розробленого типу. При цьому для керування необхідно вимірювати як основну керовану величину, так і проміжну, яка в об'єкті керування є виходом першої аперіодичної ланки та входом другої.

Розглянемо ПА як об'єкт керування. Математичну модель його маршового руху розглянуто в [2, 5]. Керуючий вплив — напруга живлення u — подається на вхід електродвигуна (ЕД), який через редуктор-валопровід (РВ) примушує обертатися гребний гвинт (ГГ) із частотою ω . У результаті обертання ГГ створюється упор F , який спричиняє рух ПА.

Рух корпусу ПА описується диференціальним рівнянням першого порядку [3], проте вхід моделі — упор гребного гвинта F — на практиці вимірювати досить складно. Зазвичай вимірюють частоту обертів ГГ ω [2, 5]. Тому саме величину ω було обрано як вихід першої аперіодичної ланки об'єкта керування та вхід другої, тобто як проміжну керовану величину. Динаміка ЕД з РВ описується двома диференціальними рівняннями першого порядку, проте стала часу одного з них порівняно невелика, що дає можливість виконувати автоматичне керування ЕД з РВ як системою першого порядку. Таким чином, отримуємо об'єкт другого порядку, систему автоматичного керування (САК) яким зображено на рис. 1.

Перший контур САК містить регулятор Р1 та ЕД з РВ. На вхід Р1 надходять бажане ω_d та фактичне ω значення частот обертів ГГ, на виході отримуємо напругу живлення ЕД u . Регулятор Р1 ґрунтується на теорії, розробленій у [4], та виконує автоматичне керування проміжною керованою величиною ω .

На вхід другого регулятора Р2 надходять задана V_d та зміна V швидкості руху ПА. Задачею Р2 є розрахунок такої бажаної частоти обертання ГГ ω_d , яка б забезпечила відповідність змінної швидкості V до заданої V_d . На вхід Р2 також надходить фактичне значення частоти обертів ГГ ω , оскільки для роботи Р2 у його пам'яті повинні зберігатися змінні значення згенерованого керуючого впливу, а величина ω_d не є такою.

З тієї ж причини роботу Р2 не можна організувати повністю за алгоритмом Р1, тобто зі східчастою зміною керуючого впливу, тому що в даному випадку керуючий вплив ω буде змінюватися плавно,

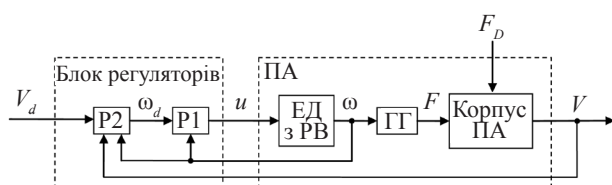


Рис. 1. Система автоматичного керування маршовим рухом ПА

оскільки є виходом аперіодичної ланки «ЕД–РВ». Для коректної роботи САК (див. рис. 1) необхідно забезпечити ідентифікацію параметра k_1 при повільній зміні сигналу керування.

Розраховувати параметр k_1 пропонується в такий спосіб. Спочатку послідовно задаємо бажаний сигнал керування ω_d , що дорівнює деякій величині ω_1 , потім ω_2 та знову ω_1 . При кожному встановленні значень ω_d будемо чекати на завершення перехідного процесу, щоб регулятор Р1 установив фактичне значення ω , що дорівнює потрібному заданому ω_d . При цьому будемо записувати змінні ω , V та \dot{V} . У результаті отримаємо залежність $u=f(x, \dot{x})=k_1\dot{x}+k_2x-D$ (інверсну залежність по відношенню до (1)) у табличному вигляді. Методом найменших квадратів виконаємо апроксимацію отриманої таблиці даних та одержимо поліном вигляду

$$\omega = a_1 + a_2V + a_3\dot{V}, \quad (2)$$

де $a_{1,2,3}$ — коефіцієнти полінома (коефіцієнт a_3 і буде являти собою шуканий k_1).

У загальному випадку, чим більший діапазон охоплять ω_1 та ω_2 , тим точнішим буде k_1 , тому бажано взяти $\omega_1 = -\omega_{\max}$ і $\omega_2 = +\omega_{\max}$. Проте через необхідність для керуючого впливу брати свої граничні положення, розраховувати k_1 доцільно не на кожному кроці роботи Р2, а тільки за необхідності (за зовнішньою вимогою). Таким чином, алгоритм роботи регулятора Р2 буде мати вигляд, зображений на рис. 2.

У блоці 1 вводиться параметр ω_{\max} — максимальне значення сигналу керування.

У блоці 2 виконується зчитування:

– змінної k , згідно з якою регулятор продовжує ($k=1$) або припиняє ($k \neq 1$) свою роботу шляхом перевірки умови в блоці 3;

– змінної r , за результатом перевірки якої в блоці 4 алгоритм переходить до процедури розрахунку коефіцієнта k_1 (при $r=1$) або безпосередньо до розрахунку керуючого впливу (при $r \neq 1$);

– величин ω , V , V_d .

Блок 5 виконує розрахунок сигналу керування за законом, отриманим у роботі [4], за аналогією з розробленим у ній регулятором.

Блок 6 виконує виведення частоти ω_d та подання її на наступний регулятор (Р1 на рис. 1), в якому синтезується керуючий вплив на виконавчий механізм.

Блок 7 починає свою роботу при $r=1$ і задає початкове значення сигналу керування $\omega_d := -\omega_{\max}$, а також параметри $n=1$ та $c=1$, де n — номер заміру керованої величини; c — номер серії поданого сигналу керування. Параметр c вводиться для забезпечення послідовного подання різних значень керуючих впливів.

Блок 8 еквівалентний блоку 6 і виконує виведення частоти ω_d .

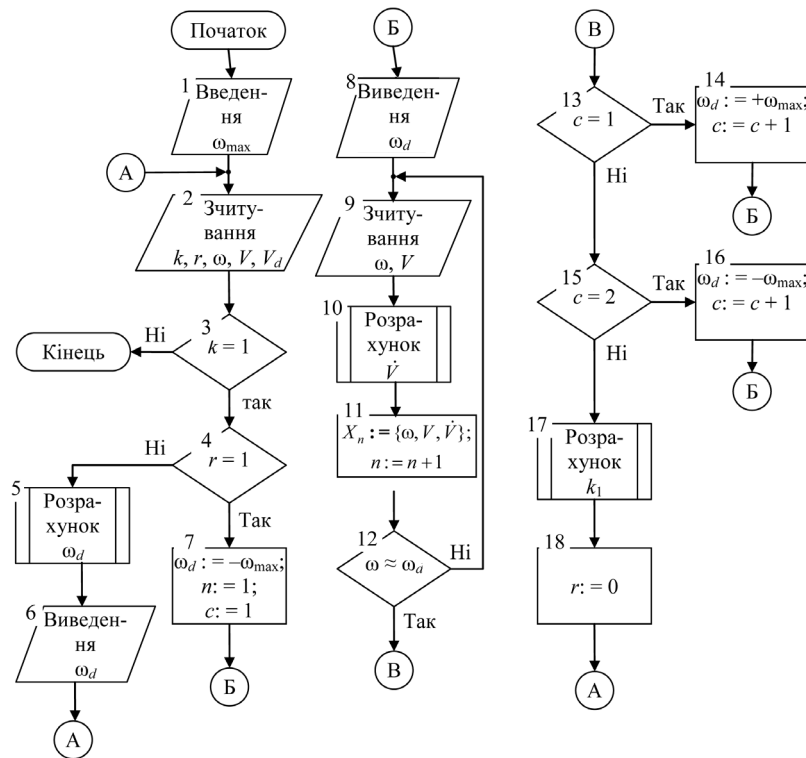


Рис. 2. Алгоритм роботи регулятора з розрахунком k_1 за вимогою при плавній зміні сигналу керування

У блоці 9 виконується зчитування основної V та проміжної ω керованих величин.

У блоці 10 виконується розрахунок похідної змінного значення керованої величини \dot{V} .

Блок 11 виконує запис стану системи в n -й стовпець масиву X . Кожна чарунка масиву X являє собою структуру даних, яка містить змінні значення ω , V та \dot{V} . Також у цьому блоці індекс n збільшується на одиницю.

Блок 12 перевіряє, чи відповідає керована величина ω заданому значенню ω_d . Якщо результат перевірки false, то алгоритм повертається до блока 9 і продовжує виконання замірів.

Перехід до блока 14 після перевірки умови в блоці 13 означає, що ω досягла першого заданого значення. У блоці 14 величина ω_d набуває наступного другого значення, а параметр c збільшується на одиницю.

Перехід до блока 16 після перевірки умови в блоці 15 означає, що ω досягла другого заданого значення. У блоці 16 величина ω_d набуває наступного третього значення, а параметр c також збільшується на одиницю.

Перехід до блока 17 означає, що ω досягла всіх трьох заданих значень і масив X містить достатню кількість даних для розрахунку коефіцієнта k_1 . У блоці 17 виконується апроксимація табличних даних методом найменших квадратів та отримується коефіцієнт k_1 у залежності (2).

У блоці 18 параметр r встановлюється таким, що дорівнює нулю, що забезпечує виконання

блоків 7–17, які відповідають за ідентифікацію коефіцієнта k_1 тільки за зовнішньою вимогою.

Після цього алгоритм повертається до циклу 2–6, який відповідає безпосередньо за автоматичне керування.

Виконаємо перевірку роботи САК ПА як об'єктом другого порядку. Для повноти експерименту задамо також зовнішні збурення, що змінюються за законом

$$F_D = 30 \sin(0,63t).$$

Блок регуляторів САК було налагоджено таким чином: сигнал керування було обмежено діапазоном $u \in [-600, 600]$ В, сталу часу регулятора P1 встановлено $\Delta t_1 = 0,02$ с, сталу часу P2 — $\Delta t_2 = 0,1$ с, граничне значення частоти обертів гребного гвинта взято $\omega_{\max} = 200$ рад/с.

На рис. 3 зображено перехідний процес при синусоїдальному характері заданої швидкості V_d .

На першому інтервалі (від 0 до t_1) регулятор P2 виконує автоматичне настроювання (ідентифікацію коефіцієнта k_1) і далі переходить безпосередньо до керування.

На рисунку бачимо, що регулятор P2 послідовно встановлює $\omega_d = -200, +200, -200$ рад/с, чекає на завершення перехідних процесів та, визначивши коефіцієнт k_1 , динамічно змінює ω_d у залежності від змінного стану системи. При цьому з моменту часу t_1 по t_2 величина ω_d має максимальне значення, що обумовлено великою різницею між V_d та V .

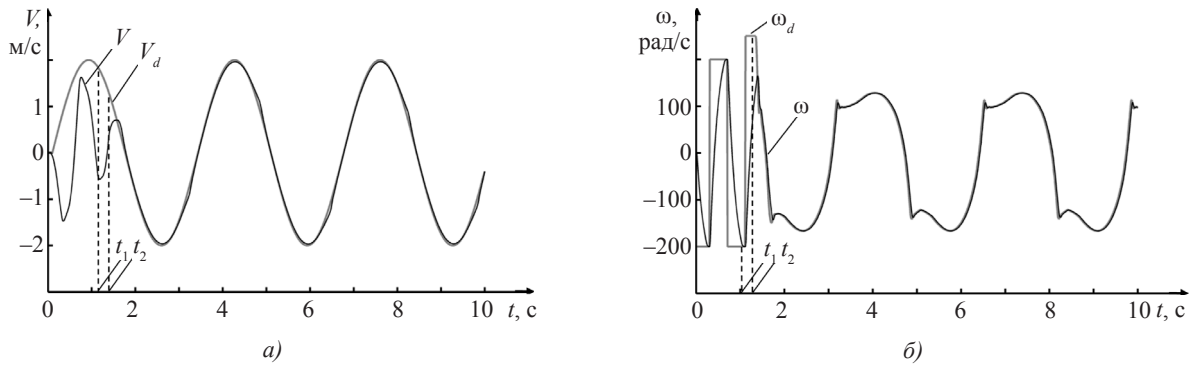


Рис. 3. Моделювання роботи САК при синусоїдальному характері заданої швидкості: а) — графік зміни швидкості; б) — графік зміни проміжної керованої величини ω

На рис. 4 зображено перехідний процес при східчастій зміні заданої швидкості V_d .

На рисунку бачимо, що після настроювання регулятор Р2 починає виконання поставленої задачі автоматичного керування. При невеликих значеннях V_d (до 0,5 м/с) бачимо перерегулювання в межах 10% від максимального значення керованої величини. Це обумовлено істотним проявом нелінійностей об'єкта керування (в цій зоні коефіцієнт k_1 значно змінюється) та впливом невизначених зовнішніх збурень. Незважаючи на це, регулятор цілком успішно виконує задачу керування й встановлює необхідну швидкість. Регулятор Р1 також цілком успішно виконує задачу керування (рис. 5).

Таким чином, аналіз результатів комп'ютерного моделювання підтверджує працездатність розглянутого підходу і свідчить, що розроблена САК на основі послідовно з'єднаних регуляторів дозволяє ефективно керувати об'єктом в умовах невизначеності його параметрів та зовнішніх збурень, причому як при східчастому, так і при плавному законах зміни заданої швидкості.

ВИСНОВКИ

1. На основі описаного раніше підходу онлайн-ідентифікації та регулятора зі східчастою зміною керуючого впливу розроблено структуру й алгоритм роботи регулятора з плавною зміною керуючого впливу, який пропонується використовувати в складі блока регуляторів для керування об'єктами другого порядку.

2. На основі регуляторів зі східчастою і плавною зміною сигналів керування розроблено САК, яка дає змогу виконувати ефективне керування об'єктом другого

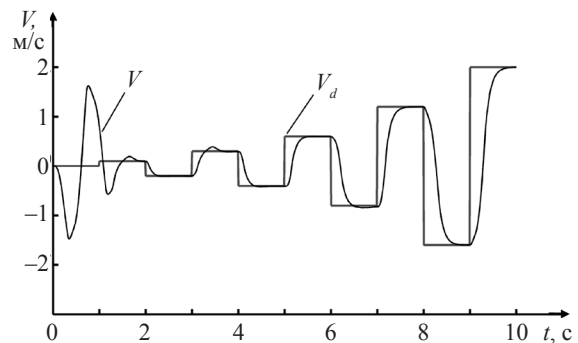


Рис. 4. Моделювання роботи САК при східчастій зміні V_d

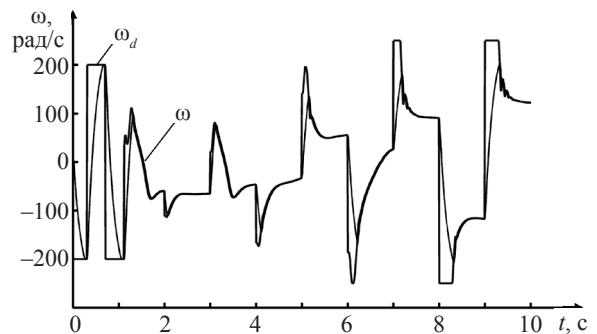


Рис. 5. Проміжна керована величина при східчастому характері V_d

порядку, при цьому не потребує попередніх досліджень динаміки об'єкта та ідентифікації його параметрів.

3. Методом комп'ютерного моделювання підтверджено працездатність та ефективність розробленої системи для керування підводним апаратом як об'єктом другого порядку в умовах невизначеності й істотних нелінійностей об'єкта та 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. Сірвчук // Комп'ютерні науки: освіта, наука, практика : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. — Миколаїв : НУК, 2012. — С. 31–34.

- [3] **Блінцов, О. В.** Онлайн-ідентифікація параметрів підводного апарата як нестационарного об'єкта в системі керування на базі інверсної моделі [Електронний ресурс] / С. В. Блінцов // Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». — Миколаїв : НУК, 2012. — № 3. — Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [4] **Блінцов, О. В.** Синтез та дослідження системи керування динамікою руху підводного апарата на базі інверсної моделі з онлайн-ідентифікацією параметрів [Текст] / С. В. Блінцов // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2012. — № 4 (445).
- [5] **Ставинський, А. А.** Удосконалення математичної моделі самохідного підводного апарата для дослідження просторового руху [Текст] / А. А. Ставинський, С. В. Блінцов // Зб. наук. пр. Національного університету кораблебудування. — Миколаїв : НУК, 2004. — № 3 (396). — С. 161–166.
- [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.

© С. В. Блінцов

Надійшла до редколегії 01.08.2012

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

Статтю розміщено у Віснику НУК № 4, 2012