

УДК 681.5:629.584
Б 69

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

С. В. Блінцов, канд. техн. наук, доц.;
Доан Фук Тхи, асп.

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. На базі штучних нейронних мереж розроблено принципи функціонування оптимальної за швидкодією системи автоматичного керування швидкістю руху та переміщеннями для суттєво нелінійного технічного об'єкта – самохідного підводного апарата. Запропоновано методику побудови такої системи керування в умовах невизначеності власних параметрів і математичної моделі об'єкта.

Ключові слова: підводний апарат, нелінійний динамічний об'єкт, оптимальна система керування, штучна нейронна мережа.

Аннотация. На базе искусственных нейронных сетей разработаны принципы функционирования оптимальной по быстродействию системы автоматического управления скоростью движения и перемещениями для существенно нелинейного технического объекта – самоходного подводного аппарата. Предложена методика построения такой системы управления в условиях неопределенности собственных параметров и математической модели объекта.

Ключевые слова: подводный аппарат, нелинейный динамический объект, оптимальная система управления, искусственная нейронная сеть.

Abstract. On the basis of artificial neuron networks the operation principles of the time optimal system of the automatic control of speed of motion and traversing for the highly-nonlinear technical object, specifically for the self-propelled submersible, have been developed. The design method of such management system in terms of uncertainty of its parameters and mathematical model of the object is offered.

Keywords: submersible, nonlinear dynamic object, optimal control system, artificial neuron network.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Оптимальне за швидкодією автоматичне керування одиночним самохідним підводним апаратом (ПА) є актуальним науковим завданням, оскільки ПА є суттєво нелінійним об'єктом [7], а його просторовий рух у товщі води описується системою нелінійних диференціальних рівнянь [6]. Тому побудувати для нього оптимальний регулятор за типовими методами [5] неможливо, оскільки істотні нелінійності ускладнюють отримання адекватних передатних функцій об'єкта керування. Указана особливість обумовлює актуальність даної статті.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Наукове завдання вдосконалення систем автоматичного керування самохідними ПА активно досліджується вітчизняними та зарубіжними науковцями [1, 3, 8]. Головні зусилля при цьому сконцентровано на автоматичній стабілізації руху ПА по курсу і по траєкторії, на забезпеченні точного визначення місця ПА протягом усієї місії. Окремі публікації присвячені автоматизації керування ПА в складних умовах підводної навігації [8], проте отримані в них результати стосуються окремих рішень і не мають необхідних теоретичних узагальнень для всього класу самохідних ПА.

Перспективний напрямок розв'язання задачі для оптимального керування швидкістю руху ПА викла-

дено в роботі [2]. Описаний підхід ґрунтується на застосуванні наближеної математичної моделі руху самохідного ПА. Попередній аналіз показує, що на її основі можна виконувати синтез оптимальних за швидкодією регуляторів в умовах невизначеності власних параметрів ПА. Крім того, в роботі [2] розглянуто лише керування швидкістю, а задача оптимального керування переміщенням ПА залишилась невирішеною.

МЕТА СТАТТІ – розробка принципів функціонування оптимальної за швидкодією системи автоматичного керування швидкістю руху і просторовим переміщенням самохідного підводного апарата в умовах невизначеності його власних параметрів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розглянемо спочатку керування швидкістю руху одиночного ПА. Згідно з роботою [2] оптимальне за швидкодією керування при переході з однієї швидкості на іншу забезпечується подачею на об'єкт керуючого сигналу U , який складається з трьох інтервалів: максимального додатного значення u_{\max} (протягом інтервалу часу від 0 до t_1), максимального від'ємного значення $-u_{\max}$ (від t_1 до t_2) і нового усталеного значення $u_{\text{уст}}$, яке відповідає новому значенню швидкості в усталеному режимі. Таким чином, у процесі керування необхідно визначати три величини: t_1 , t_2 і $u_{\text{уст}}$.

Визначення $u_{уст}$ є простою операцією і не викликає труднощів. Для цього необхідно провести серію експериментів, в яких на ПА подавати деяке значення керуючого сигналу, після чого він розганяється до деякої усталеної швидкості. Наприклад, у табл. 1 наведені результати, отримані за допомогою математичного моделювання руху ПА проекту «Інспектор» (розробка Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова) у середовищі програмного пакета MATLAB.

Таблиця 1

$V_{уст}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$u_{уст}$	0	0,15	0,5	1,1	2,0	3,0	4,1	5,6	7,0	8,8	10,0

Шляхом інтерполяції другого ступеня за даною таблицею можна отримати $u_{уст}$ для будь-якого значення швидкості.

Визначимо тепер моменти перемикання t_1 і t_2 . Як показало моделювання на спеціалізованому моделюючому комплексі [4], перехід з деякої початкової швидкості V_0 на будь-яку іншу V_1 залежить лише від величини t_1 , оскільки друге перемикання (момент t_2) необхідно робити в момент часу, коли закінчується перехідний процес, тобто прискорення дорівнює нулю [2], і розраховувати його немає потреби.

Для визначення t_1 спочатку побудуємо таблицю даних для апроксимації. За запропонованою методикою шляхом комп'ютерного моделювання розганяємо ПА до деякого значення початкової усталеної швидкості V_0 . Потім протягом деякого періоду часу t_1 подаємо керуючий сигнал u_{max} , далі подаємо $-u_{max}$, поки не закінчиться перехідний процес, і заміряємо кінцеву швидкість V_1 . Такий експеримент повторюється для різних комбінацій значень V_0 і t_1 . Таким чином, отримуємо набір векторів (V_0, t_1, V_1) , який характеризує залежність кінцевої швидкості від початкової швидкості і часу перемикання. Цю залежність можна апроксимувати у зворотному вигляді й отримати необхідну функцію $t_1 = f(V_0, V_1)$.

Комп'ютерний експеримент показав, що точність керування суттєво залежить від точності визначення моменту перемикання керуючого впливу. В даному випадку потрібно апроксимувати нелінійну функцію від двох змінних – початкової V_0 та кінцевої V_1 швидкостей. Крім того, третьою вхідною змінною має бути величина прискорення в початковий момент часу (якщо зміна швидкості відбувається не з усталеного режиму) або сила зовнішнього збурення. Також установлено суттєву нелінійність об'єкта, особливо на ділянці, близькій до нуля. Таким чином, у даній задачі алгоритм поліноміальної апроксимації значно ускладнюється і може не забезпечити задовільну точність, особливо при невеликій кількості точок для апроксимації. Тому доцільним є використання як апроксиматора засобів штучного інтелекту – багатошарової нейронної мережі із зворотним поширенням похибки.

На рис. 1 показано отримані за допомогою моделі точки та апроксимаційну поверхню, яку отримуємо за допомогою нейронної мережі після її навчання. Для цього була використана нейронна мережа, що складається з двох шарів. Для досягнення необхідної точності знадобилося в прихованому шарі 10 нейронів з функцією активації у вигляді тангенціальної сигмоїди.

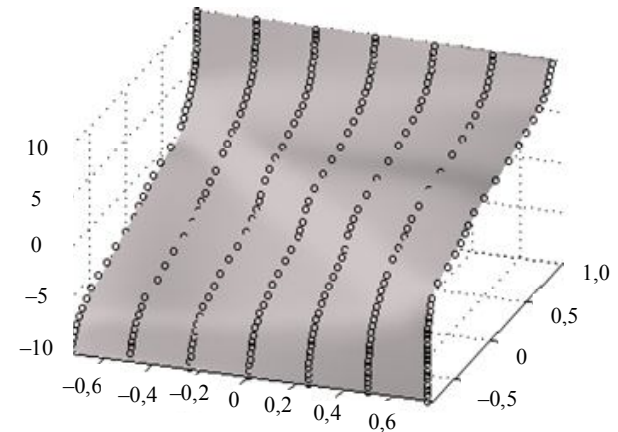


Рис. 1. Залежність тривалості інтервалу розгону від початкового та кінцевого значень швидкості

Система керування на базі нейронної мережі функціонує наступним чином. До мережі надходять дані про поточну швидкість ПА (за допомогою сенсорів зворотного зв'язку) та кінцеву – швидкість, яку необхідно досягти. На виході мережі маємо час перемикання сигналу (в секундах) від початку перехідного процесу. Таким чином, регулятор виконує перемикання керуючого сигналу з $+u_{max}$ на $-u_{max}$ в необхідний момент часу. Далі, коли прискорення дорівнює нулю, подається керуючий вплив $u_{уст}$, при цьому ПА переходить у режим усталеного руху на новій швидкості. Результати моделювання роботи системи керування для ПА проекту «Інспектор» показані на рис. 2.

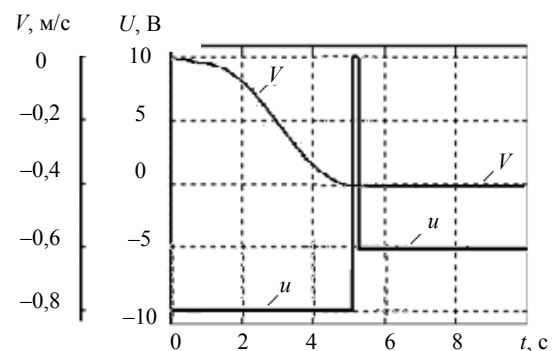


Рис. 2. Перехідний процес в оптимальній системі керування

Зменшення швидкості буде відбуватись за аналогічним алгоритмом.

Моделювання показало, що точність отриманої системи майже не відрізняється від точності оптимальної системи керування на базі математичної

моделі [7]. Однак у даному випадку можна прогнозувати, що вона залишиться такою ж і на реальному об'єкті, оскільки залежить лише від точності датчиків зворотного зв'язку.

Розглянемо тепер синтез оптимальної за швидкодією системи керування переміщенням ПА. Задача полягає в якнайшвидшому прямолінійному переміщенні з одної точки (з будь-якої початкової швидкості) в іншу (в кінцевій точці ПА повинен зупинитись – швидкість дорівнює нулю).

У даній постановці об'єкт керування буде третього порядку, тому моментів перемикання буде три. При цьому третє перемикання (вимикання керуючого впливу) відбувається в момент, коли прискорення і швидкість будуть дорівнювати нулю. Отже, момент вимикання не обчислюється, він визначається за допомогою сенсорів зворотного зв'язку.

Другий момент перемикання визначає тривалість часу, протягом якого на об'єкт буде подаватися максимальне від'ємне значення керуючого впливу, для того щоб максимально швидко привести швидкість апарата до нуля. Очевидно, що цей момент буде залежати лише від того, якої швидкості встигне набути апарат до початку гальмування. Його можна визначити за допомогою серії експериментів (або за допомогою математичного моделювання руху ПА в системі MATLAB).

Комп'ютерний експеримент проводимо наступним чином. Спочатку об'єкт протягом деякого часу розганяємо максимальним додатним керуючим сигналом, потім відбувається перемикання на максимальний від'ємний. У цей момент фіксуємо швидкість і об'єкт гальмується до деякої швидкості, наближеної до нуля. Знову виконуємо перемикання на максимальне додатне значення на час, поки прискорення не стане рівним нулю. Якщо кінцева швидкість об'єкта залишається більшою за нуль, збільшуємо час гальмування, якщо меншою, то зменшуємо його. Таким чином підбираємо саме той момент перемикання, при якому кінцева швидкість буде максимально близькою до нуля. У результаті фіксуємо швидкість, з якої починалось гальмування, та інтервал часу, протягом якого подавалось від'ємне значення керуючого впливу.

У наступному експерименті змінюємо час, протягом якого апарат розганяється, відповідно змінюється і швидкість, при якій починається гальмування, та визначаємо новий момент перемикання. Таким чином, отримуємо таблицю даних для апроксимації.

У роботі було проведено серію комп'ютерних експериментів та отримано вибірку даних, на основі якої за допомогою поліноміальної апроксимації (другого порядку) встановлюється залежність моменту перемикання від початкової швидкості руху ПА ($t_2 = f(V)$).

Наступним кроком визначимо перший момент перемикання. Очевидно, що він буде залежати від

необхідного переміщення та початкової швидкості об'єкта. Повне переміщення об'єкта буде складатися з двох відрізків: шляху, що пройде апарат під час розгону, та шляху гальмування.

Якщо об'єкту надати деякої початкової усталеної швидкості, потім протягом фіксованого часу розганяти його з максимальним керуючим впливом, а після цього загальмувати, то можна визначити довжину шляху, що пройде ПА до повної зупинки. Отримана величина повністю залежить від початкової усталеної швидкості об'єкта та часу, протягом якого відбувався розгін апарата.

Для визначення відповідної залежності необхідно провести серію експериментів, в яких поступово змінювати початкову швидкість і час розгону апарата та фіксувати відповідне переміщення. Одночасно з цим можна проводити експеримент по визначенню тривалості часу гальмування, описаний вище. Як показало моделювання, після розгону максимальним керуючим сигналом від різних початкових значень усталеної швидкості буде різне кінцеве значення прискорення при тій самій кінцевій швидкості. Тому час гальмування також буде залежати від початкової усталеної швидкості, що необхідно враховувати при подальшій апроксимації.

Для досягнення необхідної точності апроксимації функції двох змінних, як і в системі керування швидкістю, в ролі апроксиматора візьмемо двошарову нейронну мережу із зворотним поширенням похибки. Для даної задачі вистачило у прихованому шарі 4 нейрони з функцією активації у вигляді логарифмічної сигмоїди.

На базі описаної вище нейронної мережі було розроблено оптимальну за швидкодією систему керування переміщенням ПА. Вона складається з регулятора керуючого впливу, поліноміального апроксиматора, нейронної мережі та сенсорів зворотних зв'язків, які надають системі інформацію про поточний стан об'єкта. До нейронної мережі надходять дані про початкову швидкість та величину необхідного переміщення (V_p, X). На виході маємо час перемикання сигналу t_1 (в секундах, з моменту початку переміщення), який разом з іншими даними надходить на вхід регулятора. На першому етапі регулятор устанавлює максимальне значення керуючого впливу (в даному випадку $U = +10$ В). У момент часу t_1 регулятор виконує перемикання сигналу на максимальне від'ємне значення ($U = -10$ В). У цей час буде зафіксована поточна швидкість об'єкта та за допомогою поліноміальної апроксимації обчислене значення другого моменту перемикання t_2 . Коли настане момент часу t_2 , регулятор знову виконає перемикання, на об'єкт буде подано $+10$ В. Останній етап керування триватиме, доки сигнал про прискорення системи dv/dt не досягне нуля. Алгоритм роботи системи керування показано на рис. 3.

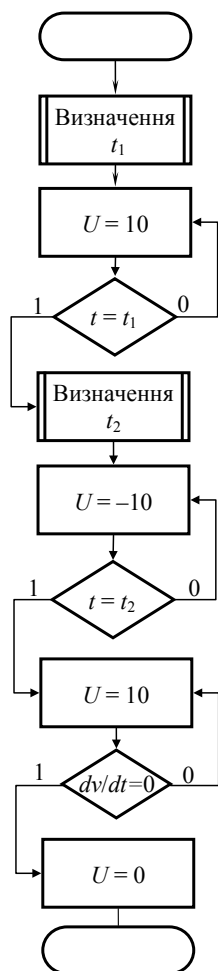


Рис. 3. Алгоритм роботи оптимальної за швидкістю системи керування переміщенням ПА: U – керуючий вплив; dv/dt – прискорення ПА; t_1, t_2 – моменти перемикання сигналу; t – час від початку переміщення

У результаті комп'ютерного моделювання в системі Simulink оптимальної за швидкістю системи

керування переміщенням ПА встановлено, що при переміщенні ПА на різні дистанції похибка знаходилась у межах 0,03...0,05 м. Зрозуміло, що на реальному об'єкті такої точності можливо буде досягнути лише за наявності ідеальних сенсорів. Але моделювання дало змогу зробити висновок, що точність апроксимації ϵ на порядок вищою за точність сенсорів, тому на реальному об'єкті точність системи керування буде обумовлюватись лише точністю сенсорів зворотного зв'язку.

ВИСНОВКИ

1. На основі застосування штучних нейронних мереж розроблено принципи функціонування високоточної, оптимальної за швидкістю системи керування самохідним підводним апаратом, яка забезпечує зміну швидкості його руху з будь-якої початкової до будь-якої кінцевої за мінімальний проміжок часу, та системи автоматичного керування переміщенням підводного апарата.

2. Математичне моделювання підтвердило високу точність розроблених систем керування, що обумовлено відмовою від застосування в них математичної моделі об'єкта, яка може виявитись недостатньо точною та вносити похибку в процес керування. У даному випадку точність керування обумовлена лише точністю датчиків зворотного зв'язку.

3. Описані принципи дають змогу будувати оптимальні системи керування для будь-яких нелінійних систем другого і третього порядку в умовах невизначеності їх параметрів та відсутності точної математичної моделі. Для цього необхідно мати лише сенсори зворотного зв'язку і можливість проведення експериментів з метою отримання необхідної вибірки даних та оцінки порядку об'єкта керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Блінцов, С. В.** Автоматичне керування автономними підводними апаратами в умовах невизначеності [Текст] : монографія / С. В. Блінцов. – Миколаїв : ТОВ «Фірма «Іліон», 2008. – 204 с.
- [2] **Блінцов, С. В.** Автоматизація підводних пошуково-обстежувальних робіт на основі застосування автономного підводного апарата-робота [Електронний ресурс] / С. В. Блінцов, Р. В. Вакар // Вісник НУК. – Миколаїв : НУК, 2010. – № 4. – Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [3] **Блінцов, С. В.** Задачі створення спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження систем керування автономними підводними апаратами [Текст] / С. В. Блінцов, Доан Фук Тхи // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 3–4. – С. 53–57.
- [4] **Блінцов, С. В.** Застосування математичної моделі руху підводного апарата для побудови оптимальної за швидкістю системи керування з компенсацією зовнішніх збурень [Текст] / С. В. Блінцов, Г. С. Грудініна // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2008. – № 3 (420). – С. 77–83.
- [5] **Зайцев, Г. Ф.** Теория автоматического управления и регулирования [Текст] / Г. Ф. Зайцев. – К. : Высшая школа, 1989. – 431 с.
- [6] **Лукомский, Ю. А.** Навигация и управление движением судов [Текст] : учебник / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. – СПб. : Элмор, 2002. – 360 с.

- [7] **Филаретов, В. Ф.** Устройства и системы управления подводных роботов [Текст] / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец. – М. : Наука, 2005. – 270 с.
- [8] Control Architectures for Autonomous Underwater Vehicles [Text] / P. Kimon, Valavanis, Denis Gracanin, Maja Matijasevic, Ramesh Kolluru, Georgios A. Demetriou / IEEE Control Systems, 1997. – P. 48–64.

© С. В. Блінцов, Доан Фук Тхи

Надійшла до редколегії 17.06.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов