

УДК 681.52: 629
Б 69

РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНИХ ЗА ШВИДКОДІЄЮ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА БАЗІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

С. В. Блінцов, канд. техн. наук;
Г. С. Грудініна, студентка

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. На базі штучних нейронних мереж розроблено оптимальні за швидкістю системи керування швидкістю руху та переміщенням для істотно нелінійного об'єкта — підводного апарата. Запропоновано методику побудови вказаних систем керування в умовах невизначеності 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 оптимальные по быстродействию системы управления скоростью движения и перемещением для существенно нелинейного объекта — подводного аппарата. Предложена методика построения указанных систем управления в условиях неопределенности параметров и математической модели объекта.

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

Abstract. The control systems optimal on speed for substantially nonlinear object — remotely operated vehicle are developed on the basis of artificial neural networks for speed and movement control. The principles of design of such control systems in conditions of uncertainty of object parameters and mathematical model are offered.

Keywords: remotely operated vehicle, nonlinear dynamical object, optimal control system, artificial neural network.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Задача побудови оптимальних за швидкістю систем керування залишається актуальною для нелінійних об'єктів, оскільки її розв'язок у загальному випадку існує лише для лінійних систем [2]. Зокрема, рух підводного апарата (ПА) у товщі води описується системою нелінійних диференціальних рівнянь [3–5]. Тому побудувати для нього оптимальний регулятор за методикою, описаною в роботі [2], неможливо, оскільки

істотні нелінійності не дозволяють навіть отримати відповідну передавальну функцію об'єкта керування. Проте від наявності таких оптимальних систем керування нерідко може залежати живучість ПА [3].

Можливий варіант розв'язку задачі для оптимального керування швидкістю руху ПА запропонований авторами в роботі [1]. Проте такий підхід базується на застосуванні математичної моделі руху ПА, яка може бути неточною, а в деяких випадках взагалі

неможливо отримати необхідні параметри для її побудови. Тому актуальною залишається задача синтезу оптимальних за швидкістю регуляторів в умовах невизначеності параметрів ПА. Крім того, в роботі [1] розглянуто лише керування швидкістю, а задача оптимального керування переміщенням ПА залишилась нерозв'язаною.

МЕТОЮ РОБОТИ є синтез оптимальних за швидкістю систем керування швидкістю руху і переміщенням самохідного підводного апарата в умовах невизначеності його параметрів.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розглянемо спочатку керування швидкістю руху ПА. Як показано в статті [1], оптимальне за швидкістю керування при переході з однієї швидкості на іншу забез-

$V_{уст}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$u_{уст}$	0	0,58	1,26	2,03	2,90	3,86	4,91	6,07	7,32	8,66	10,0

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

Розглянемо визначення моментів перемикання t_1 і t_2 . Як показало моделювання, 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 [1] і розраховувати його немає потреби.

Для визначення t_1 автори пропонують наступну методику. Спочатку також необхідно отримати таблицю даних для апроксимації. Підводний апарат розганяється до деякого значення початкової швидкості V_0 і переходить в усталений режим. Потім протягом деякого періоду часу t_1 подається u_{max} , далі подається $-u_{max}$, доки не закінчиться перехідний процес (коли прискорення дорівнюватиме нулю) і заміряється кінцева швидкість V_1 . Даний 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

печується подачею на об'єкт керуючого сигналу, який складається з трьох інтервалів: максимального додатного значення u_{max} (максимальне значення напруги живлення гребного електродвигуна) протягом інтервалу часу від 0 до t_1 , максимального від'ємного значення $-u_{max}$ від моменту t_1 до t_2 , і нового усталеного значення напруги живлення $u_{уст}$, яке відповідає новому значенню швидкості в усталеному режимі. Таким чином, у процесі керування необхідно визначати три величини: t_1, t_2 і $u_{уст}$.

Для визначення $u_{уст}$ необхідно провести серію експериментів, в яких на ПА подається деяке значення керуючого сигналу і він розганяється до деякої усталеної швидкості. Наприклад, у таблиці, поданій нижче, наведені результати, отримані за допомогою математичного моделювання руху ПА «Агент-1» у системі MATLAB.

перемикання. Цю залежність можна апроксимувати у зворотному вигляді й отримати необхідну функцію $t_1 = f(V_0, V_1)$.

Як показало моделювання, точність керування суттєво залежить від точності визначення моменту перемикання керуючого впливу. В даному випадку потрібно апроксимувати нелінійну функцію від двох змінних — початкової та кінцевої швидкостей. Крім того, третьою вхідною змінною може бути величина прискорення в початковий момент часу (якщо зміна швидкості відбувається не з усталеного режиму) або сила зовнішнього збурення. Також відмітимо значну нелінійність об'єкта, особливо на ділянці, близькій до нуля. Таким чином, у даній задачі алгоритм поліноміальної апроксимації суттєво ускладнюється і може не дати задовільну точність, особливо при невеликій кількості точок для апроксимації. Тому доцільним є використання багаточислової нейронної мережі зі зворотним поширенням похибки як апроксиматора засобів штучного інтелекту.

Випадки збільшення та зменшення швидкості розглядалися окремо, оскільки об'єднаний простір виявився досить складним для апроксимації. На рис. 1 показано

експериментальні точки при збільшенні швидкості, які отримані за допомогою моделі й утворюють таблицю для апроксимації, а також апроксимаційну поверхню, яку одержимо за допомогою нейронної мережі після її навчання. Як видно, точність апроксимації є задовільною. Для цього була використана нейромережа, що складається з двох шарів. Для досягнення необхідної точності знадобилось у прихованому шарі 10 нейронів з функцією активації у вигляді тангенціальної сигмоїди. Подібний вигляд має і поверхня, що відповідає зменшенню швидкості, тому вона апроксимується нейромережею з аналогічними параметрами.

Система керування на базі нейронної мережі буде працювати наступним чином. До відповідної мережі (яка відповідає розгону чи гальмуванню) 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, регулятору залишається лише виконати перемикання керуючого сигналу з u_{\max} на $-u_{\max}$ у необхідний момент часу. Потім відслідковується момент, коли прискорення дорівнює нулю (тобто закінчення перехідного процесу), і подається сигнал $u_{\text{уст}}$, при цьому ПА переходить у режим усталеного руху на новій швидкості. Результати моделювання роботи системи керування при розгоні до 0,7 м/с та подальшому гальмуванні до 0,3 м/с показані на рис. 2.

Моделювання показало, що точність отриманої системи майже не відрізняється від точності оптимальної системи керування на базі математичної моделі [1]. 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).

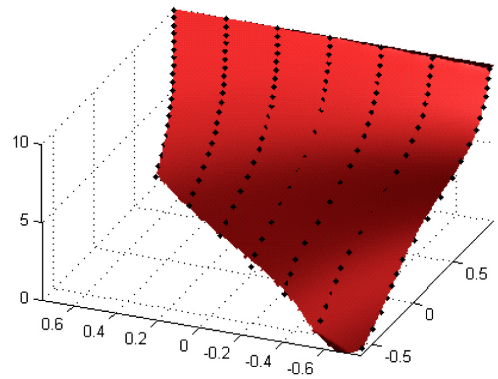


Рис. 1. Залежність тривалості інтервалу розгону від початкового та кінцевого значень швидкості

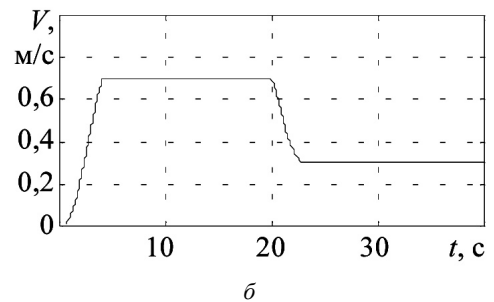
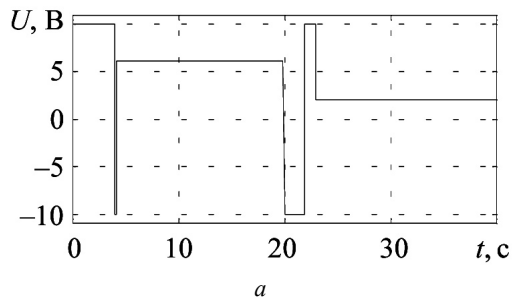


Рис. 2. Перехідний процес в оптимальній системі керування: а — керуючий сигнал; б — швидкість руху

У даній постановці об'єкт керування буде вже 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).

Експеримент проводиться наступним чином. Спочатку об'єкт протягом деякого часу розганяється максимальним додатним керуючим сигналом, потім відбувається перемикавання на максимальний від'ємний. У цей момент фіксується швидкість і об'єкт гальмується до деякої швидкості, наближеної до нуля. Знову робиться перемикавання на максимальне додатне значення (воно, як зазначено вище, триває, доки прискорення не почне дорівнювати нулю). Якщо кінцева швидкість об'єкта залишається більшою за нуль, то необхідно збільшити час гальмування, якщо меншою — зменшити його. Таким чином підбирається саме той момент перемикавання, при якому кінцева швидкість буде максимально близькою до нуля. В результаті фіксуємо швидкість, з якої починалось гальмування, та інтервал часу, протягом якого подавалось від'ємне значення керуючого впливу.

В наступному експерименті змінюється час, протягом якого апарат розганяється, відповідно змінюється і швидкість, при якій починається гальмування, та визначається новий момент перемикавання. Таким чином одержано таблицю даних для апроксимації.

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

Наступний крок — визначення першого моменту перемикавання. 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 його розганяти 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 і часу, протягом якого відбувався розгін апарату.

Для визначення відповідної залежності необхідно провести серію експериментів, в яких поступово змінювати початкову швидкість, час розгону апарата і фіксувати відповідне переміщення. Одночасно з цим можна проводити експеримент з визначення 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, за апроксиматор візьмемо двошарову нейронну мережу зі зворотним поширенням похибки. Для даної задачі вистачило у прихованому шарі чотирьох нейронів 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, нейромережі 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 перемикавання сигналу t_1 (в секундах, з моменту початку переміщення), який разом з іншими даними надходить на вхід регулятора. На першому етапі регулятор встановлює максимальне значення керуючого впливу (в даному випадку $U = +10$ В). У момент часу t_1 регулятор виконує перемикавання сигналу на максимальне від'ємне значення ($U =$

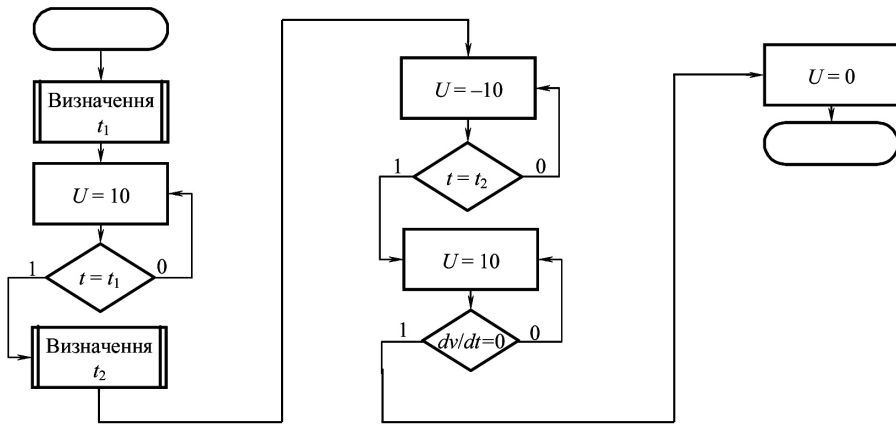


Рис. 3. Алгоритм роботи оптимальної за швидкістю системи керування переміщенням ПА: U — керуючий вплив; dv/dt — прискорення ПА; t_1, t_2 — моменти перемикання сигналу; t — час від початку переміщення

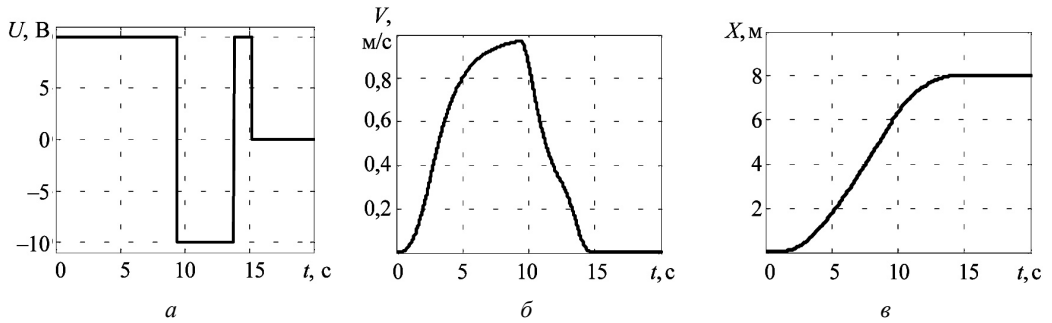


Рис. 4. Перехідний процес в оптимальній системі керування переміщенням ПА: a — керуючий сигнал; b — швидкість руху; c — переміщення ПА

–10 В). У цей час буде зафіксована поточна швидкість об’єкта і 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 зображено на рис. 3.

На рис. 4 показано результати моделювання в системі Simulink оптимальної за швидкістю системи керування при переміщенні ПА вперед на 8 м.

Як видно, точність керування є цілком задовільною. Примодельованні переміщення на різні дистанції похибка знаходилась у межах 0,03...0,05 м. Зрозуміло, що на реальному об’єкті такої точності можна буде

досягти лише при наявності ідеальних сенсорів. Але моделювання дає змогу зробити висновок, що точність апроксимації є 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 базі штучної нейронної мережі побудовано високоточну оптимальну за швидкістю систему керування, яка дозволяє змінювати швидкість руху підводного апарата з будь-якої початкової на будь-яку кінцеву за мінімальний проміжок часу.
2. Розроблено алгоритм роботи та побудовано оптимальну за швидкістю систему керування переміщенням підводного апарата із використанням штучної нейронної мережі.

Система керування забезпечує максимально швидке прямолінійне переміщення апарата на будь-яку відстань, при цьому апарат може мати будь-яку початкову швидкість. 3. Математичне моделювання підтвердило високу точність розроблених систем керування, що обумовлено відмовою від застосування в них математичної моделі об'єкта, яка може виявитись недостатньо точною і внести похибку в процес керування. В даному випадку точність керування обумовлена

лише точністю сенсорів зворотного зв'язку. 4. Описані методики дозволяють 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 та можливість проведення експериментів з метою отримання необхідної вибірки даних та оцінки порядку об'єкта керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Блінцов С.В., Грудініна Г.С.* Застосування математичної моделі руху підводного апарата для побудови оптимальної за швидкодією системи керування з компенсацією зовнішніх збурень // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2008. — № 3 (420). — С. 77–83.
- [2] *Зайцев Г.Ф.* Теория автоматического управления и регулирования. — К.: Высш. шк., 1989. — 431 с.
- [3] *Понырко С.А., Попов О.С., Ястребов В.С.* Адаптивные системы для исследования океана. — С.Пб.: Судостроение, 1993. — 224 с.
- [4] *Ставинський А.А., Блінцов С.В.* Удосконалення математичної моделі самохідного підводного апарата для дослідження просторового руху // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2004. — № 3 (396). — С. 161–166.
- [5] *Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А.* Устройства и системы управления подводных роботов. — М.: Наука, 2005. — 272 с.