



УКРАЇНА

(19) **UA**

(11) **110082**

(13) **C2**

(51) МПК

B63H 21/21 (2006.01)

B63H 25/42 (2006.01)

G06N 3/02 (2006.01)

G06N 3/08 (2006.01)

G06F 15/18 (2006.01)

G05B 13/04 (2006.01)

B63G 8/08 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: **а 2014 12646**

(22) Дата подання заявки: **24.11.2014**

(24) Дата, з якої є чинними
права на винахід: **10.11.2015**

(41) Публікація відомостей
про заявку: **25.03.2015, Бюл.№ 6**

(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: **10.11.2015, Бюл.№ 21**

(72) Винахідник(и):

Блінцов Сергій Володимирович (UA)

(73) Власник(и):

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА
МАКАРОВА,**

пр. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв,
54025 (UA)

(56) Перелік документів, взятих до уваги
експертизою:

RU 2519315 C2, 10.06.2014

US 2009076670 A1, 19.03.2009

US 8468108 B1, 18.06.2013

US 2007082564 A1, 12.04.2007

UA 64215 U, 25.10.2011

EP 2090507 A2, 19.08.2009

UA a201301893, 18.02.2013

UA 101201 C2, 11.03.2013

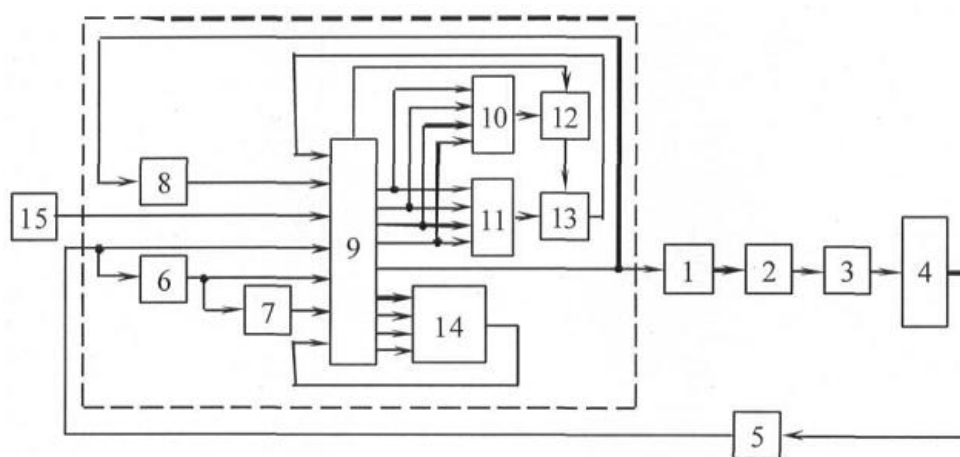
WO 9116235 A2, 31.10.1991

(54) КОМБІНОВАНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ РУХУ ПІДВОДНОГО АПАРАТА НА БАЗІ РЕГУЛЯТОРА З ПЕРЕДБАЧЕННЯМ ТА NARMA-L2-СОВІТНИКОМ

(57) Реферат:

Винахід належить до суднобудування. Комбінована система автоматичного керування швидкістю руху підводного апарата на базі регулятора з передбаченням та NARMA-L2-совітником містить задавач вхідного сигналу, датчик швидкості, послідовно з'єднані силовий перетворювач, електродвигун, гребний гвинт, а також підводний апарат як об'єкт керування. В схему введено чотири обчислювача, які оснащені певними програмами на базі штучних нейронних мереж. Технічним результатом є підвищення точності та швидкодії при одночасному уникненні використання датчика частоти обертання гребного гвинта.

UA 110082 C2



Фиг.

Винахід належить до галузі суднобудування і може бути застосований на підводних апаратах (ПА), які використовують як рушій для переміщення по деякій осі координат (горизонтальний, вертикальний або лаговий рух) гребний гвинт з електричним приводом, та до яких висуваються вимоги високої точності керування швидкістю руху в умовах невизначеності параметрів ПА.

Відомо про адаптивну систему із змінною структурою для керування швидкістю руху підводного робота (Юхимец Д.А., Филаретов В.Ф., патент RU 2215318, опубл. 27.10.2003). Такий пристрій містить послідовно з'єднані перший блок множення, перший суматор, перший релейний елемент, фільтр, блок виділення модуля, вимірник неузгодженості, ключ, другий вхід якого через другий релейний елемент приєднаний до виходу першого блока виділення модуля, інтегратор, другий суматор, другий вхід якого з'єднаний з виходом джерела еталонного сигналу й другим входом першого вимірника неузгодженості, а його вихід з'єднаний з першим входом першого блока множення, послідовно з'єднані третій суматор, перший вхід якого з'єднаний із виходом системи, другий блок виділення модуля, другий блок множення, другий вхід якого з'єднаний з виходом першого релейного елемента, і четвертий суматор, а також датчик прискорення руху підводного робота, установлений на корпусі підводного робота, що підключений до другого входу першого суматора, причому другий вхід першого блока множення з'єднаний із входом другого блока виділення модуля, послідовно з'єднані третій блок виділення модуля, третій блок множення, п'ятий суматор, другий вхід якого підключений до виходу датчика швидкості руху підводного робота, установленого на корпусі підводного робота, входу третього блока виділення модуля й другому входу третього суматора, шостий суматор, другий вхід якого з'єднаний з виходом четвертого блока множення, п'ятий блок множення, сьомий суматор, підсилювач, двигун і гвинт, жорстко пов'язаний з валом двигуна, а також послідовно з'єднані датчик швидкості обертання вала двигуна, установлений на цьому валу, четвертий блок виділення модуля, восьмий суматор, шостий блок множення, дев'ятий суматор, перший нелінійний елемент, другий нелінійний елемент, вхід якого підключений до другого входу четвертого блоку множення, перший блок ділення, другий вхід якого з'єднаний з виходом десятого суматора, перший вхід якого підключений до виходу п'ятого суматора й через квадратор - до другого входу дев'ятого суматора, сьомий блок множення, другий вхід якого з'єднаний з виходом четвертого блока виділення модуля, другим входом п'ятого блока множення й першим входом восьмого блока множення, вихід якого підключений до другого входу сьомого суматора, одинадцятий суматор, другий вхід якого з'єднаний з виходом шостого суматора, а третій вхід - із третім входом шостого суматора, другим входом десятого суматора, другим входом восьмого блока множення й виходом восьмого суматора, дев'ятий блок множення, другий вхід якого підключений до другого входу четвертого блока множення, другого входу третього блока множення й через третій релейний елемент - до виходу датчика швидкості обертання вала двигуна, третього входу сьомого суматора, четвертого входу одинадцятого суматора, другого входу восьмого суматора, другого входу шостого блока множення й третього входу п'ятого суматора, третій нелінійний елемент, другий блок розподілу, вихід якого з'єднаний із четвертим входом сьомого суматора, а другий вхід - з виходом дванадцятого суматора, перший вхід якого підключений до виходу четвертого суматора, а другий вхід - до виходу п'ятого блока множення й другого входу четвертого суматора. У вказаній адаптивній системі визначення керуючого сигналу проводиться на основі математичної моделі об'єкта з урахуванням нелінійностей. Основною проблемою є висока складність синтезу системи керування і визначення її коефіцієнтів, а також параметрів моделі, що унеможливорює синтез такої системи керування в умовах невизначеності цих параметрів.

Найбільш близьким аналогом є система автоматичного керування швидкістю руху підводного апарата по одній осі координат (Блінцов С.В., патент UA 101201 C2, опубл. 11.03.2001). Такий пристрій містить задавач вхідного сигналу, датчики швидкості й частоти обертання гребного гвинта, апроксиматор залежності приросту швидкості і прискорення руху ПА від його поточного стану та значень керуючого сигналу, зв'язаний з датчиками швидкості й частоти обертання гребного гвинта і оснащений програмою на базі штучних нейронних мереж, яка апроксимує вказану залежність на основі попередньо отриманих даних по швидкості і прискоренню підводного апарата, частоті обертання гребного гвинта та значеннях керуючої напруги, обчислювач керуючого сигналу, входи якого зв'язані з апроксиматором, датчиком швидкості і задавачем вхідного сигналу, а вихід - з силовим перетворювачем, послідовно з'єднані силовий перетворювач, електродвигун, гребний гвинт, а також ПА як об'єкт керування.

Така система керування може бути синтезована в умовах невизначеності параметрів математичної моделі ПА, але вона потребує складних попередніх експериментів по отриманню необхідних даних для настроювання нейронних мереж.

Ставиться задача удосконалення системи автоматичного керування швидкістю руху підводного апарата шляхом додаткового введення елементів обчислення керуючого впливу на електродвигун гребного гвинта, які не потребують спеціальних даних для налаштування, що приводить до значного спрощення попередніх експериментальних процедур по отриманню

таких даних, прискорення та спрощення синтезу системи керування в цілому.

Поставлена задача вирішується тим, що в системі автоматичного керування швидкістю руху, яка містить задавач вхідного сигналу, датчик швидкості руху ПА, послідовно з'єднані силовий перетворювач, електродвигун, гребний гвинт, а також ПА як об'єкт керування, відповідно до винаходу додатково введено перший блок затримки вихідного сигналу, зв'язаний з датчиком швидкості, другий блок затримки вихідного сигналу, зв'язаний з першим блоком затримки, блок затримки керуючого сигналу, зв'язаний входом і виходом з першим обчислювачем, перший обчислювач, зв'язаний входами з датчиком швидкості, першим і другим блоками затримки вихідного сигналу, блоком затримки керуючого сигналу, блоком ділення, четвертим обчислювачем та задавачем вхідного сигналу, виходами - з силовим перетворювачем, другим, третім і четвертим обчислювачами і суматором та оснащений програмою на базі алгоритму оптимізації (пошуку мінімуму середньоквадратичної похибки), другий обчислювач, зв'язаний входами з першим обчислювачем і постачений програмою на базі штучних нейронних мереж, що відтворює функцію $f()$ NARMA-L2-регулятора, третій обчислювач, зв'язаний входами з першим обчислювачем і постачений програмою на базі штучних нейронних мереж, що відтворює функцію $g()$ NARMA-L2-регулятора, суматор, зв'язаний входами з першим і другим обчислювачами, блок ділення, зв'язаний входами з суматором і третім обчислювачем, а виходом - з першим обчислювачем, четвертий обчислювач, зв'язаний входами і виходом з першим обчислювачем і постачений програмою на базі штучних нейронних мереж, що відтворює модель динаміки об'єкта.

Суть пропозиції полягає в наступному. Система керування постачається моделлю об'єкта, виконаною на базі апарата штучних нейронних мереж (ШНМ-модель), та блоком оптимізації. Задачею останнього є формування послідовності керуючих сигналів певної довжини, яка забезпечить протягом наступних декількох кроків дискретизації рух вихідної координати об'єкта за траєкторією, визначеною задавачем вхідного сигналу. Для цього блок оптимізації формує набір (послідовність) сигналів керування (яким чином - описано нижче), подає їх на ШНМ-модель і отримує прогноз зміни вихідної координати. Потім набір сигналів керування послідовно коректується і знову подається на ШНМ-модель. І в такий спосіб вирішується задача мінімізації критерію якості керування:

$$J = \sum_{i=1}^{N_y} (y_r(t+i) - y_m(t+i))^2 + p \sum_{i=1}^{N_u} (u(t+i-1) - u(t+i-2))^2,$$

де N_y , N_u - розмір горизонту передбачення, тобто довжина послідовності прогнозованих кроків, на яких відстежується похибка керування та приріст керуючого сигналу, відповідно; y_r - бажані значення вихідної координати, які формуються задавачем вхідного сигналу; y_m - спрогнозовані ШНМ-моделлю значення; u - значення керуючого сигналу; p - коефіцієнт, який відповідає за внесок в критерій якості приросту керуючого сигналу. Другий доданок дає змогу запобігати різким змін керуючого сигналу.

Таким чином, блок оптимізації за допомогою ШНМ-моделі визначає оптимальну послідовність керуючих сигналів, яка забезпечить максимальну близькість прогнозованої траєкторії до бажаної (заданої).

Щодо формування початкового набору керуючих сигналів. В класичному варіанті регулятора з передбаченням він формується випадковим чином. Але після цього процедура мінімізації критерію похибки, яка є дуже ресурсозатратною, займає багато часу. Це може стати перешкодою для практичної реалізації системи, оскільки вона повинна працювати в реальному часі. В пропонованій системі початковий набір формується не випадково, а за допомогою NARMA-L2-совітника, принцип роботи якого описаний нижче. Тобто приблизні значення керуючих сигналів розраховуються дуже швидко, і алгоритму оптимізації залишається лише відкорегувати їх згідно з критерієм якості, але зона пошуку оптимуму вже локалізована. Це забезпечує істотне скорочення часу на розрахунки, приблизно до 10 разів. При цьому точність системи керування не погіршується і залишається вищою, ніж у окремого NARMA-L2-регулятора.

Совітник будується згідно з концепцією побудови NARMA-L2-регуляторів (Narendra K.S., Mukhopadhyay S. Adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models// IEEE

Transactions on Neural Networks, Vol. 8, 1997, pp. 475-485. [1]). Вважається, що модель об'єкта можна апроксимувати рівнянням:

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)] + g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)] \cdot u(k+1), \quad (1)$$

де $y(k)$ - вихідна координата об'єкта керування в момент часу k ; $u(k)$ - вхідна координата (керуючий сигнал).

Тоді сигнал керування, необхідний для приведення вихідної координати до значення $y(k+d)$ можна розрахувати за формулою

$$u(k+1) = \frac{y(k+d) - f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)]}.$$

Функції $f()$ і $g()$ апроксимуються за допомогою штучних нейронних мереж.

10 Настроювання регулятора полягає лише в навчанні штучних нейронних мереж, алгоритми їх роботи описані в літературі (Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. -М.: "Горячая линия - Телеком", 2002. - с. 10-20, с. 89-134 [2]). При цьому для навчання не потрібно проводити складний експеримент по отриманню навчальної вибірки спеціального виду. Для даного типу регулятора в системі керування ПА достатньо протягом деякого часу (до 100-200 с) подавати на вхід об'єкта керуючий сигнал, який являє собою сходинок випадкової величини (з допустимого діапазону) та випадкової довжини (в діапазоні від 1 до 10 секунд). При цьому запам'ятовуються вхідна та вихідна координати з інтервалом часу 0,01 с. По цих даних на базі персонального комп'ютера за спеціальним алгоритмом навчається штучна нейронна мережа, які апроксимують зняті дані, та утворює ШНМ-модель об'єкта. По тих 20 самих даних навчаються нейромережі, які апроксимують функції $f()$ і $g()$, як складові моделі об'єкта (1). Потім параметри цих мереж прописуються у відповідні апаратні ШНМ у складі регулятора, після чого регулятор готовий до роботи.

Структурна схема пропонованої системи показана на рисунку.

25 Комбінована система автоматичного керування швидкістю руху ПА на базі регулятора з передбаченням та NARMA-L2-совітником містить: послідовно з'єднані силовий перетворювач 1, виходом якого є напруга живлення електродвигуна 2, електродвигун 2, який забезпечує кутову частоту обертання ω рушія 3, рушій 3 по даній осі координат - гребний гвинт, що розвиває упор Т, підводний апарат 4, як об'єкт керування; датчик 5 швидкості руху ПА по даній осі, зв'язаний з корпусом підводного апарата 4; перший блок затримки вихідного сигналу 6, зв'язаний з датчиком швидкості 5; другий блок затримки вихідного сигналу 7, зв'язаний з першим блоком затримки 6; блок затримки керуючого сигналу 8, зв'язаний входом і виходом з першим обчислювачем 9; перший обчислювач 9, зв'язаний входами з датчиком швидкості 5, першим 30 другим 7 блоками затримки вихідного сигналу, блоком затримки керуючого сигналу 8, блоком ділення 13, четвертим обчислювачем 14 та задавачем вхідного сигналу 15, виходами - з силовим перетворювачем 1, другим 10, третім 11 і четвертим 14 обчислювачами і суматором 12 35 та оснащений програмою на базі алгоритму оптимізації (пошуку мінімуму середньоквадратичної похибки); другий обчислювач 10, зв'язаний входами з першим обчислювачем 9 і оснащений програмою на базі штучних нейронних мереж; третій обчислювач 11, зв'язаний входами з першим обчислювачем 9 і оснащений програмою на базі штучних нейронних мереж; суматор 12, зв'язаний входами з першим 9 і другим 10 обчислювачами; блок ділення 13, зв'язаний 40 входами з суматором 12 і третім обчислювачем 11, а виходом - з першим обчислювачем 9; четвертий обчислювач 14, зв'язаний входами і виходом з першим обчислювачем 9 і оснащений програмою на базі штучних нейронних мереж; задавач вхідного сигналу 15, вихід якого зв'язаний з першим обчислювачем 9 і який задає значення швидкості ПА згідно з програмою 45 руху. До складу системи керування входять пристрої 6-14, при цьому блоки 10-13 формують NARMA-L2-совітник. Обчислювачі 9, 10, 11 і 14 можуть бути реалізовані програмно на базі ЕОМ або загально відомих мікроконтролерів (Motorola, Intel, PIC-контролери).

Пропонована система працює наступним чином. З інтервалом часу t_c система керування опитує датчик 5 і задавач вхідного сигналу 15. Ці сигнали, а також сигнали з блоків затримки 6, 50 7 і 8, які виконують затримку сигналу на інтервал часу t_c для врахування динаміки об'єкта, надходять до обчислювача 9. Останній подає вектор значень, який містить поточну швидкість, два її попередні значення і попередній керуючий сигнал, на обчислювачі 10 і 11, бажане значення швидкості - на суматор 12. Суматор віднімає від цього значення вихід блока 10 (функцію $f()$), результат ділиться в блоці 13 на вихід блока 11 (функцію $g()$) і передається в

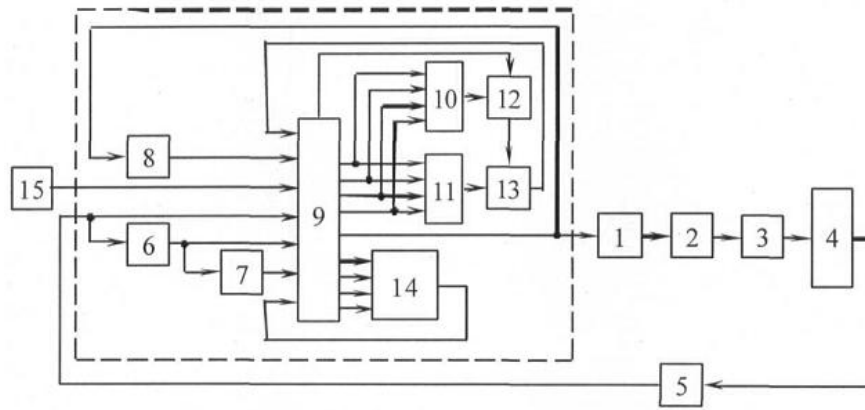
обчислювач 9. Це є розраховане NARMA-L2-совітником значення керуючого впливу для першого інтервалу керування. Воно, разом з поточним і двома попередніми значеннями швидкості, подається з блоку 9 на обчислювач 14, який повертає прогнозоване значення швидкості після першого інтервалу. В блоці 9 формується новий вектор, який містить прогнозовану швидкість, два її попередніх значення (для другого інтервалу - це поточне і одне попереднє значення швидкості) і керуючий сигнал, обчислений в минулому циклі (це є попереднє значення сигналу керування для другого інтервалу). Цей вектор подається на обчислювачі 10 і 11, бажана швидкість для другого інтервалу - на суматор 12, блок 13 обчислює керуючий сигнал для другого інтервалу, який повертається в блок 9 і подається (у складі нового вектора) в блок 14. Аналогічні розрахунки повторюються до тих пір, поки не буде сформований повний набір значень керуючого сигналу для всього горизонту керування, тобто N_y разів. Цей набір є початковим для процесу оптимізації.

Після цього обчислювач 9 багаторазово звертається до обчислювача 14 (ШНМ-моделі об'єкта), послідовно подаючи на нього керування з отриманого набору разом з відповідними для кожного інтервалу поточною та двома попередніми значеннями швидкості, отримує прогноз зміни швидкості, розраховує критерій якості керування, виконує корекцію набору сигналів керування згідно з алгоритмом оптимізації та знов подає відкориговану послідовність на блок 14. Процес повторюється до отримання мінімуму критерію якості керування J . Після закінчення процедури оптимізації перший керуючий сигнал з отриманої послідовності подається на об'єкт. На наступному інтервалі дискретизації знов виконуються описані розрахунки набору сигналів керування NARMA-L2-совітником, оптимізація його на наступні декілька кроків і подача першого з послідовності сигналу керування на об'єкт. В результаті об'єкт отримує оптимальний керуючий сигнал, і зміна швидкості руху ПА максимально відповідає сигналу, що формується задавачем.

Таким чином, вирішується задача побудови системи керування істотно нелінійним об'єктом - підводним апаратом в умовах невизначеності його параметрів на основі лише експериментальних даних. При цьому сам експеримент по отриманню даних є дуже простим та таким, що легко реалізується. Також відпадає необхідність в оснащенні системи датчиком частоти обертання гребного гвинта. Отримана система забезпечує високу точність, формуючи близький до оптимального сигнал керування, при цьому процес оптимізації займає майже в 10 разів менший час у порівнянні з традиційною системою керування з передбаченням.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Комбінована система автоматичного керування швидкістю руху підводного апарата на базі регулятора з передбаченням та NARMA-L2-совітником, яка містить задавач вхідного сигналу, датчик швидкості, послідовно з'єднані силовий перетворювач, електродвигун, гребний гвинт, а також підводний апарат як об'єкт керування, яка **відрізняється** тим, що до неї додатково введено перший блок затримки вихідного сигналу, зв'язаний з датчиком швидкості, другий блок затримки вихідного сигналу, зв'язаний з першим блоком затримки, блок затримки керуючого сигналу, зв'язаний входом і виходом з першим обчислювачем, перший обчислювач, зв'язаний входами з датчиком швидкості, першим і другим блоками затримки вихідного сигналу, блоком затримки керуючого сигналу, блоком ділення, четвертим обчислювачем та задавачем вхідного сигналу, виходами - з силовим перетворювачем, другим, третім і четвертим обчислювачами і суматором та оснащений програмою на базі алгоритму оптимізації - пошуку мінімуму середньоквадратичної похибки, другий обчислювач, зв'язаний входами з першим обчислювачем і оснащений програмою на базі штучних нейронних мереж, що відтворює функцію $f()$ NARMA-L2-регулятора, третій обчислювач, зв'язаний входами з першим обчислювачем і оснащений програмою на базі штучних нейронних мереж, що відтворює функцію $g()$ NARMA-L2-регулятора, суматор, зв'язаний входами з першим і другим обчислювачами, блок ділення, зв'язаний входами з суматором і третім обчислювачем, а виходом - з першим обчислювачем, четвертий обчислювач, зв'язаний входами і виходом з першим обчислювачем і оснащений програмою на базі штучних нейронних мереж, що відтворює модель динаміки об'єкта.



Комп'ютерна верстка Л. Бурлак

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601