

<http://dx.doi.org/10.15589/evn20140106>

УДК 681.51:629.58

Б 69

## NEURAL CONTROL OF THE UNDERWATER VEHICLE MOTION UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY ON THE BASIS OF THE PREDICTIVE CONTROLLER

### НЕЙРОКЕРУВАННЯ РУХОМ ПІДВОДНОГО АПАРАТА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА БАЗІ РЕГУЛЯТОРА З ПЕРЕДБАЧЕННЯМ

Serhii V. Blintsov

[sergiy.blintsov@nuos.edu.ua](mailto:sergiy.blintsov@nuos.edu.ua)

ORCID: 0000-0001-5706-2200

Doan Fuk Tkhy

[Thuyhh2002@yahoo.com](mailto:Thuyhh2002@yahoo.com)

ORCID: 0000-0002-3452-9039

С. В. Блінцов,

канд. техн. наук;

Доан Фук Тхи,

асп.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

**Abstract.** The automatic control system of the speed of the underwater vehicle motion on the basis of the predictive controller under conditions of uncertainty of the object parameters has been synthesized and studied. The algorithm of the controller operation is described, and its structure is shown. A series of experiments was conducted on the mathematical model of the motion dynamics of the underwater vehicle. The training data sample was obtained and the artificial neural network approximating the object model was trained. The study of the impact of the controller parameters on the control accuracy was conducted. The best parameters were selected. The developed system showed high accuracy and performance. At that, it is not required to conduct complex experiments on obtaining data from the object for its synthesis. The disadvantages of the control system are the high complexity in obtaining a predictive model on the basis of the artificial neural networks and the high demands for hardware performance to compute the control signal.

**Keywords:** underwater vehicle; automatic control system; artificial neural network; intelligent control.

**Анотація.** Синтезовано систему автоматичного керування швидкістю руху підводного апарата на основі регулятора з передбаченням в умовах невизначеності параметрів об'єкта. Досліджено її ефективність, указано переваги та недоліки.

**Ключові слова:** підводний апарат; система автоматичного керування; штучна нейронна мережа; інтелектуальне керування.

**Аннотация.** Синтезирована система автоматического управления скоростью движения подводного аппарата на основе регулятора с предсказанием в условиях неопределенности параметров объекта. Исследована ее эффективность, указаны достоинства и недостатки.

**Ключевые слова:** подводный аппарат; система автоматического управления; искусственная нейронная сеть; интеллектуальное управление.

## REFERENCES

- [1] Ageev M.D. *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* [Autonomous underwater robots. Systems and technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 398 p.
- [2] Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, «Goryachaya liniya – Telekom» Publ., 2002. 382 p.
- [3] Kuznetsov B.I., Vasilets T.Ye., Varfolomeev A.A. Neyroupravlenie nelineynym dinamicheskim obektom s ispolzovaniem metoda obobshchennogo upravleniya s predskazaniem [Neural control of the nonlinear dynamic object using the method of generalized predictive control]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical Engineering and Electromechanics*, 2008, no. 4, pp. 34–41.
- [4] Kuznetsov B.I., Vasylets T.E., Varfolomeiev A.A. Pobudova neiromerezhevoi systemy keruvannya neliniinoiu elektromekhanichnoiu systemoju z vykorystanniam neirolontrolera z peredbachenniam [Construction of the

- neural network control system of the nonlinear electromechanical system using the predictive neural controller]. *Elektroinform – Electroinform*, 2008, no. 1, pp. 6–10.
- [5] Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A. *Ustroystva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* [Devices and systems of underwater robots control]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 270 p.
- [6] García M.R., Vilas C., Santos L.O., Alonso A.A. A Robust Multi-Model Predictive Controller for Distributed Parameter Systems. *Journal of Process Control*, 2012, no. 22, issue 1, pp. 60–71.
- [7] Garcia C.E., Prett D.M., Morari M. Model predictive control: theory and practice – a survey. *Automatica*, 1989, vol. 25, pp. 335–348.
- [8] Moore S. W., Bohm H., Jensen V. *Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication*. Marine Advanced Technology Education (MATE) Center Publ., 2010. 770 p.
- [9] Nikolaou M. Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs. *Advances in Chemical Engineering*. Academic Press, 2001, vol. 26, pp. 131–204.
- [10] Hedengren J.D., Asgharzadeh Shishavan R., Powell K.M., Edgar T.F. Nonlinear modelling, estimation and predictive control in APMonitor. *Computers & Chemical Engineering*, 2014, no. 70, issue 5, pp. 133–148.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Підводні апарати (ПА) є складними нелінійними об'єктами, тому побудова систем керування ними є доволі непростою задачею, якій присвячена увага як вітчизняних, так і зарубіжних учених [1, 5, 8].

Одним із сучасних формалізованих підходів до аналізу і синтезу систем керування є теорія керування динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC), або регуляторів з передбаченням. Цей підхід почав розвиватися на початку 60-х років для керування процесами та обладнанням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, в даний час сфера практичного застосування MPC-методів істотно розширилася, охоплюючи різноманітні технологічні процеси в хімічній і будівельній індустрії, легкій та харчовій промисловості, в аерокосмічних дослідженнях, у сучасних системах енергетики тощо [7, 9].

Основу MPC-підходу становить наступна схема керування динамічними об'єктами за принципом зворотного зв'язку:

1. Розглядається математична модель об'єкта, початковими умовами для якої служить його поточний стан. При заданому програмному керуванні виконується інтегрування рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на деякому кінцевому відрізку часу (горизонті прогнозу).

2. Виконується оптимізація програмного керування, метою якого є наближення регульованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних заданих сигналів на горизонті прогнозу. Оптимізація здійснюється з урахуванням усього комплексу обмежень, накладених на керуючі і регульовані змінні.

3. На кроці обчислень, що становить фіксовану малу частину горизонту прогнозу, реалізується знайдене оптимальне керування і здійснюється вимірювання (або відновлення за вимірними змінними) фактичного стану об'єкта на кінець кроку.

4. Горизонт прогнозу зсувається на один крок уперед, і повторюються пункти 1–3 цієї послідовності дій.

Наведена схема може бути об'єднана з попереднім проведенням ідентифікації рівнянь моделі, використовуваної для виконання прогнозу.

Ураховуючи, що в ролі моделі може використовуватись апроксимаційна модель об'єкта на базі штучних мереж, яку можна отримати на основі експериментальних даних, цей підхід дозволяє будувати систему керування в умовах невизначеності параметрів об'єкта керування та його математичної моделі. Це є дуже важливим фактором по відношенню до ПА, оскільки для нього досить важко отримати точну математичну модель.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У даний час MPC-підхід знаходиться в стадії інтенсивного розвитку, про що свідчить велика бібліографія опублікованих за останні роки наукових робіт, присвячених даній проблематиці [3, 4, 6, 10]. Розвиток ідей керування з прогнозуванням відбувається в напрямку використання нелінійних моделей, забезпечення стійкості за Ляпуновим контрольованих рухів, надання робастних властивостей замкнутій системі керування, застосування сучасних оптимізаційних методів у реальному масштабі часу та ін. При цьому по відношенню до ПА даний підхід не застосовувався.

**МЕТА РОБОТИ** – синтез та дослідження автоматичної системи керування швидкістю руху підводного апарата на базі регулятора з передбаченням.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Доцільність уведення в розгляд прогнозуючої моделі на базі штучних нейронних мереж (ШНМ-моделі) визначається тією обставиною, що будь-яка фіксована математична модель лише наближено представляє реальний об'єкт. Це пов'язано з наявністю ряду неврахованих при її виведенні факторів, які роблять рух реального об'єкта відмінним від того, що моделюється. Сюди відносяться невраховані

нелінійності, зовнішні впливи, варіації параметрів, неврахована додаткова динаміка тощо. Зазначимо, що ШНМ-модель апроксимує реальні дані, зняті з об'єкта експериментальним шляхом, тому всі перелічені фактори в ній враховуються автоматично.

Загальна схема керування з прогнозом складається з наступних дій:

1. Вимірювання або оцінювання вектора стану  $x(t)$  реального об'єкта.

2. Розв'язання оптимізаційної задачі для прогнозуючої ШНМ-моделі з початковою умовою  $\bar{x}|_{\tau=t} = x(t)$  по пошуку такої послідовності керуючих сигналів, яка забезпечить мінімум відхилення фактичної траєкторії від заданої.

3. Використання знайденої оптимальної послідовності як програмного керування на відрізок  $\tau \in [t; t + \delta]$ .

4. Заміна моментів часу  $t$  на момент  $t + \delta$  і повторення операцій, зазначених у пунктах 1–3.

Наведена послідовність дій реалізується в системі керування зі зворотним зв'язком, блок-схема якої подана на рис. 1.

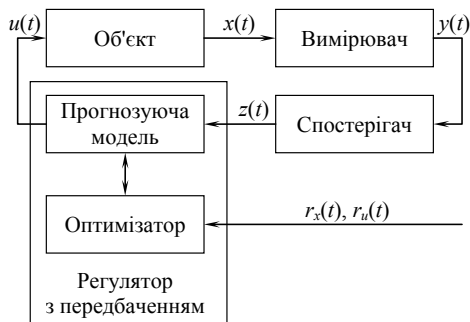


Рис. 1. Блок-схема системи керування з прогнозуючою моделлю

Очевидно, що для забезпечення точної роботи системи керування, яка розглядається, необхідно якомога точніше відтворити прогнозуючу модель

об'єкта. Для моделі динаміки руху підводного апарата, яка навіть у першому наближенні описується системою нелінійних диференціальних рівнянь, це є досить складною задачею. Тому доцільним у даному випадку є використання штучних нейронних мереж, які мають властивості універсального апроксиматора. Зручні засоби для моделювання таких систем відтворені в програмному забезпеченні Matlab, на основі якого і проводились дослідження (рис. 2).

На рис. 2 блоки Ramp, Zero-Order Hold, Fcn1, а також Ramp1 і Fcn2 служать для задавання східчастого та синусоїдального вхідних сигналів, перемикання між якими виконується блоком Manual Switch. NN Predictive Controller – блок регулятора з передбаченням. Object Model – підсистема, що реалізує модель руху ПА, на її вході – керуючий сигнал (напруга живлення електродвигуна), на виході – швидкість руху.

Ключовим етапом синтезу системи керування є навчання нейронної мережі, яка буде представляти прогнозуючу модель. Слід відзначити, що для навчання не потрібно проводити складний експеримент по отриманню навчальної вибірки спеціального виду. У найпростішому варіанті для даного типу регулятора в системі керування ПА достатньо протягом деякого часу (до 500...200 с) подавати на вхід об'єкта керуючий сигнал, який являє собою сходинки випадкової величини (з допустимого діапазону) та випадкової довжини (в діапазоні від 1 до 10 с). При цьому запам'ятовуються вхідна та вихідна координати з деяким інтервалом часу (наприклад, 0,01 с). Згідно з цими даними за спеціальним алгоритмом навчається штучна нейронна мережа, яка апроксимує зняті дані. Може використовуватись будь-який з алгоритмів навчання багатосарових нейронних мереж, описаних у відповідній літературі, наприклад у [2].

Після навчання параметри цієї мережі (ШНМ-моделі) використовуються в моделі регулятора в системі Matlab для моделювання роботи системи керування або можуть бути прописані в апаратну ШНМ

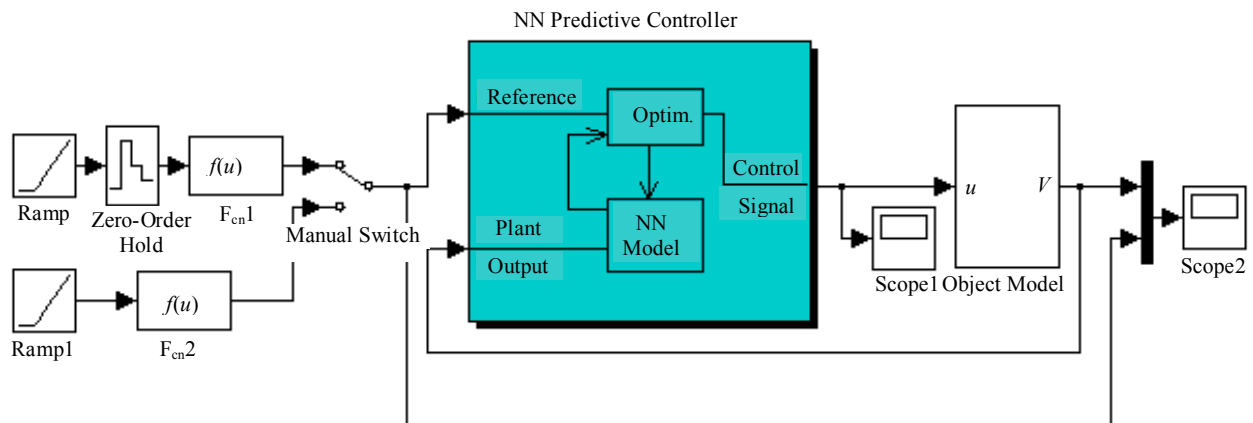


Рис. 2. Модель системи керування з передбаченням у середовищі Matlab Simulink

у складі регулятора, який знаходиться в реальній системі керування ПА. Після цього регулятор готовий до роботи.

Даними для навчання є вхідна координата (керуючий сигнал) і декілька її попередніх значень та вихідна координата (швидкість руху ПА по горизонтальній осі) і декілька її попередніх значень. Виходом ШНМ-моделі має бути значення швидкості, яке буде мати ПА, знаходячись у даному стані, при отриманні деякого керуючого сигналу. Тож вихідним вектором для навчання ШНМ будуть значення швидкості ПА, а входами – декілька попередніх значень швидкості та керуючого сигналу, які характеризують поточний стан об'єкта. Помилки передбачення між виходом об'єкта і виходом нейронної мережі використовуються для нейронної мережі як сигнал навчання. Схема процесу навчання наведена на рис. 3.



Рис. 3. Схема навчання нейронної мережі прогнозуючої ШНМ-моделі

Ця мережа може бути навчена окремо, з використанням даних, отриманих при експлуатації об'єкта, або, як описано вище, за допомогою подачі на об'єкт спеціального керуючого сигналу протягом деякого часу для накопичення цих даних.

Важливими параметрами є кількість попередніх значень вихідної та вхідної координат ( $M_y$  і  $M_u$ , відповідно), які враховуються для відображення стану об'єкта, а також величина кроку дискретизації зняття даних  $\Delta t$ . Їх значення є предметом дослідження і залежать від характеристик динаміки об'єкта. Для ПА, модель якого розглядалась, шляхом численних експериментів було встановлено, що найкращими значеннями з точки зору показників якості отриманої в подальшому системи керування є  $M_y = 3$ ,  $M_u = 1$ ,  $\Delta t = 0,01$  с.

Схема системи керування з передбаченням показана на рис. 4.

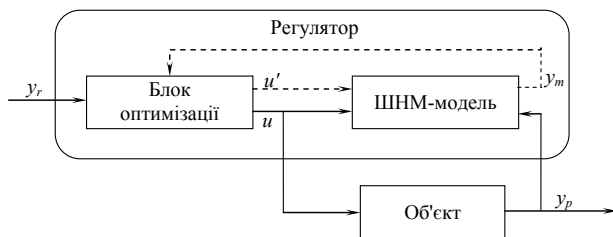


Рис. 4. Схема інтелектуальної системи керування з передбаченням

Після того як ШНМ-модель отримано, основну роль у процесі керування відіграє блок оптимізації. Його задачею є формування послідовності керуючих сигналів певної довжини, яка забезпечить протягом наступних декількох кроків дискретизації рух вихідної координати об'єкта за заданою траєкторією. Для цього блок оптимізації формує набір (послідовність) сигналів керування, подає їх на ШНМ-модель та отримує прогноз зміни вихідної координати. Потім набір сигналів керування послідовно коректується і знов подається на ШНМ-модель. І в такий спосіб розв'язується задача мінімізації критерію якості керування:

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

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;  $\rho$  – коефіцієнт, який відповідає за внесок у критерій якості приросту керуючого сигналу. Другий доданок дає змогу запобігати різким змінам керуючого сигналу.

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

Після експериментального підбору і налаштування всіх параметрів було отримано систему керування, результати роботи якої показані на рис. 5.

Як видно, в усталених режимах похибка керування відсутня, перехідні процеси досить швидкі, але на деяких швидкостях наявні коливання, що обумовлене недостатньою точністю ШНМ-моделі в цих режимах. При синусоїдальному вхідному сигналі графіки фактичної і заданої швидкостей практично збігаються, тому на рисунку не наведені.

Однак слід зазначити, що для отримання системи з показаною точністю знадобилось дуже багато часу та зусиль для отримання точної ШНМ-моделі (шляхом підбору кількості нейронів у прихованому шарі, інтервалу дискретизації, кількості ліній затримки по вхідному та вихідному сигналах). Крім того, час розрахунку керуючого сигналу (пошук оптимальної послідовності керуючих сигналів) є дуже значним, і реалізація даної системи керування в реальному часі буде вимогливою до швидкодії апаратних засобів.

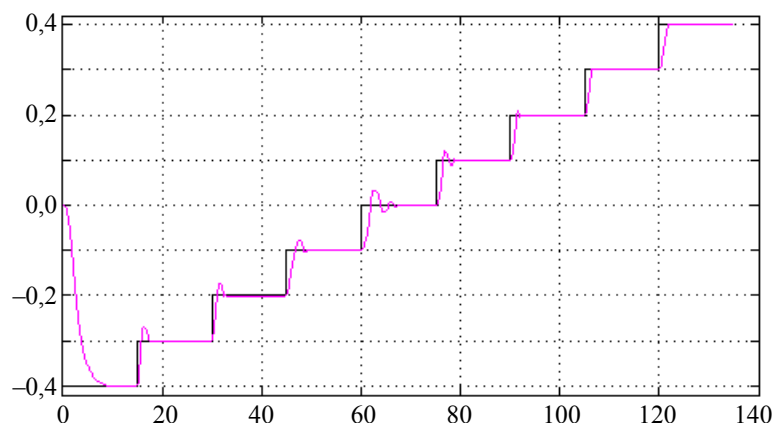


Рис. 5. Результати роботи системи керування при ступінчатому входному сигналі

### ВИСНОВКИ

1. Синтезовано та досліджено систему автоматичного керування швидкістю руху підводного апарата на основі регулятора з передбаченням в умовах невизначеності параметрів об'єкта. Розроблена система показала високу точність та швидкодію. При цьому

для її синтезу не потрібно проводити складних експериментів по отриманню даних з об'єкта.

2. Недоліками даної системи керування є висока трудомісткість при отриманні прогнозуючої моделі на базі штучних нейронних мереж, а також дуже високі вимоги до швидкодії апаратних засобів для обчислення керуючого сигналу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Агеев, М. Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии [Текст] / М. Д. Агеев. – М. : Наука, 2005. – 398 с.
- [2] Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика [Текст] / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
- [3] Кузнецов, Б. И. Нейроуправление нелинейным динамическим объектом с использованием метода обобщенного управления с предсказанием [Текст] / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Электротехника и электромеханика. – Х. : ХНТУ «ХПИ», 2008. – № 4. – С. 34–41.
- [4] Кузнецов, Б. И. Побудова нейромережевої системи керування нелінійною електромеханічною системою з використанням нейроконтролера з передбаченням [Текст] / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Електроінформ. – Л. : ТОВ «Екоінформ», 2008. – № 1. – С. 6–10.
- [5] Филаретов, В. Ф. Устройства и системы управления подводных роботов [Текст] / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец. – М. : Наука, 2005. – 270 с.
- [6] A Robust Multi-Model Predictive Controller for Distributed Parameter Systems [Text] / M. R. Garcia, C. Vilas, L. O. Santos, A. A. Alonso // Journal of Process Control. – 2012. – № 22 (1). – P. 60–71.
- [7] Garcia, C. E. Model predictive control: theory and practice – a survey [Text] / C. E. Garcia, D. M. Prett, M. Morari // Automatica. – 1989. – Vol. 25. – P. 335–348.
- [8] Moore, S. Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication [Text] / Steven W. Moore, Harry Bohm, Vickie Jensen / Publisher: Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010. – 770 p.
- [9] Nikolaou, M. Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs [Text] / M. Nikolaou // Advances in Chemical Engineering. Academic Press. – 2001. – Vol. 26. – P. 131–204.
- [10] Nonlinear modelling, estimation and predictive control in APMonitor [Text] / J. D. Hedengren, R. Asgharzadeh Shishavan, K. M. Powell, T. F. Edgar // Computers & Chemical Engineering. – 2014. – № 70 (5). – P. 133–148.

© С. В. Блінцов, Доан Фук Тхи

Надійшла до редколегії 18.11.13

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

Статтю розміщено у Віснику НУК № 1, 2014