

УДК 004.942

## МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З НЕОДНОЗНАЧНОЮ НЕЛІНІЙНІСТЮ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Орлов Андрій Андрійович

д.т.н., професор каф. КСПТ Фомін Олександр Олександрович  
Національний університет «Одеська політехніка», УКРАЇНА

**АНОТАЦІЯ.** Вирішується задача моделювання динамічних об'єктів з неоднозначною нелінійністю на основі нейронних мереж з тимчасовими затримками. Розглянуто типові неоднозначні нелінійності, їх властивості. Визначені переваги використання нейронних мереж з тимчасовими затримками при моделюванні динамічних об'єктів з неоднозначною нелінійністю.

**Вступ.** Прогрес штучного інтелекту та нейроінформатики, спричинений розвитком теорії та засобів глибокого навчання, призвів до значного просування у вирішенні багатьох складних задач. Здібності алгоритмів до ефективного виявлення складних структур у багатомірних даних знайшли своє застосування в різних галузях, включаючи розпізнавання мови та обробку природної мови, інформаційний пошук, комп'ютерний зір, біомедицина та аналіз соціальних мереж [1–3].

Сьогодні у практичних додатках розглядаються динамічні об'єкти управління, які характеризуються суттєво нелінійними властивостями у вигляді неоднозначності. Завдяки цим характеристикам об'єкти можуть функціонувати у складніших режимах, які не можуть бути реалізовані за допомогою лінійних чи слабких нелінійних характеристик.

Найважливішим з точки зору практичного використання є клас динамічних об'єктів типу «чорна скринька». Такі об'єкти, як правило, характеризуються повною відсутністю апріорної інформації як про закони функціонування об'єкта, які можуть бути оцінені методами параметричної ідентифікації, так і структуру об'єкта. Зовнішньому спостерігачеві вивчення об'єкта доступна лише реакція об'єкта  $y(t)$  (вихідний сигнал) на тестовий вплив  $x(t)$  (вхідний сигнал), отримані результати так званого експерименту «вхід-вихід» [4, 5].

Це спричиняє застосування методів непараметричної ідентифікації для побудови інформаційної моделі об'єкта. Доцільно використовувати як інформаційну модель об'єкта непараметричні динамічні моделі, на основі даних експерименту «вхід-вихід», які описують нелінійні та інерційні властивості об'єкта, що забезпечує високу точність моделювання.

*Критичний огляд існуючих рішень.* Відомо кілька видів нелінійності у вигляді неоднозначних характеристик. Типові неоднозначні нелінійності – це гістерезис з насиченням, гістерезис із релейністю та гістерезис із насиченням та нечутливістю [3, 4].

Існуючі моделі мають ряд недоліків, суттєвих для викладених вище вимог до сучасного математичного забезпечення та засобів моделювання. Так, моделі у вигляді функціональних рядів більшою мірою підходять для моделювання об'єктів зі слабкою однозначною гладкою нелінійністю. Наявність неоднозначних або кусочно безперервних нелінійних характеристик робить їх застосування неефективним. Крім того, існуючі обмеження на амплітуди вхідних тестових сигналів також перешкоджають використанню таких моделей при ідентифікації складних об'єктів.

Наявність нелінійних елементів з неоднозначними характеристиками у системі призводить до необхідності опису поведінки таких систем. Поширеним методом опису поведінки таких систем є диференціальні рівняння високих порядків. Дуже часто рішень таких рівнянь у кінцевому вигляді немає, тому для опису поведінки нелінійних систем широко використовують наближені графоаналітичні методи, наприклад, фазовий метод. Але сучасні вимоги до якості процесів управління та діагностування вимагають більш точних методів побудови моделей об'єктів. Крім того, застосування диференціальних рівнянь ускладнюється відсутністю апріорної інформації про структуру та параметри об'єкта дослідження.

Актуальним підходом для моделювання нелінійних динамічних об'єктів є апарат штучних нейронних мереж з часовими затримками [6, 7]. Нейронна мережа із затримкою часу це багаторівнева нейронна мережа, здатна аналізувати дані зі зрушенням у часі. В цій архітектурі кожний нейрон на кожному рівні отримує вхідні дані від активацій/функцій на нижньому рівні. Такі моделі здатні навчатися на основі даних експерименту вхід-вихід нелінійних динамічних об'єктів і мають хороші властивості збіжності.

Ця робота спрямована на дослідження нейронних мереж з часовими затримками для моделювання динамічних об'єктів управління з істотно нелійними характеристиками у вигляді неоднозначних характеристик (гістерезису).

**Метою роботи** є підвищення точності моделювання динамічних об'єктів із суттєвими нелійними у вигляді неоднозначних характеристик з використанням нейровмережових моделей, виявлення сфери їх ефективного застосування.

Ця мета може бути досягнута шляхом дослідження існуючих неоднозначних характеристик та нейро-мережових моделей, виявлення їх переваг та недоліків, областей їх ефективного використання.

**Основна частина роботи.** *Математичний опис моделі на основі нейронної мережі з часовими затримками.* Архитектура нейронної мережі з часовими затримками у вигляді тришарової мережі з прямим поширенням сигналу є найбільш поширеним та ефективним засобом моделювання нелінійних динамічних об'єктів з безперервними характеристиками.

Вхідний сигнал у вигляді послідовності  $M+1$  наборів даних, зрушених на одне значення відносно попереднього надходить на нейрони вхідного шару нейронної мережі.

Вихідний сигнал мережі в момент часу  $t$  залежить не тільки від вхідного сигналу  $x(t)$  в даний момент часу, але і відзначень вхідних сигналів  $x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-M)$  у моменти часу  $t-1, t-2, \dots, t-M$  відповідно, де  $M$  - довжина затримки (системна пам'ять). Вихідний сигнал  $y(t)$  такої моделі визначається за формулою (1):

$$y(n) = b_0 + s_0 \sum_{i=0}^K r_i^2 S_i \left( b_i + \sum_{j=0}^M r_{i,j}^1 x(n-j) \right) \quad (1)$$

де  $b_0, b_i$  - зміщення нейронів вихідного та вхідного шарів відповідно;  $S_0, S_i$  - функції активації нейронів вихідного та вхідного шарів відповідно;  $r_i^2, r_{i,j}^1$  - вагові коефіцієнти нейронів вихідного та вхідного шарів відповідно.

Якщо ми представимо функцію активації як поліном, співвідношення вхід-вихід (1) для трирівневої TDNN з  $M$  входами та одним виходом можна виразити наступним чином.

$$y(n) = b_0 + s_0 \sum_{i=0}^K r_i^2 S_i \left( b_i + \sum_{j=0}^M r_{i,j}^1 x(n-j) \right)^n \quad (2)$$

*Апробація як підтвердження досягнення мети.* Апробація запропонованого підходу до побудови динамічних моделей на основі нейронних мереж з часовими затримками досліджено на прикладі тестових динамічних об'єктів з неоднозначними нелійними у зворотному зв'язку [8, 9].

Для створення нейронної мережі використовуються бібліотека Keras (keras.io) - популярний програмний інструментальний засіб на мові Python для ефективно організації API-інтерфейсів при моделюванні нейронних мереж довільної складності. Бібліотека найбільш ефективна як при побудові невеликих мереж з послідовним розташуванням шарів та одним вхідним і одним вихідним шарами, так і складніших нейромережових структур з кількома входами та виходами та зворотніми зв'язками між прихованими шарами.

В результаті експерименту створена та навчена тришарова нейронна мережа. Вхідний сигнал потрапляє на  $M+1$  нейрон вхідного шару. Прихований шар складається з  $J$  нейронів. Вихідний шар складається з одного нейрону з лінійною функцією активації.

Співставлення вихідних сигналів – реакції моделі на тестові вхідні збудження показало перевагу в точності моделювання з використанням отриманої нейронної мережі у порівнянні з фазовим методом на 7-15%.

**Висновки.** Наукова новизна полягає у використанні нейровмережових моделей з часовими затримками для моделювання динамічних об'єктів із суттєвими нелінійностями у вигляді неоднозначних характеристик.

Практична користь розробленого підходу полягає у підвищенні точності моделювання нелінійних динамічних об'єктів у порівнянні з фазовим методом. При цьому, моделювання може проводитися як у тестовому, так і у функціональному режимах роботи об'єкту.

Запропонований підхід апробований на даних тестового нелінійного динамічного об'єкта. Результати експерименту демонструють підвищення точності моделювання у порівнянні з фазовим методом на 7-15%.

Таким чином, нейромережові моделі з часовими затримками – це ефективний підхід опрацювання реальних даних у їх необробленому вигляді при ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів.

Напрямом подальших досліджень можуть бути методи підвищення швидкості навчання нейронних мереж з часовими затримками, оскільки швидкість побудови нелінійної моделі об'єкту на основі динамічної нейронної мережі з часовими затримками істотно обмежена часом навчання цієї мережі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. C.Rudin and J.Radin, "Why are we using black box models in AI when we don't need to? A lesson from an explainable AI competition", *Harvard Data Science Review*, vol. 2, no. 1, 2019.
2. J.Sen, "Machine Learning – Algorithms, Models and Applications", London, United Kingdom, IntechOpen, 2021.
3. S.Marton, S.Lüdtke and C.Bartelt, "Explanations for Neural Networks by Neural Networks", *Appl. Sci.*, vol. 12, 2022, p. 980.
4. W. Liu, Y. Su and L. Zhu, "Nonlinear Device Modeling Based on Dynamic Neural Networks: A Review of Methods", 2021 IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Xi'an, China, 2021, pp. 662-665.
5. W.Samek, G.Montavon, S.Lapuschkin, C.J.Anders and K.-R.Müller, "Explaining Deep Neural Networks and Beyond: A Review of Methods and Applications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 3, 2021, pp. 247-278.
6. M.Sugiyama, H.Sawai and A.H.Waibel, "Review of TDNN (time delay neural network) architectures for speech recognition", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 1, 1991, pp. 582-585.
7. L.Wenyuan, L.Zhu, F.Feng, W.Zhang, Q.-J.Zhang, L.Qian and G.Liu, "A time delay neural network based technique for nonlinear microwave device modelling", in: *Micromachines*, Basel, vol. 11, no. 9, 2020, p. 831.
8. Fomin, O., Polozhaenko, S., Krykun, V., Orlov, A., Lys, D. (2023). Interpretation of Dynamic Models Based on Neural Networks in the Form of Integral-Power Series. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (eds) *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 536. Springer, Cham. Pp. 258-265.
9. O.O.Fomin, O.D.Ruban, H.M.Fedorova, P. E.Bartalyov, D.G.Katsiuk. Construction of the nonlinear dynamic objects diagnostic model based on of multiple factors variance analysis / *Herald of Advanced Information Technology*, 2020, vol. 3(2), pp. 52-60.

### MODELING OF DYNAMIC OBJECTS WITH AMBIGUOUS NONLINEARITY BASED ON NEURAL NETWORKS

Andrii Orlov

Doctor of Science, professor of Computerized Systems and Software Technologies Department

Oleksandr Fomin,

Odesa Polytechnic National University, UKRAINE

**ANNOTATION.** The work is devoted to solving the problem of modeling objects with ambiguous nonlinearity based on neural networks. The structure of a same network for building dynamic models is presented. Typical ambiguous nonlinearities, their properties and physical meaning are considered. The advantages of using neural networks with time delays in modeling dynamic objects with ambiguous nonlinearity are determined.