

# Нелінійне перетворення сигналів у схемі формального нейрона

Ігор Бех<sup>1</sup>, Сергій Новак<sup>2</sup>

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
просп. Глушкова 4-г, Київ, Україна, 03022

<sup>1</sup>[sun@univ.kiev.ua](mailto:sun@univ.kiev.ua), <sup>2</sup>[novak.s.a.24@gmail.com](mailto:novak.s.a.24@gmail.com)

Отримано 20.03.2021, прийнято 19.05.2021  
<https://doi.org/10.32347/tit2141.03010>

## ВСТУП

Інтерес в проведенні досліджень штучних нейронних мереж (ШНМ) обумовлений тим, що спосіб обробки інформації людським мозком сильно відрізняється від методів, які зазвичай використовуються цифровими комп'ютерами. Мозок володіє здатністю організувати свої структурні компоненти, які називаються нейронами, так, щоб вони могли виконувати конкретні задачі (наприклад, розпізнавання образів, обробку сигналів органів чуття, моторні функції) в кілька разів швидше, ніж це можуть виконувати найшвидші сучасні комп'ютери [1].

На кафедрі радіотехніки та радіоелектронних систем факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка організовано наукову групу, яка займається побудовою та дослідженням аналогових моделей ШНМ на операційних підсилювачах.

При побудові штучної нейронної мережі використовують модель формального нейрона [1], до складу якої входить нелінійний елемент, що забезпечує так звану «функцію активації», згідно з якою обчислюється вихідний сигнал. Від вибору конкретної функції активації залежить як точність роботи

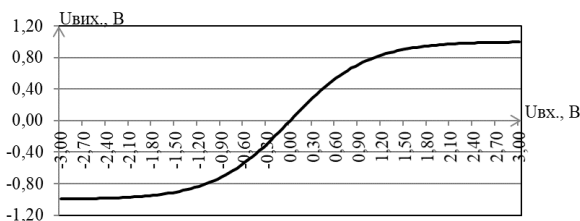


Рис. 1. Графік функції гіперболічного тангенса

моделі формального нейрона, так і складність практичної реалізації штучної нейронної мережі. В наших роботах [2-9], у якості функції активації обрано сигмоїдальну функцію, а саме, гіперболічний тангенс (Рис. 1).

В роботах [2-4] аналогове обчислення гіперболічного тангенса реалізовано за допомогою схеми з використанням двох зустрічно увімкнених діодів. Моделювання роботи схеми в програмному пакеті "NI Multisim" показало задовільну якість обчислення [2, 3]. З метою підвищення точності аналогових обчислень було прийнято рішення дослідити більш складні схеми [8], де нелінійність забезпечується диференціальним каскадом на біполярних транзисторах (Рис. 2).

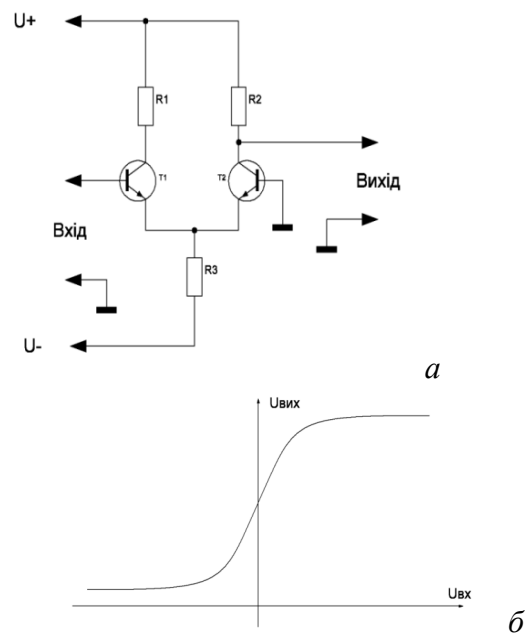


Рис. 2. Функціональна схема диференціального каскаду на біполярних транзисторах (а) і графік його передавальної характеристики (б)

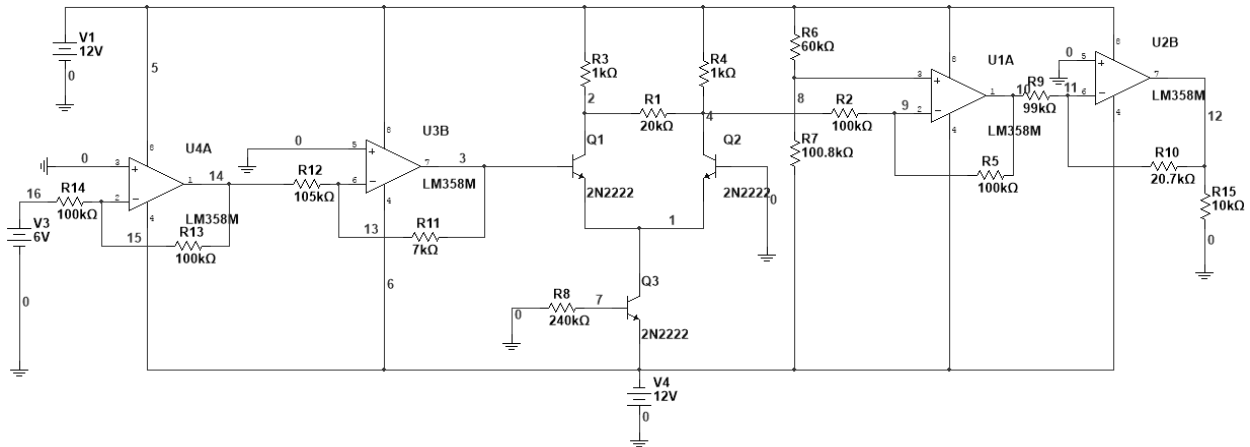


Рис. 3. Принципова схема нелінійного елемента формального нейрона [8]

Як відомо, передавальна характеристика звичайного диференціального підсилювача (Рис. 2, а) на дискретних транзисторах має вигляд подібний до вигляду потрібної нам функції [10]. Але графік передавальної характеристики знаходиться повністю вище нуля (Рис. 2, б). Це зумовлено тим, що сигнал знімається з колектору відносно нульового потенціалу. При цьому на колекторі напруга може бути тільки позитивною і при нулі на вході дорівнює половині напруги живлення.

В роботі [8] було проведено комп'ютерне моделювання роботи схеми, наведеної на Рис.3. Варіація опору резистора  $R_2$  дозволила отримати значення відносної похибки аналогового обчислення гіперболічного тангенса від вхідного сигналу на рівні 10%, проте передавальна характеристика схеми втратила симетричність, як це видно із Рис. 4.

Дана робота містить результати подальшого вдосконалення схеми нелінійного еле-

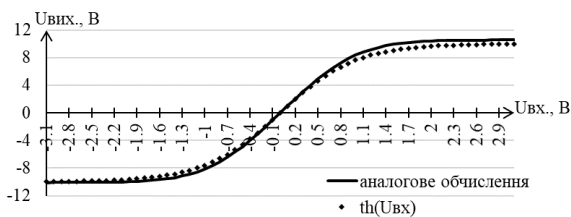


Рис. 4. Передавальна характеристика схеми нелінійного елемента формального нейрона [8]

мента формального нейрона з метою зниження похибки аналогових обчислень.

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати, наведені в даній роботі, отримані при комп'ютерному моделюванні роботи схем у програмному пакеті NI Multisim 12.0 та при дослідженні заздалегідь виготовлених макетних плат, для побудови яких були використанні доступні компоненти:

- операційні підсилювачі LM358P з мінімальним дрейфом нуля та максимальною робочою частотою;
- транзистори 2N2222A з коефіцієнтом передачі струму  $h_{21E} = 80$  та граничною частотою  $f_{h21E} = 250$  МГц;
- резистори з допустимим відхиленням  $\pm 1\%$ .

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Перший етап роботи полягав у дослідженні макету диференціального каскаду

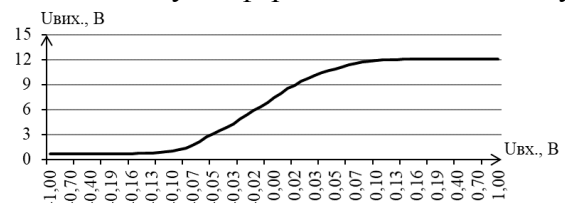


Рис. 5. Прохідна характеристика диференціального каскаду

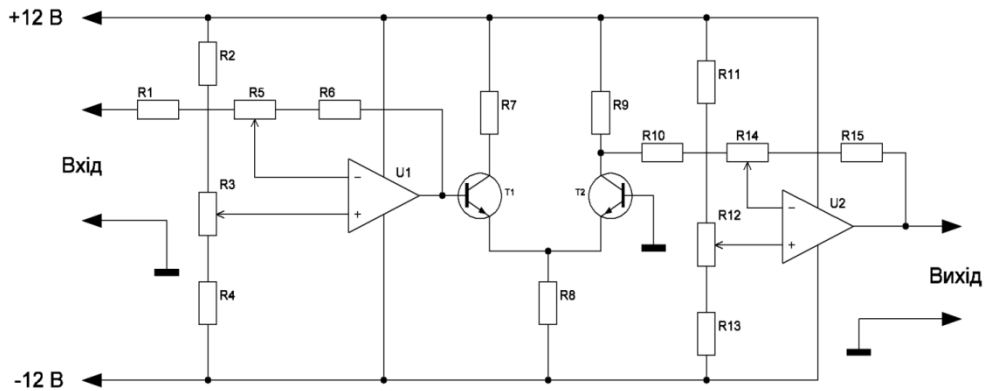


Рис. 6. Функціональна схема нелінійного елемента формального нейрона

(Рис. 2, а). Була виміряна його прохідна характеристика, графік якої наведено на Рис. 5.

Видно, що графік характеристики якісно відповідає функції гіперболічного тангенса у певному масштабі, проте він несиметричний відносно осі абсцис, зсунутий «вгору».

Для наближення отриманої прохідної характеристики до гіперболічного тангенса у схему було додано два каскади на операційних підсилювачах U1 та U2, як це показано на Рис. 6:

- для встановлення кута нахилу графіка передавальної характеристики в околі початку координат слугує каскад на операційному підсилювачі U1, підключений до входу диференціального каскаду; його коефіцієнт підсилення і буде регулювати дану величину; наявність схеми зовнішньої компенсації нуля дозволяє встановлювати положення графіка по-горизонталі;
- для зміщення графіка вниз і забезпечення

симетричного діапазону напруг відносно початку координат до виходу диференціального каскаду підключений каскад на операційному підсилювачі U2 зі схемою зовнішньої компенсації нуля; його ж можна використати і для встановлення правильної області значень  $U_{\text{вих}}$ , просто розрахувавши необхідний коефіцієнт підсилення.

У даній схемі присутні 4 підстроювальних резистори R3, R5, R12, R14. Вони дають можливість регулювати параметри схеми у певних межах, що дозволяє варіювати передавальну характеристику схеми.

Коефіцієнт передачі каскаду на U1 визначається наближено з отриманої прохідної характеристики диференціального каскаду (Рис. 5) та має знаходитись у межах  $K \sim 0,045 \dots 0,16$ . Резистор R3 потрібен для зсування графіка по горизонталі. Необхідно забезпечити можливість зміни напруги на неінвертуючому вході U1 в невеликих межах.

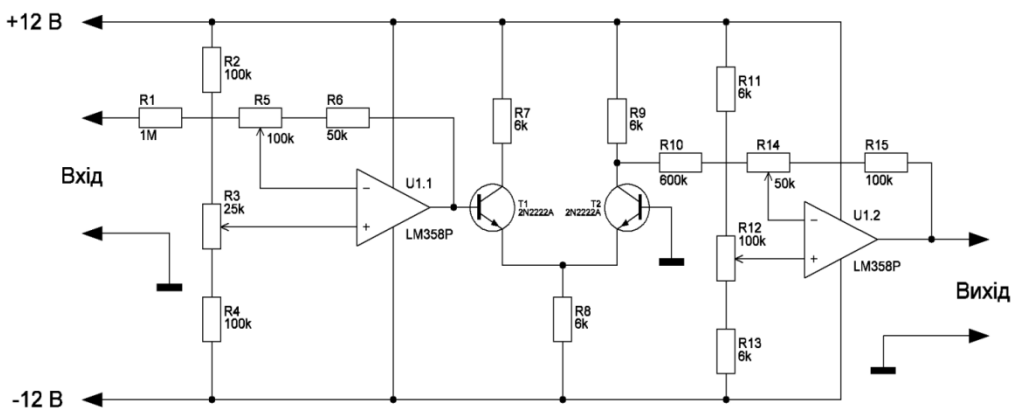


Рис. 7. Принципова схема нелінійного елемента формального нейрона

. Резистори R10, R14, R15 задають коефіцієнт передачі каскаду на U2. З графіку прохідної характеристики диференціального каскаду (Рис. 5) видно, що вихідна напруга змінюється в межах від нуля до 12 вольт. Функція гіперболічного тангенса має область значень від -1 В до 1 В, тобто 2 В, отже необхідно встановити коефіцієнт передачі  $K \sim 0,167$ . Для регулювання коефіцієнта передачі U2 слугує резистор R14. Резистор R12 та резистори R11, R13 призначені для встановлення рівня нуля на виході.

Принципова схема нелінійного елемента формального нейрона з усіма номіналами елементів зображена на Рис. 7.

На другому етапі досліджень було проведено комп'ютерне моделювання роботи схеми, наведеної на Рис. 7. Графік передавальної характеристики схеми зображено на Рис. 8, при цьому відносна похибка аналогового обчислення гіперболічного тангенса склала 7,5% поблизу нуля вхідного сигналу.

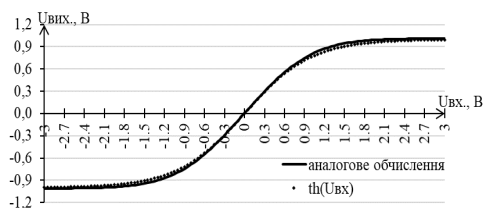


Рис. 8. Передавальна характеристика схеми нелінійного елемента формального нейрона

Третім етапом роботи стало дослідження макету схеми, наведеної на Рис. 7. Графік отриманої прохідної характеристики зображено на Рис. 9.

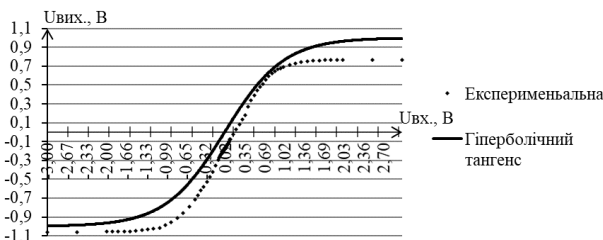


Рис. 9. Прохідна характеристика макету схеми нелінійного елемента формального нейрона

Порівняння отриманої залежності з графіком гіперболічного тангенса, розрахованим аналітично, свідчить про працездат-

ність макету схеми, але також і про необхідність його подальшого налагодження.

Після проведення додаткових регулювань резисторами R3, R5, R12, R14 прохідну характеристику схеми було виміряно знову (Рис. 10). Отримана залежність знаходиться у гарній відповідності з графіком гіперболічного тангенса, розрахованим аналітично.

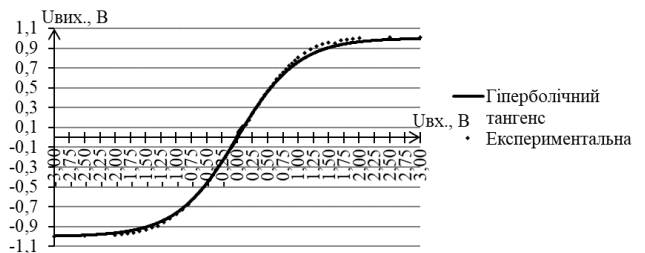


Рис. 10. Прохідна характеристика макету схеми нелінійного елемента формального нейрона після додаткових регулювань

Для оцінки відповідності передавальної характеристики макету схеми гіперболічному тангенсу було отримано залежність відносної похибки аналогового обчислення від вхідного сигналу, яку зображено на Рис. 11.

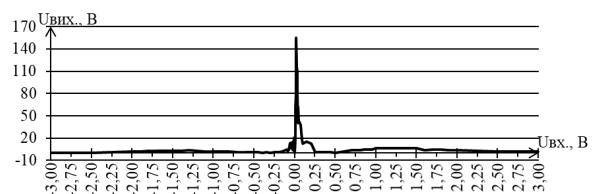


Рис. 11. Залежність відносної похибки аналогового обчислення макетом схеми нелінійного елемента формального нейрона гіперболічного тангенса від вхідного сигналу

Наведений на Рис. 11 графік має різкий стрибок до 160% близько нуля вхідного сигналу, на решті ж проміжку похибка не перевищує 10%, що якісно відповідає результатам комп'ютерного моделювання, де максимум похибки також спостерігався поблизу нуля вхідного сигналу. Причиною різкого зростання похибки в околі початку координат, на нашу думку, є аналогова природа вхідного сигналу та компонентів схеми: при малих вхідних напругах шуми, притаманні аналоговим сигналам та компонентам, стають сумірними із корисним сиг-

налом, тому він зазнає істотних спотворень. Крім того, диференціальний каскад виготовлено із окремих транзисторів, що унеможливує ідеальне співпадіння їхніх параметрів та характеристик.

На даному етапі високий рівень похибки не дозволяє використовувати запропоновану схему у складі моделі формального нейрона. Необхідна подальше вдосконалення схеми для підвищення точності обчислень і стабілізації передавальної характеристики.

## ВИСНОВКИ

На підставі отриманих в роботі результатів можна зробити такі висновки.

1. Схеми на основі диференціального каскаду можуть бути використані у якості нелінійного елемента формального нейрона. Для підвищення точності обчислень і стабілізації передавальної характеристики необхідне подальше вдосконалення.

2. Причиною різкого зростання похибки обчислення гіперболічного тангенсу в околі початку координат як при моделюванні, так і при макетуванні, є аналогова природа вхідного сигналу та компонентів схеми: при малих вхідних напругах шуми, притаманні аналоговим сигналам та компонентам, стають сумірними із корисним сигналом і значною мірою його спотворюють.

3. Диференціальний каскад у макеті схеми виготовлено із окремих транзисторів, що унеможливує ідеальне співпадіння їхніх параметрів та характеристик, що також сприяє збільшенню рівня похибки.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Хайкин С. (2006). Нейронные сети. М., издат. дом Вильямс, 1104.

2. Bekh I.I. (2015) Approximation of mathematical functions based on the simulation of neural networks with the help of the analog calculating machines (ACM). XI International Conference Intellectual Systems For Decision Making And Problems Of Computational Intelligence (ISDMCI'2015), 2015, Zaliznyj Port, Ukraine, 231-232.

3. Andrusenko V., Bekh I.I., Novak S.O. (2015). Simulation of Neural Networks by the Analog Calculating Machine (ACM) (in the task of approximation of mathematical functions). Вісник

Київського ун-ту, сер. Радіофізика і електроніка, 1(21), 10-13.

4. Andrusenko V., Bekh I.I., Novak S.O. (2014). Analog calculating machine (ACM) for simulation of neural networks (task approximation of mathematical functions). XIV international young scientists' conference on applied physics, Kiev, Ukraine, 213-214.

5. Бех І.І., Новак С.О., Хлапонін Ю.І. (2016). Апроксимація нелінійної функціональної залежності на основі алгоритму зворотного розповсюдження помилки. Наук.-техн. конф. Інформаційна безпека України, Київ, 52-54.

6. Бех І.І., Новак С.О., Хлапонін Ю.І. (2016). Побудова апроксимаційної функції на основі алгоритму зворотного розповсюдження помилки як методу навчання штучних нейронних мереж. Вісник інженерної академії України, 1, 198-201.

7. Бех І.І., Новак С.О., Хлапонін Ю.І. (2016). Моделювання штучних нейронних мереж (ШНМ) засобами аналогової електроніки. XII Міжнародна наукова конференція Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2016), Залізний Порт, Україна, 254-255.

8. Bekh I.I., Grinevich O.V., Novak S.O. (2017). Computer simulation of a formal neuron based on analogue electronics devices. XIII international conference Electronics and applied physics, Kiev, Ukraine, 209-210.

9. Бех І.І., Новак С.О. (2017). Адаптація та понад розширення в антенних решітках. Науково-технічна конференція Інформаційна безпека України, Київ, 21-25.

10. Левитський С.М. (2007). Основи радіоелектроніки: підруч. Київ, Видавничо-поліграф. центр Київський університет, 455.

11. Гавлицкий А.И. (2009). Особенности схемотехники сверхнизковольтных прецизионных аналоговых перемножителей напряжения. Изв. ЮФУ, Технич. науки, 5(94), 101-108.

12. Горбань А.Н. (1998). Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей. Сибирский журнал вычислительной математики, Т.1, 1, 12-24.