

УДК004.032.26

О. К. КОЛЕСНИЦЬКИЙ, Ю. В. ЛЕВЧЕНКО

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

ІМПУЛЬСНИЙ НЕЙРОННИЙ ЕЛЕМЕНТ НА СТАБІЛІТРОНІ

Анотація. У даній роботі проведено дослідження та запропоновано нову спрощену схему моделі нейронного елемента, а також проведено перевірку на відповідність запропонованої схеми моделі нейрону до математичної моделі LIF-нейрону. Для створення схеми моделі нейронного елемента було використано середовище моделювання NI Multisim, а для відображення математичної моделі, відповідно, середовище CSIM. Проведене дослідження комп'ютерної моделі запропонованої схеми нейронного елемента на стабілітроні показує, що його передатна характеристика адекватна передатній характеристиці LIF-нейрону з великою точністю. Запропонована схема нейронного елемента може використовуватися для побудови апаратних реалізацій імпульсних нейронних мереж з великою кількістю елементів.

Ключові слова: нейросистеми; нейронні мережі; LIF-нейрон; CSIM; Multisim; оптичні входи та виходи.

Аннотация. В данной работе проведено исследование и предложено новую упрощенную схему модели нейронного элемента, а также проведена проверка на соответствие предлагаемой схемы модели нейрона к математической модели LIF-нейрона. Для создания схемы модели нейронного элемента было использовано среду моделирования NI Multisim, а для отображения математической модели, соответственно, среду CSIM. Проведенное исследование компьютерной модели предложенной схемы нейронного элемента на стабилитроне показывает, что его передаточная характеристика адекватна передаточной характеристике LIF-нейрона с большой точностью. Предложенная схема нейронного элемента может использоваться для построения аппаратных реализаций импульсных нейронных сетей с большим количеством элементов.

Ключевые слова: нейросистемы; нейронные сети; LIF-нейрон; CSIM; Multisim; оптические входы и выходы.

Abstract. In current work research was held and a new simplified circuit model of neural element was proposed as well as verification for correspondence of the proposed neuron model scheme with the mathematical model of LIF-neuron. A simulation environment NI Multisim was used for the creation of neural element scheme model and the environment CSIM was used for the mathematical model displaying. The performed research of computer model for the proposed scheme of neural element created using zener diodes shows that its transmitting characteristic is adequate to according characteristic of the LIF-neuron with great accuracy. The proposed neural element scheme can be used to construct hardware implementations of spiking neural networks with a large number of elements.

Key words: neural system; neural networks; LIF-neuron; CSIM; Multisim; optical inputs and outputs.

Вступ

Зацікавленість штучними нейронними мережами швидко виросла за останні декілька років. Фахівці з багатьох областей, таких як технічне конструювання, філософія, фізіологія і психологія, зацікавлені можливостями, що надає ця технологія, і шукають застосування їм всередині своїх дисциплін. Максимум переваг від нейронних мереж можна отримати при їх апаратній реалізації [1]. Чим більше буде нейронів у мережі, тим складніші завдання можна буде вирішувати [2]. Але більшість відомих схем нейронних елементів на сьогодні побудовані на основі мікроелектронної технології [3,4], а тому використовують електричні зв'язки при формуванні із них мереж нейронів. Планарна природа напівпровідникових чипів не дозволяє створювати велику кількість зв'язків між нейронами в межах кристалу. Вирішити цю проблему можна при використанні оптичних зв'язків між нейронами в мережі. Тому існує задача створення схем нейронних елементів, в яких введення нових вузлів та зв'язків надасть змогу працювати з оптичними сигналами. Завдяки наявності оптичних входів та виходів схема буде зручна у використанні при побудові нейронних мереж з великою кількістю елементів та зв'язків між ними. Це розширює функціональні можливості схеми, оскільки організація великої кількості оптичних зв'язків реалізується набагато простіше, ніж електричних, за допомогою оптичних та голографічних засобів. Але мало створити схему нейронного елемента, треба ще довести, що її функціонування відповідає математичним моделям нейронів [5], на яких будуються потужні теоретичні засади функціонування імпульсних нейронних мереж [6]. Тому виникає необхідність проведення моделювання розроблених схем нейронних елементів та перевірка відповідності створених схем математичним моделям нейронів.

Постановка задачі

На сучасному етапі, на жаль, переважає підхід до створення нейросистем на основі формальних нейронів, які оперують статичними бінарними чи аналоговими сигналами на відміну від біологічних нейронів, які оперують імпульсними сигналами [7]. Тому найперспективнішими для технічної реалізації є саме імпульсні нейрони [1,2].

Нейронні елементи і мережі можна реалізовувати:

- програмно;
- програмно-апаратно;
- апаратно.

Максимальна перевага – створення реальної нейронної мережі. Чим більше нейронних елементів буде в мережі – тим краще. На даний час існує велика кількість різних варіантів нейронних елементів: механічних, магнітоелектричних, термоелектричних, квантових, на основі надпровідних матеріалів, на транзисторних схемах, на приладах з від'ємним опором – R-негатронах, на біспін-приладах, на операційних підсилувачах, на цифрових мікросхемах та мікроконтролерах. Складні фізичні моделі нейронних елементів дозволяють найбільш точно відобразити всі процеси та функціонування

біологічних нейронів, проте містять велику кількість елементів і створення великих масивів таких нейронів є занадто складною технічною задачею. Альтернативний підхід полягає у створенні якомога простіших апаратних реалізацій нейронних елементів зі збереженням головних функцій нейрону. Найперспективнішою елементною базою для створення нейронних елементів є функціональні електронні прилади, використання яких забезпечить схмотехнічну простоту, високу надійність, економічність, технологічність, малі габарити та вагу [1].

Необхідно використовувати прості схеми апаратної реалізації нейронів. З іншого боку виникає необхідність, щоб створені схеми відповідали математичним моделям нейронних елементів, для яких уже доведено теореми повноти та представимості [6,7]. Також роздільна та апроксимаційна властивості імпульсних нейронних мереж доведені саме для LIF-нейронів [5]. Роздільна властивість передбачає, що будь-які дві вхідні функції мережі, які значно різняться, спричиняють неперервні стани мережі, які також значно різняться. Апроксимаційна властивість передбачає, що елемент зчитування має здатність апроксимувати будь-яку дану неперервну функцію f , що відображає поточні неперервні стани мережі у поточні виходи [6,7].

Мета

Мета статті – дослідження схмотехнічної реалізації імпульсного нейрону на стабілітроні та доведення її адекватності математичній моделі LIF-нейрону.

Аналіз існуючих моделей нейронних елементів

Є відомі схеми нейронних елементів, але кожна із них має ряд недоліків.

Пристрій для моделювання нейрона (патент України №55921[8]), який містить джерело живлення, два фотодіоди, три резистора, три конденсатори, тиристор, світлодіод. Недоліком даного пристрою є складність схеми технічної реалізації, низька швидкодія та великі струми перемикачів.

Інший відомий пристрій для моделювання нейрона (патент України № 22956[9]) містить два фотоприймачі, електронний ключ, біспін-прилад, резистор навантаження, модулятор лазерного випромінювання, лазер та голограму, на якій записано зовнішні зв'язки моделі нейрону. Недоліком даного пристрою також є його апаратна складність. Детальний аналіз відомих схем нейронних елементів наведено в [10].

Зазначені вище недоліки вимагають розробки як найпростішої схеми нейронного елемента, що зможе легко використовуватися при побудові імпульсних нейронних мереж з великою кількістю елементів та зв'язків між ними. Це й розширить функціональні можливості нейронного елемента, оскільки організація великої кількості оптичних зв'язків реалізується набагато простіше, ніж електричних, за допомогою оптичних та голографічних засобів.

Схема імпульсного нейронного елемента на стабілітроні

Інтелектуальні системи на основі штучних нейронних мереж дозволяють ефективно вирішувати задачі розпізнавання образів, прогнозування, оптимізації, діагностики, кластеризації, асоціативної пам'яті та керування. Штучний нейрон є елементарним функціональним модулем, з множини яких будуються штучні нейронні мережі. Він являє собою модель біологічного нейрона, але не в сенсі способу функціонування, а лише здійснення відповідних перетворень над вхідними сигналами. Імпульсний нейрон виконує зважене підсумовування (інтегрування) вхідних сигналів до досягнення цією сумою певного заданого порогу, після чого на виході нейрона формується вихідний імпульс, а зважена сума обнулюється.

Авторами була запропонована модель нейрона, яка містить порогові елемент, виконаний у вигляді стабілітрона, резистор та конденсатор, який під'єднаний паралельно до стабілітрона та резистора, вивід стабілітрона є виходом моделі, два фотодіоди та світловипромінювач, джерело живлення [11]. На рис. 1 зображено схему запропонованої моделі нейрона. Вона містить конденсатор 1, стабілітрон 2, резистор 3, перший 4 та другий 5 фотодіоди, світловипромінювач 6, джерело живлення 11. Активним елементом моделі є стабілітрон 2, оптична апертура першого фотодіода 4 є входом 7 для всіх збуджувальних сигналів моделі нейрона, оптична апертура другого фотодіода 5 є входом 8 для всіх гальмівних сигналів моделі нейрона, оптична апертура світловипромінювача 6 є оптичним виходом 9 моделі нейрона, анод стабілітрона 2 з'єднаний електричним виходом 10 моделі нейрона [5].

Модель нейрона працює таким чином. Перший фотодіод 4 приймає збуджувальні вхідні оптичні сигнали, а другий фотодіод 5 приймає гальмівні вхідні оптичні сигнали. Збуджувальні вхідні оптичні сигнали перетворюються першим фотодіодом 4 в струм, що заряджає конденсатор 1, а гальмівні вхідні оптичні сигнали перетворюються другим фотодіодом 5 в струм, що розряджає конденсатор 1. Вихідний імпульс формується на резисторі 3 (електричний імпульс) та світловипромінювачі 6 (оптичний імпульс) в момент, коли напруга заряду конденсатора 1 під впливом вхідних сигналів досягає порогового значення, достатнього для збудження в стабілітроні 2 процесу лавинного множення. В момент досягнення порогу провідність стабілітрона 2 різко збільшується, в результаті чого на електричному

виході 10 виникає імпульс напруги, який затухає по мірі розряду конденсатора 1 (світловипромінювач 6 формує в цей час вихідний оптичний імпульс). Розрядження конденсатора 1 викликає запирання стабілітрона 2 і процес повторюється знов. Частота вихідних імпульсів моделі прямо пропорційна різниці між фотострумом першого фотодіода 4 та другого фотодіода 5 [11].

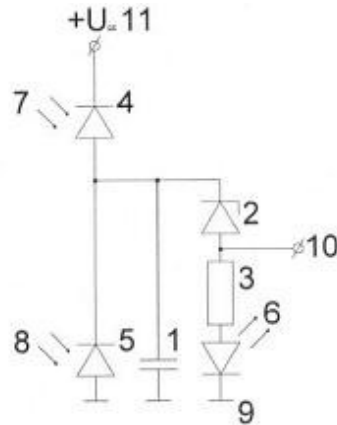


Рисунок 1 – Модель нейрона

Як збуджувальні, так і гальмівні сигнали моделі нейрону є оптичними, тобто мають однакову додатну полярність (як у біологічних нейронів) на відміну від відомих схем [3,4], де збуджувальні електричні сигнали повинні мати додатну полярність, а гальмівні електричні сигнали повинні мати від'ємну полярність. Наявність однакової полярності збуджувальних та гальмівних сигналів підвищує адекватність цієї моделі своєму біологічному прототипу.

Запропонована схема нейронного елемента дає змогу працювати з оптичними сигналами, що розширює функціональні можливості нейронного елемента та дозволяє мати збуджувальні та гальмівні сигнали однакової полярності, а це підвищує адекватність моделі до свого біологічного прототипу. Завдяки наявності оптичних входів та виходів дана модель може легко використовуватись при побудові імпульсних нейронних мереж з великою кількістю елементів та зв'язків між ними, оскільки організація великої кількості оптичних зв'язків реалізується набагато простіше, ніж електричних, за допомогою оптичних та голографічних засобів.

Моделювання схеми імпульсного нейронного елемента в середовищі NI Multisim

Для того, щоб зробити висновок про можливість застосування запропонованої схеми нейронного елемента на стабілітроні у нейронних мережах на її основі, потрібно перевірити відповідність функціонування цієї схеми та математичної LIF-моделі нейрону [5]. Для цього треба мати передатні характеристики обох моделей нейрону – фізичної моделі на стабілітроні [11] та математичної LIF-моделі нейрону [5]. Для отримання передатної характеристики нейронного елемента на стабілітроні було створено її комп'ютерну модель у програмному середовищі NI Multisim [12], яку представлено на рис. 2.

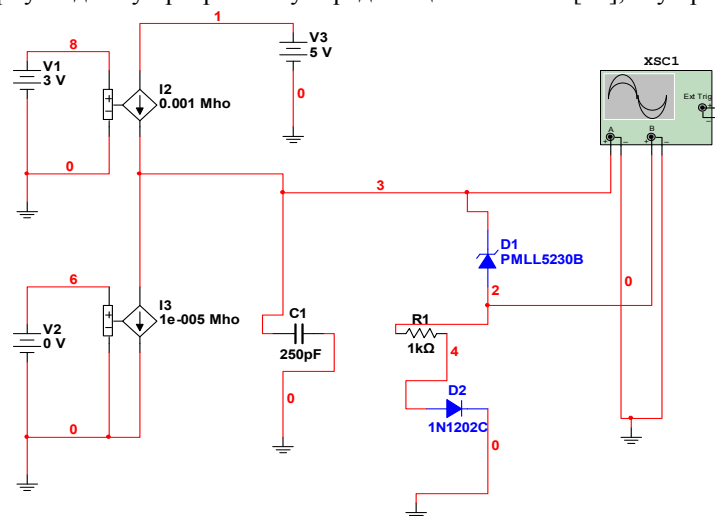


Рисунок 2 – Комп'ютерна модель схеми нейронного елемента на стабілітроні

Схема складається з джерела напруги збуджувального сигналу V1 та джерела напруги гальмівного сигналу V2, керованих напругою джерел струму I2 та I3, джерела живлення V3, конденсатора C1, стабілітрона D1, резистора R1 та світловипромінювача D2. Для контролю форми імпульсів використовується осцилограф. Внаслідок проведеного моделювання отримано залежність частоти вихідних імпульсів нейронного елемента від струму збудження. Комп'ютерне моделювання схеми нейронного елемента проводилось при таких параметрах схеми: V1=0...3V, V2=0V, V3=5V; коефіцієнт передачі керованого напругою джерела струму 0,001 Mho; конденсатор ємністю 250pF; резистор – 1 kΩ.

Порівняння передатних характеристик нейронів

Передатна характеристика нейронного елемента на стабілітроні отримана в попередньому пункті була порівняна із передатними характеристиками LIF-нейрону [5], яку було отримано в середовищі моделювання CSIM [13]. Рисунок 3 відображає відповідно дві передатні характеристики: схеми на стабілітроні та LIF-нейрону. Ці графіки дозволяють надалі визначити ступінь адекватності запропонованої схеми нейронного елемента на стабілітроні до LIF-нейрону. Як індикатор адекватності візьмемо середнє відносне відхилення графіка передатної характеристики запропонованої схеми нейрона на стабілітроні, отриманого в середовищі MULTISIM, від графіка передатної характеристики LIF-нейрону, отриманого у середовищі CSIM [13].

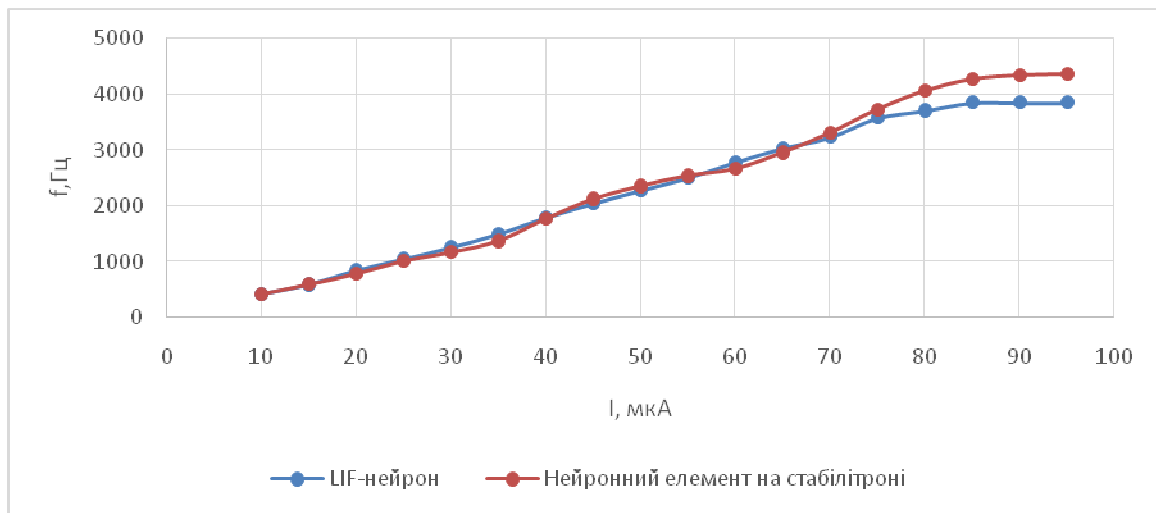


Рисунок 3 – Графік залежності передатних характеристик нейрону із середовищ CSIM та MULTISIM

Середнє відносне відхилення цих двох графіків розрахуємо за формулою (1):

$$b = \sum \frac{|(y_{ms} - y_{cs})|}{y_{cs}} \cdot \frac{1}{N} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де b – середнє відносне відхилення, y_{ms} – значення передатної характеристики запропонованої схеми нейрона на стабілітроні, отриманої в середовищі MULTISIM, y_{cs} – значення передатної характеристики LIF-нейрону, отриманого у середовищі CSIM, N – кількість значень вимірювань.

Отже, за допомогою формули (1), підставивши усі необхідні параметри, можна остаточно визначити середнє відносне відхилення:

$$b = 0,925539 \cdot \frac{1}{18} \cdot 100 = 5,14\%.$$

Цей результат свідчить про те, що передатна характеристика запропонованої схеми відрізняється від математичної моделі LIF-нейрону лише на 5,14%, що свідчить про високий ступінь їх адекватності.

Висновки

Проведене дослідження комп'ютерної моделі запропонованої схеми нейронного елемента на стабілітроні показало, що його передатна характеристика адекватна передатній характеристиці LIF-нейрону з точністю в межах 5,14%. Цедозволяє зробити висновок, що запропонована схема нейронного елемента може використовуватися для побудови апаратних реалізацій імпульсних нейронних мереж з великою кількістю елементів.

Перелік літературних джерел

1. Бардаченко В.Ф. Перспективи застосування імпульсних нейронних мереж з таймерним представленням інформації для розпізнавання динамічних образів / В.Ф. Бардаченко, О.К. Колесницький, С.А. Василецький - УСІМ.-2003-№6.- С. 73-82.
2. Kolesnytskyj O. K. Optoelectronic Implementation of Pulsed Neurons and Neural Networks Using Bispin-Devices / O. K. Kolesnytskyj, I. V. Bokotsey, S. S. Yaremchuk // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. – 2010. – Vol.19. – №2. – P.154–165. – ISSN 1060-992X.
3. DARPA SyNAPSE Program [Електронний ресурс] / Дхармендра Мода. — Режим доступу: <http://www.artificialbrains.com/darpa-synapse-program#256processor>
4. NeuroGrid Project. Grid technology for neuroscience [Електронний ресурс] / Andrew Simpson. — Режим доступу: <http://www.neurogrid.ac.uk/>
5. Gerstner W. Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity / Wulfram Gerstner, Werner M. Kistler. – Cambridge University Press, 2002. – 494p. – ISBN 0 521 89079 9 (paperback). – ISBN 0 521 81384 0 (hardcover). [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://diwww.epfl.ch/~gerstner/BUCH.html>. – ISSN 0-521-89079-9.
6. W. Maass, T. Natschlaeger, and H. Markram. Computational models for generic cortical microcircuits. In *Computational Neuroscience: A Comprehensive Approach*, J. Feng, editor, chapter 18, pages 575-605. Chapman&Hall/CRC, BocaRaton, 2004.
7. Maass W. Networks of spiking neurons: the third generation of neural network models / W. Maass // *Neural Networks*, 1997, №10. — P. 1659-1671. – ISSN 0893-6080.
8. Пат. №55921 України. Пристрій для моделювання нейрона / Колесницький О.К., Бокоцей І.В., Павлов С.М., Колесницька Г.О. Опубл. Бюл. №24, 27.12.2010.
9. Пат. №22956 України. Модель нейрона / Кожем'яко В.П., Колесницький О.К. Нізельський М.Б., Василецький С.А. Опубл. Бюл. №3, 5.05.98.
10. Бардаченко В. Ф. Таймерні нейронні елементи структури. Монографія / В. Ф. Бардаченко, О. К. Колесницький, С. А. Василецький. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005, 126 с. – ISBN 966-641-109-1.
11. Пат. 76924 Україна, МПК G 06 G 7/60. Модель нейрона / О. К. Колесницький, Ю. В. Левченко, Г. О. Колесницька, заявник і власник патенту Вінницький нац. технічн. ун-т – № 201207181; заявлено 13.06.12; опубл. 25.01.13, Бюл. №2.
12. Хернітер М.Е. Multisim. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств / М. Е. Хернітер – 2011 – С. 501.
13. CSIM: A Neural Circuit SIMulator Version 1.1 User Manual / The IGI LSM group. – Institute for Theoretical Computer Science, 2006. – 63p.

Інформація про авторів

Колесницький Олег Костянтинович, к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук ВНТУ.
Левченко Юрій Вікторович, студент групи ІКН-14мі, ВНТУ.