

ШТУЧНІ НЕЙРОННІ ОСЦИЛЯТОРИ

© Тимощук П.В., Патерега Ю.І., 2009

Наведено стислий аналіз деяких відомих штучних нейронних осциляторів. Описано декілька застосувань осциляторів такого типу. Обґрунтовано необхідність здійснення схемотехнічної реалізації таких осциляторів у сучасній аналоговій і цифровій елементних базах. Сформульовано відкриті питання в області штучних нейронних осциляторів.

Ключові слова – нейронний осцилятор, модель.

A brief analysis of some known models of artificial neural oscillators is given. Several applications of oscillators of such type are described. The necessity of implementation of such oscillators in modern analog and digital hardware is discussed. Open questions in the area of artificial neural oscillators have been formulated.

Keywords - neural oscillator, model.

Вступ

Як відомо, на кожному нейроні діють вхідні сигнали, які є вихідними сигналами інших нейронів, а також зовнішні (стимулюючі) сигнали. Якщо сума вхідних сигналів перевищує певний пороговий рівень, генерується послідовність імпульсів, інакше нейрони не формують імпульсів. Кількість імпульсів залежить від інтенсивності, тривалості вхідних сигналів, а також від внутрішніх властивостей нейрона [1].

Ритмічна поведінка притаманна більшості живих організмів [2]. Вона спостерігається в електрокардіографічних і електроенцефалографічних сигналах людини, ходьбі, дихальних циклах і добових ритмах, харчуванні. Цікавим аспектом такого явища є те, що воно є результатом складної взаємодії нейронів між собою і зовнішнім середовищем. Як наслідок, така поведінка може мати багату динаміку – від стану спокою до синхронізованої коливальної діяльності або нерегулярної, хаотичної просторово-часової динаміки.

Колівальна поведінка спостерігається в усіх нейронних системах. Ритми відіграють визначальну роль у функціонуванні нейронів в якості двигунів (так звана моторна активність нейонів), сенсорів, а можливо, навіть при виконанні ними пізнавальних функцій. Результати низки останніх експериментальних досліджень вказують на можливу роль нейронних осциляторів у візуальному сприйнятті, розпізнаванні запахів, формуванні пам'яті [3–5]. Механізми генерації ритмічних сигналів дуже різноманітні – починаючи від задаючих ритми окремих нейронів, мембранні властивості яких дозволяють їм діяти ритмічно, до великих мереж кори головного мозку (так званих кіркових мереж), де взаємодіють багато збуджувальних і затримувальних нейронів, відповідальних за ритмічну поведінку.

Колівальна природа патологій (наприклад, епілепсії і хвороби Паркінсона) добре відома і є предметом сучасних досліджень. Останнім часом багато уваги дослідників приділяється можливій ролі декількох різних кіркових ритмів (наприклад, у діапазоні гамма-частот (40 – 80 Гц)) у пізнавальних функціях. Сьогодні запропоновано низку теорій, згідно з якими може бути досягнуто поєднання сприйняття різних частин об'єкта шляхом використання так званих коливальних кодів [4, 6].

У системі функціонування органів нюху, а також у нервових клітинах кори головного мозку, відповідальних за візуальне сприйняття, були виявлені так звані послідовні коливання [7, 8].

Результати досліджень були узагальнені у вигляді теорії часової кореляції [9], згідно з якою у групах нейронів можуть формуватись синхронізовані коливання.

Пересування тварин (ходьба, біг, плавання і політ) базується на періодичних ритмічних рухах. Такими рухами керує біологічна нейронна мережа, яка називається центральним задаючим генератором (ЦЗГ) (central pattern generator (CPG)) [10]. ЦЗГ містить набори нейронних осциляторів, що розташовані у нервовому вузлі або спинному мозку. Під впливом так званих тонізуючих вхідних сигналів, які надходять від «керуючих нейронів», ЦЗГ формує ритмічну нервову діяльність. Під час такої ритмічної поведінки в результаті активації моторних нейронів виникають ритмічні рухи тварин. Частоту і фазу ритмічних рухів регулює сенсорний зворотний зв'язок [11]. ЦЗГ може адаптуватись до різного оточення і самостійно змінювати вид періодичної поведінки [10]. Зокрема, хребетні тварини (коні, кішки тощо) можуть змінювати вид свого пересування залежно від ситуації [12].

Іншим призначенням ЦЗГ є взаємодія або координація між кінцівками. Оскільки число ступенів свободи частин тіла, відповідальних за пересування, є дуже великим, то для забезпечення плавного пересування необхідна координація частин тіла. Таку координацію між кінцівками зумовлюють періодичні ритмічні рухи, керовані ЦЗГ [13]. Оскільки для плавного пересування необхідна координація частин тіла, ритмічні рухи, які керуються ЦЗГ, відіграють одну з головних ролей у пересуванні. М'язи, які відповідають за ці рухи, керуються вихідними сигналами нейронів, що, своєю чергою, керуються нейронними мережами головного і спинного мозку. ЦЗГ формує різноманітні регулярні ритми, які координують поведінку певних м'язів. Однією з фундаментальних ролей ЦЗГ у пересуванні хребетних є керування кожною їх кінцівкою. Внаслідок функціонування ЦЗГ, який приводить у дію кожен із суглобів, ритмічні рухи кожної кінцівки є стійкими.

На основі ЦЗГ запропоновано багато осциляторів, призначених для формування руху роботів [14, 15 - 21]. Зокрема, роботи, розроблені Кімурую [17], здатні до адаптації на нерівномірній місцевості за допомогою використання динаміки ЦЗГ. Біллард та Іджісерт застосували ЦЗГ для формування руху розважальних роботів [18]. Шан і Нагашіма запропонували використання ЦЗГ для створення гуманоїда [19]. Використання ЦЗГ для керування рухом у робототехніці має переваги, зокрема: 1) зменшується кількість обчислень, необхідних для керування рухом; 2) досягається автономність адаптації до різних середовищ у результаті зміни структури ЦЗГ і форми ритмів за допомогою використання так званої синаптичної пластичності.

Штучні нейронні осцилятори відіграють важливу роль у багатьох інших областях, зокрема, вони застосовуються для аналізу зображень [22].

У цій статті стисло проаналізовано деякі відомі моделі нейронних осциляторів. Обґрунтовано необхідність їх схемотехнічної реалізації в сучасній аналоговій і цифровій елементних базах. Сформульовано відкриті питання в області штучних нейронних осциляторів.

Моделювання штучних нейронних осциляторів

Існує низка методів моделювання штучних нейронних осциляторів, кожен з яких має свої переваги, обмеження і сфери застосувань [23–36]. Зокрема, у [23] описано модель неперервного часу нейронної осциляторної комірки у вигляді програмованої нейронної схеми. Модель представлено у вигляді імпульсного нейронного осцилятора гістерезисного типу зі збуджувальними та затримувальними властивостями, що залежать від суми вхідних сигналів, яка може перевищувати (або ні) певний пороговий рівень спрацювання [24]. У загальному випадку модель такого нейрона описується диференціальним рівнянням першого порядку з розривною правою частиною вигляду [25]:

$$C \frac{dx}{dt} = -G_x x - G_H H(x) - G_u u, \quad y = x \quad (1)$$

де u , y – вхідний та вихідний сигнали нейрона відповідно, x – внутрішня змінна стану, C , G_x , G_H і G_u – невід'ємні константи, $H(x)$ – активаційна функція гістерезисного типу, яка представляється у вигляді:

$$H(x) = \begin{cases} H_+, & \text{if } x > x_+ \\ -H_-, & \text{if } x < -x_- \\ [H_+, -H_-], & \text{if } -x_- < x < x_+ \\ [H_+, -H_-], & \text{if } x = -x_- \text{ or } x = x_+ \end{cases} \quad (2)$$

Схемотехнічна реалізація аналогового нейронного осцилятора, який описується моделлю (1), базується на так званому операційному транспровідному підсилювачі (ОТП), керованому напругою або струмом (рис. 1). Для збільшення діапазону зміни вхідної напруги у випадку лінеаризованого

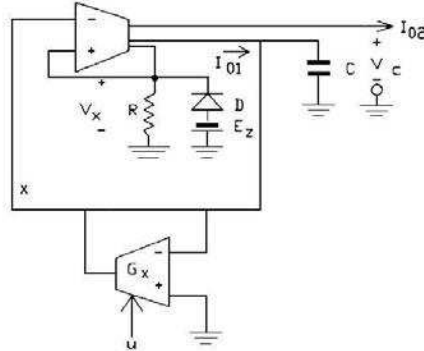


Рис. 1. Схемотехнічна реалізація аналогового нейронного осцилятора гістерезисного типу

ОТП, який реалізує активаційну функцію $G_x(u)$, використовуються розміщені в чіпі лінеаризуючі діоди, а також додатковий резистивний атенуатор [28].

Існують й інші моделі нейронів з подібними математичними описами. Зокрема, у них замість доданка $-G_H H(x)$ використовується вираз $-\sum_{j=1}^p D_{ji} f_j(x)$, де D_{ji} – вагова функція, а $f_j(\cdot)$ – нелінійні функції, які накладають обмеження і можуть розглядатись, як порогові активаційні функції. На відміну від інших аналогових нейронних схем, де важко змінювати параметри, нейронна схема з рис. 1 передбачає можливість зміни параметрів за певними алгоритмами [26, 27, 29].

Багато штучних нейронних мереж було запропоновано в якості моделей ЦЗГ [30, 31]. Зокрема, в [10] описано просту модель ЦЗГ, яка містить два релаксаційні осцилятори. У [32], як модель нейронного осцилятора, вибрано модель Амарі-Хопфілда, що містить збуджувальний і затримувальний нейрони із збуджувальними й затримувальними зв'язками. Структурно-функціональна схема, отримана за такою моделлю, показана на рис. 2.

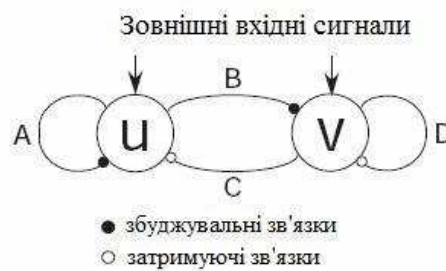


Рис. 2. Структурно-функціональна схема, отримана за моделлю Амарі-Хопфілда

Динаміка станів моделі описується системою диференціальних рівнянь вигляду:

$$\begin{cases} \tau \dot{u} = -u + Af_\mu(u) - Cf_\mu(v) + S_u(t); \\ \tau \dot{v} = -v + Bf_\mu(u) - Df_\mu(v) + S_v(t), \end{cases} \quad (3)$$

де u і v – стани збуджувальних і затримувальних нейронів відповідно. Динаміку станів моделі (3) визначають параметри А, В, С і D. Функції $S_u(t)$ і $S_v(t)$ описують зовнішні вхідні сигнали. Так звана функція перетворення $f_\mu(x)$ описується залежністю:

$$f_{\mu}(x) = \frac{1 + \tanh(\mu x)}{2}, \quad (4)$$

де $\tanh(\mu x)$ – гіперболічний тангенс або сигмоїдна функція, μ – керуючий параметр. Модель Амарі-Хопфілда отримують шляхом афінного перетворення моделі Вілсона-Кована, яка описує функціонування нейронів кори головного мозку [33]. Тому за якісними властивостями обидві моделі, динаміка яких детально вивчена, еквівалентні. Залежно від значень параметрів A , B , C і D та зовнішніх сигналів $S_u(t)$ і $S_v(t)$ модель Амарі-Хопфілда може генерувати періодичні коливання в автоматичному режимі.

Для отримання нейронних коливальних систем використовується загальноприйнятий спосіб з'єднання осциляторів, який полягає в їхньому попарному сполученні. Для формування коливань вихідний сигнал осцилятора у вигляді зворотного зв'язку подається на його вхід. Як правило, схема зворотного зв'язку є лінійною, а осцилятор – нелінійним.



Рис. 3. Структурно-функціональна схема коливальної системи

На рис. 3 показано структурно-функціональну схему такої коливальної системи. Аналіз перехідних процесів такої спареної системи є доволі складним, однак може бути виконаний у частотній області. Якщо $G(j\omega)$ – частотна характеристика схеми зворотного зв'язку, а $N(j\omega, A)$ – лінеаризована частотна характеристика осцилятора на частоті ω при амплітуді вхідних сигналів A , то стійкі коливання можуть бути отримані тільки тоді, коли коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку дорівнює одиниці або виконується співвідношення

$$N(j\omega, A)G(j\omega) = 1. \quad (5)$$

Графічне розв'язання рівняння (5) дозволяє оцінити можливості систем, які приводяться в рух такого типу осциляторами, і їхнього регулювання. Шляхом чисельного аналізу, комп'ютерного моделювання і фізичних експериментів підтверджено коректне функціонування такої коливальної системи. Показано, що система може генерувати стійкі ритмічні сигнали в зашумлених середовищах [34].

В останні роки багато дослідників у контролерах, які використовуються в робототехніці для керування процесом пересування, застосовують ЦЗГ. Більшість ЦЗГ контролерів були розроблені з використанням цифрових процесорів, які можуть функціонувати з високою точністю, однак споживають багато енергії і є складними з точки зору схмотехнічної реалізації. Для зменшення споживання енергії було спроектовано нейронну схему аналогової осциляторної комірки, яка була покладена в основу функціонування ЦЗГ контролера [33]. Схема розроблена на базі моделі Амарі-Хопфілда, яку зручно реалізувати в аналоговій елементній базі завдяки своїй простій функції перетворення. Така схема містить так звані фундаментальний схемний прототип, наприклад, диференціальну пару, дзеркало струму і RC-схему. Оскільки МОН-транзистори, які входять до такої схеми, функціонують нижче порогового рівня (у так званій підпороговій зоні), це дає змогу зменшити споживання енергії. Сфера застосувань штучних нейронних осциляторів у робототехніці простягається від керування процесом пересування до регулювання руху рук роботів. Осцилятори можуть гарантувати стійку динаміку системи при зміні або збуреннях її параметрів. Одним з обмежень існуючих осциляторів такого типу є те, що їх дуже складно налагоджувати [17–19, 22].

Висновки

У статті розглянуто деякі відомі моделі штучних нейронних осциляторів. Необхідність моделювання осциляторів такого типу зумовлена наявністю коливальних процесів, які спостерігаються в біології, нейрофізіології, медицині, інженерії і багатьох інших галузях. Оскільки такі коливання лежать в основі фізіологічних механізмів більшості живих організмів, результати досліджень в області штучних нейронних осциляторів становлять значний інтерес.

У мережах взаємозв'язаних осциляторів для досягнення їхнього узгодженого функціонування необхідною є синхронізація їх коливань. Синхронізовані коливання на стадії їх формування можна пояснити за допомогою аналізу у фазовому просторі [35].

Як можна побачити з огляду літератури, існують різні моделі, які описують динаміку станів штучних нейронних осциляторів. Однак, лише незначна їх частина реалізована фізично в сучасній аналоговій або цифровій елементних базах, кожна з яких має свої переваги і обмеження. Зокрема, цифрові процесори можуть функціонувати з високою точністю і надійністю, однак вони споживають багато енергії та вимагають багато місця на чіпі. Аналогові схеми відзначаються високою швидкістю, здатністю обробляти сигнали з широким діапазоном їх зміни, проте характеризуються нижчою точністю оброблення сигналів. Тому завдання схемотехнічної реалізації штучних нейронних осциляторів у сучасних як аналоговій, так і цифровій елементних базах є актуальними. На завершення відзначимо, що сьогодні для кожного з існуючих аналогових і цифрових нейронних осциляторів залишаються нерозв'язаними певні задачі. Серед них можна виділити такі:

1. Стабільність функціонування осциляторів.
2. Збіжність коливань осциляторів до встановлених режимів.
3. Однозначність коливань осциляторів.
4. Визначення діапазонів зміни значень параметрів осциляторів для режимів збудження, генерації, затухання коливань, а також стану спокою.
5. Керування амплітудою і частотою коливань.
6. Аналіз осциляторів у фазовому просторі.
7. Узагальнення моделей осциляторів на випадок генерації амплітудно-, частотно-модульованих, а також випадкових коливань, які спостерігаються у біологічних, нейрофізіологічних, медичних і технічних системах.
8. Узагальнення теоретичних результатів на випадок мережі, що містить багато нейронних осциляторів.
9. Синхронізація коливань осциляторів.
10. Реалізація мереж осциляторів у сучасних програмних комплексах, зокрема, в Cadence.
11. Схемотехнічна реалізація мереж осциляторів, зокрема, на основі ПЛІС.
12. Спрощення моделей і відповідних схем осциляторів.
13. Порівняльний аналіз існуючих осциляторів.
14. Застосування осциляторів в різних галузях науки і техніки.

Вищеперелічені завдання є актуальними і будуть предметом подальших досліджень в області штучних нейронних осциляторів.

1. B. Linares, E. Sánchez, A. Rodríguez, and J. L. Huertas, "A programmable neural oscillator cell," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 36, pp. 756–761, 1989. 2. L. Glass, M.C. Mackey, *From Clocks to Chaos: The Rhythms of Life*, New York: Princeton University Press, 1990. 3. W. Singer, "Synchronization of cortical activity and its putative role in information processing and learning," *Ann Rev Physiol*, vol. 55, pp 349– 74, 1993. 4. C.M. Gray, "Synchronous oscillations in neuronal systems: mechanisms and functions," *J Comput Neurosci*, vol. 1, pp. 11– 38, 1994. 5. G. Patel, J. Hollemam and S. Deweerth, "Analog VLSI Model of Intersegmental Coordination with Nearest Neighbor Coupling," *In Adv. Neural Information Processing.*, vol. 10, pp.710-725, 1998. 6. G.B. Ermentrout, D. Kleinfeld, *Traveling electrical*

waves in cortex: insights from phase dynamics and speculation on a computational role. *Neuron* 2001; vol.29, pp.33 – 44. 7. Freeman W.J. Spatial properties of an EEG event in the olfactory bulb and cortex. — *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, vol. 44, No. 5, pp. 586–605, 1978. 8. R. Eckhorn, R. Bauer, W. Jordan, M. Brosch, W. Kruse, M. Munk, H.J. Retböck, Coherent oscillations: A mechanism of feature linking in the visual cortex?, *Biol. Cybern.*, vol. 60, No. 2, pp. 265–280, 1988. 9. C. Von der Malsburg, W. Schneider, A neural cocktail-party processor, *Biological Cybernetics*, vol. 54, pp. 29– 40, 1986. 10. F. Delcomyn, *Foundations of Neurobiology*, W.H. Freeman and Co, New York, 1997. 11. M.Arbib, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, Second Edition. Ed., USA, MIT PRESS, chapter 3, Press 2002. 12. J. Nishii, "Legged animals select the optimal locomotor pattern based on energetic cost," *Biological Cybernetics.*, vol.83, pp.435-442, 2000. 13. K. Nakada, T. Asai, Y. Amemiya, "An analog neural oscillator circuit for locomotion controller in quadruped walking robot," *Neural Networks*, vol.2, pp. 983 - 988, 20-24 July 2003. 14. P.L. Buono and M. Golubitsky. Models of central pattern generators for quadruped locomotion: I. primary gaits. *J.Math. Biol.* vol. 42 (4), pp. 291-326, 2001. 15. Schoner G, Jiang WY, Kelso JA. A synergetic theory of quadrupedal gaits and gait transitions. *J Theor Biol.* Feb 9; vol. 142(3), pp. 359-91, 1990. 16. S. Crook and A Cohen. Central pattern generators. In Bower and Beeman, editors, *The Book of GENESIS: A workbook of tutorials for the GEneral NEural SIMulation System*, Chapter , 1995. 17. H. Kimura, Y. Fukuoka and K. Konaga, "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot by Using Neural System Model," *ADVANCED ROBOTICS*, vol.15, No.8, pp.859-876, 2001. 18. A. J. Ijspeert, A. Billard, "Biologically inspired neural controllers for motor control in a quadruped robot," In *Proc. International Joint Conference on Neural Networks*, pp.3-4, 2000. 19. J. Shan, F. Nagashima, "Neural Locomotion Controller Design and Implementation for Humanoid Robot HOAP-1", In *Proc. 20th RSJ conference*, pp.2, 2002. 20. G. Patel, J. Hollemam and S. Deweerth, "Analog VLSI Model of Intersegmental Coordination with Nearest Neighbor Coupling," In *Adv. Neural Information Processing.*, vol. 10, pp.710-725, 1998. 21. M. A. Lewis, M. J. Hartmann, R. Etienne-Cummings, A. H. Cohen, "Control of a robot leg with an adaptive VLSI CPG chip," *Neurocomputing.*, vol.38-40, pp 1409-1421, 2001. 22. D. Wang, *The time dimension for scene analysis*, *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 16, No. 6, pp. 1401–1426, 2005. 23. B. Linares-Barranco, E. Sanchez-Sinencio, A. Rodriguez-Vazquez, J.L Huertas, "A programmable neural oscillator cell," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 36, Issue 5, pp.756 – 761, May 1989. 24. G. Kiruthi, R. C. Ajmera, R. Newcomb, T. Yami, H. Yazdani, "A hysteretic neural type oscillator," in *Proc. IEEE/ISCAS*, vol. 3, pp. 1173-1175, May 1983. 25. F. C. Hoppensteadt, *An Introduction to the Mathematics of Neurons*. New York: Cambridge Univ. Press, 1986. 26. D. W. Tank, J. J. Hopfield, "Simple neural optimization networks: An A/D converter, signal decision circuit, and a linear programming circuit," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-33, pp. 533-541, May 1986. 27. A. F. Murray, A. V. W. Smith, "Asynchronous VLSI neural networks using pulse-stream arithmetic," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 23, pp. 688-697, June 1988. 28. VTC Incorporated, "High Performance Integrated Circuits," *Data Book (supplement) 1987*. 29. C. Koch, J. Marroquin, and A. Yuille, "Analog 'neural' networks in early vision," in *Proc. Natl. Acad. Sci. (Biophysics)*, vol. 83, pp. 4263-4267, June 1986. 30. K. Matsuoka, "Mechanism of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators," *Biological Cybernetics*, vol,56, pp.345-353, 1987. 31. G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu, "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," *Biological Cybernetics.*, vol. 65, pp.147-159, 1991. 32. S. Amari, "Characteristic of the random nets of analog neuron-like elements," *IEEE trans. on System, Man and Cybernetics*, SMC-2, pp.643-657, 1972. 33. H. R. Wilson, J. D. Cowan, "Excitatory and Inhibitory interactions in localized populations of model neurons," *Biophys. J.*, vol. 12, pp.1-24, 1972. 34. Williamson M.M., "Designing rhythmic motions using neural oscillators," *Intelligent Robots and Systems*, 1999. *IROS '99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference*, vol. 1, pp: 494-500, 1999. 35. A.T. Winfree, *Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators*, *J. Theoret. Biol.*, vol. 16, No. 1, pp. 15–42, 1967.