

Д.Ю. Зубенко, С.О. Закурдай, О.В. Донець, В.В. Ліньков

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ЗВ'ЯЗКІВ В ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖАХ

Аналіз стабільності для загального класу випадкових імпульсних та комутаційних нейронних мереж, що показано в цій роботі, в якій підлягають дослідженню як безперервна динаміка, так і імпульсивні стрибки випадкових порушень. Для пояснення та висвітлення ефективності розроблених результатів використовуються два числові приклади. Завдяки збільшенню їх застосування в управлінні мережею, енергосистеми тощо, теорії управління імпульсивними і системами комутації були розглянуті в данній статті.

**Ключові слова:** штучні нейронні мережі, електротранспорт, чисельні алгоритми, надійна стабільність зв'язків

### Постановка проблеми

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Незважаючи на їх широке застосування в різних областях наприклад штучний інтелект, розпізнавання мови та комп'ютерне моделювання, питання аналізу стабільності для нейронних мереж є найбільш первинний і фундаментальний, який привертая інтенсивну увагу протягом останніх десятиліть, [1–10] та посилання в ній.

Добре відомо, що імпульсні та комутаційні системи формулюються комбінуванням імпульсних систем із системами комутації [11–14] - це більш комплексна модель нелінійних систем [14]. Завдяки збільшенню їх застосування в управлінні мережею, енергосистеми тощо, теорії управління імпульсивними і системами комутації були гарячою темою дослідження в минулому десятилітті. Плідні результати досліджень щодо аналізу стабільності та управління конструкцією імпульсних та комутаційних систем є, такі як стабільність вхідного стану [13], стабільність з обмеженим часом [15], керованість та спостережливість [2-7] та дизайн управління зворотним зв'язком [8-15] тощо. З іншого боку, це також заслуговує уваги.

### Мета статті

Розробка методів підвищення стабільності зв'язків в штучних нейронних мережах.

### Виклад основного матеріалу

В якості вхідних даних мережі Хопфілда можна використовувати двійкові, але тут ми будемо використовувати +1 для позначення стану "включено" і -1 - для стану "вимкнено".

Комбінований введення елемента обчислюється за формулою:

$$net_i = \sum_{i=1}^n s_i w_{ij}$$

де  $S_i$ , позначає стан елемента з номером  $i$ .

У цій роботі розглядаються наступні випадкові імпульсивні та комутація нейронної мережі у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -A_{\delta(t_k)} x + B_{\delta(t_k)} f_{\delta(t_k)}(x) + g_{\delta(t_k)}(x, t) \eta(t), t \in [t_k, t_{k+1}), \\ \delta x(t_{k+1}) &= h_{\delta(t_k)}(t_{k+1}, x(t_{k+1}), \chi_{k+1}) \\ x(t_0) &= x_0, \delta(t_0) = \delta_0 \end{aligned} \quad (1)$$

де  $x(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$  позначає вектор стану; перемикання сигналу  $\delta(t)$  є правильним безперервним і приймає значення кінцевих значень  $I = \{1, 2, \dots, m\}$ .

Рішення при виборі функції, яку визначено в теоремі (1), і обчислити його похідну:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t, x) &= \frac{\psi_i^{\bar{p}(t)} \ln \psi_i}{t_{k+1} - t_k} x^T Q_{id}(t) x + \frac{\psi_i^{\bar{p}(t)} L_i}{t_{k+1} - t_k} x^T (Q_{(id+1)} - Q_{id}) x + \\ &+ 2\psi_i^{\bar{p}(t)} x^T Q_{id}(t) (-A_i x + B_i f_i(x) + G_i \eta(t)) \leq \\ &\leq \psi_i^{\bar{p}(t)} \ln \psi \left( \frac{\bar{\alpha}_{i1}(t)}{\delta_1} + \frac{\bar{\alpha}_{i2}(t)}{\delta_2} \right) x^T Q_{id}(t) x + \\ &+ \psi_i^{\bar{p}(t)} \ln \psi \left( \frac{\bar{\alpha}_{i1}(t)}{\delta_1} + \frac{\bar{\alpha}_{i2}(t)}{\delta_2} \right) x^T (Q_{(id+1)} - Q_{id}) x + \\ &+ \psi_i^{\bar{p}(t)} x^T (-Q_{id}(t) A_i + A_i Q_{id}(t)) x + \\ &+ 2\psi_i^{\bar{p}(t)} x^T Q_{id}(t) B_i f_i(x) + \\ &+ 2\psi_i^{\bar{p}(t)} x^T Q_{id}(t) G_i P_i^{-1} G_i^T Q_{id}^T(t) x + \\ &+ m_{10} |\eta(t)|^2, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $m_{10} = \max_{i \in T} \{ \psi, \lambda_{\max}(P_i) \}$

В даному виразі, варто відзначити, що всі критерії виражені в єдиній формі, в якій враховуються ефекти стабілізуючих та імпульсів і дестабілізуючих - неактивних імпульсів.

### Висновки

Розроблено ряд методів для підвищення стабільності зв'язків в штучних нейронних мережах.

Дослідницький інтерес полягає в розробці відповідного фільтра для оцінки невідомої інформації про стан невизначеності з використанням нелінійного методу розв'язки.

### Література

1. S. Xu, J. Lam, D.W. Ho (2006) A new LMI condition for delay-dependent asymptotic stability of delayed Hopfield neural networks, *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs* 53 (3) 230–234.
2. S. Xu, J. Lam, D.W. Ho, Y. Zou, (2005) Novel global asymptotic stability criteria for delayed cellular neural networks, *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs* 52 (6) 349–353.
3. Mykhalkiv, S., Ravlyuk, V., Khodakivskyi, A., Bereznyi, V. (2018) Identification of axle-box bearing faults of freight cars based on minimum entropy deconvolution and squared envelope spectra. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 167 — 173. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19729>
4. B. Zhang, S. Xu, G. Zong, Y. Zou, (2009) Delay-dependent exponential stability for uncertain stochastic Hopfield neural networks with time-varying delays, *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.* 56 (6) 1241–1247.
5. Q. Ma, S. Xu, Y. Zou, (2011a) Stability and synchronization for Markovian jump neural networks with partly unknown transition probabilities, *Neurocomputing* 74 (17) 3404–3411.
6. Q. Ma, S. Xu, Y. Zou, J. Lu, (2011b) Stability of stochastic Markovian jump neural networks with mode-dependent delays, *Neurocomputing* 74 (12–13) 2157–2163.
7. K. Cui, J. Lu, C. Li, Z. He, Y. Chu, (2019) Almost sure synchronization criteria of neutral-type neural networks with

Lévy noise and sampled-data loss via event-triggered control, *Neurocomputing* 326 (24) 113–120.

8. J. Lian, J. Wang, (2015) Passivity of switched recurrent neural networks with time-varying delays, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 26 (2) 357–366.

9. J. Liu, G. Zong, (2009) New delay-dependent asymptotic stability conditions concerning BAM neural networks of neutral type, *Neurocomputing* 72 (10–12) 2549–2555.

10. M. Dai, J. Xia, H. Xia, H. Shen, (2019) Event-triggered passive synchronization for Markov jump neural networks subject to randomly occurring gain variations, *Neurocomputing* 331 403–411.

11. X. Li, J. Wu, (2018) Sufficient stability conditions of nonlinear differential systems under impulsive control with state-dependent delay, *IEEE Trans. Autom. Control* 63 (1) 306–311.

12. Y. Yin, X. Zhao, X. Zheng, (2017) New stability and stabilization conditions of switched systems with mode-dependent average dwell time, *Circuits Syst. Signal Process.* 36 (1) 82–98.

13. Y. Yin, G. Zong, X. Zhao, (2017) Improved stability criteria for switched positive linear systems with average dwell time switching, *J. Frankl. Inst.* 354 (8) 3472–3484.

14. X. Zhao, P. Shi, Y. Yin, S.K. Nguang, (2017) New results on stability of slowly switched systems: a multiple discontinuous Lyapunov function approach, *IEEE Trans. Autom. Control* 62 (7) 3502–3509.

15. R. Wang, L. Hou, G. Zong, S. Fei, D. Yang, (2018) Stability and stabilization of continuous-time switched systems: A multiple discontinuous convex Lyapunov function approach, *Int. J. Robust Nonlinear Control*, doi:10.1002/rnc.4449.

### References

1. S. Xu, J. Lam, D.W. Ho (2006) A new LMI condition for delay-dependent asymptotic stability of delayed Hopfield neural networks, *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs* 53 (3) 230–234.
2. S. Xu, J. Lam, D.W. Ho, Y. Zou, (2005) Novel global asymptotic stability criteria for delayed cellular neural networks, *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs* 52 (6) 349–353.
3. Mykhalkiv, S., Ravlyuk, V., Khodakivskyi, A., Bereznyi, V. (2018) Identification of axle-box bearing faults of freight cars based on minimum entropy deconvolution and squared envelope spectra. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 167 — 173. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19729>
4. B. Zhang, S. Xu, G. Zong, Y. Zou, (2009) Delay-dependent exponential stability for uncertain stochastic Hopfield neural networks with time-varying delays, *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.* 56 (6) 1241–1247.
5. Q. Ma, S. Xu, Y. Zou, (2011a) Stability and synchronization for Markovian jump neural networks with partly unknown transition probabilities, *Neurocomputing* 74 (17) 3404–3411.
6. Q. Ma, S. Xu, Y. Zou, J. Lu, (2011b) Stability of stochastic Markovian jump neural networks with mode-dependent delays, *Neurocomputing* 74 (12–13) 2157–2163.
7. K. Cui, J. Lu, C. Li, Z. He, Y. Chu, (2019) Almost sure synchronization criteria of neutral-type neural networks with

Lévy noise and sampled-data loss via event-triggered control, *Neurocomputing* 326 (24) 113–120.

8. J. Lian, J. Wang, (2015) Passivity of switched recurrent neural networks with time-varying delays, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 26 (2) 357–366.

9. J. Liu, G. Zong, (2009) New delay-dependent asymptotic stability conditions concerning BAM neural networks of neutral type, *Neurocomputing* 72 (10–12) 2549–2555.

10. M. Dai, J. Xia, H. Xia, H. Shen, (2019) Event-triggered passive synchronization for Markov jump neural networks subject to randomly occurring gain variations, *Neurocomputing* 331 403–411.

11. X. Li, J. Wu, (2018) Sufficient stability conditions of nonlinear differential systems under impulsive control with state-dependent delay, *IEEE Trans. Autom. Control* 63 (1) 306–311.

12. Y. Yin, X. Zhao, X. Zheng, (2017) New stability and stabilization conditions of switched systems with mode-dependent average dwell time, *Circuits Syst. Signal Process.* 36 (1) 82–98.

13. Y. Yin, G. Zong, X. Zhao, (2017) Improved stability criteria for switched positive linear systems with average dwell time switching, *J. Frankl. Inst.* 354 (8) 3472–3484.

14. X. Zhao, P. Shi, Y. Yin, S.K. Nguang, (2017) New results on stability of slowly switched systems: a multiple discontinuous Lyapunov function approach, *IEEE Trans. Autom. Control* 62 (7) 3502–3509.

15. R. Wang, L. Hou, G. Zong, S. Fei, D. Yang, (2018) Stability and stabilization of continuous-time switched systems: A multiple discontinuous convex Lyapunov function approach, *Int. J. Robust Nonlinear Control*, doi:10.1002/rnc.4449.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.Ф. Смирний, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна.

**Автор:** ЗУБЕНКО Денис Юрійович

доцент, к.т.н.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – Denis04@ukr.net

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6736-7849>

**Автор:** ЗАКУРДАЙ Світлана Олександрівна

доцент, к.т.н.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – lanyssia@gmail.com

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7927-8413>

**Автор:** ДОНЕЦЬ Олександр Вадимович

доцент, к.т.н.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – aleksvadds@gmail.com

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6736-7849>

**Автори:** ЛІНЬКОВ Віктор Васильович

доцент, к.т.н.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – Denis04@ukr.net

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0246-0513>

## INCREASING COMMUNICATION STABILITY IN ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

D. Zubenko, S. Zakurdai, J. Donec, V. Linkov

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

*The problem of stability analysis for the general class of random pulsed and switching neural networks is presented in this paper, which is to be investigated both continuous dynamics and impulsive jumps of random disturbances. Two numerical examples are used to explain and highlight the effectiveness of the results developed. The purpose of this article is to provide a comprehensive overview of studies, including continuous time and discrete time models for solving various problems, and their application in motion planning and superfluous manipulator management, chaotic system tracking, or even population control in mathematical biological sciences. Considering the fact that real-time performance is in demand for time-varying problems in practice, analysis of the stability and convergence of various models with continuous time is considered in a unified form in detail. In the case of solving the problems of discrete time, procedures are summarized for how to discriminate a continuous model and methods for obtaining an accuracy decision.*

*Due to its strong ability to extract features and autonomous learning, neural networks are rooted in many industries, for example, neuroscience, mathematics, informatics and engineering, transport, etc. Despite their widespread use in various fields, such as artificial intelligence, language recognition, and computer simulation, the issue of neural network stability analysis is the most primary and fundamental that has attracted intense attention in recent decades, and references therein.*

*It is well known that pulse and switching systems are formulated by combining pulse systems with switching systems, which is a more complex model of nonlinear systems. With their increasing use in network management, power systems, and the like, impulse control theory and switching systems have been a hot topic of research for the past decade. The fruitful results of research on stability analysis and control design of pulse and switching systems such as input stability, time-limited, controllability and observation and feedback control design, etc. On the other hand, it is also noteworthy.*

**Keywords:** Technical analysis of the neural network, electric transport, numerical algorithms, reliable stability