

**Ярослав Кириленко¹, Богдан Воробйов², Сергій Сенченко³, Юрій Кутовий⁴,
Лю Хань⁵**

¹асистент кафедри автоматизовані електромеханічні системи
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)
E-mail: Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>

²доктор філософії, завідувач кафедри автоматизовані електромеханічні системи
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)
E-mail: bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0264-354X>

³аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)
E-mail: Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2471>

⁴кандидат технічних наук, професор кафедри автоматизовані електромеханічні системи
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)
E-mail: Yaroslav.Likhno@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7082-7562>

⁵аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)
E-mail: seanhanzi@aliyun.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8182-0040>

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖІ

У статті представлено результати науково-методичного дослідження синтезу нейромережевого контролера та розрахунків умов виникнення фрикційних автоколивань в електроприводі рейкових транспортних засобів таких як: магістральні електровози, електропоїзди приміського сполучення, шахтні електровози, трамваї, поїзди метро та інші види транспорту. Проведені дослідження показали можливість побудови інтелектуальних систем управління, на базі прямо спрямованих нейронних мереж з сигмоїдальними активаційними функціями нейронів прихованого шару структури NN3-20-1. Такі системи, на відміну від класичних, мають хороші демпфуючі властивостями, що перешкоджає виникненню коливальних або автоколивальних динамічних режимів. Застосування нейронних мереж для управління електромеханічними системами не призводить до підвищення астатизму по впливу, що збурує, тому в даній системі не спостерігається статична помилка швидкості другої маси, яка становить 0,7%.

Ключові слова: Нейромережева система керування, генетичний алгоритм, асинхронний двигун, електропривод, перехідні процес, характеристика зціплення.

Актуальність теми дослідження. Залізничний транспорт використовують у всіх видах пасажирського та вантажного транспорту. До них відносяться магістральні електровози, електропоїзди приміського сполучення, шахтні електровози, трамваї, поїзди метро та інші види транспорту.

Пробуксовка коліс локомотивів і фрикційні авто-коливання погіршують ряд експлуатаційних та енергетичних показників залізничного транспорту. Тому розробка сучасних систем управління, які усувають ці проблеми, є актуальним завданням

Аналіз останніх досліджень та публікацій: Дослідження пускових режимів електроприводу (ЕП) магістрального електровоза ДСЗ виконані в [1] проведені при допущенні, що розрахункова схема механічної частини одномасова і не містить пружних зв'язків в кінематичній ланці. У водночас у роботах Штенвольфа Л.І. [2], Мінова Д.К. [3], Клепікова В.Б [4] розглянуті двомасові моделі ЕП, а, отже, при розробці моделей систем управління для асинхронного тягового ЕП необхідно враховувати маси електровоза і причіпних вагонів. У такій системі, при певних поєднанні параметрів ЕП [5], можливе виникнення коливального або автоколивального процесу, характер якого бути обумовлений як не лінійністю характеристики навантаження, так і наявністю пружного зв'язку.

Метою статті є дослідження двомасової електромеханічної системи магістрального електровоза ДСЗ, виявлення умов при яких в ній збуджується автоколивання, синтез нейрорегулятора, що забезпечує усунення автоколивальних режимів при будь-яких поєднаннях параметрів ЕП.

Виклад основного матеріалу. Для магістрального електровоза, внаслідок інерційності лінійно рухомих мас, можна вважати швидкість другої маси рівної швидкості ковзання, що дозволяє скористатися структурною схемою (рис. 1).

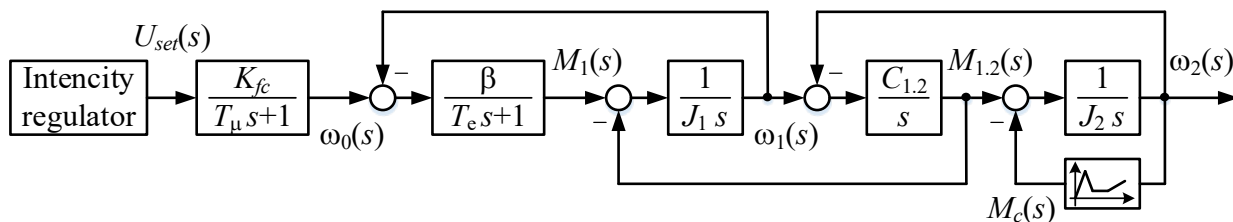


Рисунок 1 – Структурна схема двомасового ЕП електровоза ДСЗ

Структурна схема отримана за умови, що електромагнітна частина асинхронного двигуна і перетворювач частоти представлені аперіодичними ланками, характеристика зчеплення містить висхідну і падаючу ділянку, задатчик інтенсивності (ЗІ), що забезпечує лінійний закон зміни керуючого впливу. Імітаційна модель ЕП в MATLAB/Simulink (рис. 2).

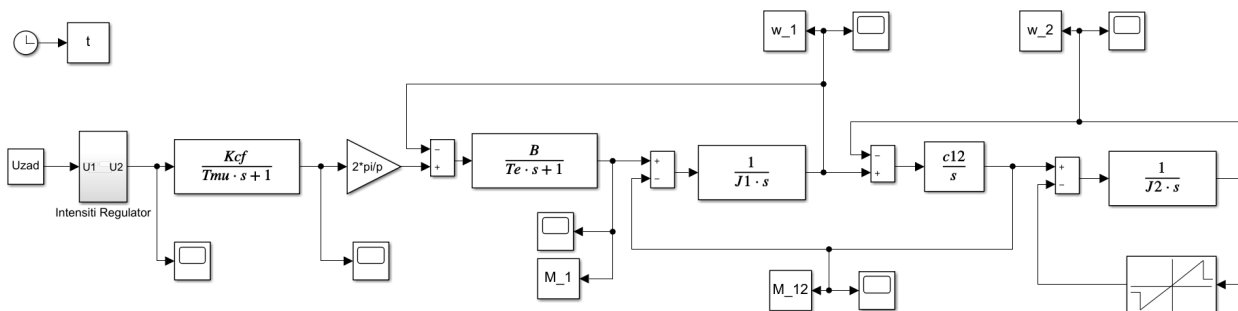


Рис.2. Імітаційна модель двомасового ЕП електровоза ДСЗ

Попередні розрахунки пускових режимів для типових умов завантаження електровоза ДСЗ показали, що в системі виникають автоколивання. Результат розрахунку (рис. 3).

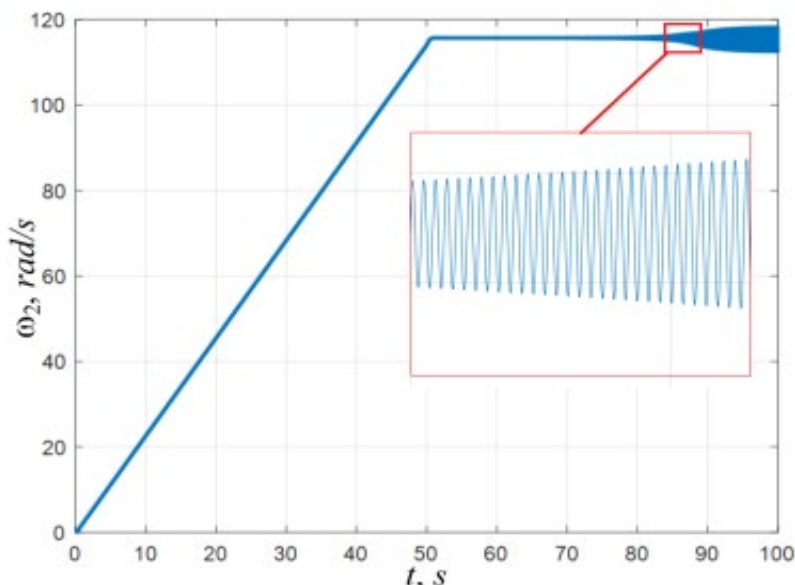


Рис.3. Перехідний процес двомасового електроприводу електровоза ДСЗ для типових умов завантаження

Відповідно до методики визначення умов виникнення фрикційних автоколиваний, запропонованої Клепиковим В.Б. в [4], за фізичними параметрами системи $T_e = 0.7$ с, $J_1 = 150$ кг · м², $\beta = 7.61 \cdot 10^3$ і приведеним до швидкості двигуна параметрам $J_2 = 150$ кг · м², $C_{1,2} = 10^7$ Н · м, а також $\beta_c = -6200$ для падаючої ділянки характеристики зчеплення були розраховані узагальнені безрозмірні параметри γ , b , T_{M1}^* , ν значення яких дозволяють визначити характер динамічного процесу ЕП: $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1$ – коефіцієнт співвідношення мас; $\nu = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{эм}^2}$; где $\Omega_{12} = \frac{\sqrt{C_{12}(J_1 + J_2)}}{\sqrt{J_1 \cdot J_2}}$ – власна частота пружних недемпфованих коливань пружної механічної системи, $\Omega_{em} = \frac{1}{\sqrt{T_e \cdot T_{M1}}}$ – частота електромеханічних коливань, $T_{M1} = \frac{J_1}{\beta}$ – електромеханічна постійна часу; $T_{M1}^* = \Omega_{1,2} \cdot T_{M1}$ – відносне значення електромеханічної постійної часу; безрозмірний параметр $b = \frac{\beta_c}{\beta}$.

Отримані значення параметрів $\nu = 108,9134$ і $\gamma = 6,4089$ для даного ЕП знаходяться в четвертому секторі простору узагальнених параметрів ν і γ [4], отже, це дозволяє визначити межі розрахункових діапазонів відповідно до системи рівнянь, наведеної нижче:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{*1}^2 = \frac{\nu+1}{2 \cdot \nu} + \sqrt{\left(\frac{\nu+1}{2 \cdot \nu}\right)^2 - \frac{1}{\gamma \cdot \nu}} \\ \Omega_{*2}^2 = \frac{\nu+1}{2 \cdot \nu} - \sqrt{\left(\frac{\nu+1}{2 \cdot \nu}\right)^2 - \frac{1}{\gamma \cdot \nu}} \\ \Omega_{*3}^2 = \frac{(\gamma-1)}{\gamma} \\ \Omega_{*4}^2 = 1; \\ \Omega_{*5}^2 = 1 - \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\nu} \end{array} \right. \quad (1)$$

За співвідношеннями (2), (3) здійснено розрахунок параметрів b , T_{M1}^* у діапазоні $[\Omega_1 - \Omega_4]$, оскільки ці межі є обмежуючим для сектора №4.

$$b = \frac{\gamma \cdot \nu \cdot \Omega_*^4 - \gamma \cdot (\nu+1) \cdot \Omega_*^2 + 1}{\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \Omega_*^2 - 1}; \quad (2)$$

$$T_{M1}^* = \sqrt{\frac{[\Omega_*^2 - (1 - 1/\gamma + 1/\nu)] \nu b}{(\gamma-1)(1 - \Omega_*^2)}}; \quad (3)$$

Показані межі стійкості системи у площині параметрів b , T_{M1}^* для типового завантаження електровоза (рис. 4).

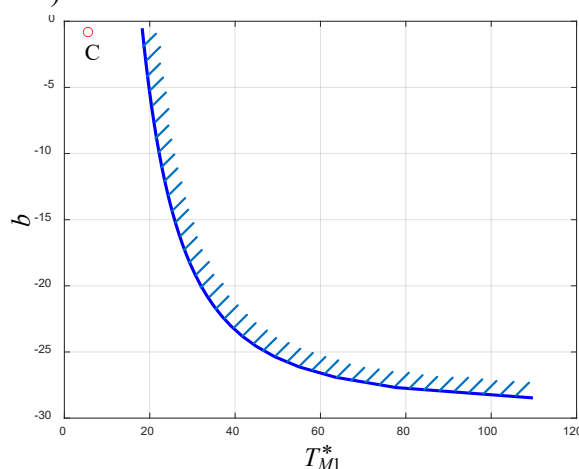


Рис.4. Кордони стійкості системи при завантаженні 5 вагонів

Робоча точка C , координати якої дорівнюють $b = 0,81139$, $T_{M1}^* = 5,534$, знаходиться у площині коливального перехідного процесу. Частота коливань при цьому становить 33 Гц, а амплітуда 5% від значення швидкості другої маси. Для усунення коливань, що виникають у системі при будь-яких поєднаннях параметрів, нижче наведено синтез системи з нейрорегулятором та зворотним зв'язком за швидкістю другої маси.

Як показали раніше проведені дослідження [6], для реалізації замкнутих систем управління з нейронною мережею для управління електродвигуном постійного або змінного струму цілком достатньо одного зворотного зв'язку за швидкістю, з дискретизацією за часом і однією ланкою чистого запізнення. Таким чином, нейронна мережа матиме 3 вхідних нейрона, на які подається вектор вхідних сигналів у вигляді сигналу завдання, поточного та попереднього значення швидкості другої маси ЕП. Мінімально-достатня кількість нейронів прихованого шару таких систем дорівнює 10 – 20, а вихідних нейронів у разі потрібно один. На цьому вихідному нейроні і формуватиметься керуючий вплив для частотного перетворювача. Нейронні мережі такого типу позначаються NN3–20–1 (рис. 5).

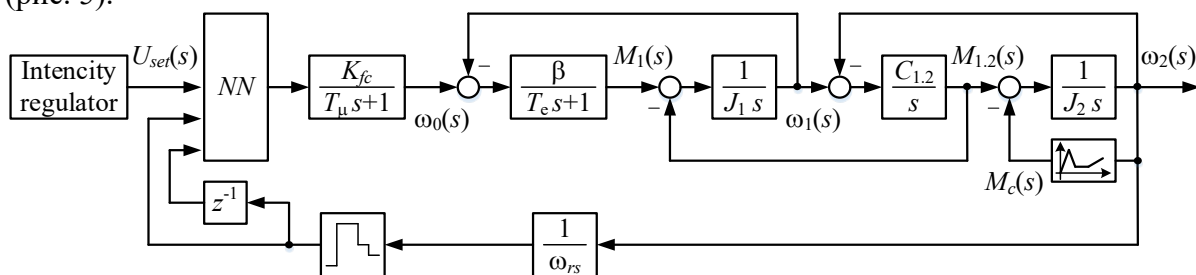


Рис.5. Нейромережева система керування електровозом ДСЗ

Для глобальної оптимізації параметрів нейронних мереж необхідно використовувати метод генетичного алгоритму [6]. Розглядаючи нейронну мережу як єдиний набір параметрів, генетичний алгоритм здатний здійснювати її оптимальну настройку при розмірності пошукового простору достатньою для вирішення більшості практичних завдань. При цьому спектр додатків, що розглядаються, набагато перевершує можливості алгоритму зворотного поширення помилки. Поєднання цих двох обчислювальних технологій, штучні нейронні мережі та генетичні алгоритми, розглядається сьогодні як потенційний джерело майбутнього прогресу у сфері еволюційного моделювання. Крім властивої йому глобальності, генетичний алгоритм, як тренувальна процедура, має ту перевагу в порівнянні з алгоритмом зворотного поширення помилки, що він здатний тренувати нейронну мережу відразу по вихідним характеристикам об'єкта, а не вихідним сигналам нейронної мережі.

Відповідно, вихідний сигнал нейронної мережі описується наступним рівнянням:

$$NN = W_2 \cdot \text{tansig}(W_1 \cdot U + B_1) + B_2 \tag{4}$$

де NN – вихід нейронної мережі; tansig — функція активації; W_1 – матриці вагових коефіцієнтів нейронів прихованого шару нейронної мережі; W_2 – матриці вагових коефіцієнтів нейронів вихідного шару нейронної мережі; B_1 – це матриці зсувів нейронів прихованого шару нейронної мережі; B_2 – матриці зсувів нейронів вихідного шару нейронної мережі; $U = \begin{bmatrix} U_{set} \\ \omega_{2,i} \\ \omega_{2,i-1} \end{bmatrix}$ – це матриця вхідних сигналів нейронної мережі, компонентами якої є: U_{set} це сигнал заданої швидкості; $\omega_{2,i}$ є поточним значенням швидкості,

та $\omega_{2,i-1}$ це попереднє значення швидкості двигуна, отримане за допомогою зворотного зв'язку за швидкістю. Параметри отриманого нейрорегулятора (див. табл. 1).

Таблиця 1 - матриці зсувів нейронів прихованого та вихідного шарів нейронної мережі

№	Прихований шар, В1	Вихідний шар, В2	№	Прихований шар, W1			Вихідний шар, W2
1	-0.576	-6.006	1	0.105	-0.256	0.0262	-1.085
2	-0.497		2	0.987	0.831	-0.527	-5.119
3	0.7007		3	0.130	0.369	-0.053	-1.537
4	0.8262		4	0.883	-0.736	0.571	-4.400
5	-0.776		5	-0.459	-0.514	0.083	-8.569
6	-0.268		6	-0.959	0.221	-0.441	-9.071
7	-0.998		7	0.729	-0.285	0.295	5.879
8	0.3503		8	-0.969	0.627	0.908	-8.462
9	-0.7276		9	0.925	0.825	-0.167	4.005
10	0.7072		10	0.627	0.468	-0.726	7.402
11	0.0523		11	0.490	0.142	0.7826	5.499
12	0.0333		12	0.576	-0.763	-0.428	-0.321
13	0.6916		13	-0.928	-0.546	-0.515	-5.194
14	-0.301		14	-0.892	0.809	0.0884	-9.991
15	0.8836		15	-0.778	-0.903	0.0604	-2.564
16	0.7886		16	0.241	0.514	0.513	3.094
17	-0.734		17	0.033	0.240	-0.577	0.094
18	0.3117		18	-0.424	-0.693	-0.579	-4.617
19	0.5047		19	-0.457	0.043	0.0551	3.476
20	0.9868		20	0.978	-0.098	-0.656	7.958

Представлений перехідний процес швидкості другої маси тягового асинхронного електроприводу електровоза ДСЗ з нейромережевою системою управління. Оскільки, при навчанні нейронної мережі не враховувалися необхідні обмеження координат ЕП, зумовлені, наприклад, електронною та механічною міцністю приводу та ін, тому був застосований задатчик інтенсивності (рис. 6).

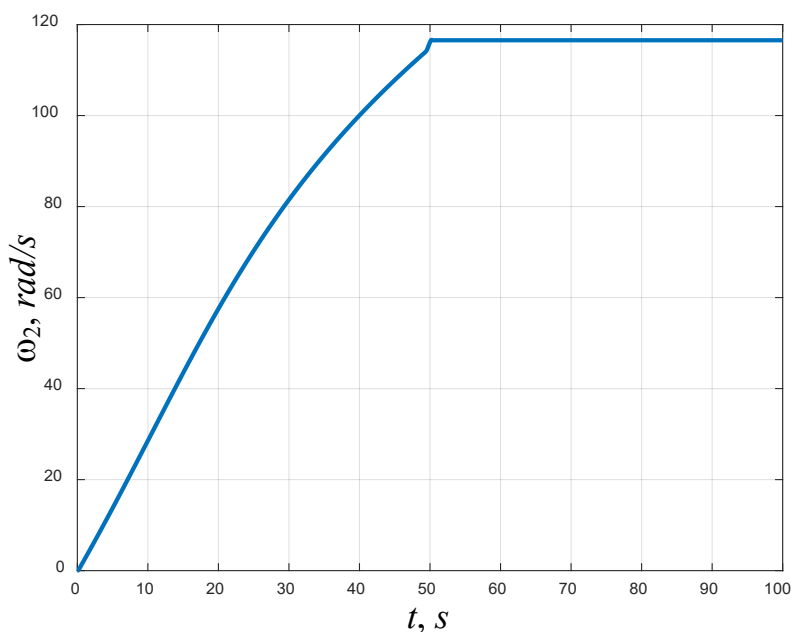


Рис.6. Перехідний процес двомасового електроприводу електровоза ДСЗ з нейронною мережею та задатчиком інтенсивності

Висновки. Проведені дослідження показали можливість побудови інтелектуальних систем управління, на базі прямо спрямованих нейронних мереж з сигмоїдальними активаційними функціями нейронів прихованого шару структури NN3-20-1. Такі системи, на відміну від класичних, мають хороші демпфуючими властивостями, що перешкоджає виникненню коливальних або автоколивальних динамічних режимів. Застосування нейронних мереж для управління електромеханічними системами не призводить до підвищення астатизму по впливу, що збурює, тому в даній системі спостерігається статична помилка швидкості другої маси, яка становить 0,7%.

Список використаних джерел

- [1] Дослідження пускових режимів частотно-регульованого електроприводу магістрального електровозу ДС3 / Ю. М. Кутовий, Т. Ю. Кунченко, І. В. Обруч, Я. О. Кириленко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика. – 2019. – № 16. – С. 95-98.
- [2] Штейнвольф, Л. І. Якісна теорія фрикційних автоколивань у механічних передачах / Л. І. Штейнвольф // Теорія механізмів і машин. Перегляд. – Харків : ХДУ, 1966. – Вип. 1. – С. 76-88.
- [3] Минов, Д. К. Підвищення тягових властивостей електровозів та тепловозів з електричною передачею / Д. К. Мидов. – Москва : Транспорт, 1965. – 257 с.
- [4] Клепиков, В. Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением : монография / В. Б. Клепиков. – Харьков : Підручник НТУ "ХПІ", 2014. – 407 с.
- [5] Клепиков, В. Б. Про фрикційні автоколивання в електроприводах / В. Б. Клепиков // Електрика. – 1986. – № 4. – С. 59-62.
- [6] Обруч, І. В. Замкнуті системи управління електроприводом із двигуном постійного струму послідовного збудження на базі нейронних мереж / І. В. Обруч, Ю. М. Кутовой // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Проблеми автоматизованого ЕП: Теорія та практика». – 2013. – Спец. Вип. №36. – С. 485-487.

References

- [1] Kutovy, Yu. M., Kunchenko, T. Yu., Obruch, I. V., Kirilenko, Ya. O. (2019). Investigation of the starting modes of the frequency-regulated electric drive of the mainline electric locomotive DS3. *Bulletin of the National Technical of the University "KhPI". Ser. : Problems of automated electric drive Theory and practice*, 16, 95-98.
- [2] Steinwolf, L. I. (1966). A clear theory of frictional vibrations in mechanical transmissions. *Theory of mechanisms and machines*. (Vol. 1). P. 76-88.
- [3] Minov, D. K. (1965). Improvement of traction power of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission. Moscow: Transport.
- [4] Klepikov, V. B. (2014). Dynamics of electromechanical systems with nonlinear thorns. Kharkiv: Pidruchnik NTU "KhPI".
- [5] Klepikov, V. B. (1986). About frictional auto-motion in electric drives. *Electrics*, 4, 59-62.
- [6] Obruch, I. V., Kutovoy, Yu. M. (2013). Closed-loop control systems for an electric drive with a motor of a constant flow of sequential activation based on neural measurements. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Problems of automated EP: Theory and practice"*, 36, 485 - 487.

Отримано 14.09.2023

Yaroslav Kyrylenko¹, Bohdan Vorobiov², Sergiy Senchenko³, Yurii Kutovoi⁴, Khan Liu⁵

¹assistant of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute" (Харків, Україна)

E-mail: Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>

² Ph. D, head of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute" (Харків, Україна)

E-mail: bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua. ORCID: : <https://orcid.org/0000-0002-0264-354X>

³postgraduate student of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute"» (Харків, Україна)

E-mail: Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2471>

⁴Ph. D, Professor of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute" (Харків, Україна)

E-mail: Yaroslav.Likhno@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7082-7562>

⁵postgraduate student of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute" (Харків, Україна)

E-mail: seanhanzi@aliyun.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8182-0040>

DESIGN OF THE CONTROL SYSTEM OF TRACTIONAL ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE BASED ON NEUROCONTROLLER

The article examines the synthesis of a neuro-boundary controller and the development of minds in the culprit of frictional auto-switches in the electric drive of railway transport vehicles such as mainline electric locomotives, municipal electric trains, mine electric locomotives, trams, metro trains and other types of transport. Slippage of locomotive wheels and frictional self-oscillations worsen a number of operational and energy indicators of railway transport. Therefore, the development of modern management systems that eliminate these problems is an urgent task. The purpose of the article is to study the two-mass electromechanical system of the DS3 mainline electric locomotive, to identify the conditions under which self-oscillation is excited in it, and to synthesize a neuroregulator that ensures the elimination of self-oscillating modes for any combination of electric drive parameters. The investigations showed the feasibility of intelligent control systems based on direct neural measurements of the sigmoidal activation functions of the neurons of the attached ball structure NN3-20-1. Such systems, in contrast to the classical ones, have good damping power, which overcomes the disadvantage of columbing or autocolumn dynamic modes. Transient processes of the speed of the second mass of the traction asynchronous electric drive of the DS3 electric locomotive with a neural network control system are presented. Since, during the training of the neural network, the necessary restrictions of the coordinates of the electric drive, caused, for example, by the electronic and mechanical strength of the drive, were not taken into account. The tightening of neural circuits for controlling electromechanical systems does not lead to an increase in astatism in the flow that boils, so in this system a static reduction in the liquidity of another mass, which becomes 0.7%, is avoided.

Keywords: Neuro-fusing system, genetic algorithm, asynchronous motor, electric drive, transition process, clutch characteristic.