

УДК 621.331

## ЕЛЕКТРОПРИВОД РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ

- КИРИЛЕНКО Я.О.** асистент кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua;
- СЕНЧЕНКО С.О.** аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua;
- ВОРОБІЙОВ Б.В.** д-р філософії (к.т.н.), завідувач кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua;
- ХАНЬ Л.** аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: seanhanzi@mail.com;
- ЛІХНО Я.В.** аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Yaroslav.Likhno@ieec.edu.ua;

**Мета роботи.** Дослідження умов виникнення фрикційних автоколивань, синтез нейрорегулятора усуваючого автоколивання, розробка системи автоматичного керування швидкістю руху залізничного транспорту в залежності від кривизни шляху на основі технології комп'ютерного зору.

**Методи дослідження.** Математичний аналіз та моделювання.

**Отримані результати.** У статті наведено результати розробки та досліджень інтелектуальної системи керування електроприводом магістрального електровоза ДСЗ. Розроблені системи мають єдиний легко реалізований зворотний зв'язок по швидкості двигуна, що не створює труднощів у фізичній реалізації. Відзначено, що загальною рисою електроприводу рейкового транспорту є нелінійна характеристика навантаження. Показано, що за певних комбінацій параметрів у тяговому електроприводі можливі фрикційні автоколивання. Ефективне усунення фрикційних автоколивань за рахунок синтезу системи з нейрорегулятором. Нейронна мережа має три вхідні нейрони, на які подається вектор вхідних сигналів у вигляді сигналу напруги, сигналу значення швидкості двигуна поточного та попереднього значення швидкості енергії. Кількість нейронів прихованого шару системи становить 20 та один вихідний нейрон. На вихідному нейроні формуються керуючі впливи для перетворювача частоти. Нейронні мережі такого типу позначаються NN3-20-1. Для всієї оптимізації параметрів нейронних мереж використовується метод генетичного алгоритму. Імітаційна модель електроприводу рейкового транспорту має інтеграцію блоку комп'ютерного зору. Підвищення рівня автоматизації та безпеки руху рейкових транспортних засобів можливо на основі комп'ютерного зору. Особливістю цієї структури є наявність у ній нейрорегулятора NN. NN забезпечує задану якість перехідного процесу у всьому діапазоні навантажень і при знаходженні робочої точки на спадаючій ділянці. Розроблена система автоматичного регулювання швидкості руху рейкових транспортних засобів залежно від кривизни колії для підвищення рівня автоматизації та безпеки руху. Моделювання системи показало її працездатність, яка проявляється в зниженні швидкості руху рейкових транспортних засобів при русі по ділянці колії з кривизною.

**Наукова новизна.** Ефективне усунення фрикційних автоколивань за рахунок застосування нейрорегулятора.

**Практична цінність.** Розроблена система автоматичного регулювання швидкості рейкового транспорту залежно від кривизни колії для підвищення рівня автоматизації та безпеки руху.

**Ключові слова:** нейромережева система керування; генетичний алгоритм; асинхронний двигун; електропривод; перехідний процес; ДСЗ; кривизна траєкторії; комп'ютерний зір.

### I. ВСТУП

Залізничний транспорт використовують у всіх видах пасажирського та вантажного транспорту. До них відносяться магістральні електровози, електропо-

їзди приміського сполучення, шахтні електровози, трамваї, поїзди метро та інші види транспорту.

Пробуксовка коліс локомотивів і фрикційні автоколивання погіршують ряд експлуатаційних та енергетичних показників залізничного транспорту.

Тому розробка сучасних систем управління, які усувають ці проблеми, є актуальним завданням.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Перелічені типи рейкових транспортних засобів мають різні умови роботи. До них пред'являються різні вимоги, але в той же час вони мають спільну рису у вигляді нелінійної характеристики зчеплення.

Дослідження характеристик зчеплення рейкових транспортних засобів описано в наступних роботах [1] - [2]. Вони відзначають, що характеристика зчеплення містить висхідну і спадаючу ділянки. Робота на ділянці, що падає, призводить до пробуксовки коліс під час рушання з місця та гальмування. Крім того, в ряді випадків при певних комбінаціях параметрів електромеханічної системи виникають фрикційні автоколивання [3].

Загалом інтелектуальне керування залежить від кількох важливих моментів. По-перше, це сприйняття навколишнього середовища, засноване на низці датчиків камери (передня, бокова та задня камери), а також інших датчиків, таких як LIDAR) або радарів. Цей підхід гарантує, що транспортний засіб може бачити об'єкти навколо нього на 360 градусів (апаратне забезпечення) та ідентифікувати з них об'єкти, важливі для водіння (завичай програмне забезпечення на основі ШІ). Другий момент – це точна локалізація, коли транспортний засіб має точно знати своє місцезнаходження. Третій пункт – це шлях, яким потрібно пройти, щоб досягти бажаного пункту призначення. Нарешті, четвертий пункт – контроль. Представлене стосується загалом самокерованих транспортних засобів, незалежно від того, чи це автомобілі чи поїзди. Оскільки вся індустрія безпілотних автомобілів є новинкою, зміни відбуваються майже щомісяця. Деякі з цих змін дуже часто можуть мати істотний характер.

## III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження умов виникнення фрикційних автоколиваний, синтез нейрорегулятора усуваючого автоколивання, розробка системи автоматичного керування швидкістю руху залізничного транспорту в залежності від кривизни шляху на основі технології комп'ютерного зору.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як основний метод дослідження математичне моделювання використовує узагальнення електромеханічної системи з лінійною механічною характеристикою.

У [4] показано, що для двигунів різних типів за певних умов механічні характеристики описуються однаковими рівняннями. Усі рівняння подібні за формою і відрізняються лише виразом статичної жорсткості  $\beta$  і електромеханічної постійної часу  $T_e$ .

$$\begin{cases} M \cdot (T_e \cdot s + 1) = \beta \cdot (\omega_0 - \omega) \\ M - C_{1,2}(\varphi_1 - \varphi_1) - M_{c1} = j_1 \cdot s \cdot \omega_1 \\ C_{1,2}(\varphi_1 - \varphi_1) - M_{c2} = 2 \cdot s \cdot \omega_2 \\ M_{c2} = f(\omega_2) \end{cases} \quad (1)$$

Структурна схема узагальненої електромеханічної системи на рис. 1 отримана за умови, що двигун і перетворювач представлені аперіодичними ланками, характеристика зчеплення містить висхідну і спадаючу ділянки, задатчик інтенсивності, що забезпечує лінійну закономірність зміни керуючого впливу.

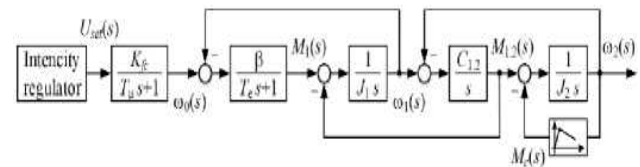


Рисунок 1. Структурна схема електроприводу

Рейкові транспортні засоби мають багатомоторний привід. Навантаження на двигуни розподіляються рівномірно. Отже, структурна схема електроприводу (рис. 1) містить модель лише одного асинхронного двигуна, на який діє 25% навантаження всього поїзда, і момент інерції

$$J_2 = \frac{J_\Sigma}{4}, \quad (2)$$

де  $J_\Sigma$  – маса вагонів, приведена до валу електродвигуна.

Ці особливості та припущення дають змогу дослідити умови виникнення фрикційних автоколиваний в електроприводі магістрального електровоза ДС3. Даний електровоз має частотно-регульований електропривод з мікропроцесорним керуванням, що дозволяє здійснювати керування відповідно до вимог.

Відповідно до методики Клепикова В.Б. були визначені умови для збудження фрикційних автоколиваний. Розраховані фізичні параметри  $J_1, T_e, \beta$  та параметри  $J_2, C_{1,2}, \beta_c$  приведені до частоти обертання двигуна. Значення цих безрозмірних параметрів дозволяють визначити характер динамічного процесу:

$$\gamma = (J_1 + J_2)/J_1, \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\Omega_{I2}^2}{\Omega_{EM}^2}, \quad (4)$$

$$\Omega_{I2} = \sqrt{\frac{C_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}}, \quad (5)$$

$$\Omega_{EM} = \frac{1}{\sqrt{T_e \cdot T_{M1}}}, \quad (6)$$

$$T_{M1} = \frac{J_1}{\beta}, \tag{7}$$

$$T_{M1}^* = \Omega_{12} \cdot T_{M1}, \tag{8}$$

$$b = \frac{\beta_c}{\beta}, \tag{9}$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт співвідношення мас;

$\Omega_{12}$  – власна частота пружних незатухаючих коливань пружної механічної системи;

$\Omega_{EM}$  – кутова частота електромеханічних коливань;

$T_{M1}$  – електромеханічна постійна часу;

$T_{M1}^*$  – відносне значення електромеханічної постійної часу;

$b$  – безрозмірний параметр.

На рисунку 2 представлено імітаційну модель електроприводу.

Розрахункові значення параметрів  $\nu = 108,9134$  і  $\gamma = 6,4089$  для даного електроприводу магістрального локомотива ДС3 знаходяться в четвертому секторі площини узагальнених параметрів по  $\nu$  і  $\gamma$  [4] - [5].

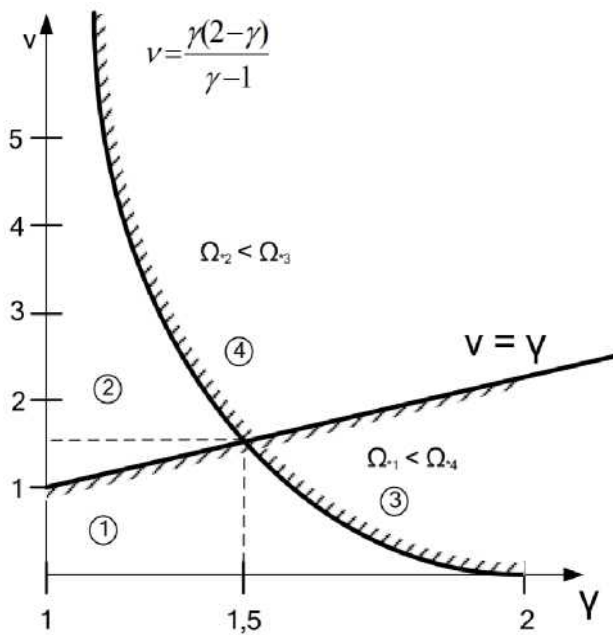


Рисунок 2. Імітаційна модель електроприводу

Це дозволяє визначити межі розрахункових діаграм (рис.2):

$$\left\{ \begin{aligned} \Omega_{*1}^2 &= \frac{\nu+1}{2 \cdot \nu} + \sqrt{\left(\frac{\nu+1}{2 \cdot \nu}\right)^2 - \frac{1}{\gamma \cdot \nu}} \\ \Omega_{*2}^2 &= \frac{\nu+1}{2 \cdot \nu} - \sqrt{\left(\frac{\nu+1}{2 \cdot \nu}\right)^2 - \frac{1}{\gamma \cdot \nu}} \\ \Omega_{*3}^2 &= \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \\ \Omega_{*4}^2 &= 1 \\ \Omega_{*5}^2 &= 1 - \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\nu} \end{aligned} \right. \tag{10}$$

Діапазон частот  $[\Omega_{*1} \div \Omega_{*4}]$  (10) є граничним для четвертого сектора (рисунк 2). Межі стійкості електромеханічної системи в площині параметрів  $b, T_{M1}^*$  для типових умов навантаження з урахуванням співвідношень (10):

$$b = \frac{\gamma \cdot \nu \cdot \Omega_*^4 - \gamma \cdot (\nu+1) \cdot \Omega_*^2 + 1}{\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \Omega_*^2 - 1}, \tag{11}$$

$$T_{M1}^* = \sqrt{\frac{\Omega_*^2 - \left(1 - \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\nu}\right) \nu b}{(\gamma-1)(1-\Omega_*^2)}}. \tag{12}$$

На рис. 3 показано межю стійкості системи для типового навантаження магістрального електровоза.

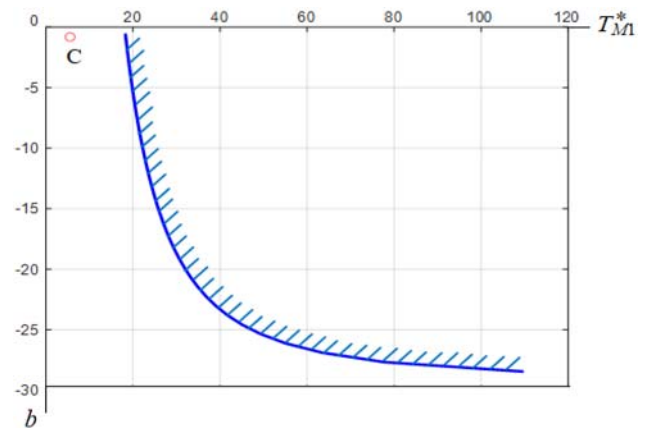
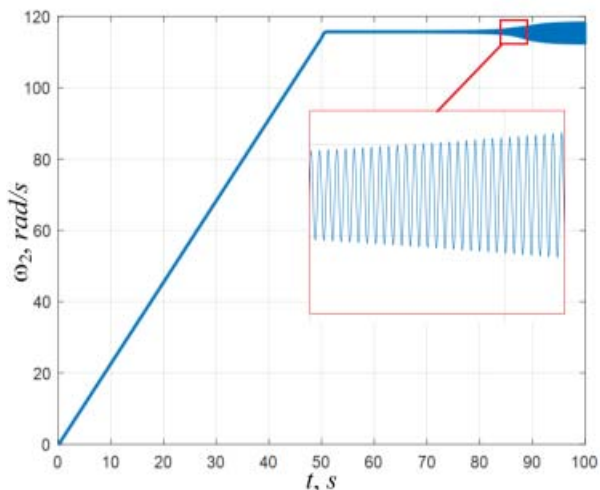


Рисунок 3. Межі стійкості системи з навантаженням 5 вагонів

При типовому навантаженні електровоза узагальнені параметри дорівнюють  $b = 0,81139$ ,  $T_{M1}^* = 5,534$ . Ці параметри наведені на рис.4 у площині  $(b, T_{M1}^*)$  позначені точкою С. Ця точка знаходиться в зоні коливального перехідного процесу [5]. Частота коливань 33 Гц. Амплітуда 5 % від значення сталого

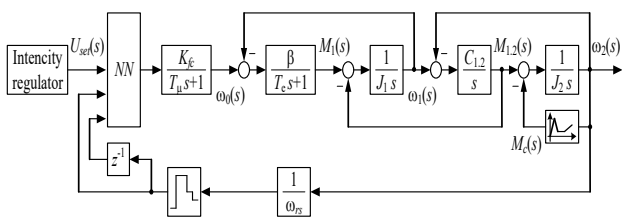
стану на рисунку 4.



**Рисунок 4.** Імітаційна модель електроприводу

Для усунення коливань в системі виконали синтез системи з нейрорегулятором. Ця система використовує зворотний зв'язок за швидкістю другої маси з дискретизацією по часу та однією ланкою чистої затримки. [6].

Таким чином, нейронна мережа матиме три вхідних нейрони, на які подається вектор вхідних сигналів у вигляді сигналу напруги, сигналу значення швидкості двигуна поточного та попереднього значення швидкості енергії. Мінімально достатня кількість нейронів прихованого шару таких систем становить 20, і в цьому випадку необхідний лише один нейрон [7]. На цьому вихідному нейроні будуть формуватися керуючі впливи для перетворювача частоти. Нейронні мережі такого типу позначаються NN3-20-1. Структурна схема системи керування з нейроконтролером наведена на рис. 5.

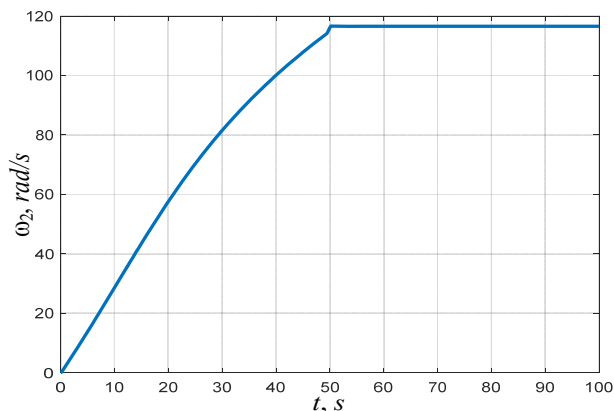


**Рисунок 5.** Нейромережева система керування електровозом ДС3

Для всієї оптимізації параметрів нейронних мереж необхідно використовувати метод генетичного алгоритму [8]. Розглядаючи нейронну мережу як єдиний набір параметрів, для всієї оптимізації параметрів нейронної мережі необхідно використовувати метод генетичного алгоритму [7], [8]. Розглядаючи нейронну мережу як єдиний набір параметрів, генетичний алгоритм здатний оптимально налаштувати її з розмірністю простору пошуку, достатньою для вирішення

більшості практичних завдань. При цьому спектр розглянутих додатків значно перевищує можливості алгоритму зворотного розповсюдження помилок. Сьогодні поєднання цих двох обчислювальних технологій, тобто штучних нейронних мереж і генетичних алгоритмів, розглядається як потенційне джерело майбутнього прогресу в галузі еволюційного моделювання. На додаток до властивій йому універсальності, генетичний алгоритм, як процедура навчання, має перевагу перед алгоритмом зворотного розповсюдження помилок у своїй здатності навчати нейронну мережу відразу після отримання вихідних характеристик об'єкта, але не після вихідних сигналів нейронної мережі.

На рис. 6 зображено перехідний процес зміни кутової швидкості другої маси тягового асинхронного електроприводу з нейромережевим керуванням.



**Рисунок 6.** Перехідний процес в електроприводі електровоза ДС3 при пуску з нейромережевою системою керування

Як видно з графіка (рис. 6), нейронна мережа дозволяє повністю усунути фрикційні автоколивання.

Ступінь автоматизації електровоза ДС3, як і всіх інших рейкових транспортних засобів в Україні, досить низька. Відповідно до міжнародного стандарту ІЕС 62290 - 1: 2014 [9] відносяться до першого рівня з чотирьох.

Підвищення рівня автоматизації та безпеки залізничного транспорту можливо шляхом усунення людського фактору. Аналіз транспортних аварій на залізницях показав, що причиною аварій є людський фактор і становить близько 30% від загальної кількості [10], [11].

Обмеження швидкості будь-якого рейкового транспорту багато в чому залежить від кривизни колії. Кривизна колії вимагає зниження швидкості рейкового транспорту. Наразі це робить водій згідно з графіком руху.

Автоматичний контроль швидкості можливий на основі комп'ютерного зору. Для цього на кабіні водія встановлена камера. Зображення з камери обробляється в певній послідовності, зображеній на рис. 7.

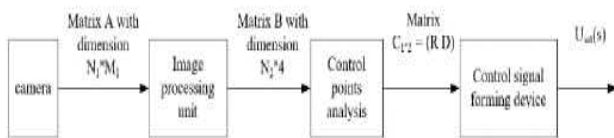


Рисунок 7. Обробка зображення з камери

Блок-схема алгоритму, що реалізує обробку зображень, наведена на рис. 8.

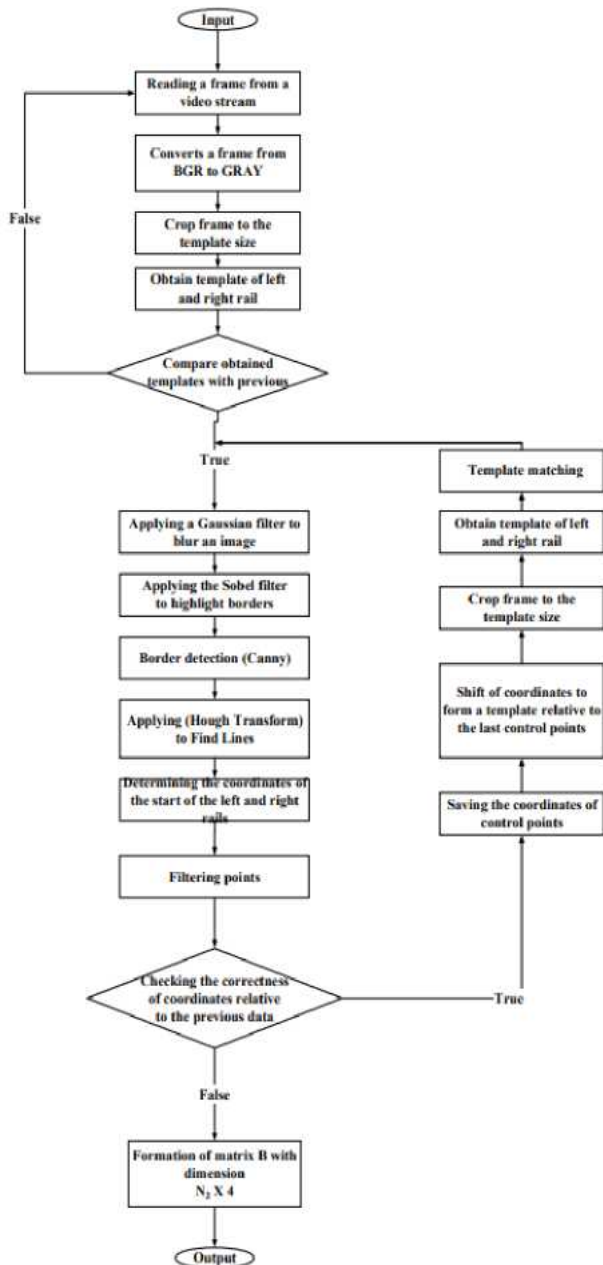


Рисунок 8. Блок-схема алгоритму обробки зображення

На схемі, що зображена на рис. 7, камера формує відеопотік, який кадр за кадром подається на блок обробки зображень. Для представлення кадру використовується матриця А, розмір якої  $N_1 \times M_1$  відповідає висоті та ширині кадру. Значення  $N_1$  і  $M_1$  залежать від налаштувань камери. На виході блоку обробки зображень формується матриця В, розміри стовпців якої відповідають координатам лівої та правої рейок, відповідно. Розмір  $N_2$  рядів дорівнює кількості контрольних точок. Блок аналізу отриманих контрольних точок формує матрицю С, яка зберігає два значення R і D. R – значення радіуса кривизни рейки. D дорівнює коду дефекту на залізниці. Код дефекту дорівнює 1, якщо виявлено дефект, інакше код дорівнює нулю. Вихідний пристрій формує сигнал заданої швидкості [12].

Блок обробки зображень використовує бібліотеку алгоритмів комп’ютерного зору з відкритим кодом OpenCV. Програмування виконано за допомогою мови Python, яка добре взаємодіє з бібліотекою OpenCV та Matlab/Simulink [13] - [14].

Радіус кривизни залізничного полотна розраховується по трьох контрольних точках. На рис. 9 наведена блок-схема алгоритму вимірювання кривизни колії та визначення дефектів геометрії залізничного полотна [15], [16], [17], [18].

Радіус кривизни залізничного полотна розраховується по трьох контрольних точках. На рис. 9 наведена блок-схема алгоритму вимірювання кривизни колії та визначення дефектів геометрії залізничного полотна [15], [16], [17], [18].

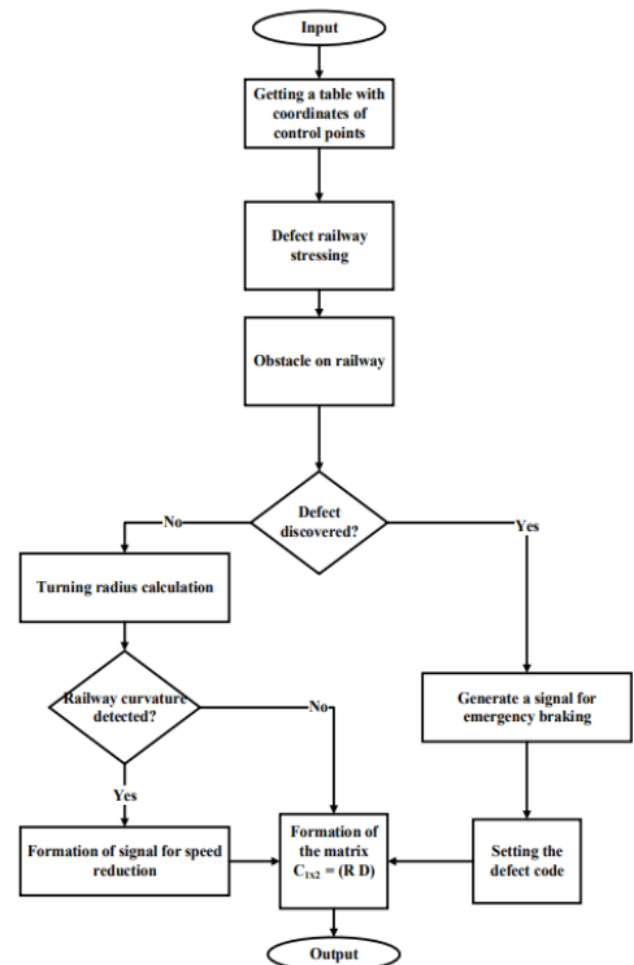
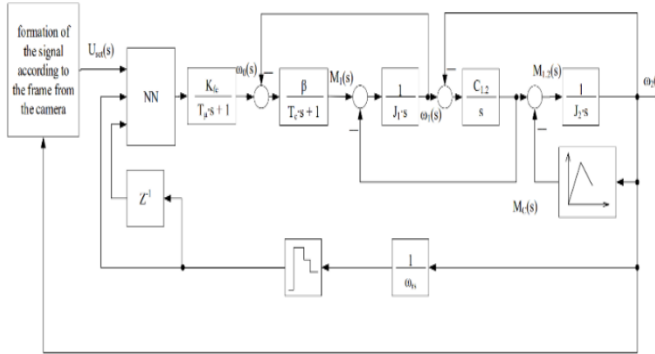


Рисунок 9. Блок-схема алгоритму визначення кривизни колії

Далі, згідно з функціональною схемою каналу обробки зображення, здійснюється формування керуючого сигналу на електропривод, який забезпечує зниження швидкості в залежності від кривизни. На рис. 10 показана структурна схема тягового електроприводу, на який впливають сигналом від камери після відповідної обробки сигналу.



**Рисунок 10.** Неймережева система керування електровозом ДСЗ

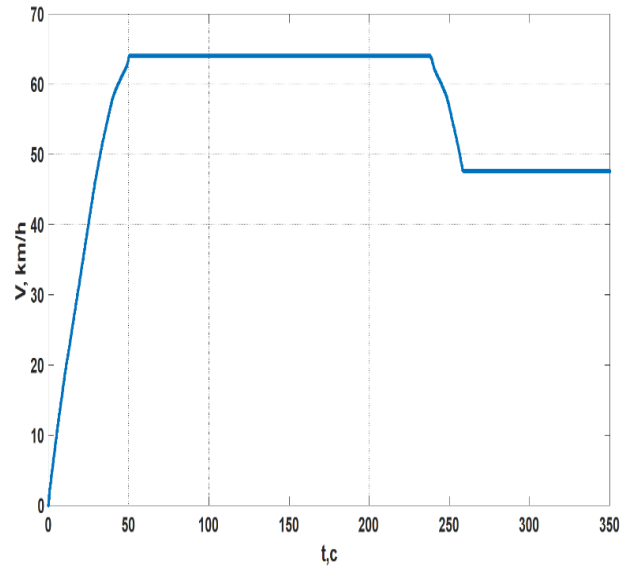
Особливістю цієї структури є наявність у ній нейрорегулятора NN. NN забезпечує задану якість перехідного процесу у всьому діапазоні навантажень і при знаходженні робочої точки на спадаючій ділянці.

Для експерименту було використано готове відеозображення залізничної колії з кривизною. Кадр із цього відео показано на рис. 11.

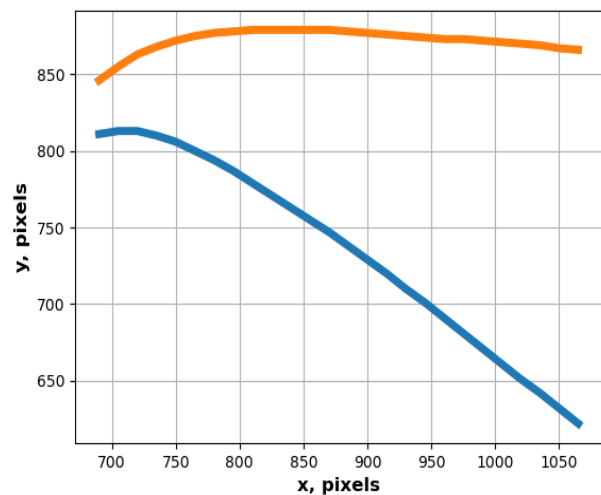


**Рисунок 11.** Кадр відеозображення колії з кривизною

Моделювання системи показало її працездатність, яка проявляється в зниженні швидкості руху рейкових транспортних засобів при русі по ділянці колії з кривизною. Результати розрахунків на імітаційній моделі наведені на рис. 12, 13.



**Рисунок 12.** Результати моделювання системи з автоматичним регулюванням швидкості



**Рисунок 13.** Приклад кривизни, на основі якої приймається рішення про зниження швидкості

## V. ВИСНОВКИ

Відзначено, що загальною рисою електроприводу рейкового транспорту є нелінійна характеристика навантаження. Показано, що за певних комбінацій параметрів у тяговому електроприводі можливі фрикційні автоколивання. Ефективне усунення фрикційних автоколиваний за рахунок застосування нейрорегулятора.

Підвищення рівня автоматизації та безпеки руху рейкових транспортних засобів можливо на основі комп'ютерного зору. Розроблена система автоматичного регулювання швидкості руху рейкових транспортних засобів залежно від кривизни колії для підвищення рівня автоматизації та безпеки руху.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Wu B., Xiao G., An B., Wu T., Shen Q. Numerical study of wheel/rail dynamic interactions for high-speed rail vehicles under low adhesion conditions during traction / B. Wu, G. Xiao, B. An, Q. Shen // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106266>
- [2] Shteynvol'f L. Qualitative theory of fractional oscillations in mechanical gears // Theory of mechanisms and machines. – KhSU, 1966. – Iss. 1, P. 76–88.
- [3] Клепиков В. Б. О фрикционных автоколебаниях в электроприводах // Электричество. 1986. № 4.
- [4] Клепиков В. Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2014. – 408 с.
- [5] Kyrylenko Y., Kutovyi Yu., Obruch I., Kunchenko T. Neural network control of a frequency-regulated electric drive of a main electric locomotive / Y. Kyrylenko, Yu. Kutovyi, I. Obruch, T. Kunchenko // IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). – 2020. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240880
- [6] Obruch I. V., Kutovyi Yu. N. Neural network control system for the electric drive of the АП14 electric locomotive taking into account the elasticity of the kinematic connections / I. V. Obruch, Yu. N. Kutovyi // Journal of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – 2015. – Iss. 12 (1121), P. 248–250.
- [7] Obruch I. V. Synthesis of electromechanical systems with a neural net work and frictional loading / I. V. Obruch // National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute". – 2019.
- [8] K. De Jong. Genetic algorithms: A 10 year perspective / De Jong K. // Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications. – 1985. – P. 167 - 177.
- [9] EC 62290-1:2014. Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 1: System principles and fundamental concepts, MOD.
- [10] FRA Safety Data. Режим доступу: <https://safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafety/default.aspx>
- [11] Стан справ аварійності на транспорті в Україні за 2019 рік. Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/files/bezpeka/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%20%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%20%D0%BD%D0%B0%20%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D1%96%20%20%D0%B7%D0%B0%202019%20%D1%80%D1%96%D0%BA.pdf>
- [12] Klette R. Concise computer vision: An introduction into theory and algorithms // Series "Undergraduate Topics in Computer Science", London, UK. – 2014. – P. 429. DOI: 10.1007/978-1-4471-6320-6.
- [13] Howse J., Minichino J. Learning OpenCV 4 computer vision with Python 3: Get to grips with tools, techniques, and algorithms for computer vision and machine learning, 3rd Edition, Kindle Edition.
- [14] Introduction to OpenCV-Python tutorials. Режим доступу: [https://docs.opencv.org/master/d0/de3/tutorial\\_py\\_intro.html](https://docs.opencv.org/master/d0/de3/tutorial_py_intro.html)
- [15] Cheng Y., Maimone M. W., Matthies L. Visual odometry on the Mars exploration rovers – a tool to ensure accurate driving and science imaging / Y. Cheng, M. W. Maimone, L. Matthies // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2006. – P. 54-62. DOI: 10.1109/MRA.2006.1638016
- [16] Takaoka Y., Kida Y., Kagami S., Mizoguchi H., Kanade T. 3D Map building for a humanoid robot by using visual odometry / Y. Takaoka, Y. Kida, S. Kagami, H. Mizoguchi, T. Kanade // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. – 2004. – P. 4444-4449. DOI: 10.1109/ICSMC.2004.1401231
- [17] Fernandez D., Price A. Visual odometry for an outdoor mobile robot / D. Fernandez, A. Price // IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. – 2004. – P. 816-821. DOI: 10.1109/RAMECH.2004.1438023
- [18] Chhaniyara S., Bunnun P., Zweiri Y., Seneviratne L., Althoefer K. Feasibility of velocity estimation for all terrain ground vehicles using an optical flow algorithm / S. Chhaniyara, P. Bunnun, Y. Zweiri, L. Seneviratne, K. Althoefer // ICARA 2006-Third international conference on autonomous robots and agents. – 2017. DOI: 99511995302346

Стаття надійшла до редакції 21.09.2023

## RAIL TRANSPORT ELECTRIC DRIVE WITH INTELLIGENT CONTROL SYSTEM

KYRYLENKO Y.O.

Assistant of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua;

- SENCHENKO S.O. Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua;
- VOROBIOV B.V. Ph.D., Head of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua;
- KHAN L. Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: seanhanzi@mail.com;
- LIKHNO Y.V. Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Yaroslav.Likhno@ieec.edu.ua;

**Purpose.** *The study of the conditions for the occurrence of frictional self-oscillations, the synthesis of a neuroregulator eliminating self-oscillation, the development of a system for automatic control of the of railway transport speed depending on the curvature of the track on the basis of computer vision technology.*

**Methodology.** *Mathematical analysis and modeling.*

**Findings.** *The paper presents the results of the development and research of an intelligent control system for the electric drive of a DS3 mainline electric locomotive. The developed systems have a single easily implemented motor speed feedback, which does not create difficulties in physical implementation. It is noted that a common feature of the electric drive of rail transport is a nonlinear load characteristic. It is shown that, under certain combinations of parameters, frictional self-oscillations are possible in the traction electric drive. Effective elimination of frictional self-oscillations is done by synthesizing the system with a neuroregulator. The neural network has three input neurons that receive a vector of input signals in the form of a voltage signal, a signal of the motor speed value of the current and previous energy speed values. The number of neurons in the hidden layer of the system is 20 and there is one output neuron. The control actions for the frequency converter are formed on the output neuron. Neural networks of this type are designated NN3-20-1. The genetic algorithm method is used for all optimization of neural network parameters. The simulation model of the electric drive of rail transport has the integration of a computer vision unit. Increasing the level of automation and safety of rail vehicles is possible on the basis of computer vision. A feature of this structure is the presence of an NN neural regulator in it. NN ensures the specified quality of the transient process over the entire load range and when the operating point is located on a falling section. A system for automatic control of the speed of rail vehicles depending on the curvature of the track has been developed to increase the level of automation and traffic safety. Modeling of the system showed its efficiency, which is manifested in a decrease in the speed of rail vehicles when moving along a section of track with curvature.*

**Originality.** *Effective elimination of frictional self-oscillations due to the use of a neuroregulator.*

**Practical value.** *A system for automatically adjusting the speed of rail transport depending on the curvature of the track has been developed to increase the level of automation and traffic safety.*

**Keywords:** *neural network control system; genetic algorithm; asynchronous motor; electric drive; transient; DS3; curvature of the path; computer vision.*

## REFERENCES

- [1] Wu, B., Xiao, G., An, B., Wu, T., Shen, Q. (2022). Numerical study of wheel/rail dynamic interactions for high-speed rail vehicles under low adhesion conditions during traction. *Engineering Failure Analysis*, vol. 137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106266>
- [2] Shteynvol'f, L. (1966). Qualitative theory of fractional oscillations in mechanical gears. «Theory of mechanisms and machines». KhSU, Iss. 1. 76–88. (in Ukrainian).
- [3] Klepikov V. (1986) O frikcionnyh avtokolebaniyah v elektroprividah [About frictional selfoscillations in electric drives]. *Elektrichestvo*, № 4. (in Ukrainian).
- [4] Klepikov V. (2014) Dinamika elektromehaniicheskikh system s nelinejnym treniem: monografija [Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: monograph], Kharkiv: NTU “KhPI”, 408 (in Ukrainian).
- [5] Kyrylenko, Y., Kutovyi, Yu., Obruch, I., Kunchenko, T. (2020). Neural network control of a frequency-regulated electric drive of a main electric locomotive. *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240880
- [6] Obruch, I. V., Kutovyi, Yu. N. (2015). Neural network control system for the electric drive of the AP114 electric locomotive taking into account the elasticity of the kinematic connections. *Journal of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*, issue 12 (1121), 248–250. (in Ukrainian).
- [7] Obruch, I. V. (2019). Synthesis of electromechanical systems with a neural network and frictional loading. *National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”*. (in Ukrainian).



- [8] K., De Jong. (1985). Genetic algorithms: A 10 year perspective. *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*. 167 - 177.
- [9] EC 62290-1:2014, Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 1: System principles and fundamental concepts, MOD.
- [10] FRA Safety Data. Retrieved from: <https://safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafety/default.aspx>
- [11] Stan sprav avarijnosti na transporti v Ukraїni za 2019 rik. [State of transport accident cases in Ukraine for 2019] Retrieved from: <https://mtu.gov.ua/files/bezpeka/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%20%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%20%D0%BD%D0%B0%20%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D1%96%20%20%D0%B7%D0%B0%202019%20%D1%80%D1%96%D0%BA.pdf> (in Ukrainian).
- [12] Reinhard, Klette. (2014). Concise computer vision: An Introduction into Theory and Algorithms. Series “Undergraduate Topics in Computer Science”. London, UK, 429. DOI: 10.1007/978-1-4471-6320-6.
- [13] Howse, J., Minichino, J. Learning OpenCV 4 computer vision with Python 3: Get to grips with tools, techniques, and algorithms for computer vision and machine learning, 3rd Edition, Kindle Edition.
- [14] Introduction to OpenCV-Python Tutorials. Retrieved from: [https://docs.opencv.org/master/d0/de3/tutorial\\_py\\_intro.html](https://docs.opencv.org/master/d0/de3/tutorial_py_intro.html)
- [15] Cheng, Y., Maimone, M. W., Matthies, L. (2006). Visual odometry on the Mars exploration rovers – a tool to ensure accurate driving and science imaging. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 54–62. DOI: 10.1109/MRA.2006.1638016
- [16] Takaoka, Y., Kida, Y., Kagami, S., Mizoguchi, H., Kanade, T. (2004). 3D Map building for a humanoid robot by using visual odometry. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 4444–4449. DOI: 10.1109/ICSMC.2004.1401231
- [17] Fernandez, D., Price, A. (2004). Visual odometry for an outdoor mobile robot. *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 816–821. DOI: 10.1109/RAMECH.2004.1438023
- [18] Chhaniyara, S., Bunnun, P., Zweiri, Y., Seneviratne, L., Althoefer, K. (2017). Feasibility of velocity estimation for all terrain ground vehicles using an optical flow algorithm. *ICARA 2006-Third international conference on autonomous robots and agents*. DOI: 99511995302346