

**С. Ю. ЧЕРВ'ЯКОВ**, аспірант НТУ «ХПІ»;  
**Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ**, канд.техн.наук, доц. НТУ «ХПІ»;  
**Б. Х. ЄРІЦЯН**, ст. викл. НТУ «ХПІ»;  
**М. Л. ГЛЕБОВА**, канд.техн.наук, доц. ХНУМГ ім. О. М. Бекетові, Харків  
**О. В. КЛИМЕНКО**, студент НТУ «ХПІ»;  
**В. М. ІВАХНЕНКО**, студент НТУ «ХПІ»

### **РЕЖИМИ РУХУ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ З ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ДІЛЯНЦІ ШЛЯХУ ДЛЯ ЯКОГО ЗАДАНО ПРОФІЛЬ ТА ГРАФІК РУХУ**

В роботі розглядається методика вибору режимів руху момент при розробці нових електрорухомих складів (ЕРС) та при моделюванні руху виникає та стратегія керування для математичної моделі руху потягу. Для створення ефективного керівного сигналу для руху потягу крім визначення можливих режимів руху розроблена стратегія керування. Виведені 5 режимів руху та умови їх зміни такі як: рух з максимальною силою тяги, що реалізується; рух на вибігу; рух з максимальною силою гальмування, що реалізується; рух при роботі електроприводу з максимальним ККД в режимі тяги та рух при роботі електроприводу з максимальним ККД в режимі гальмування. Стратегія враховує потрібні обмеження по швидкості, прискоренню та розкладу руху. Стратегія дозволяє мінімізувати енергетичні затрати з урахуванням наведених обмежень на заданій ділянці шляху.

**Ключові слова:** режими руху потягу, моделювання руху, стратегія керування, перехідні процеси

**Вступ.** Вибір режимів руху електрорухомого складу (ЕРС) значно впливає на загальну витрату енергії та на тривалість руху. Стратегія зміни режимів визначає якість перехідних процесів, що реалізуються на електроприводі рухомого складу. Визначення режимів руху та стратегія їх перемикання разом реалізують алгоритм автокерування електропотягом.

**Аналіз основних досягнень і літератури.** Основні режими керування рухомого складу в останні часи опираються на принцип максимуму Понтрягіна. [1,2,3], згідно якому оптимальні режими керування повинні опиратися на мінімальні втрати енергії для руху потягу на ділянці колії [4,5]. Однак, за останні часи вирішенні лише часткові випадки що до оптимальних режимів руху з дуже великими припущеннями такими, як лінійність залежностей втрат енергії, відсутність змін швидкостей руху, наявність зміни профілю шляху та ін. Поява у останні часи нових типів електромеханічних перетворювачів енергії також привела до змін у уяві до цих процесів. Тому робота направлена на розробку режимів руху ЕРС з електромеханічним перетворювачем змінного струму на ділянці шляху, у якому задано профіль та графік руху, є актуальною.

**Мета роботи:** розробити методіку керування перемиканням режимів руху для ЕРС з ЕМП змінного струму.

**Матеріал дослідження:** Нами прийнято, що математична модель руху ЕРС складається з двох диференціальних рівнянь: рівняння руху поїзда та рівняння зміни температури ЕМП [6,7].

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{1+\gamma} (F - W - B), \quad (1)$$

де  $m$  – маса електропоїзда;  $v$  – швидкість руху електропоїзда;  $1 + \gamma$  – коефіцієнт інерції обертових частин;  $t$  – поточне значення часу;  $F$  – сила тяги;  $B$  – гальмівна сила;  $W$  – повний опір руху [8];  $\gamma$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив обертових частин на прискорення руху електропоїзда. Сила тяги і гальмування залежать від режиму роботи тягового приводу [9].

На реально існуючих ділянках шлях мінімізація витрат енергії являє складну багатокритеріальну задачу [10]. Тому для реалізації математичної моделі керівного впливу на ЕРС під час руху ділянкою шляху з напередвизначеним профілем і графіком руху та з виконанням вимог по мінімізації часу пропонуються до використання наступні режими руху ЕРС:

- рух з максимально реалізуємою силою тяги;
- рух на вибігу;
- рух з максимально реалізуємою силою гальмування;
- рух при роботі електроприводу з максимальним ККД в режимі тяги;
- рух при роботі електроприводу з максимальним ККД в режимі гальмування.

Для створення ефективного керівного сигналу для руху потягу крім визначення можливих режимів руху потрібно ввести стратегію керування [11,12]. Під стратегією керування будемо розуміти стратегію зміни режимів під час руху. Стратегія перемикання режимів працює у дескриєзованому просторі часу. Для кожного з відрізків часу вона визначає, який саме режим треба використовувати. При цьому вихідними даними для стратегії є:

- поточна швидкість руху;
- профіль шляху;
- обмеження швидкості на поточній ділянці;
- обмеження прискорення для заданого типу електрорухомого складу;
- поточний режим руху;
- «історія» режимів.

Під «історією» будемо розуміти знак прискорення стратегії: тобто чи направлена вона на підтримання швидкості, прискорення, або сповільнення руху.

Для виконання умови мінімізації часу руху ЕРС ділянкою шляху задана швидкість на кожній ділянці дорівнює швидкісному обмеженню на цій ділянці. Для реалізації стратегії пропонується ввести 2 довірчих інтервали. Інтервали можуть задаватись як абсолютно, так і відносно. В першому випадку вони інтервали задаються як абсолютні відхилення від заданої

швидкості у км/г, у другому – у процентному відхиленні. У статті будемо розглядати інтервали, що задаються абсолютно. Позначимо відповідні відхилення як  $\delta_1$  та  $\delta_2$ .

Позначемо ключові швидкості:

$$V_{vib} = V_m - \delta_1, \quad V_{pp} = V_m - \delta_2, \quad (2)$$

де  $V_{vib}$  – швидкість виходу на вибіг;  $V_m$  – задана швидкість або гранична швидкість;  $V_{pp}$  – швидкість виходу на постійну потужність.

Крім того введемо поняття перехідної швидкості, котру задамо відносно максимальної:

$$V_{pr} = V_m \cdot k_1, \quad (3)$$

де  $k_1 = 0,8$ .

Таким чином, довірчі інтервали розділяють простір швидкості на 3 умовних зони: I – зона в інтервалі  $[0; V_m - \delta_2]$ , в якій потрібно максимально реалізувати тягу для якнайскорішого досягнення заданої швидкості; II – зона в інтервалі  $(V_m - \delta_2; V_m - \delta_1]$ , в котрій максимальне пришвидшення вже не є обов'язковим і ЕРС може рухатись, в тому числі, в режимах вибігу та максимального ККД тяги; III – зона в інтервалі  $(V_m - \delta_1; V_m]$ , або зона виходу на вибіг.

Режим руху з максимально реалізуємою силою тяги використовується при початковому розгоні електропотяга, та, наприклад, при розгоні при підвищенні швидкісного обмеження. Перехід на такий режим руху виконуються з режиму стоянки, з будь якого режиму при переході складу на ділянку з більшою заданою швидкістю та з режимів вибігу та тяги з максимальним ККД у випадку, коли швидкість руху стає меншою за  $V_m - \delta_2$ , тобто у просторі швидкості ЕРС переміщується з зони II до зони I. Таким чином режим з максимальною силою тяги будемо завжди використовувати, коли  $v < V_{per}$ .

Для режиму максимальної тяги електромагнітний момент двигуна може бути визначений наступним чином:

$$M = \text{MIN}(M_{\max}(n, t^\circ), M'_k), \quad (4)$$

Де  $M_{\max}(n, t^\circ)$  – максимальний момент при відповідній частоті обертання і температурі тягового двигуна,  $M'_k$  – критичний момент відповідний критичній силі тяги за обмеженням зчеплення контакту колесо-рейка.

Критичний момент, у свою чергу, можна визначити як:

$$M'_k = \frac{F'_k D}{2\mu\eta_{zp}}, \quad (5)$$

де  $\mu$  – передавальне відношення редуктора ЕРС;  $D$  – діаметр середнізношеного бандажа колісної пари ЕРС для моторного вагона електропоїзда, що прийнято прирівнювати до 1,015;  $\eta_{zp}$  – ККД зубчастієї передачі для тягових приводів з редукторним приводом становить величину 0,98, а для безредукторного приводу дорівнює 1.

$$F'_k = 9,81 \psi m_l \cdot 1000, \quad (6)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою.

$$\psi = 0,28 + \frac{3}{50 + 20v} - 0,0007v, \quad (7)$$

де  $v$  – швидкість руху.

Рух на вибігу використовується при швидкостях, близьких до заданої. Тобто, коли швидкість руху знаходиться в зоні III, іншими словами, коли виконується нерівність:

$$V_{vib} \leq v < V_m. \quad (8)$$

Режим руху з максимальною силою гальмування використовується при необхідності різкого зниження швидкості через обмеження швидкостного режиму руху згідно графіка руху.

Режим руху при роботі електроприводу з максимальним ККД в режимі тяги пропонується використовувати при швидкостях близьких до заданої та при великому опорі руху, як, наприклад, на затяжних підйомах. Режим використовується при

$$V_{per} \leq v < V_{vib}. \quad (8)$$

Для цього режиму визначимо момент як:

$$M = \text{MIN} \left( M(n_{\max}, t^\circ), M'_k \right), \quad (9)$$

де  $M(n_{\max}, t^\circ)$  – момент на валу ЕМП при максимальному ККД при відповідній частоті обертання і температурі тягового двигуна, знайдений для відповідного типу ЕМП.

Режим руху при роботі електроприводу з максимальним ККД в режимі гальмування використовується зі швидкостями близькими до заданої та при великому негативному опорі руху, наприклад, на затяжних спусках.

Ці режими, разом зі стратегією їх зміни, узгоджуються з принципом Понтрягіна [1], згідно з яким, рух поїзда має здійснюватися з максимальною силою тяги для досягнення встановленої швидкості руху або на вибігу, після її досягнення.

**Висновок.** В роботі розглядається методика вибору режимів руху та стратегія керування для математичної моделі руху потягу. Виведені 5 режимів руху та умови їх зміни. Стратегія враховує потрібні обмеження по швидкості, прискоренню та розкладу руху. Стратегія дозволяє мінімізувати енергетичні витрати з урахуванням наведених обмежень на заданій ділянці шляху.

**Список літератури:** 1. *Понтрягин Л. С.* Математическая теория оптимальных процессов. [3-е издание] / *Л. С. Понтрягин* и др. – М. Наука, 1976. – 392с. 2. Створення тягового електроприводу моторвагонних поїздів на базі сучасних інформаційних технологій [Текст] : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.22.09 / *Носков Валентин Іванович*; Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". - Х., 2009. - 37 с. 3. Методи та моделі прогнозування ефективних параметрів керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу [Текст] : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.22.09 / *Блиндюк Василь Степанович* ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. В. Лазаряна. - Дніпропетровськ, 2014. - 40 с. 4. *Носков Валентин Іванович, Дмитриєнко Валерій Дмитрієвич, Заполовський Николай Іосифович, Леонов Сергей Юрьевич.* Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. — Х. : ХФИ Транспорт Украины, 2003. — 248с. — (Библиотека по современной автоматике; Вып.12). — Библиогр.: с. 241-245. 5. *Мугиншейн Л. А.* Энергооптимальные методы управления движением поездов / *Л. А. Мугиншейн, А. У. Илютович, И. А. Ябко* – М.: Интекст, 2012. – 80с. 6. Основы локомотивной тяги. [Учебник для техникумов ж.-д. трансп.] / *С. И. Осипов, К. А. Миронов, В. И. Ревич.*: 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Транспорт, 1979. – 440 с. 7. *Гребенюк П. Т.* Правила тяговых расчетов поездной работы / *П. Т. Гребенюк* – М. : Транспорт. 1985. – 287 с. 8. *Черв'яков С. Ю., Любарський Б. Г.* Сили опору руху електрорухомого складу залізниць / *Б. Г. Любарський, С. Ю. Червяков, М. М. Калюжний* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».–2012.– № 20. – С. 91-96 9. *Червяков С. Ю., Любарский Б. Г.* Определение эффективности тягового привода электропоездов / *В. И. Омеляненко, Б. Г. Любарский, С. Ю. Червяков* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – № 32 – С. 67 – 75 10. *Гетьман Г. К.* Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта [Текст]: монография / *Г. К. Гетьман.* – Д.: Изд. Днепр. нац. ун-та ж/д трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с. 11. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. [9-е изд., исправленное и дополненное] / *Л. А. Бессонов* М.: Высшая школа, 1996 – 638 с. 12. *Любарский Б. Г.* Выбор типа тягового электромеханического преобразователя энергии для пригородного электропоезда / *Б. Г. Любарский,* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – Х.: НТУ «ХПІ».– 2014. – № 36(1009)– С. 195–197

**Bibliography (transliterated):** 1. *L. S. Pontryagin* The mathematical theory of optimal processes . [ 3rd Edition]. *L. S. Pontryagin* , etc. - Moscow. Science , 1976. 2. Stvorenniya traction elektroprivodu railcar poїzdıv on bazi Suchasni informatsiynih How? [Text]: Author. dis. Dr. tech. Sciences: 05.22.09. *Sox Valentin Ivanovych*, 2009. 3. Metodi that modeli prognozuvannya efektivnosti parametriv keruvannya traction elektroprivodom railcar depot Ruh [Text]: Author. dis. Dr. tech. Sciences: 05.22.09. *Blindyuk Stepanovich* ; Dnipropetr . nat. Univ zalizn . transp . IM V. Lazaryana . - Dnepropetrovsk, 2014. 4. *Sox Valentin , Dmitrienko Valery, Zapolovsky Nicholas I., Sergey Leonov.* Modeling and optimization of management and control systems of locomotives. - Kharkiv: KhPhI Transport of Ukraine, 2003. 5. *Muginsheyn L. A.* Energooptimalnye methods of train control - Moscow. Intekst 2012. 6. Basics locomotive traction . [ Textbook for technical railway transp . ]. *S. I. Osipov, K. A. Mironov , V. I. Revich .* : 3rd ed. , Ext. and rev. - Moscow: Transport , 1979. 7. *Grebenuk P. T.* Terms of train traction calculations. *P. T. Grebenuk* - Moscow : Transport. 1985. 8. *Chervyakov S. Y., Lyubarsky B. G.* Sealy support Ruhu elektroruhomogo warehouse zaliznits. *B. G. Lyubarsky , S. Y. Worms , M. M. Kalyuzhna.* News Natsionalnogo tehnicnogo universitetu KhPI. -2012. - № 20. 9. *Tchervyakov S. Y., Lyubarskii B. G.* Determine the effectiveness of electric traction drive. *V. I. Omelyanenko , B. G. Lubarsky , S. Y. Worms.* News Natsionalnogo tehnicnogo universitetu " KhPI ." - 2013 . - № 32. 10. *Getman G. K.* Rational scientific basis for determining horsepower traction series of railway transport [Text] : monograph / *G. K. Getman.* - D.: Univ . Dnepr . nat. Univ w / d transp . im. Acad. V. Lazarian , 2008. 11. *Bessonov L.A.* Theory of Electrical Engineering . Electrical circuits . [ 9th ed . , Revised and enlarged ] / *L. A. Bessonov* Moscow: Higher School , 1996. 12. *Lyubarskii B. G.* Selecting the type of electromechanical transducer traction energy for suburban EMUs. News Natsionalnogo tehnicnogo universitetu "KhPI" - Kharkiv.: NTU "KhPI " - 2014. . - № 36 ( 1009 ).

*Надійшла (received) 15.05.2014*