

Е.Н. ШАПРАН, канд. техн. наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (Україна)

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ТЕПЛОВОЗІВ

У статті приведені результати обґрунтування конструкції мікропроцесорної системи керування електричною передачею з поліпшеними тягово-енергетичними характеристиками локомотивів.

В статті приведені результати обґрунтування конструкции микропроцессорной системы управления электрической передачей с улучшенными тягово-энергетическими характеристиками локомотивов.

In the article there are results of analysis the possibility of the construction microprocessor system of the main electric drive which to improve tractive-energetic characteristics of locomotives.

Тенденції розвитку транспортної мережі України тісно пов'язані з підвищенням ефективності роботи залізничного транспорту, зокрема, з необхідністю зниження витрати паливно-енергетичних ресурсів і поліпшення тягових властивостей локомотивів. Це висуває високі вимоги до якості роботи систем керування електричними передачами (ЕП).

Сьогодні приписний парк Укрзалізниці складає більше 2000 одиниць магістральних і маневрових тепловозів. Тому доцільно проводити їх модернізацію для впровадження нових технічних заходів, що відповідають сучасному рівню техніки та не передбачають значних змін конструкції і великих капіталовкладень. Це підтверджується прийнятим Міністерством транспорту України і Укрзалізницею рішень, які викладені у "Концепції і програмі реструктуризації на залізничному транспорті".

Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є впровадження ефективних протибуксовочних систем, виконаних, як правило, на базі сучасних мікропроцесорів [1]. Цілком зрозуміло, що для розробки алгоритмів їхнього функціонування необхідно постійно узагальнювати накопичений науковий досвід для його практичної реалізації. При цьому особливий інтерес викликають дослідження характеристик зчеплення при реалізації тягових зусиль, у тому числі визначення величини критичного ковзання U_{sk} , котре є визначальними при виборі конструкції протибуксовочних систем, які забезпечують підвищення тягово-зчіпних властивостей локомотивів.

Теоретичними дослідженнями процесів буксування, підвищенням ефективності використання зчіпних властивостей локомотивів за-

ймалося багато вчених: Є.Г. Бове [2], М.Р. Барський [3], І.П. Ісаєв [4], О.Л. Голубенко [5], Д.К. Мінов [6], Ю.І. Чуверін [7], С.І., А.П. Павленко [8] та ін.

Велика увага приділяється таким дослідженням і за кордоном. В даний час у США на тепловозах для підвищення тягових властивостей застосовується протибуксовочна система "Супер Серієс" фірми General Motors [9]. Створенням нових методів регулювання прослизань займаються відомі вчені: Watanabe T., Yamashita M. [10], Onishi K., Ogawa Y. [11], Park D., Kim M. [12] та ін.

Досить успішно вирішується питання впровадження мікропроцесорних систем управління дизель-генератором та електропередачею тепловозів 2ТЭ116 і ЧМЭЗ російськими вченими ВНІЖТ та Саратовського проектно-виробничого підприємства „Дизельавтоматика” [15].

Проблемою поліпшення зчіпних властивостей локомотивів займаються й інші відомі фірми: Siemens, Hitachi, Ansaldo, General Motors та інші [9-12,18]. В усіх цих розробках дуже багато схожого з вітчизняними і принципових розходжень у підходах майже не має, але для регулювання сили тяги колісних пар використовуються досить складні алгоритми на основі спостереження за швидкістю прослизання.

Перспективними є системи радіолокаційного виміру швидкості та магнітометрична система [16]. Але перша має низьку точність при швидкостях до 10 м/с, тобто в тому діапазоні де найбільше проявляються процеси буксування, а друга потребує зміни конструкції буксового вузла колісної пари для кріплення додаткового обладнання.

Необхідно відзначити, що всі притивобуксовочні системи, основані на використанні дій-

сної швидкості руху локомотивів [16], коштують на декілька порядків вище за існуючі. Вони мають, як і впроваджені на локомотивах, спільний недолік – неадаптований до реальних умов (температури, вологості, забруднень, зміни навантаження від колеса на рейку тощо) алгоритм контролю нормованого значення прослизання, при досягненні якого подається сигнал на вмикання протибуксовочної системи, тобто не забезпечується повісна реалізація потенційного коефіцієнта зчеплення ψ_k^{\max} .

Крім цього, за допомогою цифрових автоматичних систем можна реалізувати більш складні алгоритми керування електропередач [1, 13, 18]. Так, наприклад, параметри тягових електродвигунів (ТД) вибираються, виходячи з необхідності досягнення максимального значення коефіцієнта корисної дії (ККД) у тривалому режимі роботи. Однак відомо, що такі режими складають до 30 % усього часу його роботи. При цьому, струми тягових двигунів будуть істотно нижче розрахункових, що приводить до зниження середньо експлуатаційного ККД електропередачі і тепловоза в цілому [19].

Гістограми окремих режимів завантаження тепловозів показані на рис. 1. З них видно, що на високих позиціях контролера машиніста тепловози працюють незначний час [19].

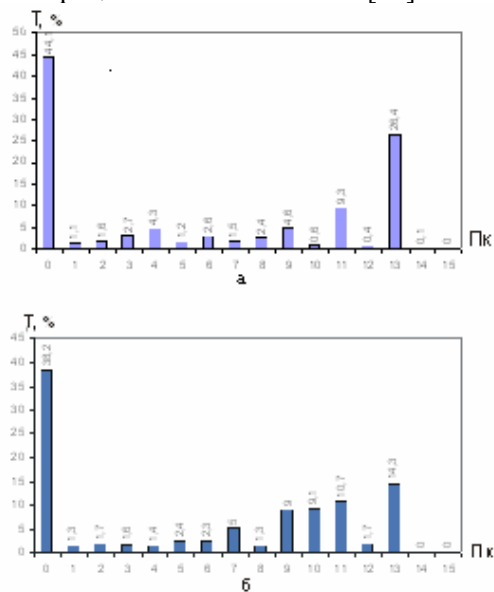


Рис. 1. Типові режими завантаження магістральних тепловозів:

а) – тепловоз 2ТЕ116; б) – тепловоз 2ТЕ10М;
 Т – відносний час роботи на даній позиції;
 Пк – номер позиції контролера машиніста

Тобто існує реальна можливість збільшення ефективності тепловозів за рахунок зміщення режимів роботи електропередачі в зону підви-

щених ККД шляхом автоматичного відключення частини тягових електродвигунів при незначних струмах тягового генератора, а також оптимального вибору параметрів протибуксовочних систем, що і передбачається досліджувати в даній роботі.

Багаторічні дослідження ВНДТІ (м. Коломна) процесів реалізації тяги в зоні обмеження по зчепленню показує, що робота сучасних тепловозів часто відбувається при значних швидкостях ковзання [20]. Так, наприклад, для тепловозів ТЕМ2 і 2ТЕ121, що відрізняються між собою осьовими навантаженнями (200 і 250 кН на вісь), потужністю (880 і 2950 квт) і поступальною швидкістю (від 0,7 до 40 км/год), ці характеристики в безрозмірних одиницях в умовах руху з подачею піску майже збігаються. Максимальна сила тяги спостерігалася при ковзаннях $\varepsilon = 2,5-3,5$ відсотка.

Були також отримані характеристики зчеплення без подачі піску при різному стані поверхні рейок (рис. 2). При цьому в деяких випробуваннях на характеристиках зчеплення при відносних ковзаннях від 5 до 25 відсотків були зареєстровані локальні максимуми, що добре погоджується з дослідженнями, проведеними за рубежом [11,21].

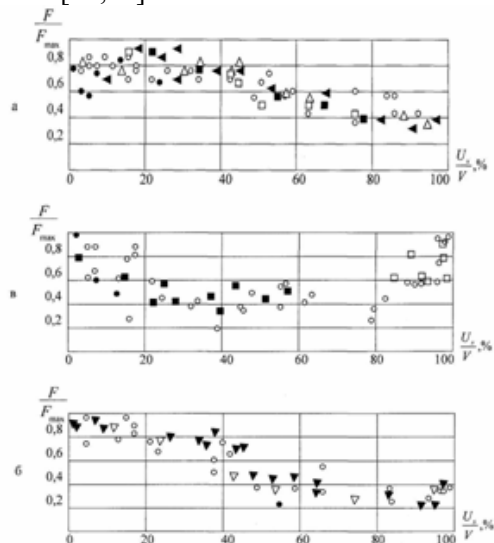


Рис. 2. Характеристики зчеплення при роботі без подачі піску: а – на сухих рейках; б – на мокрих рейках; в – на змащених рейках: ●, ○, ■, □, ▼, ◀, Δ - дані різних поїздок

Таким чином, результати експериментального і теоретичного дослідження зчеплення відрізняються як кількісно (рис. 3), так і якісно [14, 17, 20-22]. Якщо в області малих ковзання теоретичні моделі і результати експериментальних робіт близькі, то при подальшому збіль-

шенні ковзань розходження стає істотним. У випадку реалізації колесом тягового (гальмового) моменту, тобто при наявності значного ковзання, використання теоретичних моделей зчеплення, в основі яких лежить гіпотеза Рейнольдса і закон тертя Кулона, для вибору параметрів протибуксовочних систем буде не цілком виправданим.

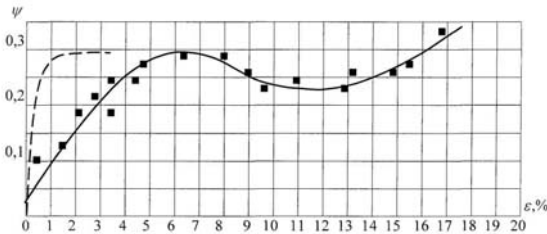


Рис. 3. Характеристики зчеплення отримані за Ф. Картером і за експериментальними даними

Порівнюючи дані характеристик зчеплення колеса з рейкою за всіма наведеними вище теоретичними і експериментальними дослідженнями можна зробити такі висновки:

1. Теоретичні моделі зчеплення в загальному випадку підтверджують, що з ростом ковзання від нуля до критичного $\varepsilon_{кр}$ коефіцієнт зчеплення росте, а потім не змінюється. Причому, величина $\varepsilon_{кр}$ становить 0,1...0,5 % [5, 6].

2. Експериментальні дослідження характеристик зчеплення в режимі тяги локомотива [20-22] показують, що наявність у реальних умовах забруднень поверхневих шарів контактної зони приводить до того, що максимум зчеплення зміщується в зону критичних ковзань 2...15 % [20]. Крім того, виникає другий максимум характеристики зчеплення при ковзаннях 10...25 % на рейках помірного забруднення [17-20].

Багатофакторність системи «колесо – рейка» і відсутність надійних детермінованих методів, що задовольняють потреби практики, сприяли інтенсивному розвитку теоретико-імовірнісного підходу в дослідженні характеристик зчеплення колеса з рейкою, усебічно розробленого професором І.П. Ісаєвим [4]. Такий підхід також перспективний стосовно деяких задач динаміки локомотива, пов'язаних з розробкою протибуксовочних систем.

Для подальших досліджень превентивності протибуксовочних і протиюзних властивостей електропередач тепловозів, ґрунтуючись на дослідженнях вітчизняних і закордонних авторів [3-6, 9-12, 17, 20-23], можна одержати узагальнене сімейство найбільш ймовірних характеристик (математичних чекань) коефіцієнта зчеп-

лення колеса з рейкою у такому вигляді:

$$M[\psi(V \cdot U_s)] = K_{xy} M[\psi(V)] \left\{ \arctg \frac{800U_s}{V} - a \cdot \exp \left[- \frac{1,6 - b \cdot \exp(-V) + cV^2}{d + hU_s^2} \right] \right\}; \quad (1)$$

$$M[\psi(V)] = M[\psi(0)] \left\{ 1 - z \cdot \exp \left(- \frac{m}{VM[\psi(0)]} \right) - nVM[\psi(0)] \right\}, \quad (2)$$

де $M[\psi(0)]$ – математичне сподівання коефіцієнта зчеплення при $V=0$; a, b, c, d, h, m, n, z – коефіцієнти, що залежать від конструкції екіпажної частини і забруднення рейки; K_{xy} – коефіцієнт кореляції, що враховує вплив поперечного ковзання; U_s – швидкість ковзання; V – швидкість локомотива.

Для обґрунтування можливості вибору параметрів протибуксовочних систем, виходячи з умови досягнення максимуму коефіцієнта зчеплення, насамперед, дослідимо на екстремум залежність (1) як функцію ковзання U_s і швидкості V руху локомотива за умови мінімальних втрат енергії на тертя. Ці умови можна виразити так:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\psi}(V, U_s)}{\partial U_s} = 0; \frac{\partial \bar{\psi}(V, U_s)}{\partial V} = 0; \\ \eta_k \rightarrow \eta_k^{\max} \text{ при } U_s \in U_s^*; V \in V^*, \end{cases} \quad (3)$$

де U_s^*, V^* – величини параметрів, що відповідають області максимальних значень коефіцієнта зчеплення; $\bar{\psi}(V, U_s)$ – найбільш ймовірна характеристика, задана функцією (1); η_k^{\max} – максимальний коефіцієнт корисної дії колісної пари.

Якщо прийняти, що поступальна швидкість протягом експерименту не змінюється, то умову досягнення максимального ККД колісною парою від швидкості ковзання можна виразити так:

$$\eta_k^{\max} = \frac{F_k V}{F_k^{\max} V} = \frac{P_s}{F_k^{\max}} = \frac{\psi_k}{\psi_k^{\max}}. \quad (4)$$

де – F_k , F_k^{\max} тягове зусилля і його максимальне значення; P_s – вертикальне навантаження на колісну пару.

Отже, залежність ККД колісної пари від швидкості ковзання в тяговому режимі ідентична характеристичі зчеплення і для пошуку екстремуму згідно з формулами (3) і (4) досить виконати умови

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\psi}(V, U_s)}{\partial U_s} = 0; \\ \frac{\partial \bar{\psi}(V, U_s)}{\partial V} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Розв'язавши систему рівнянь (5) одним з методів пошуку екстремуму, можна одержати залежність максимального значення коефіцієнта зчеплення від швидкості руху локомотива V і ковзання U_s колісних пар у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \psi_{(V, U_s)}^{\max} &= 0,7\psi_0 \left[1 - Z \cdot \exp\left(-\frac{m}{\psi_0 V}\right) \right] \times \\ &\times \left[\arctg \frac{800U_s}{V} - N \right]. \quad (6) \\ N &= a \cdot \exp\left(-\frac{1,6 - b \cdot \exp(-V)}{d + hU_s^2}\right) \end{aligned}$$

Отримана залежність добре корегується з експериментальними даними [17-20], наведеними на рис. 3.

Аналіз втрат в електричних ланцюгах тепловозів дозволяє визначити найбільш ефективні шляхи їх зниження. Для цього розглянемо ККД електродвигуна при довільно заданих струмах якоря I і напрузі U , який розраховується згідно такої залежності:

$$\eta_d = 1 - \frac{P_\Sigma}{U \cdot I}, \quad (7)$$

де P_Σ – сумарні втрати потужності у ТД.

Максимальне значення він може досягти за таких умов:

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta_d}{\partial I} = \frac{\partial}{\partial I} \left(1 - \frac{P_\Sigma}{U \cdot I} \right) = 0; \\ \frac{\partial \eta_d}{\partial U} = \frac{\partial}{\partial U} \left(1 - \frac{P_\Sigma}{U \cdot I} \right) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Крім цього, при виборі числа працюючих ТД повинні враховуватися такі обмеження:

$$\begin{cases} I \leq I_n; \\ U \leq U_n, \end{cases} \quad (9)$$

де I_n , U_n – тривало припустимі значення I і U .

Проведені дослідження показали, що максимум ККД можна забезпечити в робочому діапазоні напруг при навантаженнях ТД, коли електричні втрати в міді дорівнюють постійним втратам

$$\begin{aligned} I^2 R_\Sigma &= 1,2 P_{сн} \left(\frac{U}{U_n} \right)^{1,5} \left(\frac{\Phi}{\Phi_n} \right)^2 + \\ &+ 0,002 U_n I_n + K_{мх} \omega, \end{aligned} \quad (10)$$

де R_Σ – сумарний опір ланцюгів якоря ТД; $P_{сн}$ – номінальне значення втрат у сталі; ω – частота обертання якоря; Φ , Φ_n – магнітний потік і цього номінальне значення; $K_{мх}$ – коефіцієнт механічних втрат.

Тоді можна рекомендувати наведений на рис. 4 алгоритм керування кількістю включених тягових двигунів в електропередачі для підвищення економічності її роботи.

Необхідно відзначити, що підпрограми вимикання ПП OFF і вмикання ПП ON тягових двигунів працюють селективно, починаючи з 4 позиції контролера машиніста. При цьому вимикання ТД починається з першої колісної пари за напрямком руху локомотива, а вмикання – у зворотному порядку. Зроблено це для того, щоб забезпечувати очищення поверхонь рейок першими вимкненими колісними парами, котрі найбільш схильні до буксування через вертикальне розвантаження. Крім того, вимикання частини ТД дозволяє підвищити як їх ККД, так і ККД тягових редукторів (див. рис.5) завдяки зростанню їх відносного навантаження.

Отже, сумарний ріст ККД тягових двигунів і тягових редукторів приведе до підвищення ККД електричної передачі тепловоза. Даний висновок перевірений на математичних моделях тепловозів 2ТЕ116 і ТЕП 150, обладнаних системою поосьового регулювання дотичної сили тяги при штатному керуванні і при керуванні зі зміною кількості увімкнених ТД, реалізованих за допомогою пакета прикладних програм для моделювання Simulink, інтегрованих у математичний пакет MATLAB. Результати розрахунків показали, що запропоновані алгоритми керування тяговими двигунами дозволяють підвищити ККД електропередачі від 3 до 16 відсотків у залежності від швидкості руху тепловоза, профілю колії і ваги потягу.

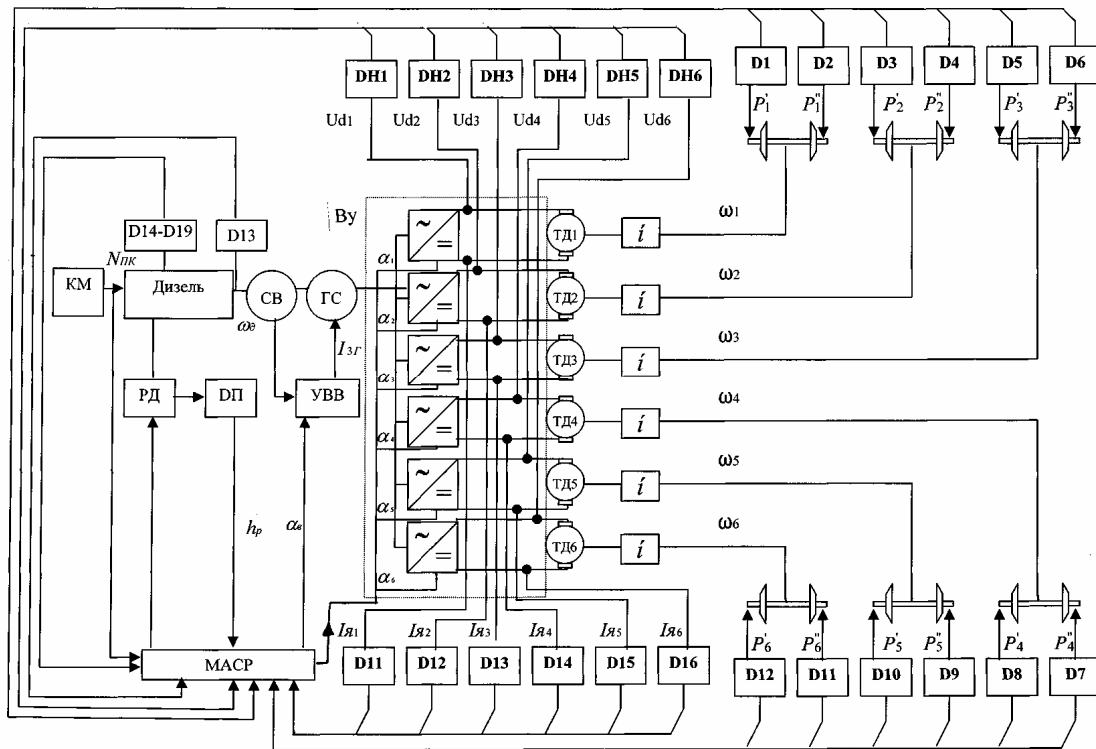


Рис. 7. Функціональна схема мікропроцесорної адаптивної системи регулювання дизель-генератора і електропередачі тепловоза (МАСР): КМ – контролер машиніста; СВ – збуджував; ГС – тяговий генератор; ПД – регулятор дизеля; ДП – датчик переміщення рейки паливних насосів; УВВ – джерело живлення обмотки збудження тягового генератора; ДН1÷ДН6, ДТ1÷ДТ2 - датчики на пруги (Ud1÷Ud6) та струмів (Iя1÷Iя6) тягових двигунів ТД1 – ТД6; ВУ – джерела живлення ТД1 – ТД6; D1÷D12 – датчики навантаження колісних пар; D13 – датчик частоти обертання колінчатого валу дизеля; D14÷D19 – датчики тиску повітря в ресивері, температури і тиску мастила, температури і тиску охолоджуючої рідини; α_1 - α_6 сигнали регулювання на пруги Ud1÷Ud6 на ТД1 – ТД6; ω_1 ÷ ω_6 – частота обертання колісних пар; P1' ÷ P6', P1'' ÷ P6'' – вертикальне навантаження на ліві і праві колеса колісної пари.

Висновки за даним дослідженням і перспективи робіт у цьому напрямку.

Дані, отримані у роботі, показують:

1. У зв'язку з тим, що взаємодія колеса з рейкою здійснюється в нестационарних умовах і характеризується впливом систематичних і випадкових факторів, обумовлених як особливостями конструкції локомотива і рейкового шляху, так і фізико-хімічним станом контактуючих поверхонь, то в проведених дослідженнях запропоновано розглядати не коефіцієнт зчеплення, а його математичне чекання, отримане за численними експериментальними даними. Також показано, що на однорідній ділянці шляху він наближується до нормального стаціонарного процесу.

2. Було доведено й експериментально підтверджено, що проблема вибору оптимальних параметрів протибуксовочних систем є багатокритеріальною задачею пошуку екстремуму коефіцієнта зчеплення виходячи зі швидкості руху локомотива, абсолютного значення швидкості ковзання, а також фактичного стану пове-

рхні рейок у точці контакту кожної колісної пари (6). На рис. 8 показана бажана динамічна зона регулювання ковзання поблизу точки максимуму коефіцієнта зчеплення.

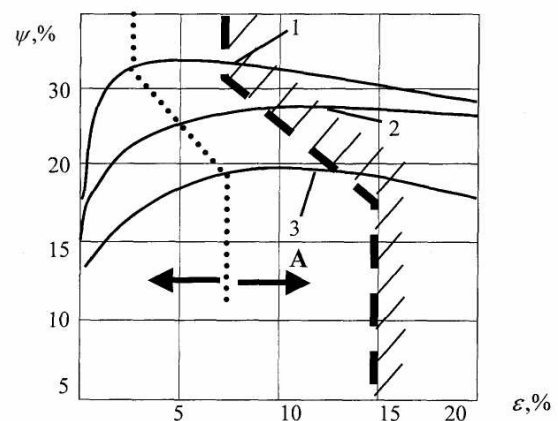


Рис. 8. Динамічна зона А регулювання ковзання при швидкості руху локомотива V=20 км/год; 1 – характеристика зчеплення при русі по сухих рейках; 2 – мокрих рейках; 3 – при русі в кривій 200 м, сухі рейки

3. Традиційні протибуксовочні системи, що мінімізують різницю струмів тягових двигунів, обмежують ефект поосного поліпшення зчеплення коліс з рейками. Тому, у відмінності від традиційних підходів до побудови протибуксовочних систем, необхідно допускати роботу тягових двигунів з різними струмами і частотою обертання для того, щоб виключити вплив на тягові і протибуксовочні властивості локомотивів розходження в діаметрах колісних пар, характеристик двигунів та інших параметрів, що випадковим чином впливають на форму кривої зчеплення. Крім того, необхідно допускати для передніх (по ходу) колісних пар більш високі рівні ковзання для поліпшення умов зчеплення, менш схильних до буксування наступних колісних пар, на які можна перерозподілити недовикористану потужність дизель-генератора.

4. Проведені дослідження показують, що максимальне значення ККД тягових двигунів забезпечується при навантаженнях, коли електричні втрати в міді стають рівними постійним втратам, що складаються з втрат у сталі, додаткових втрат і механічних втрат. При цьому ККД електропередачі зростає в середньому на 3 – 16 відсотків.

5. Запропонований спосіб керування електричною передачею зі зміною кількості увімкнених електродвигунів легко реалізувати на тепловозах із системою поосьового регулювання напруги на тягових електродвигунах без будь-яких додаткових витрат – тільки завдяки зміні алгоритму роботи керуючої програми. До таких тепловозів відносяться: 2ТЕ116, ТЕП150, ТЕ120, ТЕ127.

Проведені теоретичні дослідження на математичній моделі процесів буксування в запропонованій системі дозволяють зробити висновки, що подальшу розробку методів і технічних засобів підвищення тягово-зчіпних властивостей локомотивів необхідно вести у таких напрямках:

1. Наукового обґрунтування найбільш економічного шляху модернізації діючих тепловозів з метою підвищення їх тягово-зчіпних властивостей, зниження паливно-енергетичних витрат за рахунок удосконалення систем управління і регулювання дизель-генераторних установок та електропередач, в тому числі поліпшення роботи протибуксовочних систем.

2. Розробки наукових підходів до створення адаптивних мікропроцесорних систем управління дизель-генераторами та електропередачами перспективних локомотивів, котрі базу-

ються на елементах інтелектуальних систем і водночас не потребують складних математичних алгоритмів реалізації для забезпечення високої швидкодії.

3. Розробки засобів реалізації адаптивних систем регулювання, котрі забезпечують уніфікацію і можливості їх використання як на діючих, так і на перспективних локомотивах.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ким С.Н. Системы микропроцессорного управления электропередачей автономных локомотивов. Дис. ... д-ра техн. наук. Коломна: ВНИТИ, 1998.

2. Бове Е.Г. Противобуксовочная защита на электровозах. Сб. Новое в устройстве и содержании электровазов и тепловозов. Трансжелдориздат. 1962.

3. Барский М.Р., Серединова И.Н. Экспериментальное исследование процессов буксования и юза электровазов // Проблемы повышения эффективности работы транспорта. – М.: АН СССР, 1953. – Вып 1. с. 130-180.

4. Исаев И.П., Лужков Ю.М. Проблемы сцепления колес локомотивов с рельсами. – М.: Машиностроение. 1985. – 238 с.

5. Голубенко А.Л. Сцепление колеса с рельсом. – К.: ВИПОЛ, 1993. – 448 с.

6. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровазов с электрической передачей. М.: Транспорт. – 1965. – 257 с.

7. Чуверин Ю.Н. Электрические противобуксовочные схемы электровазов. Вестник ВНИИЖТ, 1961, №5.

8. Павленко А.П. Прогнозирование динамических качеств и оптимизация параметров систем “экипаж – тяговой электроваз – путь” перспективных локомотивов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1987. – 42 с.

9. SD 60 M Operators's Manual/ Electro-Motive Division General Motors Corporation. March. 1991.

10. Watanabe T., Yamashita M. Basic study of anti-slip control without speed sensor for multiple motor drive of electric railway vehicles // IEEE, Proceedings of the Power Conversion Conference. April, 2002. – Vol. 3. p. 1026-1032.

11. Ohishi K., Ogawa Y. Adhesion control of electric motor coach based on force nontrol using disturbance observer // IEEE, Advanced Motion Control. – April, 2000. p. 323-328.

12. Park D., Kim M. Hybrid readhesion control method for traction system of highspeed railway // IEEE, Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems. August, 2001. – Vol. 2. p. 739-742.

13. Шаговик А.В. Управление электрической передачей автономного локомотива: Сб. научн. тр. – СП: ПГУПС, 2004. – С.122 – 124.

14. Cartez F.W. On the action of a locomotive driving wheel / Proc. R. Soc. London: 112A (1926).-P. 151.-157.
15. В.В. Фурман, Е.Е. Коссов, Н.П. Аникиев, А.Н. Кирьянов. Микропроцессорная система управления высокофорсированным двигателем // Вісн. Східноукр. нац. ун-та. №4. – с. 90-95.
16. Малахов О.В. Підвищення точності і швидкодії системи контролю відносного переміщення коліс локомотива і рейок: Автореф. дис. ... к-та техн. наук / Східноукр. нац. ун-т. Луганск. – 2001. – 21 с.
17. Марков Д.П. Взаимосвязь коэффициента трения с проскальзыванием в условиях взаимодействия колеса с рельсом //Вестник ВНИИЖТ. 2003. №3.-С. 31-33.
18. Пат. 6012011 США, МПК В61С15/12. Traction control system and a method for remedying wheel – slippage. Jonson Chipley Н. Заяв. 11.09.1999. Оpubл. 04.01.2000.
19. Гриневич В.П., Гундоров М.П., Родионов И.Н. и др. Энергетические показатели тепловозов, режимы эксплуатации и затраты топлива на тягу / Труды ВНИТИ, - Коломна. Вып. 79. – С. 298 – 322.
20. Гриневич В.П. Исследования тяговых свойств тепловоза в зоне ограничения по сцеплению / Труды ВНИТИ, - Коломна, 1999, вып 79.-С. 270-297.
21. Вербек Г. Современное представление о сцеплении и его использовании //Железные дороги мира. 1974. №4.-С. 23-53.
22. Лужнов Ю.М., Русакова Н.В., Черепашенец Р.Г. Загрязнение поверхностей рельсов и колес подвижного состава// Вестник ВНИИЖТ. 1972. №4.-С. 38-40.
23. Беляев А.И., Емельянов Ю.В., Филяев А.В. Экспериментальное определение оценок вероятностных характеристик случайного процесса сцепления колесной пары с рельсами // Вестник ВНИИЖТ. 2001. №2.-С. 36-39.