

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФЕДОТОВ ВЛАДИСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 622.6

**ДИНАМІКА ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ
РУДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ З УРАХУВАННЯМ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЧИННИКІВ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ**

Спеціальність 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Вінниця – 2018

Дисертацією є рукопис.

Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Сінчук Олег Миколайович,
Криворізький національний університет,
завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних
систем в промисловості та транспорті.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мокін Олександр Борисович
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри відновлювальної енергетики та
транспортних електричних систем і комплексів.

доктор технічних наук, старш. наук. співр.
Юрченко Олег Миколайович
Інститут електродинаміки НАН України,
завідувач відділу транзисторних перетворювачів
(м. Київ).

Захист відбудеться «09» листопада 2018 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті, МОН України за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету МОН України за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «02» жовтня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Україна належить до країн сталого розвитку природних ресурсів і з 2013 року займає четверте за обсягом експорту залізорудної сировини місце в світі. Між тим, динаміка коливань світових цін на залізорудну сировину позбавлена позитивної тенденції, в порівнянні з 2011 роком в 2015 році ціни на залізорудну сировину на світовому ринку сировини знизилися на 60%. При цьому, собівартість видобутого залізорудної сировини по всім без винятку вітчизняним гірничорудним підприємствам з року в рік зростає.

Найбільшою сталістю змін в пайовій участі у формуванні комплексу показників собівартості видобутку залізорудної сировини (ЗРС) зазнають сегменти витрат на транспортування, а також енерговитрати. За останні два десятиліття перший з вищезазначених показників в загальній собівартості видобутого ЗРС збільшився більш ніж в 4 рази при збільшенні майже на 20% витрат електричної енергії на доставку сировини.

Причиною низьких показників функціонування електропотягів залізорудних шахт, крім об'єктивних причин, пов'язаних з процесом зниження глибин видобутку ЗРС, є застаріле технологічне обладнання всього комплексу внутрішньошахтного транспорту (ВШТ) і особливо електровозів, де в свою чергу архізастарілими є тягові електромеханічні комплекси (ТЕМК), які не відповідають сучасним вимогам енергоефективності, а також можливості реалізації очікуваного процесу автоматизації управління тяговими електромеханічними комплексами, як основи автоматизованої системи управління (АСУ) ВШТ.

В останнє десятиріччя в Україні відновились наукові пошуки в напрямку створення сучасних ефективних систем управління (СУ) ТЕМК рудникових (шахтних) видів електровозів. Отримані перші позитивні результати. Проте питання масового випуску очікуваних ефективних ТЕМК, як і нових зразків електропотягів на їх основі, відкладається. Головною причиною цієї затримки є відсутність в досліджуваних структурах систем (підсистем) адаптивної мінімізації динамічних процесів тягового комплексу, оскільки саме ці процеси в значній мірі впливають на ефективність функціонування ТЕМК. Джерелом динамічних режимів є перехідні процеси в ТЕМК, котрі в умовах функціонування електровозів залізорудних шахт займають більше 50% часу в циклі руху електропотягів.

Більш того, відсутність в такій ситуації адаптивної поведінки по мінімізації негативного впливу динамічних процесів в необхідному обсязі з боку СУ в процесі управління електровозами, також є причиною небезпечних зіткнень зчіпок: вагонеток – електровоза, і, як наслідок, передчасний вихід з ладу механічних і електричних частин всього комплексу електропотягів.

Створення СУ ТЕМК необхідного рівня ефективності важливо ще й тому, що при варіанті ручного, нині існуючого, управління ці недоліки в системі управління можуть бути виправлені і кориговані у тій чи іншій мірі машиністом електровоза, а в автоматичному варіанті, це може призвести до

непередбачуваних наслідків – нестійкості, неадекватності і навіть втрати контрольованості поведінки системи управління, що для тягової транспортної системи, тим більше в підземних умовах, вкрай небажано і навіть небезпечно.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень, які проводяться кафедрою автоматизованих електромеханічних систем у промисловості і транспорті Криворізького національного університету, і є частиною комплексних досліджень, що проводяться в рамках договору з ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат» з дослідження і практичної реалізації процесу модернізації експлуатованих і розробки нових тягових електротехнічних комплексів для сучасних типів рудникових електровозів і систем управління ними, а також є складовою держбюджетної НДР «Розробка енергозберігаючих заходів на підприємствах гірничодобувної промисловості» (№ держреєстрації 01115U003180), Кривий Ріг – 2015–2016 рр., у якій автор був одним з виконавців. Дисертаційна робота в своєму баченні реалізує мету державної програми розвитку машинобудування на 2006-2016 роки, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 18.04.2006 р №516.

Мета і завдання досліджень. Підвищення ефективності функціонування тягових електромеханічних комплексів рудникових типів електровозів шляхом зменшення рівня негативного впливу динамічних процесів у структурах «електровоз – вагонетки» на складові процесу транспортування з урахуванням експлуатаційних чинників залізорудних шахт.

Для досягнення мети дисертаційної роботи поставлені та розв'язані наступні наукові завдання:

- розробка тактики оцінки і дослідження реальних режимів функціонування тягових електротехнічних комплексів електровозів в умовах сучасних вітчизняних залізорудних шахт;

- аналітичне дослідження динаміки поведінки складових електропотягів для визначення рівня стійкості їх до виникаючих коливань і оцінки впливу цього процесу на тяговий комплекс;

- розробка дослідницької математичної моделі для визначення ролі, місця та рівня впливу електромеханічних перехідних процесів на динаміку поведінки рудникових електропотягів, ведених електровозами з двома осями й оцінка взаємодії динаміки електропотяга на складові тягових електротехнічних комплексів;

- визначення тактики будови структури системи управління тяговим електротехнічним комплексом рудникових електровозів у підземних гірничих виробках залізорудних шахт.

Об'єкт досліджень. Електродинамічні процеси в тягових електромеханічних системах рудникових видів електровозів.

Предмет досліджень. Динамічні режими функціонування тягових електромеханічних комплексів рудникових електровозів.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти дисертаційної роботи базуються на основах теорії електроприводу, в тому числі для рішення задач

оцінки динамічних процесів. При дослідженні динамічних процесів використовувалися варіаційні принципи Баграцького-Гамільтона, функції Лагранжа, методи кусково-лінійної апроксимації, закони фізики, метод планування експерименту, елементи теорії автоматичного управління електроприводами, електричних ланцюгів, елементи теорії електричних машин, наближеного рішення систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь, методи математичного і фізичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше для тягових комплексів контактних рудникових електровозів показано та формалізовано визначальний вплив динамічних режимів на поведінку електропотяга як багатомасової неоднорідної електромеханічної системи в залежності від типу підземних гірничих виробок залізрудних шахт з метою доповнення закону керування рухом потяга засобами мінімізації небажаних коливань, що дало змогу підвищити енергоефективність функціонування транспортної системи в цілому;

- вперше запропоновано для оцінювання порядку математичної моделі системи використовувати метод діаграми коефіцієнтів і встановлено, що для синтезу відповідного регулятора швидкості системи управління тяговими електромеханічними комплексами варто розглядати систему як систему третього порядку;

- отримала подальший розвиток теорія синтезу систем керування для тягових електромеханічних комплексів, які містять складну структуру механічної частини, шляхом використання регулятора швидкості, який налаштовується у відповідності до полюсів передатної функції динамічної системи, отриманої шляхом ідентифікації з комбінованим використанням узагальненого та зваженого методу найменших квадратів, а також діаграм коефіцієнтів системи: «електровоз – вагонетки».

Практичне значення отриманих результатів, які представлені в дисертаційній роботі, полягає в тому, що вони дозволили:

- розробити і реалізувати методику проведення експериментальних досліджень динаміки поведінки електропотягів в умовах залізрудних шахт;

- розробити та рекомендувати для втілення в практику досліджень тягових електромеханічних комплексів рудникових електровозів методику аналізу електромеханічних процесів;

- розробити тактику формування алгоритму управління тяговим електромеханічним комплексом рудникових електровозів з двома осями;

- використовувати результати досліджень в учбовому процесі для спеціальностей: 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 184 «Гірництво».

Результати досліджень передані для їх реалізації при модернізації тягових електромеханічних комплексів експлуатованих електровозів, а також в практику розробки, створення і випуску нових електроенергоефективних видів тягових електроприводів і систем автоматичного управління рудникових

електровозів спеціалізованим організаціям і підприємствам – ТОВ «Амплітуда» (м. Київ), ТОВ «Електрозахист» (м. Харків) і ПАТ «Електромашина» (м. Харків), а також при розробці експериментального зразка та випробуванні нової СУ ТЕМК рудникового виду електровоза в шахтах ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат».

Особистий внесок здобувача.

Результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримано автором самостійно. У роботах, написаних та опублікованих в співавторстві, а в другому належать такі результати: [1] – формалізація моделі електромеханічної системи електровоза; [2] – розробка структури алгоритму формування сигналів завдання швидкості обертання електродвигунів; [3] – аналіз функції відгуку, яка була отримана на основі теорії планування експерименту; [4] – аналіз електромеханічних перехідних процесів в складових рудникових електропотягів; [5] – визначення перспективних напрямків реінжинірингу тягових електромеханічних комплексів рудникових видів електровозів; [6], [13] – виконано дослідження режимів функціонування тягових електромеханічних комплексів рудникових контактних електровозів у вітчизняних залізорудних шахтах; [7] – побудова математичної моделі і розрахунок руху рудникового електропотяга на ділянках діаграм швидкості при завантажувальних та розвантажувальних операціях; [8] – визначення тактики розробки алгоритмів ідентифікації електромеханічних параметрів рудникових електровозів; [9] – розробка вимог до системи управління рудниковим електровозом для мінімізації ударів в механічних вузлах електропотяга; [10] – розробка імітаційних моделей рудникового електровоза з різними системами електропривода; [11] – визначення еквівалентної схеми силової частини перетворювача частоти з автономним інвертором напруги; [12] – математична модель зчпного пристрою вагонеток рудникового електропотяга; [14] – визначення тактики побудови алгоритму точного позиціонування вагонеток при завантажувальних та розвантажувальних операціях; [15] – аналіз можливостей математичних підходів ідентифікації об'єкта управління та теорії планування експерименту для вирішення задачі побудови алгоритму управління ТЕМК рудниковим електропотягом; [16] – оцінка технічних показників функціонування рудникових електропотягів; [17], [18] – оцінка напрямів реінжинірингу існуючих типів і структур тягових електромеханічних комплексів; [19], [22] – розробка схем моніторингу параметрів тягових електромеханічних комплексів рудникових електровозів; [20], [21] – аспекти ідеї розробки структур тягових електромеханічних комплексів рудникових електровозів та тактики побудови алгоритмів керування ними.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення, наукові і практичні результати, які були отримані в дисертаційній роботі, доповідалися й отримали схвалення на міжнародних науково-технічних конференціях: XV, XVI, XVII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика», Інститут електромеханіки, енергозбереження і систем управління

Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (2014-2016 рр., м. Кременчук); Міжнародна науково-технічна конференція «Сталий розвиток промисловості та суспільства» (24-26 травня 2017 р., м. Кривий Ріг); XXIII Міжнародній об'єднаній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Силова електроніка та енергоефективність» (ПАЕП-СЄЕ'2017) (12-16 вересня 2017 р., м. Харків); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук» (27-28 грудня 2017 р., м. Люблін, Республіка Польща).

В цілому, дисертаційна робота доповідалась на Міжнародній науково-технічній конференції «Електротехнічні системи, методи моделювання та оптимізації», м. Кременчук, 2016 р., II-й Міжнародній науково-технічній конференції «Smart-технології в енергетиці та електроніці – 2017», смт. Лазурне, 2017 р.

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи викладені в 22 наукових працях, в тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях, які входять до переліку ВАК України, в тому числі 1 стаття – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 1 стаття – у закордонному періодичному виданні, 5 статей – у наукових журналах і збірниках наукових праць, 5 тез доповідей, 3 монографії. За результатами досліджень отримано патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Робота містить 150 сторінки основного тексту, 94 рисунка, 6 таблиць, список використаних джерел із 105 найменувань і 14 додатків. Загальний обсяг роботи – 247 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність та сформульовані мета і наукові завдання досліджень, вказано на зв'язок роботи з науково-дослідними державними програмами та темами НДР. Наведено складові наукової новизни, практичного значення одержаних результатів та стан їх апробації.

У першому розділі наведено, що показники функціонування електропотягів, які є основною транспортною одиницею ВШТ залізничних шахт, є незадовільними насамперед по надійності, продуктивності і безпеці експлуатації. Основною складовою, яка визначає вищевідзначені низькі показники ВШТ є вид і структура їх ТЕМК.

Аналіз і оцінка поведінки ТЕМК рудникових видів контактних електровозів в умовах сучасних вітчизняних залізничних шахт дозволили встановити основну причину найбільш частих пошкоджень – динамічні навантаження, що викликаються коливальними процесами комплексу: «електровоз – вагонетки», які є наслідком наступних факторів: типом і алгоритмом управління ТЕМК електровоза; станом рейкових шляхів і

контактного проводу; коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками; типом зчіпних пристроїв; масою рухомого складу; людським фактором – кваліфікацією машиніста електровоза.

Визначено, що підвищення показників ВШТ до очікуваного рівня можливо шляхом застосування АСУ ВШТ на базі сучасних ТЕМК електровозів з автоматизацією процесу управління, особливо в області мінімізації динамічних коливань, шляхом обробки відповідних узагальнюючих критеріїв алгоритмом управління ТЕМК електровозів.

У другому розділі виконано комплекс аналітичних досліджень динаміки поведінки рудникового електропотяга як багатомасової системи з нелінійними зв'язками.

Базова модель шахтного електропотяга зображена на рис. 1.

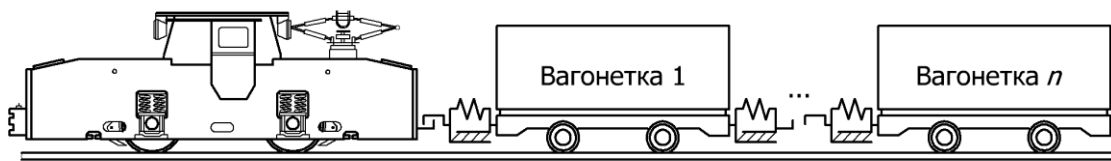


Рисунок 1 – Базова (розрахункова) модель шахтного електропотягу

На рис. 2 представлена структура управління тяговим електромеханічним комплексом електровоза. Доведено, що відомі дослідження в аналізованому напрямку базувались, як правило, на рівняннях Лагранжа. Між тим, цей системний підхід не завжди адекватно відображає динаміку поведінки як ТЕМК, так і електропотяга в цілому. Особливо це відноситься до рудникових електропотягів та особистих властивостей їх складових структур – тягових систем та зчіпних пристроїв. Запропоновано авторський підхід до аналізу динаміки поведінки вищезгаданого комплексу, котрий не відкидає теорію Лагранжа, а навпаки доповнює її. Так, згідно з наданою схемою (рис. 2), входом об'єкта управління є вектори некерованих \vec{Y} і керованих \vec{U} змінних, виходом є вектор зміщення вагонеток \vec{X} . Крім того, на об'єкт управління впливає вектор неконтрольованих збурень \vec{E} .

Інформація про вхідні і вихідні змінні поступає в модель динамічних процесів комплексу «електровоз – вагонетки», де на вибраній структурі моделі проводиться параметрична ідентифікація. Далі на моделі реалізується алгоритм управління, за допомогою якого розраховується оптимальна величина керуючого впливу \vec{U}^* .

Між тим, оцінювання динамічних процесів комплексу «електровоз – вагонетки», як об'єкту управління, вимагає виділення вхідних некерованих і керованих змінних. До некерованих вхідних змінних природно віднести стан рейкових доріг і контактного дроту, коефіцієнт зчеплення коліс з рейками, масу вагонеток і таке інше. При цьому керуючою вхідною змінною є силова дія з боку електровоза на вагонетки. Вихідними змінними є переміщення вагонеток.

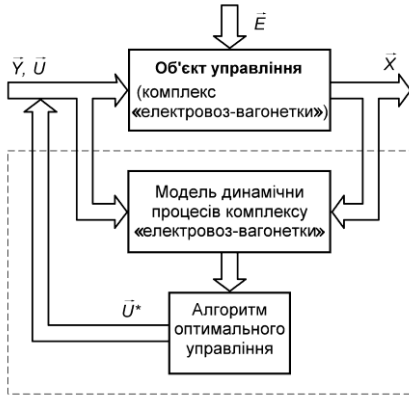


Рисунок 2 – Структура управління тяговим електромеханічним комплексом рудникового електровоза

Електропотяг (електровоз і вагонетки) є системою, яка може бути представлена у вигляді структури, що складається з n -ю кількістю мас, пов'язаних пружними (зчеплення) і жорсткими (рейки) зв'язками.

При цьому, на першому етапі досліджень вважатимемо, що при передачі зусилля в тягових модулях від тягових електричних двигунів на колісні пари через редуктори електровоза не виникає додаткових динамічних навантажень (відсутні кінетичні люфти, не виникає пружних коливань валу ходової осі через велику величину жорсткості). В такому

випадку математична модель руху комплексу «електровоз – вагонетки» може бути представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь другого порядку.

Враховуючи, що до складу рудникового електропотягу входить обмежена кількість вагонеток: 4-8 шт., а в початковий момент часу електропотяг знаходиться в статичному стані, математична модель руху комплексу «електровоз – вагонетки» представиться системою диференціальних рівнянь із нульовими початковими умовами:

$$\begin{aligned}
 m_1 \frac{dv_1}{dt} + \beta_1 v_1 + k_1 x_1 - \beta_2 (v_2 - v_1) - k_2 (x_2 - x_1) &= F_T(t), \\
 m_i \frac{dv_i}{dt} + \beta_i (v_i - v_{i-1}) + k_i (x_i - x_{i-1}) - \beta_{i+1} (v_{i+1} - v_i) - k_{i+1} (x_{i+1} - x_i) &= 0, \\
 \dots \\
 m_n \frac{dv_n}{dt} + \beta_n (v_n - v_{n-1}) + k_n (x_n - x_{n-1}) &= 0, \\
 x_i(t=0) = 0, v_i(t=0) &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де x_i – зміщення i -ої вагонетки; v_i – швидкість i -ої вагонетки; dv_i/dt – прискорення i -ої вагонетки; β_i – коефіцієнти демпфування; k_i – коефіцієнти жорсткості; m_i – маса i -ої вагонетки; $F_T(t)$ – силова дія на вагонетки з боку електровоза; n – кількість вагонеток; $i = 1, 2, \dots, n$.

Як результат структурної ідентифікації система (1) містить невідомі параметри. Для знаходження величин цих параметрів на другому етапі досліджень необхідно було провести параметричну ідентифікацію, значення якої полягає в знаходженні таких величин параметрів, які зближуватимуть у вибраному значенні об'єкт і модель. Враховуючи, що математична модель (1) описує динамічні режими, функціонал, що характеризує близькість моделі і об'єкта, записується в інтегральній формі, а мета параметричної ідентифікації полягає в мінімізації цього функціоналу за вказаних параметрів:

$$\Phi(k_1, \dots, k_8, \beta_1, \dots, \beta_8) = \int_0^T (x_i(\tau) - x_i^M(\tau, k_1, \dots, k_8, \beta_1, \dots, \beta_8))^2 d\tau \rightarrow \min_{\beta_1, \dots, \beta_8}, \quad (2)$$

де $x_i(\tau)$, $x_i^M(\tau, k_1, \dots, k_8, \beta_1, \dots, \beta_8)$ – значення i -ої вихідної змінної об'єкта і моделі у момент часу τ ; $[0, T]$ – проміжок часу, протягом якого проводиться параметрична ідентифікація; $k_1, \dots, k_8, \beta_1, \dots, \beta_8$ – параметри моделі, що налагоджуються.

Типова діаграма сили тяги і швидкості руху рудникового електровоза при завантажувально-розвантажувальних роботах з урахуванням характеристик зчіпних пристроїв представлена на рис. 3.

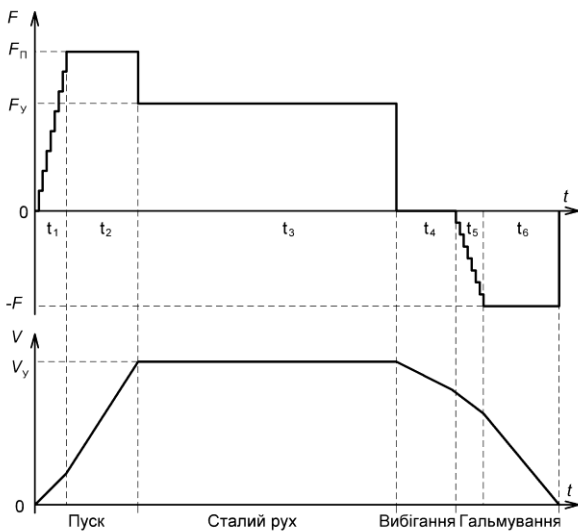


Рисунок 3 – Діаграми сили тяги і швидкості руху рудникового електротяга

Відповідно до цієї діаграми, цикл руху складається з ряду характерних часових інтервалів:

t_1 та t_5 – тривалість часу вибору люфтів і пружних деформацій в зчіпних пристроях на початку пуску і гальмування;

t_2 та t_6 – тривалість пуску і гальмування з постійним зусиллям;

t_3 – тривалість сталого рівномірного руху;

t_4 – тривалість вибігу.

Виходячи з діаграми рис. 3, електропотяг повинен максимально розігнатися, потім рухатися з допустимою швидкістю v_0 і, нарешті,

різко гальмувати до повної зупинки. В цьому випадку завдання оптимального управління можна записати у вигляді (3) та (4).

$$T(F_T(t)) \rightarrow \min_{F_T(t) \in \Omega}, \quad (3)$$

$$\Omega: \begin{cases} \underline{F} \leq F_T(t) \leq \bar{F}, \\ m \frac{dv(t)}{dt} + \beta v(t) + k x(t) = F_T(t), \\ x(0) = v(0) = v(T) = 0, x(T) = L, \\ v(t) \leq v_0 \end{cases} \quad (4)$$

Тоді завдання синтезу оптимального управління $F_T^*(t)$ зводиться до знаходження моментів часу, а саме: кінця розгону t_2 і початку гальмування t_4 .

Блок – схема базового алгоритму управління ТЕМК електропотяга представлена на рис. 4. Згідно із блок-схемою, у блоці 1 присвоюється початковий номер вагонетки, після чого в блоці 2 відбувається введення вихідних даних, до яких відносяться: m – маса рухомого складу; β – коефіцієнт демпфування; k – коефіцієнт жорсткості; \bar{F} , \underline{F} – максимальні сили тяги і гальмування; F_0 – тяга сталого руху; t_1 – тривалість розтягування зчіпних пристроїв вагонеток; $\Delta t = t_5 - t_4$ – тривалість стискання зчіпних пристроїв вагонеток; T – час під'їзду вагонетки під бункер завантаження; L – відстань

переміщення вагонетки; n – число вагонеток електропотяга; Δm – маса залізної руди, яка завантажується у вагонетку.



Рисунок 4 – Блок-схема базового алгоритму управління тяговим електро механічним комплексом

У блоці 3 відбувається розрахунок часу перемикання управління, у 4-му блоці реалізується алгоритм управління згідно із тяговою діаграмою рис. 3. У блоці 5 реалізується збільшення маси електропотяга на величину завантаження вагонетки ЗРС. Далі, у 6-му блоці збільшується номер вагонетки, яка завантажується, з подальшою перевіркою у блоці 7 на закінчення завантаження за числом вагонеток в електропотязі. Якщо завантажилися не всі вагонетки, то здійснюється перехід у блок 3, і цикл перерахунку повторюється. Коли всі вагонетки завантажені, здійснюється вихід із алгоритму.

У третьому розділі наведена тактика підходу до синтезу системи керування ТЕМК рудникового електровоза.

Рух електровоза та вагонеток описується системою рівнянь (5), де m_1 – маса електровоза; m_i – маса i -го елемента

потяга; F_T – тягове (додатне значення) або гальмівне (від’ємне значення) зусилля електровозу; W_i – загальна сила опору руху i -ї вагонетки; $F_{зч i}$ – зусилля в пружних складових i -го зчпного пристрою.

$$\begin{aligned}
 m_1 \frac{dv_1}{dt} &= F_T - W_1 - F_{зч1}, \\
 m_i \frac{dv_i}{dt} &= F_{зч(i-1)} - W_i - F_{зч i}, \\
 m_n \frac{dv_n}{dt} &= F_{зч(n-1)} - W_n.
 \end{aligned} \quad (5)$$

У загальному випадку сила опору руху може бути апроксимована функцією швидкості другого порядку за допомогою наступної залежності:

$$W = a_2 v^2 + a_1 v + a_0.$$

Перша складова загального опору руху відповідає аеродинамічному опору, друга складова – сила тертя кочення, третя складова – сила механічного опору.

Для динамічної системи «електровоз – вагонетки» матричні рівняння будуть мати вигляд:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_1 \\ l_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{11} - a_{21} v_{уст} & -\frac{k_1}{m_1} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ l_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ l_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} F_T,$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_i \\ l_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{1i} - a_{2i} v_{уст} & -\frac{k_i}{m_i} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ l_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i+1} \\ l_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{k_{i-1}}{m_i} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i-1} \\ l_{i-1} \end{bmatrix},$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_n \\ l_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{1n} - a_{2n} v_{уст} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ l_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{k_{n-1}}{m_n} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{n-1} \\ l_{n-1} \end{bmatrix}.$$

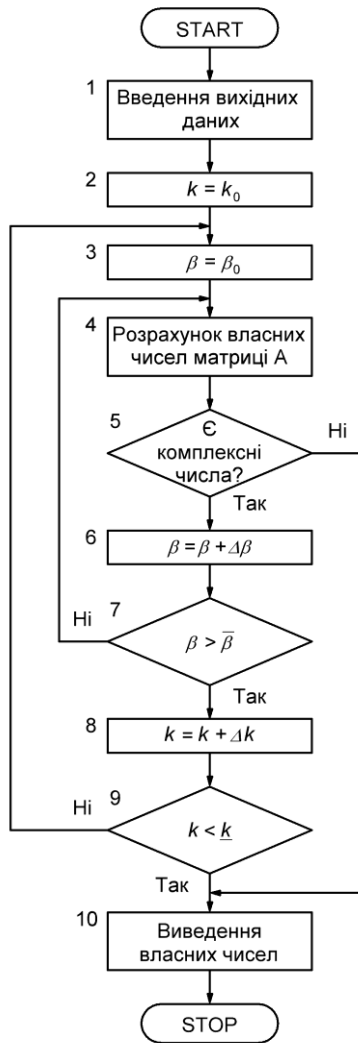


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритму управління тяговим електромеханічним комплексом

Враховуючи, що однією з невід’ємних системоутворюючих складових процедури визначення параметрів функціонування ТЕМК рудникового електровоза є аналіз коливань тягового комплексу: «електровоз – вагонетки» та необхідна оцінка впливу цього процесу на динаміку поведінки потяга з метою побудови відповідного алгоритму керування. Прогнозовано було включення в його структуру алгоритму функцій упередженої компенсації небажаних проявів цих явищ до прийнятних значень. Між тим, рішення задачі усунення коливань комплексу «електровоз – вагонетки» зв’язане, перш за все, із знаходженням необхідних величин коефіцієнтів жорсткості і демпфування зчпних пристроїв вагонеток. Величини цих коефіцієнтів визначаються з умови того, щоб власні числа системи диференціальних рівнянь (1) були дійсними і негативними. Варіюючи величинами коефіцієнтів жорсткості k і демпфування β можна добитися того, що власні числа системи диференціальних рівнянь (1) будуть дійсними і негативними, що повинно в теорії забезпечити відсутність аналізованих коливань.

На рис. (4) представлена апроксимована блок-схема алгоритму функціонування ТЕМК, що дозволяє усунути (або мінімізувати до прийнятних значень) коливання комплексу «електровоз – вагонетки».

В алгоритмі (рис. 2) виконується структурна та параметрична ідентифікації. Структурна ідентифікація виконується на основі методу діаграм коефіцієнтів та визначає відповідний порядок передаточної функції. Подібно до методу діаграми коефіцієнтів, особливі характеристики передаточної функції системи дають унікальне зображення діаграми коефіцієнтів.

При цьому, логічно, що така багатомасова електромеханічна система як «електровоз – вагонетки» повинна ідентифікуватися спостерігачем стану, котрий в свою чергу повинен бути частиною програмного комплексу мікропроцесорної системи керування ТЕМК. Отримана при структурній ідентифікації передаточна функція буде відображати коливні характеристики системи «електровоз – вагонетки», а також часові запізнення, що діють у системі. Тому «випуклість» на діаграмі коефіцієнтів буде мати вигляд пілоподібної кривої. Опуклість визначатиме, що діаграма коефіцієнтів матиме вигляд кривої, коли коефіцієнт максимального порядку не є найбільшим значенням.

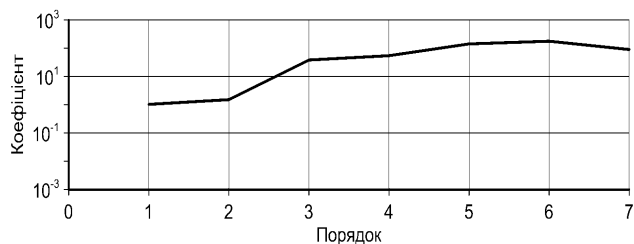


Рисунок 5 – Типова діаграма коефіцієнтів для системи з резонансними властивостями та часовою затримкою

передаточної функції для кожного порядку системи при його послідовному збільшенні. Коли порядок є неповним, отримана передаточна функція буде мати тенденцію до відображення лише коливних характеристик системи, наприклад, її резонансну частоту. По мірі збільшення порядку системи, отримана передаточна функція буде відображати частоту як антирезонансу, так і частоту резонансу. В подальшому отримана передаточна функція відображатиме як затримку по часу, так і механічні резонансні характеристики, коли порядок системи стане досить високим. При використанні діаграми коефіцієнтів: коли вибраний порядок системи є недостатнім, діаграма коефіцієнтів відображає пілоподібну криву, а коли порядок системи відповідатиме реальному, пілоподібна крива перетвориться на опуклу криву. Це використовується для визначення порядку отриманої передаточної функції.

Описані раніше процедури дозволяють визначити порядок та коефіцієнти передаточної функції електромеханічного комплексу «електровоз – вагонетки», що можна використати для покращення показників якості керування, що отримуються у замкненій системі. На рис. 6 представлена структурна схема замкненої системи керування швидкістю тягового двигуна електровоза.

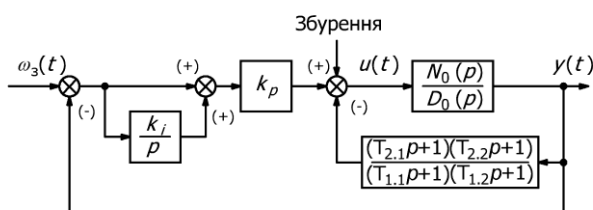


Рисунок 6 – Структурна схема замкненої системи керування швидкістю тягового

На рис. 5 представлено вигляд діаграми коефіцієнтів системи, що описується передаточною функцією сьомого порядку, яка відображає резонансні властивості ТЕМК як коливної системи.

У процесі ідентифікації отримуються коефіцієнти

На вхід системи діє сигнал завдання кутової швидкості $\omega_3(t)$, на виході отримуємо реальне значення кутової швидкості $y(t)$, а величина $u(t)$ є сигналом завдання тягового моменту системи. Динамічна ланка $N_0(p)/D_0(p)$ є отриманою передаточною

функцією динамічної системи «електровоз – вагонетки», що в даному випадку виступає в ролі об'єкту керування. Для реалізації керування з метою зменшення коливальних властивостей системи додано компенсацію за збуренням, що реалізована зворотнім зв'язком. Компенсатор коливних режимів за подібною структурою використовується, наприклад, як регулятор демпфування коливань у енергетичних системах. Даний компенсатор коливних режимів використовується для зміщення власних значень об'єкту керування та покращення демпфувальних властивостей системи. Для зміщення власних значень застосовуються декілька компенсаторів запізнення-випередження. У якості регулятора швидкості у системі застосовується ПІ-регулятор. Налаштування системи відбувається за наступним алгоритмом: спочатку знаходяться параметри компенсатора коливних режимів T_1 та T_2 за допомогою аналізу логарифмічних амплітудо-частотних та фазо-частотних характеристик системи, а також розміщення її полюсів. На наступному етапі переходять до вибору параметрів регулятора швидкості k_p та k_i шляхом вивчення реакції системи на ступінчасту зміну сигналу завдання.

На рис. 7 представлено загальний алгоритм структури ідентифікації для отримання числової моделі багатомасової електромеханічної системи «електровоз – вагонетки».

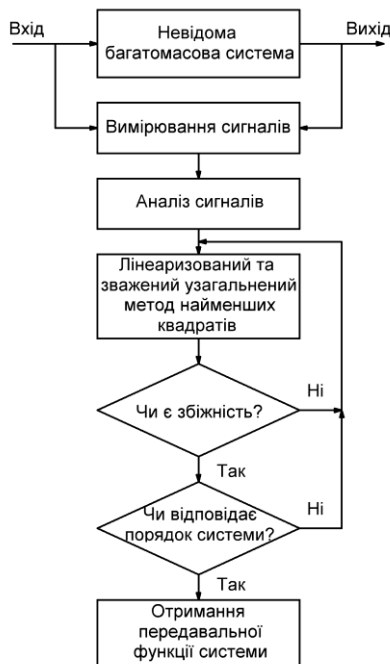


Рисунок 7 – Загальний алгоритм структури ідентифікації параметрів електропотяга

Згідно алгоритму на першому етапі реалізується процес збирання вибірок вхідних та вихідних сигналів системи, що ідентифікується. Для ідентифікації багатомасової механічної системи сигнал завдання тягового моменту змінюється за псевдовипадковим законом мікропроцесором СУ. Частота обертів тягових електродвигунів (ТЕД), яку можна розглядати як сигнал відгуку системи, вимірюється за допомогою відповідного датчика, і є вихідним сигналом системи для процесу ідентифікації. На другому етапі отримуються дані про відгук системи за допомогою наборів вхідних та вихідних даних.

При наявності відгуку динамічної системи ТЕМК «запускається» ітераційний процес, що може розглядатися, як третій етап роботи системи. В його основі лежить використання лінеаризованого та зваженого узагальненого методу найменших квадратів для отримання передаточної функції, що максимально відповідатиме відгуку системи. Отримана таким чином передаточна функція відображає суттєві характеристики механічної частини системи. Отже, синтезована

передаточна функція може бути використана для налаштування параметрів регулятора, що реалізовано у мікропроцесорі СУ.

При ідентифікації параметрів, отримані передаточні функції та відповідні вихідні сигнали системи, дозволяють зробити висновок, що для синтезу відповідного регулятора швидкості достатньо розглядати систему, як систему не більш ніж третього порядку (рис. 8).

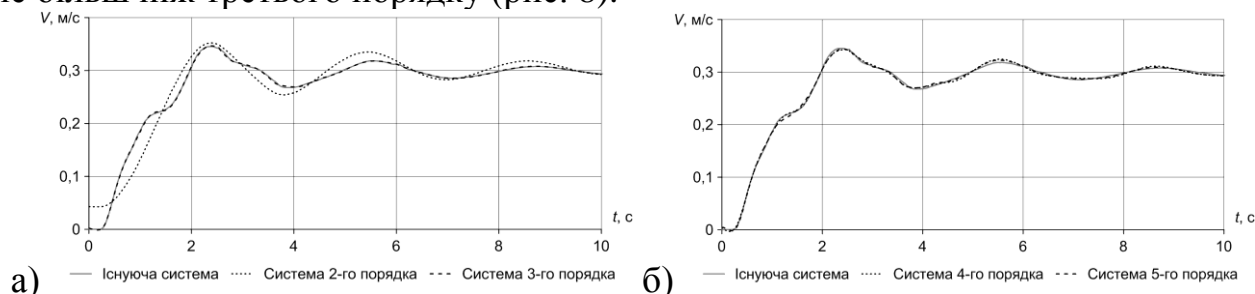


Рисунок 8 – Вихідні сигнали існуючої динамічної системи та ідентифікованих систем: а) другого, третього порядків; б) четвертого та п'ятого порядків

У четвертому розділі згідно логіки досліджень аналізувались динамічні процеси в тяговому комплексі шляхом модельних досліджень на відповідно розробленій моделі. В ході моделювання аналізувались та порівнювались два варіанти структур ТЕМК: існуюча реостатно-контакторна (РКС) ТЕД постійного струму (ДПС) та асинхронним приводом інвертор напруги (ІН) – тяговий асинхронний двигун (ТАД).

При аналізі початковим варіантом стану всіх зчіпних пристроїв був реальний варіант, коли вони повністю зімкнуті, тобто при розгоні електровоза зчіпні пристрої всі послідовно, починаючи з електровоза, розмикаються з ударами, вибираючи зазори величиною 0,2 м. Алгоритм управління пусько-гальмівним режимом РКС-ДПТ електропотяга наступний.

На першому розгінному ступені (рис. 9) до 2,5-ої секунди електропотяг починає рух з вибором зазорів в зчіпних пристроях, після чого оператор переводить рукоять командоконтролера на другу позицію, і електровоз розганяється далі. Далі на 16,4 секунді оператором здійснюється перемикання з розгінного режиму на режим динамічного гальмування (з майже одночасним реверсуванням обмотки збудження), з подальшим послідовним перемиканням 2-х гальмівних позицій командоконтролера.

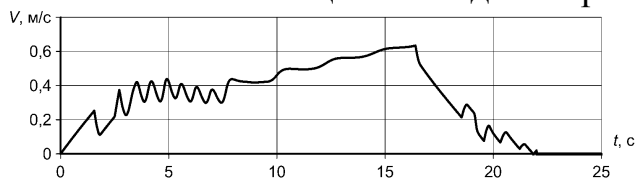


Рисунок 9 – Графік швидкості електровоза

ТЕМК з РКС дозволяє отримати задовільні результати при управлінні досвідченим оператором електровоза. Проте по графіках рис. 10-11 не очевидні напрями подальшій автоматизації управління РКС ТЕМК. Одиниці електропотяга

рушають в різні моменти часу, тому що немає стабілізації розгінної швидкості електровоза, удари від вагонеток сильно змінюють швидкість електровоза. Неочевидно виглядає і момент часу переходу з розгінного на динамічний

гальмівний режим. Оператор цей момент визначає на основі свого особистого досвіду, і ймовірно, що він може допускати помилки в оцінці моменту.

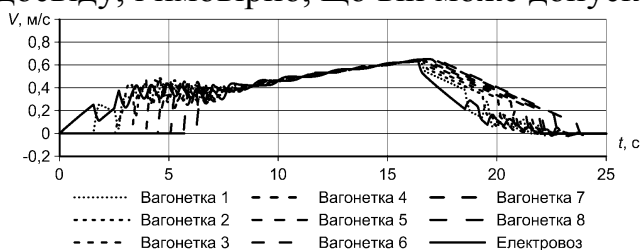


Рисунок 10 – Коливання швидкості руху електровоза в варіанті з вісьма вагонетками

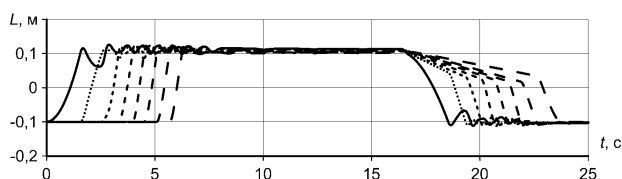


Рисунок 11 – Зміна зазорів в зчіпних пристроях електропотяга

Далі, перемикання між двома гальмівними рівнями теж може виконуватись в довільні моменти часу. Все це вказує на те, що на основі існуючої структури системи РКС–ДПТ складно побудувати жорстко детерміновану систему управління електровозом, тому що вихідний стан системи електропотяга може бути довільним, і залежить від багатьох чинників, котрі складно спрогнозувати і ще більше складно реалізувати в практику конструювання ТЕМК.

Також в цьому розділі проведено комплекс модельних досліджень для апріорно ефективної структури ТЕМК – ІН–АД. Основою для побудови моделі тягового асинхронного електроприводу на Matlab є загальновідомі рівняння АД в ортогональній системі координат $x, y, 0$. Для досліджень використовувалась розімкнена скалярна система управління ІН, в якій реалізовувався закон Костенко $U/f = \text{const}$.

Початкова ділянка тахограми руху електровоза з системою ІН-АД обмежується граничною величиною струму двигунів, а також граничними значеннями дотичною сили тяги за умовами зчеплення коліс з рейками.

Швидкість електровоза з системою ІН-ТАД по факту має стабільніше значення (рис. 12), ніж при роботі РКС, але все одно при ударах вагонеток швидкість електровоза змінюється приблизно в тих же межах, що і при роботі РКС.

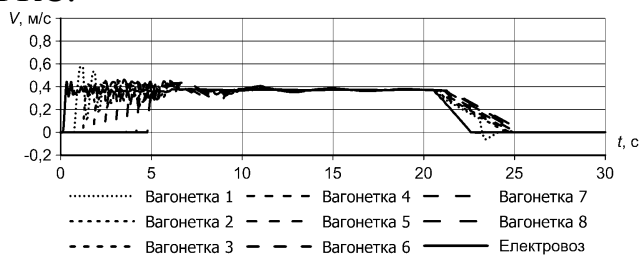


Рисунок 12 – Коливання швидкостей руху електровоза і вагонеток

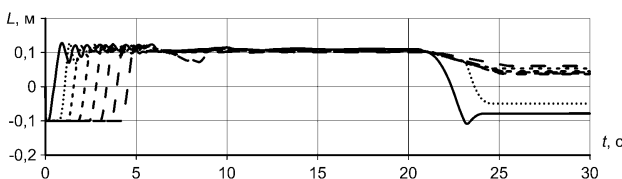


Рисунок 13 – Зміна зазорів в зчіпних пристроях електропотяга

Більш того, гальмування електровоза практично «стрибком» (рис. 13) призведе до розкиду станів зчіпних пристроїв, що, в свою чергу, різко погіршить точність позиціонування вагонеток при перестановці, роблячи її практично невизначеною в часу та динаміці.

Як один з варіантів з достатнім рівнем оптимальності вирішення задачі по точному позиціонуванню вагонеток задана тахограму швидкості електровоза була змінена, враховуючи при

цьому, що ударні зусилля не повинні мати значення вище заданого, і гальмування ударним способом, з 0,6 м/с (природно, при цьому не мають бути також перевищені граничні ударні зусилля і не повинно буди відскоку вагонеток одна від одної).

Нажаль, при низьких частотах ІН ТАД будуть недовикористані по потужності, тому для реалізації тактики руху потяга згідно закону Костенко значно форсована напруга живлення для цього діапазону частоти, рекомендується знижений з 220 В до 110 В рівень напруги.

Динамічні процеси в рудниковому електропотягу при зміні частоти обертів двигунів (рис. 14) і одночасною підтримкою закону Костенко приведе до динамічних процесів позиціонування вагонеток, які зображені на рис. 15.



Рисунок 14 – Уточнена тахограма задання частоти інвертора тягового електропривода електровоза

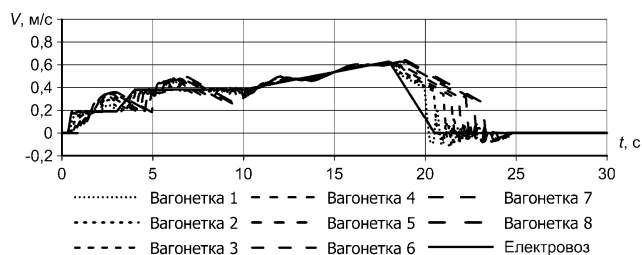


Рисунок 15 – Швидкості руху електровоза і вагонеток при повному їх завантаженні і розімкнених на момент початку руху зчіпних пристроях

Недолік даного способу управління – за допомогою його не можливо виконати переміщення вагонеток на невеликі відстані, тому що система може не встигнути забезпечити набір швидкості руху, при якій гарантована необхідна точність зупинки – 0,6 м/с.

У п'ятому розділі наведені результати експериментальних лабораторних дослідження функціонування ТЕМК з програмною реалізацією процесу зменшення динамічних коливань. Отримані експериментальним способом результати, в основі своїй підтверджують результати, отримані теоретичним шляхом та моделюванням на OEM. Запропонований варіант алгоритму регулювання завданнями швидкості обертання тягового асинхронного двигуна ТЕМК рудникових електровозів з двома двигунами, у поєднанні з вибраною базовою системою управління, забезпечує високу якість регулювання зі швидкодії, перерегулювання, статичній помилці регулювання і можливості розвивати необхідний рівень електромагнітного моменту на валу ТЕД.

На графіку рис. 15 видно, що електровоз має вищу стабільність підтримки поточної швидкості, практично не залежну від ударів інших вагонеток об нього. Це дає можливість зупинити електровоз з високою точністю при русі під завантаження та розвантаження.

Наступним позитивним моментом слід зазначити, що при форсуванні напруги струмове навантаження (включаючи початкову ділянку включення в мережу) двигунів електровоза, не дивлячись на порушення закону Костенко – менше номінального значення (амплітудні значення ледве менше 100 А проти 118 А).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі теоретико-експериментальних досліджень викладено вирішення наукового завдання, що полягає у розвитку існуючих та розробці нових аспектів теорії та практики керування тяговими електроприводами в напрямку пошуку способів з підвищення рівня ефективності їх функціонування в структурах тягових електромеханічних комплексів рудникових типів електровозів шляхом застосування методів зменшення рівня негативного впливу динамічних процесів у структурах: «електровоз – вагонетки» в умовах експлуатаційних чинників залізорудних шахт. В результаті виконаних досліджень сформульовані наступні узагальнюючі висновки і практичні результати:

1. Тягові електромеханічні комплекси, як і самі рудникові електровози, на яких застосовуються дані комплекси вітчизняних залізорудних шахт, не відповідають сучасним вимогам по цілому ряду показників, в т. ч. по енергоефективності, надійності, технологічності. Створені в останні роки сучасні експериментальні зразки нових тягових комплексів в основі своїй підтверджують свою ефективність, проте ряд питань залишилися невирішеними. Головною причиною такої незавершеності є недостатнє врахування, при розробці алгоритмів керування, специфіки впливу ряду технологічних чинників на режими функціонування ТЕМК електропотягів в підземних виробках тих чи інших видів шахт, в т. ч. в особливих умовах технології рудних шахт, де неусталені режими займають більш ніж 50% всього часу в циклі функціонування електропотягів, що є вагомою причиною небажаних коливань в елементах електропотягів, котрі, в свою чергу, призводять до зменшення термінів експлуатації електромеханічного обладнання та значно знижують продуктивність роботи ВШТ в цілому.

2. Теоретичні дослідження динамічних процесів в комплексі «електровоз – вагонетки» з урахуванням нелінійних властивостей зчіпних пристроїв дозволили отримати аналітичні вирази для оцінки рівнів впливу параметрів системи та величин збурювальних чинників на динаміку поведінки електропотяга та ТЕМК, що дозволило провести побудову базової структури алгоритму управління тяговим електромеханічним комплексом електровоза.

3. Запропонована структура алгоритму ідентифікації параметрів тягової електромеханічної системи, яка виконує оцінку порядку системи, а також коефіцієнтів відповідної передатної функції. Для оцінки порядку системи використовується метод діаграми коефіцієнтів, а для ідентифікації передатної функції відповідного порядку – метод найменший квадратів.

4. Отримані в процесі ідентифікації електричних параметрів тягової електромеханічної системи, передаточні функції та відповідні вихідні сигнали системи, дозволяють зробити висновок, що для синтезу відповідного регулятора швидкості руху електровоза достатньо розглядати систему, як систему третього порядку.

5. Одним із варіантів керування режимом функціонування тягового електромеханічного комплексу для вирішення задачі точного позиціонування

вагонеток в процесі технологічного функціонування електропотяга при завантажувально-розвантажувальних елементах циклоруху є зупинка всіх вагонеток «м'яким ударним» способом одна об одну. Для цього потрібно забезпечити жорстку підтримку швидкості ТЕМК електровоза, і не перевищувати максимального значення дотичної сили тяги. Збільшити жорсткість підтримки швидкості електровоза в системі ІН – ТАД можливо форсуванням (збільшення) напруги живлення на затисках ТАД відносно частоти на низьких вихідних частотах інвертора напруги тягового електромеханічного комплексу. Струм двигунів електровоза при цьому повинен знаходитись в межах допустимих значень.

6. Розроблений та запропонований для реалізації спосіб управління ТЕМК при позиціонуванні електропотяга при завантаженні та розвантаженні не вимагає наявності будь-яких датчиків зворотних зв'язків на вагонетках електропотяга, що є значною перевагою запропонованої системи управління тяговим комплексом.

7. Експерименти, проведені на лабораторному експериментальному стенді, показали, що достатня якість регулювання зі швидкодії, перерегулювання, статичній помилці регулювання і узгодженню швидкостей обертання електричних двигунів тягових комплексів рудникових електровозів в умовах переміщення на низьких швидкостях, забезпечується системою скалярного управління згідно закону В. П. Костенка та формуванням сигналів завдання у вигляді заданих тахограм швидкості.

8. Результати досліджень у вигляді технічної документації алгоритмів управління в форматі прикладних програм для керуючого мікропроцесора ТЕМК передані спеціалізованим підприємствам та використані ними при розробці експериментального зразка системи управління рудниковими електровозами, який пройшов повний комплекс попередніх випробувань у лабораторних умовах і в шахті ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат». Теоретичні аспекти та практичні рекомендації, котрі були отримані в процесі пошуків автора при роботі над дисертацією використовуються в навчальному процесі при читанні лекцій і проведенні лабораторних занять у Криворізькому національному університеті.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. О. Н. Синчук, А. Б. Сёмочкин, и В. А. Федотов, «Переходные процессы асинхронного электропривода шахтного электровоза при его питании от реальной системы электроснабжения», *Электротехнические и компьютерные системы*, №15 (91), с. 201-204, 2014.

2. О. Н. Синчук, А. Б. Сёмочкин, В. А. Федотов, и Б. В. Жеребкин, «Автоматическое управление двухдвигательным тяговым электромеханическим комплексом рудничного электровоза», *Електрифікація транспорту. Науковий журнал*, №10, с. 65-72, 2015.

3. О. Н. Синчук, А. Б. Сёмочкин, и В. А. Федотов, «Оценка влияния факторов на предельную величину ударного усилия в сцепном устройстве при перемещении пары «электровоз-вагонетка» при различных способах управления электровозом», *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, №12 (1121), с. 251-256, 2015.

4. А. Б. Сёмочкин, В. А. Федотов, и Л. В. Сменова, «О строении управляющей функции тяговых электромеханических комплексов шахтных электровозосоставов для позиционирования вагонеток», *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, №27 (1249), с. 419-423, 2017.

5. О. Н. Синчук и др., «Малый комментарий к тактике создания тяговых электромеханических комплексов рудничных электровозов комбинированного вида», *Електрифікація транспорту. Науковий журнал*, № 14, с. 42-55, 2017.

6. O. Sinchuk, I. Sinchuk, V. Fedotov, and V. Chorna, “Modes and parameters of functioning of traction electromechanical complexes miner contact electric in iron mines”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university*, №6, pp. 22-27, 2016.

7. O. N. Sinchuk, I. A. Kozakevich, V. A. Fedotov, A. B. Somochkyn, and V. M. Serebrenikov, “Development of a system to control the motion of electric transport under conditions of iron-ore mines”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 2 (87), pp. 39-47, 2017. doi:10.15587/1729-4061.2017.103716.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. О. Н. Синчук, А. Б. Сёмочкин, и В. О. Федотов, «К вопросу совершенствования методики определения электромеханических параметров тяговых асинхронных двигателей шахтных электровозов», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання*, Кременчук, 2014, с. 156-158.

9. О. Н. Синчук, А. Б. Сёмочкин, и В. А. Федотов, «Аспекты оценки и разработка принципов управления динамическими процессами в рудничных электровозосоставах», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання*, Кременчук, 2015, с. 92-94.

10. А. Б. Сёмочкин, В. О. Федотов, та Ю. О. Іщенко, «Порівняльний аналіз динамічних властивостей систем електроприводу рудничного електровоза в характерних режимах», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання*, Кременчук, 2015, с. 95-97.

11. А. Б. Сёмочкин, В. О. Федотов, та С. В. Кутумова, «Аналіз пускогальмівних режимів шахтного електровозосоставу при використанні системи електроприводу «автономний інвертор напруги – асинхронний двигун»», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції*, Кременчук, 2016, с. 94-96.

12. А. Б. Сёмочкин, В. А. Федотов, та Л. В. Сменова, «Порівняльний аналіз динаміки шахтного електровозосостава з системами тягового приводу РКС і ПЧ-АД по можливості автоматизації управління переміщенням вагонеток під розвантаження», *Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук»*, м. Люблін, Республіка Польща, 2017, с. 150-154.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13. И. О. Синчук, А. В. Омельченко, и В. А. Федотов, «Анализ условий и режимов функционирования тяговых электромеханических систем рудничных контактных электровозов в условиях железорудных шахт», *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, №12 (1121), с. 283-287, 2015.

14. И. О. Синчук, А. Б. Сёмочкин, и В. А. Федотов, «О принципах минимально соударяемого и максимально точного управления перемещением вагонеток рудничных электровозосоставов», *Вісник Криворізького національного університету*, №42, с. 83-87, 2016.

15. А. Б. Сёмочкин, В. А. Федотов, и Л. В. Сменова, «Анализ математических подходов для решения задачи точности позиционирования вагонеток рудничных электровозосоставов при погрузочно-разгрузочных операциях», *Вісник Криворізького національного університету*, №42, с. 88-92, 2016.

16. O. N. Sinchuk, I. O. Sinchuk, E. S. Guzov, I. V. Kasatkina, and V. A. Fedotov, “Aspects of the architectural structure of the transport automated control system in the domestic iron ore companies with underground method of mining”, *Computer Science Information Technology Automation*, №5, pp. 12-22, 2016. [Online]. Available: <http://csita.com.ua/wp-content/uploads/2017/03/Sinchuk-O.N.-Sinchuk-I.O..pdf>. Accessed on: February 16, 2017.

17. О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, и В. А. Федотов, «Энергоэффективные электромеханические комплексы и перспективные виды шахтных электровозов», *Качество минерального сырья. Сборник научных трудов*, с. 183-193, 2017.

18. О. Н. Синчук, В. А. Федотов, В. Л. Дебелый, и В. П. Степаненко, «О необходимости внедрения в практику работы железорудных шахт комбинированных видов электровозов», *Горный информационно-аналитический бюллетень*, №10, с. 84-99, 2017.

19. О. Н. Синчук и др., *Мониторинг параметров и защита тяговых электромеханических комплексов шахтных электровозов: монография*. Кривой Рог, Украина: ЧП Щербатых А. В., 2017.

20. О. Н. Синчук и др., *Теоретические и практические аспекты строения архитектур современных тяговых электромеханических комплексов шахтных электровозов (в 2-х томах). Том 1. Тяговые электромеханические комплексы постоянного тока: коллективная монография*. Кривой Рог, Украина: ЧП Щербатых А. В., 2018.

21. О. Н. Синчук и др., *Теоретические и практические аспекты строения архитектур современных тяговых электромеханических комплексов шахтных электровозов (в 2-х томах). Том 2. Тяговые электромеханические комплексы переменного тока: коллективная монография.* Кривой Рог, Украина: ЧП Щербатых А. В., 2018.

22. О. М. Сінчук, Е. С. Гузов, І. О. Сінчук, В. О. Чорна, та В. О. Федотов, «Пристрій для контролю та захисту тягових електричних двигунів шахтних електровозів від перегріву», u201405189, Груд. 25, 2014.

АНОТАЦІЯ

Федотов В. О. Динаміка тягових електромеханічних комплексів рудникових електровозів з урахуванням експлуатаційних чинників залізорудних шахт. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси і системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2018.

У дисертаційній роботі поставлене, сформульоване та вирішене актуальне наукове завдання розробки теоретичних положень та практичних рішень із підвищення ефективності функціонування тягових електромеханічних комплексів (ТЕМК) рудникових типів електровозів шляхом зменшення рівня впливу динамічних процесів у структурах: «електровоз – вагонетки» з урахуванням експлуатаційних чинників залізорудних шахт.

Обґрунтована та оцінена різниця в активній фазі режимів функціонування електропотягів в умовах залізорудних видів шахт від вугільних.

Встановлено, що тягові електромеханічні комплекси рудникових електровозів більше ніж 50% часу цикло руху функціонують у неусталених режимах.

Підтверджено, що неусталені режими ТЕМК пов'язані з проблемою виникнення динамічних процесів як в самому ТЕМК, так і в комплексі «електровоз – вагонетки», що може спричинити процеси автоколивальності у складових електропотяга. Це в практиці експлуатації призводить до прискореного механічного зносу елементів електропотяга, збільшення часу на завантаження та розвантаження вагонеток, і додаткових енергозатрат.

Доведено, що усунути ці небажані фактори в існуючих варіантах систем керування електропотягів неможливо.

У роботі проведені аналітичні дослідження, котрі дозволили оцінити співвідношення рівнів коливальності складових електропотягів у функції можливих видів діаграм руху електропотягів в умовах підземних виробок вітчизняних залізорудних шахт.

На відміну від основних теоретичних положень про скалярне керування, що передбачає формування постійної перенавантажувальної можливості по моменту на валу тягового двигуна, введено нове теоретичне положення – підвищення жорсткості швидкісної характеристики в системі: IGBT – перетворювач – тяговий асинхронний двигун при наднизьких частотах обертів.

Запропоновано оптимізувати процес позиціонування вагонеток під завантаження–розвантаження «м'яким ударним» способом їх зупинення при обов'язковому виконанні технологічних обмежень – запобіганням буксування чи юзу коліс по рейках, обмеження руйнівних сил у зчіпних облаштуваннях.

Комплекс модельних досліджень дозволив виявити нові можливості, котрі покладені в процес конструювання алгоритму керування ТЕМК електровозу.

Отримані результати знайшли своє підтвердження в ході експериментальних досліджень на лабораторному стенді.

Ключові слова: рудникові електровози, динамічні процеси, тяговий електромеханічний комплекс, тяговий асинхронний двигун, алгоритм управління.

АННОТАЦИЯ

Федотов В. А. Динамика тяговых электромеханических комплексов рудничных электровозов с учетом эксплуатационных факторов железорудных шахт. Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».– Винницкий национальный технический университет, Винница, 2018.

В диссертационной работе поставлено, сформулированное и решено актуальная научная задача разработки теоретических положений и практических решений по повышению эффективности функционирования тяговых электромеханических комплексов (ТЭМК) рудничных типов электровозов путем уменьшения уровня влияния динамических процессов в структурах: «электровоз – вагонетки» с учетом эксплуатационных факторов железорудных шахт.

Обоснована и оценена разница в активной фазе режимов функционирования электропоездов в условиях железорудных видов шахт в отличие от угольных.

Установлено, что тяговые электромеханические комплексы рудничных электровозов больше чем 50% времени циклодвижения функционируют в переходных режимах.

Подтверждено, что переходные режимы ТЭМК связаны с проблемой возникновения динамических процессов как в самом ТЭМК, так и в комплексе «электровоз – вагонетки», что может повлечь за собой процессы автоколебаний в составляющих электропоезда. Это на практике эксплуатации приводит к ускоренному механическому износу элементов электропоезда, увеличению времени на погрузку и разгрузку вагонеток, и дополнительным энергозатратам.

Доказано, что устранить эти нежелательные факторы в существующих вариантах систем управления электропоездов невозможно.

В работе проведены аналитические исследования, которые позволили оценить соотношение уровней колебаний составляющих электропоездов в

функции возможных видов диаграмм движения электропоездов в условиях подземных выработок отечественных железорудных шахт.

В отличие от основных теоретических положений о скалярном управлении, которое предусматривает формирование постоянной перегрузочной способности по моменту на валу тягового двигателя, введено новое теоретическое положение – повышение жесткости скоростной характеристики в системе: IGBT – преобразователь – тяговый асинхронный двигатель, при сверхнизких частотах вращения.

Предложено оптимизировать процесс позиционирования вагонеток под погрузку–разгрузку «мягким ударным» способом их остановки при обязательном выполнении технологических ограничений – предотвращении буксования или юза колес по рельсам, ограничении разрушительных сил в сцепном устройстве.

Комплекс модельных исследований позволил обнаружить новые возможности, которые положены в процесс конструирования алгоритма управления ТЭМК электровозу.

Полученные результаты нашли свое подтверждение в ходе экспериментальных исследований на лабораторном стенде.

Ключевые слова: рудничные электровозы, динамические процессы, тяговый электромеханический комплекс, тяговый асинхронный двигатель, алгоритм управления.

ABSTRACT

Fedotov V. O. Dynamics of traction electromechanical complexes of mine electric locomotives with taking into account operational factors. Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

A thesis submitted for the PhD degree in technical sciences on the speciality 05.09.03 – “Electrotechnical complexes and systems”. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2018.

In the manuscript the actual scientific task of the development of theoretical positions and practical decisions for increasing the efficiency of traction electromechanical complex functioning of the mine types of electric locomotives was formulated and solved by reducing the level of influence of dynamic processes in structures: electric locomotives - trolleys taking into account operational factors of iron ore mines.

The difference in the active phase of modes of operation electric locomotives in the conditions of iron ore mines from coal is grounded and estimated.

It is determined that traction electromechanical complexes of electric locomotives more than 50% of cycle time are functioning in unestablished modes.

It is confirmed that non-steady modes of traction electromechanical complexes are connected with the problem of occurrence of dynamic processes both in the traction electromechanical complex itself, and in the complex of electric locomotive – trolley, which might bring the processes of self-oscillations in the components of electric traction. In practice, this leads to acceleration of mechanical wear of elements of underground mining transport, increasing the time for loading and unloading of

trolleys, and additional energy consumption.

It is proved that elimination of these odious factors in the existing variants of control systems for electric locomotives is impossible.

In this scientific research, analytical studies have been carried out that allow us to estimate the ratio of the oscillations levels of the components of electric locomotives in the function of possible types of diagrams of movements of electric locomotives in conditions of underground workings of domestic iron ore mines.

In contrast to the basic theoretical provisions on scalar control, which involves the formation of a permanent overload capability on the moment on the shaft of the traction asynchronous engine, introduced a new theoretical position – increased rigidity of the high-speed characteristics in the system: IGBT – converter – traction asynchronous engine at extremely low, low and nominal speeds of the above mentioned.

It is proposed to optimize the process of positioning trolleys under loading-unloading by "shock" means of their stopping under the obligatory performance of technological constraints - preventing the hitching of the wheels on the rails, limiting the destructive forces in the coupling arrangements.

The complex of model studies allowed to reveal the new possibilities, which are laid in the process of designing the algorithm of control of traction electromechanical complex of electric locomotive taking into account the range of sources of influence on this process by the technology of dynamics of behavior of electric traction and its traction electromechanical complex in conditions of functioning depending on types of underground mining workings. The presented results obtained by experimental research on a research laboratory bench confirmed the similarity of the results of analytical and model research with experimental ones.

Scientific novelty of the obtained results:

- for the first time, for the traction complexes of contact mining locomotives, the defining influence of dynamic regimes on the behavior of electric trains as a multivariate heterogeneous electro-mechanical system is shown and formalized, depending on the type of underground mining of iron ore mines, in order to supplement the traffic control regulation with means of minimizing unwanted oscillations, which enabled to increase the energy efficiency of operation transport system as a whole;

- for the first time it was proposed to evaluate the order of the mathematical model of the system using the method of the coefficient diagram and it was established that for the synthesis of the corresponding speed regulator of the control system of traction electromechanical complexes it is necessary to consider the system as a system of third order;

- the theory of synthesis of control systems for traction electromechanical complexes containing a complicated structure of a mechanical part was further developed by the use of a speed regulator which is installed in accordance with the poles of the transfer function of the dynamic system obtained by identification with the combined use of the generalized and weighted least squares method, as well diagrams of system coefficients: "electric locomotive – trolleys".

The practical value of the results of the work is that they allowed:

- to develop and implement a methodology for carrying out experimental research on the dynamics of the behaviour of electric locomotives in the conditions of iron ore mines;

- to develop and recommend for the implementation of the research of traction electromechanical complexes of mine electric locomotives in the practice of electromechanical processes analysis;

- to develop the tactics of forming a control algorithm for traction electromechanical complex of mine electric locomotives with two axles;

- to use the results of research in the educational process.

Keywords: mine electric locomotives, dynamic processes, traction electromechanical complex, traction asynchronous engine, control algorithm.

Підписано до друку 01.10.18 р. Формат 29,7x42¼.

Наклад 100 прим. Замовлення №

Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК №3516 від 01.07.2009 р.