

Криворізький національний університет  
Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ФЕДОТОВ ВЛАДИСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 622.6

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи»  
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

В. О. Федотов

Науковий керівник:  
Сінчук Олег Миколайович  
доктор технічних наук, професор

Кривий Ріг – 2018

## 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 та системи». – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2018. – 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 рудникових типів електровозів шляхом зменшення рівня впливу динамічних процесів у структурах: «електровоз – вагонетки» з урахуванням експлуатаційних чинників залізорудних шахт, що дозволить підвищити продуктивність, зменшити рівень електроспоживання та підвищити терміни міжремонтної експлуатації вищезгаданих видів електропотягів.

Доведено, що реалізація цього напрямку може бути досягнута шляхом підвищення рівня реалізації потенціалу ефективності сучасних тягових електромеханічних комплексів з мікропроцесорними системами управління.

На основі аналізу режимів функціонування тягових електромеханічних комплексів електровозів при їх експлуатації в складі внутрішньошахтного транспорту сучасних залізорудних шахт України обґрунтована та оцінена різниця в активній фазі режимів функціонування цих видів транспорту в умовах залізорудних видів шахт від вугільних.

Встановлено, що тягові електромеханічні комплекси електровозів, котрі ведуть рухомі склади по підземних гірничих виробках вітчизняних залізорудних шахт більше ніж 50% часу цикло руху функціонують у неусталених режимах. Особливо це стосується сегментів завантаження-

розвантаження рухомих складів залізорудною сировиною, де такі режими складають усі 100%.

Підтверджено, що неусталені режими тягових електромеханічних комплексів пов'язані з проблемою виникнення динамічних процесів як в самому тяговому електромеханічному комплексі, так і в комплексі «електровоз – вагонетки». Останній із вищезгаданих чинників може спричиняти процеси автоколивань у складових електропотяга. Це в практиці експлуатації призводить до прискореного механічного зносу елементів внутрішньошахтного транспорту, збільшення часу на завантаження та розвантаження вагонеток, і додаткових енергозатрат електричної енергії тяговим комплексом.

Доведено, що усунути ці небажані чинники в існуючих варіантах структур та видів тягових електромеханічних комплексів – систем керування рухом електропотягів, неможливо.

Між тим, в останнє десятиріччя в Україні відновлені науково-дослідні роботи зі створення нових ефективних видів тягових електромеханічних комплексів на основі мікропроцесорних систем управління. Виготовлені перші експериментальні зразки, котрі отримали позитивні відгуки в процесі попередніх випробувань. Разом з тим, відзначено, що потенціал ефективності цих розробок не вичерпано. Перш за все ця «невичерпаність» стосується неврахування в достатньому обсязі в структурах алгоритмів керування тяговим електромеханічним комплексом можливостей мінімізації (зменшення) динамічних процесів, що, як відзначено вище, негативно впливають на показники параметрів функціонування як електропотягів, так і всього комплексу внутрішньошахтного транспорту.

Для превентивної оцінки процесів, котрі виникають в електромеханічному комплексі рудникових електропотягів у роботі проведені аналітичні дослідження, котрі дозволили оцінити співвідношення

рівнів коливань складових електропотягів у функції можливих видів діаграм їх руху в умовах підземних виробок вітчизняних залізничних шахт.

В результаті досліджень отримані нові універсальні вирази залежностей та взаємовпливу ряду чинників на динаміку поведінки тягового електромеханічного комплексу потягу, що дозволили «сконструювати» базовий алгоритм керування тяговим електромеханічним комплексом з акцентом на процес зменшення можливостей виникнення динамічних коливань.

На відміну від основних теоретичних положень про скалярне керування, що передбачає формування постійної перевантажної можливості по моменту 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 та 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 пристроях.

Комплекс модельних досліджень дозволив виявити нові можливості, котрі покладені в процес конструювання закону керування тяговим електромеханічним комплексом електровозу з урахуванням гами джерел впливу на цей процес з боку технології динаміки поведінки електропотяга та його тягового електромеханічного комплексу в умовах функціонування залежно від типів підземних гірничих виробок.

Отримані результати знайшли своє підтвердження в ході експериментальних досліджень на лабораторному стенді, підтвердивши достатню збіжність результатів аналітичних та модельних досліджень з експериментальними.

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 результатів роботи 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 електроенергоєфективних 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 та випробуванні нової системи управління синергетичним тяговим електромеханічним комплексом рудникового електровоза в шахтах ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат», на що в роботі існують відповідні Акти.

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

## 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». – Kriviy Rig National University, Kriviy Rig, 2018. – 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, which will allow to increase productivity, reduce the level of electric power consumption and increase the period of inter-repair exploitation of the above-mentioned types of electric locomotives.

It is proved that implementation of this direction can be achieved by increasing the level of implementation of the potential of efficiency of modern traction electromechanical complexes with microprocessor control systems.

Based on the analysis of the modes of operation of traction electromechanical complexes of electric locomotives during their operation in the structure of underground mine's transport of modern iron ore mines of Ukraine, the difference in the active phase of modes of functioning of these types of transport in the conditions of these kinds of mines from coal is justified.

It is estimated that traction electromechanical complexes of electric locomotives, which lead the trains to the formation of underground mining of domestic iron ore mines, more than 50% of cycle time are functioning in unsteady modes. This is especially true for segments of loading and unloading of iron ore raw materials, where such modes are all 100%.

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. The last of the above-mentioned factors may 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 of electric energy by a traction complex.

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

Meanwhile, in the last decade in Ukraine, research works have been restored to create effective types of traction electromechanical complexes based on microprocessor control systems. The first experimental samples were obtained, which received a positive feedback in the course of preliminary tests. At the same time, it was noted that the potential efficiency of these developments is not exhausted. First of all, this concerns the lack of sufficient consideration in the structures of the traction electromechanical complex control algorithms to minimize (reduce) the process of occurrence of dynamic processes which, as noted above, adversely affects the parameters of the functioning of both electric locomotives and the whole complex of underground mining transport.

For the preventive assessment of the processes occurring in the electromechanical complex of mine electric locomotives, analytical studies have been carried out which allowed to estimate the ratio of the levels of oscillations of the components of electric locomotives in the function of possible types of diagrams of electric locomotives movement under conditions of underground workings of domestic iron ore mines.

As a result of the research, new universal expressions of dependencies and interactions of a number of factors on the dynamics of traction electromechanical train complexes have been obtained, which allowed to "constructing" the basic algorithm of traction electromechanical complex management with the emphasis on the process of reducing the possibilities of occurrence of dynamic oscillations.

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 motor, introduced a new theoretical position – increased rigidity of the high-speed characteristics in the system: IGBT-converter – traction asynchronous engine at extremely low speeds.

It is proposed to optimize the process of positioning trolleys under loading-unloading by "soft 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 for the specialties: 133 "Branch of Machinery Industry", 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies", 184 "Mining".

The results of research were transmitted for their implementation during the modernization of traction electromechanical complexes of operated electric locomotives, as well as in the practice of developing, creating and production new electric power-efficient types of traction electric drives and automatic control systems for mining electric locomotives specialized organizations and enterprises - Ltd. "Amplitude" (Kyiv), LLC "Electroprotection" (Kharkiv) and PJSC "Elektromashina" (Kharkiv), as well as in the development and testing of a new control system synergistic traction electromechanical complexes of a mining electric locomotive in the mines of PJSC "Krivoy Rog Iron Ore Integrated Plant"; there are corresponding Acts in the work exist.

**Keywords:** mine electric locomotives, dynamic processes, traction electromechanical complex, traction induction motor, control algorithm.

## 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 пуско-гальмівних 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 електровозосоставу 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», *и201405189*, Груд. 25, 2014.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 ТЯГОВІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ВІТЧИЗНЯНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	
1.1 Загальні відомості про технологію функціонування електропотягів в умовах залізорудних шахт.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2 Оцінювання режимів функціонування тягових електромеханічних комплексів у залежності від виду підземних гірничих виробок .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.3 Аналіз літературних даних .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.4 Обґрунтування вихідних передумов та формалізація наукових завдань і мети досліджень.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.5 Висновки до розділу 1 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЯК БАГАТОМАСОВОЇ СИСТЕМИ З НЕЛІНІЙНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ .....	
2.1 Вихідні положення до аналітичних досліджень динаміки комплексу: «електровоз – вагонетки» .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2 Розробка методів формування діаграми руху електропотягів для синтезу закону управління .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.3 Висновки по розділу 2 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ .....	
3.1 Складання матричних рівнянь стану лінеаризованої динамічної системи: «електровоз – вагонетки».....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

- 3.2 Процедура усунення коливань комплексу «електровоз – вагонетки»  
.....**Error! Bookmark not defined.**
- 3.3 Визначення впливу люфтів зчїпних пристроїв на динаміку поведінки рудникових електропотягів .....**Error! Bookmark not defined.**
- 3.4 Параметрична ідентифікація тягового електромеханічного комплексу шахтного електровоза як об’єкту керування...**Error! Bookmark not defined.**
- 3.5 Визначення порядку рівнянь динамічної системи «електровоз – вагонетки» .....**Error! Bookmark not defined.**
- 3.6 Синтез замкнутої системи керування електроприводом ..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.7 Результати ідентифікації лінійної динамічної системи «електровоз – вагонетки» .....**Error! Bookmark not defined.**
- 3.8 Висновки по розділу 3 .....**Error! Bookmark not defined.**
- РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВОМУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ «ЕЛЕКТРОВОЗ – ВАГОНЕТКИ»  
.....**Error! Bookmark not defined.**
- 4.1 Загальні положення до моделювання системи «електровоз – вагонетки»  
.....**Error! Bookmark not defined.**
- 4.2 Розробка структури моделі комплексу «електровоз – вагонетки» для дослідження пускових і гальмівних режимів електропотяга ..... **Error! Bookmark not defined.**
- 4.3 Дослідження динаміки рудникового електропотяга із релейно-контакторною системою управління тяговим електромеханічним комплексом постійного струму .....**Error! Bookmark not defined.**
- 4.4 Визначення рівнів впливу збурювальних чинників на процеси розгону і гальмування в комплексі «електровоз – вагонетка» ..... **Error! Bookmark not defined.**



4.5 Дослідження динаміки рудникового електропотяга на моделі тягового електромеханічного комплексу із системою інвертор напруги – тяговий асинхронний двигун .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.6 Опис функціонування запропонованої системи керування тяговим електромеханічним комплексом .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.7 Висновки до розділу 4 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b>	
<b>ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО</b>	
<b>КОМПЛЕКСУ З ПРОГРАМНОЮ РЕАЛІЗАЦІЄЮ ПРОЦЕСУ ЗМЕНШЕННЯ</b>	
<b>ДИНАМІЧНИХ КОЛИВАНЬ .....</b>	
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	
5.1 Постановка завдання вибору базової структури системи тягового електромеханічного комплексу рудникового електровоза.	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.2 Лабораторні дослідження тягового електромеханічного комплексу рудникового електровоза з мікропроцесорним керуванням з реалізацією запропонованого алгоритму керування .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.3 Результати досліджень на лабораторному стенді ..	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.4 Оцінювання відповідності результатів, отриманих теоретичним і лабораторно-експериментальним способами..	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.5 Висновки до розділу 5 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>ВИСНОВОКИ.....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>31</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ДОДАТОК А Показники функціонування гірничорудних підприємств з підземним способом видобутку залізорудної сировини.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ДОДАТОК Б Патент та акти впровадження результатів дисертаційної роботи .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

ДОДАТОК В Рейсові діаграми роботи електровозів 10КР, 14КР в підземних виробках ряду шахт Криворізького залізорудного басейну **Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК Д Технічні параметри електровоза К14А і вагонетки ВГ-4,5  
.....**Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК Е Опис структури моделі потяга з 8 вагонетками ..... **Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК Ж Розрахунок коефіцієнта жорсткості амортизаторів вагонеток ВГ-4,5.....**Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК И Розрахунок передавальних функцій розгінних і гальмівних рівнів релейно-контакторної системи електровоза К14А .. **Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК К Розрахунок параметрів двигуна постійного струму електровоза.....**Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК Л Таблиці планування експерименту та його результатів . **Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК М Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна .....**Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК Н Опис структури моделі системи інвертор напруги – асинхронний двигун .....**Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК П Опорна структура електротехнічної системи управління рудниковим електровозом.....**Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК Р Лабораторний стенд тягових електромеханічних систем рудникових електровозів .....**Error! Bookmark not defined.**

ДОДАТОК С Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації..... **Error! Bookmark not defined.**

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Україна належить до країн сталого розвитку природних ресурсів [23]-[26]. Більше того, близько 70% щорічних валютних запасів країни поповнюються за рахунок експорту однієї з багатьох корисних копалин країни – залізорудної сировини, понад 60% щорічного обсягу видобутку котрої екпортується більш ніж в 10 країн світу (Додаток **Error! Reference source not found.**, рис. **Error! Reference source not found.**). І це при тому, що за оцінками прогнозних показників, попит на ЗРС у світовій економіці буде зростати до 2035 р. із середньорічним темпом приросту на 1,5% [25].

Зауважимо, що з п'ятого місяця 2013 року Україна піднялася, і за оцінками [25] займає четверте за обсягом експорту ЗРС місце в світі, випередивши Канаду. При цьому, обсяги видобутку ЗРС в Україні в 2015 році наблизилися до рекордно позитивного для країни рівня 1990 року (Додаток **Error! Reference source not found.**, рис. **Error! Reference source not found.**) з акцентом на підземний (шахта), або комбінований відкрито-підземний (кар'єр-шахта) способи видобутку.

На жаль, динаміка коливань світових цін на ЗРС в останні роки позбавлена позитивної тенденції. Так, в порівнянні з 2011 роком у 2015 році ціни на ЗРС на світовому ринку сировини знизилися на 60%. Гірничорудним підприємствам України в боротьбі за ринки збуту ЗРС доводиться докладати чимало зусиль з метою збереження і розширення обсягів як внутрішніх, так і експортних поставок. І це в умовах, коли собівартість видобутого ЗРС по всім без винятку вітчизняним гірничорудним підприємствам з року в рік зростає, а вартість його реалізації, про що зазначено вище, позбавлена динаміки зростання [24], [25].

Найбільшою сталістю зростання змін в пайовій участі у формуванні комплексу показників собівартості видобутку ЗРС зазнали і зазнають

сегменти витрат на транспортування (доставку) ЗРС, а також енерговитрати [26]-[30]. Так, за останні два десятиліття перший із вищезазначених показників у загальній собівартості видобутого ЗРС збільшився більш ніж в 4 рази (Додаток **Error! Reference source not found.**, рис. **Error! Reference source not found.**) при збільшенні майже на 20% витрат електричної енергії на доставку сировини [26]-[29].

Основні напрямки підвищення ефективності видобутку ЗРС, куди органічно входить і комплекс доставки, в перспективі визначені, але між тим, що логічно, повинні були б бути доповнені відповідною ефективною схемою транспортування ВШТ [30]-[35]. Однак, як нині, так і в найближчі 35-40 років, реальна конкуренція існуючому способу транспортування ЗРС по підземних виробках залізородних шахт – електровозному, сумнівна [2], [5], [17], [18], [37]-[44].

На жаль, і в перспективі сегмент витрат, в т. ч. електроенерговитрат, на доставку ЗРС в його собівартості (Додаток **Error! Reference source not found.**, рис. **Error! Reference source not found.**) у зв'язку зі збільшенням протяжності підземних транспортних горизонтів за фактом зниження глибин видобутку, будуть і надалі мати тенденцію зростання, бо на вітчизняних гірничорудних підприємствах глибини стволів, тобто підземні рівні ведення гірничих робіт, вже в 2010 році впритул наблизилися до непередбачених проектними показниками 1700-2500 м і більше (Додаток **Error! Reference source not found.**, рис. **Error! Reference source not found.**, таблиця **Error! Reference source not found.**). Тобто, без прийняття належних заходів, не слід очікувати поліпшення як комплексу техніко-економічних показників видобутку ЗРС взагалі, так і сегмента витрат на рівень її енергоефективності, а також транспортування.

Причиною досить низьких показників функціонування електропотягів залізородних шахт – циклічного виду транспорту, крім об'єктивних причин, пов'язаних з логічним процесом зниження глибин видобутку ЗРС, є застаріле,

перш за все, в моральному та й фізичному напрямках, технологічне обладнання всього комплексу ВШТ і особливо електровозів, де, в свою чергу, надто застарілими є тягові електромеханічні комплекси, які й за формою, і за змістом не відповідають сучасному комплексу технологічних вимог з боку служб експлуатації гірничорудних підприємств [31], [37], [45]. Досить вагомим фактом «застарілості» ТЕМК рудникових\* електровозів є і те, що вони за своєю структурою виключають можливість втілення їх в технологічну структуру комплексу очікуваного в перспективі процесу автоматизації управління – АСУ ВШТ – найбільш реального і вагومого чинника комплексного підвищення ефективності процесу доставки КК по підземних горизонтах шахт [32], [33], [38].

Вирішити ці питання тільки за рахунок «косметичних» організаційних заходів з огляду на те, що, як зазначено на початку, технологія ВШТ залишається незмінною, тим більше в діючих шахтах, досить проблематично, а, точніше, зовсім нереально.

При цьому логічно, що першим етапом «конструювання» структури АСУ ВШТ має стати створення відповідних ТЕМК самих електровозів, котрі, в свою чергу, повинні відповідати вимогам енергоефективності та бути технологічним для всіх видів і типів рудникових електровозів [2], [5], [17], [18], [20], [21], [37], [44]-[46].

В останні десятиліття в Україні відновлені науково-дослідні роботи [5], [17], [18], [45]-[47] в напрямку розпочатого ще в 70-х роках минулого століття процесу реновації як ТЕМК, так і рудникових електровозів у цілому [1], [20], [22], [43], [48]. Вже отримано певні позитивні результати. Між тим, слід констатувати, що на сьогодні ці цікаві і конче необхідні для підприємств галузі розробки не отримали статусу закінченості. На жаль, ряд питань, які стримують масове впровадження цих прогресивних і сучасних науково-

Примітка. Згідно відповідних держстандартів та положень, електровози, які виготовляються і експлуатуються в умовах шахт, рудників і інших підприємствах з технологіями підземного ведення робіт, класифікуються як рудникові види.

технічних рішень у практику вітчизняного електровозобудування невирішені і поки що продовжують бути такими [2], [5], [17], [18], [20], [21], [37], [44]-[46].

Між тим, підкреслимо, що вже перші і в цілому позитивні результати попередніх експлуатаційних випробувань викреслили недостатнє використання розробниками можливостей сучасних систем ТЕМК, в т. ч. в плані реалізації можливостей мікропроцесорного управління на основі багатофункціональних структур алгоритмів керування режимами роботи ТЕМК в функції технологічних чинників підземних гірничих виробок залізорудних шахт [20], [21].

Як свідчать результати досліджень автора та ряду інших дослідників, це у значній мірі стосується проблем динаміки поведінки складових електропотягів [1], [6], [9]-[14], [16], [19]. Пов'язаний цей висновок з тим, що, як відомо [37], [42], [45], електропотяги в підземних виробках тих чи інших видів шахт з видобутку тих чи інших КК, згідно технології їх транспортування, мають свою специфіку функціонування. Ця специфіка даного виду транспорту, визначається домінантою неусталених режимів роботи ТЕМК електровозів в процесі цикло руху потяга в гірничих виробках в умовах залізорудних шахт [13]. В свою чергу, електропотяги являють собою значні розподілені маси (електровоз, вагонетки), що не жорстко з'єднані між собою, і знаходяться як у керованому, так і некерованому (один відносно іншого) русі, що викликає складні динамічні процеси, як при пуску і гальмуванні, так і в сталих режимах руху [2], [5], [17], [18], [44], [45], [47], [48].

Встановлено [6], [9]-[14], [16], [49], що саме динамічні режими вкрай негативно впливають на ряд показників функціонування ВШТ, а саме на:

– продуктивність усього транспортного комплексу по факту збільшення часу циклу руху за рахунок збільшення часу при позиціонуванні

вагонеток потягу під навантажувальними люками та при в'їзді в круговий перекидач для розвантаження;

– підвищений рівень споживання електричної енергії за рахунок вимушених додаткових позиціонувань вагонеток при завантаженні та розвантаженні ЗРС;

– передчасні механічні пошкодження елементів електропотягів, що зменшує міжремонтні терміни експлуатації складових ВШТ.

При цьому слід мати на увазі, що динамічні режими по своїй структурі є джерелом декількох різновидів коливань [50], [51]. Проте, по рівню свого впливу пріоритет тут все ж належить поздовжньо-динамічним видам, як системоутворюючим всього комплексу негативних наслідків [50]-[57].

Так наслідком саме цих типів коливань є виникнення крутильних автоколивань в колісних парах електропотяга [58]-[61]. Якщо врахувати, що колісні пари при конструюванні ходової частини будь-яких типів і видів локомотивів в Україні на ці види коливань не перевіряються, то проблема необхідності оцінки впливу, а, що головне, обмеження рівня їх впливу на складові електропотяга, уже постає як завдання актуальне.

Незрідка динамічні зіткнення вагонеток між собою в процесі руху потягу є причиною інших негараздів – сходу електропотяга з рейок. Логічно, що впливає цілий комплекс серйозних пошкоджень, як самих електропотягів, так і рейок, та іншого обладнання. В останні десятиліття терміни служби зчіпних пристроїв електропотягів до 1-го ремонту в рудних шахтах України, в кращому випадку, не перевищує 5-6 місяців, бандажі коліс електровозів зношуються в 6 разів, а тягові електричні двигуни і редуктори майже в 20 разів швидше гарантованого заводом-виробником терміну. Більше того, близько 40% пошкоджень ТЕД – це наслідок механічних впливів, викликаних динамічними надзусиллями [34], [37], [44], [62], [63]. На додаток підкреслимо, що створення СУ ТЕМК необхідного рівня ефективності важливо ще й тому, що якщо при варіанті ручного – нині

існуючого управління, ці недоліки в СУ можуть бути виправлені й кориговані, у тій чи іншій мірі, ОПР – машиністом електровоза, то у варіанті автоматичного керування (до чого ми прагнемо в кінцевому підсумку), це може призвести до непередбачуваних наслідків – нестійкості, неадекватності і навіть втрати контрольованості поведінки СУ, що для тягової транспортної системи, тим більше в підземних умовах, вкрай небажано і навіть небезпечно. Тобто очевидно, що СУ з автоматизацією процесу управління ТЕМК повинна адекватно з необхідним рівнем попередження реагувати на виникаючі нештатні ситуації. У свою чергу, будова такої СУ має базуватися на результатах досліджень і оцінюванні динаміки поведінки не тільки ТЕМК, але і електропотяга в цілому. І тільки базуючись на такому підході до методики «конструювання» необхідного закону (алгоритму) поведінки СУ і з необхідним рівнем адаптації, в т. ч. для нових видів електровозів, можна очікувати позитивний результат. Тобто, по суті, формується завдання: створення нової сучасної універсальної для будь-якого виду рудникових електровозів СУ, яка буде якнайбільше відповідати всім, в т. ч. з динаміки, вимогам експлуатації ТЕМК, з можливістю включення цього транспортного комплексу в структуру АСУ ВШТ.

Безумовно, що ефективність рішення цього завдання буде і повинна вирішуватись, перш за все, адекватністю розробки все того ж закону (алгоритму) керування режимами функціонування ТЕМК електровоза в функції впливу на цей процес з боку комплексу технологічних чинників функціонування ВШТ в умовах конкретного виробництва, та можливості адаптивного реагування СУ ТЕМК на можливі зміни цих чинників.

Цю тезу підтверджує і те, що відомі методики досліджень динамічних процесів та засоби мінімізації їх наслідків в магістральних та промислових електропотягах, а також в електрифікованих видах транспорту соціального призначення не можуть бути в цілому застосовані для досліджень та подальшого проектування рудникових електропотягів по факту корінної



різниці конструкцій тягових систем, видів і параметрів збурення їх складових [37], [44], [47], [48], то завдання досліджень виглядає як необхідний процес пошуку в аналізованому напрямку.

Тому тема наукового дослідження при виконанні даної дисертаційної роботи актуальна і своєчасна.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень, які проводяться кафедрою автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та 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 рр, 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» 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.** Динамічні 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 розв'язку систем диференційних 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».

**Практична 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 електроенергоєфективних 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» (Додаток **Error! Reference source not found.**).

**Особистий внесок здобувача.** Результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримано автором самостійно. У роботах, написаних та опублікованих в співавторстві, а втору 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, **Error! Reference source not found.** рисунка, **Error! Reference source not found.** таблиць, список використаних джерел із **Error! Reference source not found.** найменувань і **Error! Reference source not found.** додатків. Загальний обсяг роботи – 247 сторінок.

Автор висловлює вдячність і подяку к. т. н., доцентам Гузову Е. С., Сьомочкіну А. Б., Козакевичу І. А., Сінчуку І. О., Жеребкіну Б. В. за дієві поради з теоретичних аспектів побудови методології досліджень, а також співробітникам служб ВШТ і особливо голові правління ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат» Караманіцу Ф. І. та головному енергетику Чуприні Е. В. (м. Кривий Ріг), за сприяння і допомогу при проведенні

численних експериментальних досліджень у шахтах комбінату протягом 2010-2016 років.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

[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.

[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 пуско-гальмівних 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 електровозосоставу 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.

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

[23] А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, М. В. Рогоза, С. Л. Випанасенко, *Геоeкономіка та геополітика України*. Дніпропетровськ, Україна: Національний гірничий університет, 2007.

[24] Е. К. Бабец и др., *Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг.* Кривой Рог, Украина: Издавничий дім, 2011.

[25] Є. С. Бабець, І. Є. Мельникова, С. Я. Гребенюк, та С. П. Лобов, *Дослідження техніко-економічних показників гірничодобувних підприємств*

*України та ефективності їх роботи в умовах змінної кон'юктури світового ринку залізорудної сировини: Монографія.* Кривий Ріг, Україна: вид. Р. А. Козлов, 2015.

[26] І. О. Сінчук, *Коментар до стану електроенергетики залізорудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності.* Кременчук, Україна: ЧП Щербатих А. В., 2018.

[27] О. М. Сінчук та ін., «Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізорудної промисловості», ДВНЗ «КНУ», Кривий Ріг, НДР №30-98-14 (№ дерреєстрації 0115U003180), 2015.

[28] Ю. П. Капленко, та Е. К. Яков, «Влияние глубины горных работ на технико-экономические показатели подземной до бычи руды», *Вісник криворізького технічного університету. Збірник наукових праць*, №5 (15), с. 25-28, 2006.

[29] А. А. Азарян, Ю. Г. Вілкул, Ю. П. Капленко, та Ф. І. Караманиць, *Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв.* Кривий Ріг, Україна: Мінерал, 2006.

[30] О. Н. Синчук, И. О. Синчук, Э. С. Гузов, А. Н. Яловая, та М. А. Баулина, «Оценка потенциала и тактика повышения электроэнергоэффективности подземных железорудных производств», *Технологический аудит и резервы производства*, №3 (4), с. 34-39, 2014.

[31] В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, и С. А. Мельников, «Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта», *Уголь Украины*, №6, с. 30-31, 2006.

[32] Ю. П. Астафьев, О. Н. Синчук, и Э. С. Гузов «Опыт применения АСУ электровозным транспортом с использованием компьютеров», *Горный журнал*, №11, с. 55-58, 1980.

[33] Г. П. Оат, Н. И. Литун, и В. Н. Дардалан, «Промышленные испытания аппаратуры автоматического вождения шахтных поездов», *Уголь*, № 11, с. 38-39, 1980.

[34] В. Н. Кордаков, и А. А. Коржев «Методика определения рациональной величины силы тяги дополнительного линейного электропривода рудничного электровоза», *Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб.*, №29, с. 120-125, 2003.

[35] S. A. Rosenberg, and S. B. Dewan “An inverter/cycloconverter system for variable frequency, variable voltage, ac power supplies”, *IAS Intern. Semiconductor power Converter Conf*, Lake Buena Vista, Fla. 1977, pp. 247-255, 1977.

[36] Г. Г. Пивняк, «Разработка и исследование тиристорных преобразователей в комплексе электрооборудования для безконтактного электровозного транспорта угольных шахт», дис. докт. техн. наук, Днепропетровск, Украина, 1981.

[37] О. Н. Синчука, И. О. Синчук, Э. С. Гузов, В. Л. Дебелый, и Л. Л. Дебелый, «Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование : учебник». Кривой Рог-Донецк, Украина: ЧП Щербатых А. В., 2015.

[38] В. С. Блиндюк, «Концепція побудови систем автоматизованого керування рухом поїздів», *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. №127, с. 43-56, 2011.

[39] R. Moser «Vergleichende Studie uber die verschiedenen elektrischen Traktions – motore. Typen in ihrem spezifischen Anwendungsbereich», *Brown Boveri Mitt*, №12, pp. 795-810, 1978.

[40] «EGL 160. Batterielokomotiven. Typ EGL 160 2 “System Milles” der firma Diema», *ETR: Eisenbahntechn. Rgsch*, №12, – pp 863-864, 1983.

[41] R. Valk, “On the computational power of extended Petri nets”, *Lecture Notes in Computer Science*, №64, pp. 526-535, 1978.

[42] О. Н. Синчук и др., *Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов*. Киев, Украина: ІЕДНАНУ 2006.

[43] С. А. Волотковский, Ю. С. Ремха, В. Х. Пироженко [и др.], «Опыт эксплуатации рудничных контактных электровозов с импульсной системой управления», *Горный журнал*, №7, с. 51-53, 1976.

[44] Б. В. Жеребкин, «Система векторного управления электроприводом рудничных электровозов с использованием аппарата нечёткой логики», автореф. дис. канд. наук, Санкт-Петербургский гос. горный ин-т им. Г. В. Плеханова, Санкт-Петербург, 2005.

[45] О. Н. Синчук, С. В. Лебедкин, И. О. Синчук, О. О. Удовенко, и О. В. Пасько, «Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов», *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, №8 (102), с. 83-92, 2006.

[46] О. Н. Синчук, Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа, и И. О. Синчук, «Испытания асинхронного тягового электропривода рудничного контактно-аккумуляторного электровоза», *Вісник Вінницького політехнічного університету*, №6, с. 49-52, 2011.

[47] С. В. Лебьодкін, А. Ф. Сінолиций, та О. В. Пасько, «Вугільна промисловість і перспективні напрямки розвитку тягових електроприводів рудникових электровозів (Проблеми і перспективи)», *Вісник Криворіжського технічного університету. Збірник наукових праць*, №4, с. 12-15, 2004.

[48] Б. В. Жеребкин, Д. А. Шокарев, и Е. И. Скапа, «Синтез структуры системы векторного управления тяговых электромеханических комплексов двуосных электровозов», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*, №4, с. 17-21, 2011.

[49] O. N. Sinchuk, Yu. B. Filipp, M. N. Maksimov, and V. A. Fedotov, "Choice of accumulator parameters and types of traction batteries for the mine

trolley-battery locomotives”, *Computer Science Information Technology Automation*, №5, pp. 1-10, 2016. [Online]. Available: <http://csita.com.ua/wp-content/uploads/2017/03/Synchuk-O.N.-Filipp-Yu.V..pdf>. Accessed on: February 23, 2017.

[50] В. И. Чубаров, «Определение колебаний шахтного электровоза», *Горные машины и автоматика*, №7, с. 113-115, 1965.

[51] В. Б. Клепиков, *Динамика электромеханических систем с нелинейным трением : монография*. Харків, Україна: «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014.

[52] В. А. Лазарян, «Исследование усилий, возникающих при переводных режимах движения в стержнях с различными упругими несовершенствами», *Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта*, Вып. XXV, 1955.

[53] В. Е. Жуковский, «Работа (усилие) русского сквозного и американского несквозного тягового прибора при трогании поезда с места и в начале его движения», в *Полное собрание сочинений. УИ, ДНТИ*. Ред. Москва, СССР: ДНТИ, 1937, с. 31-57.

[54] В. Б. Медель, *Взаимодействие электровоза и пути*. Москва, СССР: Трансжелдориздат, 1956.

[55] Д. К. Минов, «Теория процесса реализации сил сцепления при электрической тяге и способы повышения их использования», *Проблема повышения эффективности работы транспорта*, Вып. 1, 1963.

[56] Ф. В. Флоринский, «Исследование динамических усилий упряжных приборах при торможении поезда», *Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта*, Вып. XIX, 1948.

[57] А. У. Галлеев, и Ю. И. Першиц, *Вопросы механики поезда*. Москва, СССР: Трансжелдориздат, 1958.

[58] П. С. Шахтарь, «Динамические процессы в рудничных локомотивах и методика расчёта параметров механической части», дис. докт. наук, Донецкий гос. ун-т, Донецк, 1974.

[59] В. Г. Шорин, «Установление оптимальных параметров и конструктивных характеристик шахтного локомотивного транспорта как средства его коренного усовершенствования», автореф. дис. докт. наук, Днепропетровский горный ин-т им. Артема, Днепропетровск, 1962.

[60] Б. Г. Анискин, «Исследование характеристик рудничного электровоза в режиме буксования колёс», автореф. дис. канд. наук, Ленинградский горный ин-т им. Г. В. Плеханова, Ленинград, 1968.

[61] В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, и Н. Н. Сидоров, *Теория электрической тяги*, Москва, СССР: Наука, 1983.

[62] Г. П. Оат, «Исследование нагрузок тяговых двигателей электровозов горнорудных шахт», автореф. дис. канд. наук, Ленинградский горный ин-т им. Г. В. Плеханова, Ленинград, 1962.

[63] В. О. Чорна, «Контроль та комплексний захист тягового електроприводу постійного струму рудничних контактних електровозів», автореф. дис. канд. наук, Вінницький нац. техн. ун-т, Вінниця, 2015.

[64] Л. Б. Литвинский, «Исследование способов и разработка технических средств оптимального управления рудничными электровозами», автореф. дис. канд. наук, Днепропетровский ин-т геотехн. механики, Днепропетровск, 1974.

[65] А. К. Быля, «Динамика рудничных вагонеток», автореф. дис. канд. наук, Днепропетровский горный ин-т им. Артема, Днепропетровск, 1966.

[66] С. А. Волотковский, *Рудничная электровозная тяга*, Москва, СССР: Недра, 1981.

[67] Б. А. Кузнецов, В. А. Ярмизин, А. А. Ренгевич, и И. А. Эренбург, *Транспорт на горных предприятиях*, Москва, СССР: Недра, 1976.



[68] С. В. Федоренко, «Исследование энергетических потерь рудничного электровоза», автореф. дис. канд. наук, Днепропетровский горный ин-т им. Артема, Днепропетровск, 1977.

[69] И. О. Синчук, В. Ю. Захаров, и Е. И. Скапа, «К вопросу анализа электромеханических переходных процессов в рудничных электровозосоставах при погрузочно–разгрузочных операциях», *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, ч. 1, № 4(158), Луганськ, с. 168-172, 2011..

[70] С. Н. Якимець, «Структура та режими функціонування тягового електротехнічного комплексу двохосьових електровозів», автореф. дис. канд. наук, Кременчуцький нац. ун-т ім. М. Остроградського, Кременчук, 2011.

[71] Д. А. Шокар'юв, «Система керування тяговим асинхронним електричним приводом контактної-акумуляторної рудничної електровоза», автореф. дис. канд. наук, Вінницький нац. техн. ун-т, Вінниця, 2015.

[72] О. В. Пасько, «Тяговий електропривод змінного струму з плавно мінливою структурою для рудничного акумуляторної електровозу», автореф. дис. канд. наук, автореф. дис. канд. наук, Нац. технічний ун-т «ХПШ», Харків, 2005.

[73] А. П. Прунцев «Метод автоматического контроля сцепления колёс локомотива с рельсами», автореф. дис. канд. наук, Московский ин-т инженеров ж.-д. транспорта, Москва, 1977.

[74] А. Ф. Борзых, «Исследование динамических нагрузок, возникающих в вагонетках при пуске и торможении шахтного подвижного состава», дис. канд. наук, Кемеровский горный ин-т, Кемерово, 1965.

[75] Б. Н. Тихменев, и Л. М. Трахтман, *Подвижной состав электрических железных дорог*. Москва, СССР: Трансжелдориздат, 1959.

[76] В. А. Браташ и др., *Электровозы и тяговые агрегаты промышленного транспорта*, Москва, СССР: Транспорт, 1977.

[77] О. Б. Мокін, «Проблема ідентифікації моделей оптимального руху нелінійних розподілених динамічних систем класу багатомасових електричних транспортних засобів та методологія її вирішення», автореф. дис. докт. наук, Вінницький нац. техн. ун-т, Вінниця, 2012.

[78] О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, та О. Д. Фолюшняк, «Метод параметричної ідентифікації моделі оптимального струму електромобіля», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №3, с. 89-92, 2011.

[79] В. В. Грабко, та Д. В. Проценко, «Синтез структури пристрою керування тяговим електроприводом рухомого складу міського електротранспорту з врахуванням зміни умов зчеплення», *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, № 28, с. 63-65, 2010.

[80] С. В. Эллис, «Исследование динамики комплекса коксотушильного электровоза», автореф. дис. канд. наук, Харьковский политехн. ин-т им. В. И. Ленина, Харьков, 1971.

[81] В. П. Дардалан, «Повышение безопасности и надёжности электровозной откатки в местах разгрузки», на *Проблемы механики горно-металлургического комплекса*, Днепропетровск, 2002, с. 35-36.

[82] О. М. Сінчук, Е. С. Гузов, І. О. Сінчук, М. А. Бауліна, та Є. І. Скапа, «Рудниковий гібридний електровоз з асинхронним приводом та автоматизованим керуванням», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*, № 2/2012(18), с. 96-100.

[83] О. М. Сінчук, Е. С. Гузов, О. В. Омельченко, Є. І. Скапа, та В. О. Чорна, «Ймовірносно-статистичний метод розрахунку електричних навантажень тягових двигунів рудникових електровозів», *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, № 7(83), с. 34-41, 2012.

[84] О. Н. Сінчук, С. Н. Якимец, и Е. И. Скапа, «Электромагнитные переходные процессы в тяговых электротехнических комплексах с IGBT –

преобразователи двухосных промышленных электровозов», *Електромеханічні енергозберігаючі системи*, № 1/2011(13). с. 27-32, 2011.

[85] І. О. Сінчук, «Тяговий частотно-регульований асинхронний електропривод рудникових контактних електровозів», автореф. дис. канд. наук, Нац. технічний ун-т «ХПІ», Харків, 2009.

[86] В. И. Чуканов, *О динамических силах, возникающих при работе шахтных вагонеток. Расчёт и конструирование горных машин*. Москва, СССР: Углетехиздат, 1954.

[87] Г. Корн, и Т. Корн, *Справочник по математике для научных работников и инженеров (определения, теоремы, формулы)*. Москва, СССР: Наука, 1974.

[88] В. В. Степанов, *Курс дифференциальных уравнений*. Москва, Россия: Наука, 2004.

[89] А. А. Воронов и др., *Теория автоматического управления*. Москва, СССР: Высшая школа, 1986.

[90] А. В. Пантелеев, и А. С. Бартаковский, *Теория управления в примерах и задачах: Учеб. Пособие*, Москва, Россия: Высшая школа, 2003.

[91] Е. Г. Макаров, *Mathcad: Учебный курс*. СПб., Россия: Питер, 2009.

[92] В. А. Бесекерский, и Е. П. Попов, *Теория систем автоматического регулирования*. Москва, СССР: Наука, 1975.

[93] Y. C. Kim, and S. Manabe, "Introduction to coefficient diagram method", in *Proceedings of the SSSC'01*, Prague, 2001, pp. 147-152.

[94] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method", in *Proceeding of the 14th IFAC symposium on automatic control in aerospace*, Korea. 1998. с. 199-210.

[95] А. А. Рафальський, «Покращення динамічних властивостей електроприводу рудничного електровоза в режимах буксування», автореф. дис. канд. наук, Нац. технічний ун-т «ХПІ», Харків, 2013.

[96] С. В. Поршневу, *Компьютерное моделирование физических процессов в пакете Матлаб*. Москва, Россия: Горячая линия – Телеком, 2003.

[97] С. Г. Герман-Галкин, *Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Матлаб 6.0: Учебное пособие*. СПб., Россия: КОРОНА принт.

[98] А. П. Кислицын, «MATLAB», *Техно-сообщество*, 2013. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://tm.itizdat.ru/Uploads/Anatoli/FIL13587277850N571106001/.pdf>. Дата обращения: Янв. 28, 2015.

[99] «Электровоз серий К-10А, К-10А-01 К-14, К14М. Руководство по эксплуатации К-10А, К14А. К14МА 0000000РЭ», *ООО "ПАПАЛЕО"*, 2012. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://papaleo.ru/wp-content/uploads/2016/06/РЭ-на-электровозы-К-141014М.pdf>. Дата обращения: Май 21, 2017.

[100] Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов, *Планирование эксперимента в электромеханике*. Москва, СССР: Энергия, 1975.

[101] А. Померанцев, «Матричные операции в Excel», *Российское Хемометрическое Общество*, 2010. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://rcs.chemometrics.ru/Tutorials/excel.htm>. Дата обращения: Июнь 20, 2015.

[102] Д. А. Гурский, *Вычисления в Маткад 12*. СПб. Россия: Питер.

[103] А. С. Сандлер, и Р. С. Сарбатов, *Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями*. Москва, СССР: Энергия, 1974.

[104] А. Э. Кравчик, *Асинхронные двигатели серии 4А*. Москва, СССР: Энергоиздат, 1982.

[105] "GMT Gummi-Metall-Technik GmbH". *GMT Produktinformation*, 2008. [Online]. Available: [http://www.gmt-gmbh.de/upload/Kataloge/Produktkatalog\\_dt\\_klein.pdf](http://www.gmt-gmbh.de/upload/Kataloge/Produktkatalog_dt_klein.pdf). Accessed on: May 12, 2017.