

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ПОМАЗАН ДАНИЛО ПАВЛОВИЧ

УДК 629.4.016:629.423.32

## ДИСЕРТАЦІЯ

### ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ «ТЕПЛОВИЙ ДВИГУН – ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД» ТЕПЛОВОЗА

273 – Залізничний транспорт

27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

  
Д.П. Помазан

Науковий керівник

Маслій Артем Сергійович  
кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Помазан Д.П.* Підвищення енергоефективності системи «тепловий двигун – тяговий електропривод» тепловоза. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 273 – Залізничний транспорт – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2021.

Дисертацію присвячено питанню розробки методів та заходів з підвищення енергоефективності тепловозів з тяговою електричною передачею.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-прикладного завдання підвищення енергоефективності тепловозів з тяговою електричною передачею, що здійснюється шляхом впровадження гібридної тягової електричної передачі та використання енергооптимальних режимів ведення поїзда.

*Вперше* проведено:

- вибір конфігурації системи «тепловий двигун – тяговий електропривод» тепловоза із використання функції бажаності Харінгтона, яка дозволяє виконати оцінку складових системи базуючись як на якісних показниках їх роботи, так і на кількісних;

- оптимізаційний пошук кривої руху поїзда з використанням гібридного маневрового тепловозу ділянкою шляху із застосуванням методу динамічного програмування на базі принципу оптимальності Белмана, що дає змогу визначити енергооптимальні режими ведення поїзда і надати рекомендації щодо вибору співвідношень між потужностями основного та додаткового джерел живлення.

*Удосконалено:*

- математичну модель руху поїзда ділянкою із врахуванням впливу виникнення нестационарних режимів таких, як боксування та юз, що дозволяє дослідити процеси, які протікають при цьому в системі «тепловий двигун – тяговий електропривод – накопичувач енергії» тепловоза.

*Набули подальшого розвитку:*

– імітаційна модель дизельного двигуна, яка, на відміну від відомих, що базуються на індикаторній діаграмі його роботи, враховує залежність між силою, яка розвивається дизельним двигуном, та коефіцієнтом завантаження двигуна, даючи при цьому змогу підвищити точність розрахунку кількості спожитого пального при роботі дизель-генераторної установки без значного ускладнення моделі;

– імітаційна модель лінійного електромеханічного перетворювача електромагнітного типу, що є складовою частиною вільнопоршневого двигуна внутрішнього згорання та дозволяє провести дослідження і визначити основні особливості роботи такої дизель-генераторної установки в якості бортового джерела енергії на тепловозі.

Практичні результати дисертаційної роботи полягають у її прикладній спрямованості на підвищення показників енергоефективності та екологічності тягового рухомого складу залізниць при виконанні ним маневрової та вивізної роботи. Використання результатів дисертації дозволяє підвищити енергоефективність та екологічність систем гібридної тяги при виконанні ними роботи із переміщення вантажів, знизити капітальні витрати при проведенні модернізації існуючого рухомого складу за рахунок можливості оптимального вибору співвідношення потужностей основного та додаткового бортових джерел енергії, знизити витрати паливно-мастильних матеріалів шляхом запровадження енергооптимальних режимів ведення поїзда ділянкою по заданій тахограмі та підвищити ККД системи «тепловий двигун – тяговий електропривод» тепловоза за рахунок застосування нових конструкцій бортових дизель-генераторних установок.

За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 4 наукових статі у фахових виданнях, затверджених МОН України, з яких 1 включена до міжнародної наукометричної бази, 1 наукова стаття в іноземному виданні країни – члена ЄС, 1 додаткова праця, 11 праць апробаційного характеру.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження,

наведено його мету, завдання, зв'язок із науковими програмами, планами і темами університету. Представлено наукову новизну, практичну значущість дисертації та наведено її загальну характеристику.

У *першому розділі* виконано огляд можливих конфігурацій системи «тепловий двигун – накопичувач енергії – тяговий електропривод» маневрового тепловоза, проведено вибір оптимального складу тягової електричної передачі з ротаційним та вільнопоршневим двигуном внутрішнього згорання.

На даний час досвід світового локомотивобудування показує доцільність застосування тягової електричної передачі тепловозів змінного струму, проте більш енергоефективним є застосування гібридної системи із накопичувачем енергії, що стає все більш розповсюдженим серед основних виробників тягових одиниць.

Основні складові тягової електричної передачі мають доволі різні характеристики, а тому доцільним є проведення вибору оптимального складу системи «тепловий двигун – накопичувач енергії – тяговий електропривод» тепловоза. Оцінка складових системи проведена на основі методу, що базується на використанні функції бажаності Харінгтона. Такий підхід дає змогу провести комплексну оцінку базуючись як на якісних показниках роботи елементів системи, так і на кількісних.

Проведений у розділі аналіз дав змогу обмежити множину варіантів конфігурації системи «тепловий двигун – тяговий електропривод» тепловоза до двох найбільш бажаних конфігурацій. Найбільші показники узагальненої функції бажаності мають конфігурації тягової гібридної передачі, що включає в себе вільнопоршневий двигун внутрішнього згорання із лінійним генератором електромагнітного типу, тяговий асинхронний електропривод та літій-залізо-фосфатну акумуляторну батарею.

Водночас з тим, з огляду на відсутність експлуатаційних зразків вільнопоршневих двигунів внутрішнього згорання, а також через близькість показників узагальненої функції бажаності для двох кращих варіантів, не може бути виконано визнання системи із ротаційним дизелем як небажаної, а тому прийнято другий варіант складу тягової електричної передачі, що включає в себе ротаційний

двигун внутрішнього згорання із синхронним генератором з постійними магнітами, тяговий асинхронний електропривод та літій-залізо-фосфатну акумуляторну батарею.

*Другий розділ* присвячено моделюванню складових тягової гібридної електричної передачі маневрового тепловоза, а саме дизель-генераторної установки, тягового асинхронного електроприводу із векторною системою керування, літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї та системи контролю рівня заряду накопичувача.

В основу імітаційної моделі дизельного двигуна покладено діаграму його роботи, що представляє собою залежність значення сили, що розвивається одним циліндром при робочому ході та допоміжних циклах від переміщення поршня у циліндрі. Врахування нелінійності зміни сили, що реалізується, від коефіцієнту завантаження перетворює графік сили дизельного двигуна у тривимірну поверхню, застосування якої дає більш точні результати при обчисленні витрат пального на роботу тепловоза. Регулятор кількості обертів представляє собою механічний регулятор кількості пального, що подається до циліндру, та при моделюванні може бути представлений як пропорціонально-інтегральний регулятор. Моделювання синхронного генератора, що є складовою дизель-генераторної установки, виконано за допомогою використання блоку із бібліотеки Simulink.

Модель тягового асинхронного приводу з векторною системою керування включає в себе модель тягового асинхронного двигуна та перетворювача частоти, що реалізує векторний закон керування. Моделювання асинхронного двигуна виконано базуючись на параметрах тягового електричного двигуна марки АД-902. Моделі випрямляча та інвертора є стандартними блоками середовища Matlab. Контури регуляторів струму та швидкості векторної системи керування налаштовано на модульний та симетричний оптимуми.

Модель накопичувача енергії базується на зарядно-розрядних характеристиках батареї LT-LYP 770, що є її паспортними даними можуть бути описані рівнянням Шеферда. Система контролю рівня заряду накопичувача енергії представляє собою двоключовий buck-boost DC/DC перетворювач, ключі якого

отримують керуючі сигнали від системи регулювання рівня заряду. Для використання на тяговому рухомому складі найбільш прийнятним є алгоритм заряду за складеною характеристикою постійного струму, що дозволяє отримати необхідні значення гальмівного моменту та прийняти енергію гальмування у накопичувач.

Дослідження, виконані в *третьому розділі*, присвячені розробці моделі руху поїзда ділянкою шляху із реальними параметрами та моделюванню процесу ведення поїзда тепловозом із гібридною передачею такою ділянкою.

У процесі руху ділянкою на поїзд здійснюють вплив зовнішні сили (сила тяги, сила опору руху, гальмівна сила), що є складними функціями декількох змінних. Врахування особливостей поведінки сил тяги та гальмування при розробці математичної моделі дало змогу не тільки провести дослідження процесів, що протікають у системі гібридної передачі при стаціонарних режимах, а й розглянути нестационарні, а саме виникнення боксування або юзу. При побудові математичної моделі прийнята одномасова розрахункова схема тягового електроприводу, що дало змогу уникнути значного ускладнення моделі зі збереженням точності розрахунків у межах, що задовольняють потреби подальших досліджень.

Поєднання розробленої у розділі математичної моделі руху поїзда ділянкою шляху Харків – Борки із моделлю складових тягової електричної передачі тепловоза дало змогу провести моделювання процесів, що протікають у бортових системах локомотива у середовищі Matlab. При моделюванні виконано трапецоїдне завдання швидкості із середнім значенням 40 км/год. Результати моделювання підтвердили необхідність проведення оптимізації режимів ведення поїзда з метою зменшення витрат енергетичних ресурсів.

*Четвертий розділ* присвячено проведенню оптимізаційного обчислення з метою пошуку оптимальної тахограми ведення поїзда ділянкою та конфігурації основного і додаткового джерел енергії на тепловозі.

Дискретний характер завдання вихідних даних для проведення оптимізаційного пошуку вимагає застосування методів динамічного

програмування для вирішення транспортної задачі. Використання методу прямого проходу ділянки шляху із високим ступенем дискретизації вимагає великих обчислювальних потужностей та є досить довгим процесом. З огляду на це проведено оптимізаційний пошук за спрощеним методом прямого проходу, тобто з розбиттям тахограми на три характерні зони – розгін, квазіпостійне значення швидкості, гальмування. Цільовою функцією оптимізації прийнято витрати енергії на процес переміщення поїзда ділянкою, що складається з витрат енергії на створення прискорення, подолання сил опору руху та покриття втрат у основних складових системи гібридного тепловоза.

Використання спрощеного прямого проходу із трьома ділянками дає досить розмите поняття про необхідний характер зміни швидкості у середній зоні. Це призвело до необхідності проведення оптимізаційного пошуку із використанням принципу оптимальності Белмана. У результаті оптимізації отримано тахограму ведення поїзда з найбільш енергоощадним режимом.

Зміна характеру оптимальної кривої руху в залежності від співвідношення потужностей основного та додаткового джерел енергії на тепловозі вимагає проведення ряду обчислень для всіх значень такого співвідношення. У результаті проведених розрахунків отримано тривимірну поверхню, що дає змогу зробити вибір конфігурації джерел енергії в залежності від необхідного значення середньої швидкості.

Із використанням моделі руху поїзда, що розроблена раніше, проведено моделювання роботи тепловоза за оптимальною тахограмою та виконано порівняння отриманих результатів із даними, що отримані при моделюванні руху за неоптимальною тахограмою. Доцільність проведення оптимізації підтверджена зниженням витрат пального на виконання поїзної роботи.

Дослідження, виконані в *n'ятому розділі*, присвячені розробці імітаційної моделі вільнопоршневого двигуна внутрішнього згорання з лінійним генератором електромагнітного типу та дослідженню роботи такої системи в якості бортового джерела енергії гібридного маневрового тепловоза.

У розділі виконано вибір конфігурації системи вільнопоршневого двигуна та

його лінійного генератора та розроблено імітаційну модель їх роботи. В основу моделі дизельного двигуна, як і у попередньому випадку, покладено діаграму зміни сил від переміщення поршня. Математична модель лінійного електромеханічного перетворювача виконана на основі підходу, що базується на узагальненій моделі електромеханічного перетворювача. З метою перевірки адекватності підходу до створення моделі розроблено фізичну модель еквівалентної системи та виконано експеримент, який підтвердив збіжність результатів фізичного та імітаційного моделювання, що дало змогу стверджувати про адекватність моделей.

Використання нової конструкції бортового джерела енергії вимагає проведення нового оптимізаційного пошуку енергоефективного режиму ведення, що був проведений за методом, який застосовано в четвертому розділі. Моделювання руху поїзда з гібридним тепловозом, що оснащений удосконаленою системою бортового генерування енергії, за оптимальною тахограмою показало доцільність застосування нової конструкції через зниження витрат пального відносно традиційної системи.

**Ключові слова:** дизель-генераторна установка, тяговий асинхронний привод, накопичувач енергії, одномасова розрахункова схема, динамічне програмування, принцип оптимальності Белмана, вільнопоршневий двигун внутрішнього згорання, лінійний генератор електромагнітного типу.



## ABSTRACT

*Pomazan D.P.* Improving the energy efficiency of the system "heat engine - traction electric drive" of the diesel locomotive. – Qualification scientific work – manuscript.

Thesis for a Ph.D. – Doctor of Philosophy in 273 – Railway Transport. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to the question of the development of methods and measures for the increase of energy efficiency of diesel locomotives with traction electric transmission.

The scientific novelty of the thesis is to solve the scientific and applied problem of improving the energy efficiency of diesel locomotives with traction electric transmission, which is carried out both by changing the design of the traction unit, and through the use of energy-optimal modes of the trains driving.

*Conducted for the first time:*

- the choice of the configuration of the system "heat engine - traction electric drive" of the diesel locomotive using the Harrington desirability function, which allows evaluating the components of the system based on both qualitative indicators of their work and quantitative;

- optimization search of the train movement curve using a hybrid shunting locomotive along the track using the method of dynamic programming based on the principle of Bellman optimality, which allows to determine the energy-optimal modes of train driving and provide recommendations for choosing the ratio between the main and additional power sources.

*The following have been improved:*

- mathematical model of train movement on a section of the road taking into account the influence of non-stationary modes such as boxing and sliding, which allows investigating the processes that take place in the system "heat engine - traction drive - energy storage" of the diesel locomotive.

*Further development has been given to:*

- simulation model of a diesel engine, which, in contrast to the known ones, based on the indicator diagram of its operation, takes into account the relationship between the force developed by the diesel engine and the engine load factor, allowing to increase the accuracy of calculating the amount of fuel consumed installation without significant complication of the model;
- simulation model of a linear electromechanical converter of electromagnetic type, which is an integral part of a free-piston internal combustion engine and allows to conduct research and determine the main features of such a diesel generator set as an onboard energy source on a locomotive.

The practical results of the thesis are its applied focus on improving the energy efficiency and environmental friendliness of traction rolling stock of railways when performing shunting and export work. The use of the dissertation results allows to increase energy efficiency and environmental friendliness of hybrid traction systems when performing work on moving goods, reduce capital costs when upgrading existing rolling stock due to the possibility of optimal choice of power ratio of main and additional onboard energy sources, reduce fuel costs. of energy-optimal modes of train driving along the section according to the set tachogram and to increase the efficiency of the system "heat engine - traction electric drive" of the locomotive due to the use of new designs of onboard diesel generator sets.

17 scientific papers were published on the topic of the thesis, including 4 scientific articles in professional journals approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine, of which 1 is included in the international scientometric database, 1 scientific article in a foreign publication of an EU member state, 1 additional work, 11 approbation papers.

The introduction substantiates the relevance of the topic of thesis research, its purpose, objectives, connection with scientific programs, plans and topics of the university. The scientific novelty, practical significance of the dissertation are presented and its general characteristic is given.

*The first section* reviews the possible configurations of the system "heat engine -

energy storage - traction electric drive" of a shunting locomotive, the selection of the optimal composition of the traction electric transmission with rotary and free-piston internal combustion engine.

Currently, the experience of the world locomotive industry shows the feasibility of using a traction electric transmission of AC of diesel locomotives, but more energy efficient is the use of a hybrid system with energy storage, which is becoming more common among major manufacturers of traction units.

The main components of the traction electric transmission have quite different characteristics, and therefore it is advisable to select the optimal composition of the system "heat engine - energy storage - traction electric drive" of the diesel locomotive. The evaluation of the components of the system is based on a method based on the use of the Harrington desirability function. This approach allows for a comprehensive assessment based on both qualitative performance of system elements and quantitative.

The analysis performed in the section showed that the greatest indicator of the generalized desirability function is the configuration of the traction hybrid transmission, which includes a free-piston internal combustion engine with a linear generator of electromagnetic type, traction asynchronous electric drive and lithium-iron-phosphate battery.

At the same time, due to the lack of operational samples of free-piston internal combustion engines, the system with a rotary diesel can not be recognized as undesirable, and therefore adopted the second version of the traction electric transmission, which includes a rotary internal combustion engine with a synchronous generator with permanent magnets, traction asynchronous electric drive and lithium-iron-phosphate battery.

*The second* section is devoted to modeling the components of traction hybrid electric transmission of a shunting diesel locomotive, namely diesel generator set, traction asynchronous electric drive with vector control system, lithium-iron-phosphate battery and storage level control system.

The simulation model of a diesel engine is based on a diagram of its operation, which is the dependence of the value of the force developed by one cylinder during operation and auxiliary cycles on the movement of the piston in the cylinder. Taking into

account the nonlinearity of the realized force change from the load factor converts the graph of the diesel engine power into a three-dimensional surface, the application of which gives more accurate results when calculating fuel consumption for the operation of the locomotive. The model of the speed controller is a PI speed controller with a large value of the time constant. The simulation of a synchronous generator, which is a component of a diesel generator set, was performed using a block from the Simulink library.

The model of a traction asynchronous drive with a vector control system includes a model of a traction asynchronous motor and a frequency converter that implements the vector control law. The simulation of the induction motor is performed based on the parameters of the traction electric motor brand AD-902. Rectifier and inverter models are standard units of the Matlab environment. The current and speed control circuits of the vector control system are set to modular and symmetric optimums.

The energy storage model is based on the charge-discharge characteristics of the LT-LYP 770 battery, which are its passport data can be described by the Shepherd equation. The energy storage charge level control system is a two-key buck-boost DC / DC converter, the keys of which receive control signals from the charge level control system. For use on traction rolling stock, the most acceptable is the charge algorithm according to the composite characteristic of direct current, which allows to obtain the required values of braking torque and take the braking energy into the drive.

The research performed in *the third section* is devoted to the development of a model of train movement on a section of track with real parameters and modeling of the process of train driving by a locomotive with the hybrid transmission in such a section.

The process of movement of the section on the train is influenced by external forces (traction force, force of resistance, braking force), which are complex functions of several variables. Taking into account the peculiarities of the behavior of traction and braking forces in the development of a mathematical model allowed not only to study the processes occurring in the system of hybrid transmission in stationary modes but also to consider non-stationary, namely the occurrence of boxing or yuzu. When building a mathematical model, a single-mass calculation scheme of the traction electric drive was

adopted, which made it possible to avoid a significant complication of the model while maintaining the accuracy of calculations within the limits that meet the needs of further research.

The combination of the mathematical model of train movement along the Kharkiv – Borky section developed in the section with the model of traction electric transmission components of the locomotive made it possible to model the processes occurring in the onboard locomotive systems in the Matlab environment. During the simulation, a trapezoidal speed problem with an average value of 40 km/h was performed. The simulation results confirmed the need to optimize train modes in order to reduce energy costs.

*The fourth section* is devoted to the optimization calculation in order to find the optimal tachogram of the train section and the configuration of the main and additional energy sources on the locomotive.

The discrete nature of the source data task for the optimization search requires the use of dynamic programming methods to solve the transport problem. The use of the method of direct passage of a section of the road with a high degree of sampling requires large computing power and is a rather long process. In view of this, an optimization search was performed by the simplified method of direct passage, ie with the division of the tachogram into three characteristic zones - acceleration, quasi-constant value of speed, braking. The target optimization function is the energy consumption for the process of moving the train section, which consists of energy costs to create acceleration, overcoming the forces of resistance and covering losses in the main components of the hybrid locomotive system.

The use of a simplified direct passage with three sections gives a rather vague notion of the necessary nature of the change in speed in the middle zone. This led to the need to conduct an optimization search using the principle of Bellman optimality. As a result of optimization, the tachogram of driving of the train with the most energy-saving mode is received.

Changing the nature of the optimal curve of motion depending on the ratio of the main and additional energy sources on the locomotive requires a series of calculations

for all values of this ratio. As a result of the calculations, a three-dimensional surface is obtained, which allows to make a choice of the configuration of energy sources depending on the required value of the average speed.

Using the train motion model developed earlier, the locomotive was modeled according to the optimal tachogram and the results obtained were compared with the data obtained when modeling the motion according to the suboptimal tachogram. The feasibility of optimization is confirmed by reducing fuel consumption for train operation.

The research performed in *the fifth section* is devoted to the development of a simulation model of a free-piston internal combustion engine with a linear generator of electromagnetic type and the study of the operation of such a system as an onboard energy source of a hybrid shunting locomotive..

The section selects the configuration of the free-piston engine system and its linear generator and develops a simulation model of their operation. The model of the diesel engine, as in the previous case, is based on a diagram of the change in forces from the movement of the piston. The mathematical model of the linear electromechanical converter is made on the basis of the approach based on the generalized model of the electromechanical converter. In order to verify the adequacy of the model approach, a physical model of an equivalent system was developed and an experiment was performed, which confirmed the convergence of the results of physical and simulation modeling, which allowed to assert the adequacy of the models.

The use of a new design of the onboard energy source requires a new optimization search for energy efficient driving mode, which was carried out according to the method used in the fourth section. Simulation of the train with a hybrid locomotive, equipped with an advanced on-board energy generation system, according to the optimal tachogram showed the feasibility of using a new design due to the reduction of fuel consumption compared to the traditional system.

**Keywords:** diesel generator set, traction asynchronous drive, energy storage, single-mass calculation scheme, dynamic programming, Bellman optimality principle, free-piston internal combustion engine, linear generator of electromagnetic type.

## Список публікацій здобувача

### **Основні наукові праці:**

#### *Наукові праці у фахових виданнях України:*

1. Буряковський, С.Г., Маслій, А.С., Помазан Д.П., Деніс, І.В. Обґрунтування необхідності модернізації тепловозу ЧМЕЗ із використанням гібридної силової установки. *Електрифікація транспорту. Науковий журнал*. 2016. Вип.№ 12. С. 82 – 86.

2. Buriakovskiy S., Maslii A., Panchenko V., Pomazan D., Denys I. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model. *Electrical engineering & electromechanics*. 2018. No. 2, P. 59 – 62.

3. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Kovalchuk O. Analysis of ways of increasing the energy efficiency of traction electric transmission of shunting diesel locomotive. *COMPUTATIONAL PROBLEMS OF ELECTRICAL ENGINEERING*. 2019. Vol. 9. No. 1, P. 1 – 4.

4. Buriakovskiy S., Babaiev M., Liubarskyi B., Maslii Ar., Pomazan D., Karpenko N., Maslii An., Denys I. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1. No. 1, P. 68 –75.

#### *Публікації у виданнях інших держав:*

5. Buriakovskiy S., Liubarskyi B., Maslii A., Pomazan D., Tavrina T. Research of a hybrid diesel locomotive power plant based on a free-piston engine. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2020. Vol. 22. No. 3, P. 103 – 109.

#### *Праці апробаційного характеру:*

6. Буряковський С.Г., Помазан Д.П. Застосування моделювання для створення енергоефективного тепловозу. *Інформатика, управління та штучний інтелект: матеріали четвертої міжнародної науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів, м. Харків (21 – 22 листопада 2017 р).* – Харків: НТУ «ХП», 2017. С. 25.

7. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П. Дослідження роботи

гібридного тепловоза на імітаційній моделі. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: тези доповідей 80 міжнародної науково-технічної конференції*, м. Харків (24 – 26 квітня 2018 р). – Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 73.

8. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П., Деніс І.В. Дослідження режимів роботи тепловоза ЧМЕЗ за допомогою імітаційної моделі. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018*, м. Харків (16 – 18 травня 2018 р). – Харків: НТУ «ХП», 2018. С. 182.

9. Buriakovskiy S., Liubarskiy B., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V. and Maslii A. Mathematical Modelling of Prospective Transport Systems Electromechanical Energy Transducers on Basis of the Generalized Model. *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2019 – Proceedings*. IEEE, 05 – 07 June 2019. P. 76–79. DOI: 10.1109/ACITT.2019.8779998.

10. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П., Карпенко Н.П., Маслій Н.В. Розрахунок тягового синхронного генератора з постійними магнітами маневрового тепловоза у програмному комплексі FEMM. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019*, м. Харків (15 – 17 травня 2019 р). – Харків: НТУ «ХП», 2019. С. 224.

11. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D. Searching of The Optimum Configuration of The Traction Electric Transmission of The Shunting Locomotive. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019 – Proceedings*. IEEE, 23 – 25 September 2019. P. 22–25. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896525.

12. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П., Сафронов О.Е., Туренко О.Г. Підвищення енергоефективності маневрового тепловозу шляхом застосування накопичувачів енергії. *Практические аспекты совместимости электромагнитной и молниезащиты: тези доповідей V всеукраїнської науково-технічної конференції ПАСЕБ-2019*, м. Харків (16 – 18 жовтня 2019 р). – Харків: НТУ «ХП», 2019. С. 24–25.

13. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П., Карпенко Н.П., Маслій



Н.В. Застосування методу кінцевих елементів для розрахунку магнітних полів електромеханічних перетворювачів. *Практические аспекты совместимости электромагнитной и молниезащиты*: тези доповідей V всеукраїнської науково-технічної конференції ПАСЕБ-2019, м. Харків (16 – 18 жовтня 2019 р). – Харків: НТУ «ХП», 2019. С. 27.

14. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V., Overianova L., Omelianenko H. Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2020 – Proceedings*. IEEE, 12 – 14 May 2020. P. 158–163. DOI: 10.1109/ESS50319.2020.9160105.

15. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Maslii A. Mathematical Modeling of Non-stationary Processes during Train Movement. *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2020 – Proceedings*. IEEE, 16 – 18 September 2020. P. 213–216. DOI: 10.1109/ACIT49673.2020.9208919.

16. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Maslii A., Panchuk O., Rybin A. Study of Methods for Charging of Energy Storage Devices of Railway Traction Units. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice, PAEP 2020 – Proceedings*. IEEE, 21 – 25 September 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240794.

***Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

17. Пат. на корисну модель 122882, Україна, МПК F02B 7/04 (2006.01), F02B 7/00 (2006.01), H02J 3/00 (2006.01) Система генерування електричної енергії. Б.Г. Любарський, С.Г. Буряковський, А.С. Маслій, Д.П. Помазан. Заявка u201908198 від 14.07.2019; опубл. 10.02.2020, бюл. № 3.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	20
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР КОНФІГУРАЦІЇ СИСТЕМИ «ТЕПЛОВИЙ ДВИГУН – ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД» ТЕПЛОВОЗА	27
1.1 Теоретичні аспекти використання методу бажаності Харінгтона	30
1.2 Визначення оптимальної конфігурації тягового електроприводу	33
1.3 Визначення бажаної конфігурації силової дизель-генераторної установки тепловоза	36
1.4 Визначення конфігурації тягового електричного генератора тепловоза	39
1.5 Вибір типу накопичувача енергії для гібридної тягової електричної передачі тепловоза	43
1.6 Вибір оптимальної конфігурації системи «тепловий двигун – тяговий електричний привід» маневрового тепловозу	44
1.7 Висновки за розділом	46
РОЗДІЛ 2 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН ГІБРИДНОЇ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОВОЗА	47
2.1 Математичне моделювання силової дизель-генераторної установки тепловоза	48
2.2 Математичне моделювання асинхронного приводу з векторною системою керування	53
2.3 Математичне моделювання електрохімічного накопичувача енергії	66
2.4 Висновки до розділу	77
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ «ТЕПЛОВИЙ ДВИГУН – НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ – ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД» НА МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ РОБОТИ ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОЗА	79
3.1 Загальні відомості про рух поїзда ділянкою	79
3.2 Математичний опис процесу утворення сили тяги рухомого складу	81
3.3 Математичний опис процесу утворення гальмівної сили поїзда	89
3.4 Математичне моделювання руху поїзда	92
3.5 Моделювання ведення поїзда гібридним тепловозом ділянкою шляху	96

3.6 Висновки до розділу	99
РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІБРИДНОГО ЛОКОМОТИВА	100
4.1 Постановка задачі оптимізації у загальному вигляді	100
4.2 Virішення задачі оптимізації методом динамічного програмування	104
4.3 Virішення задачі оптимізації методом, що базується на використанні принципу оптимальності Белмана	123
4.4 Моделювання роботи тепловоза за оптимальним режимом	134
4.5 Висновки до розділу	136
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІЛЬНОПОРШНЕВОГО ДВЗ В ЯКОСТІ БОРТОВОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ НА МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗАХ	138
5.1 Загальні дані про вільнопоршневі двигун внутрішнього згорання	138
5.2 Вибір конструкції двигуна внутрішнього згорання і генератора	140
5.3 Розробка імітаційної моделі роботи двигуна	143
5.4 Створення фізичної моделі вільнопоршневого двигуна із лінійним генератором електромагнітного типу	152
5.5 Моделювання роботи гібридного тепловоза із вільнопоршневим двигуном внутрішнього згорання з лінійним електромеханічним перетворювачем	159
5.6 Висновки за розділом	162
ВИСНОВКИ	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	166
ДОДАТОК А Скрипт розрахунку параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна за його паспортними даними	179
ДОДАТОК Б Скрипт виконання оптимізаційного обчислення спрощеним методом прямого проходу	183
ДОДАТОК В Скрипт виконання оптимізаційного обчислення за принципом оптимальності Белмана	196
ДОДАТОК Г Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	204
ДОДАТОК Д Акти впровадження	208

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DC	– постійний струм;
SOC	– рівень заряду;
АБ	– акумуляторна батарея;
АД	– асинхронний двигун;
ДВЗ	– двигун внутрішнього згорання;
ДГУ	– дизель-генераторна установка;
ДПС	– двигун постійного струму;
ЕМП	– електро-механічний перетворювач;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
ЛГ	– лінійний генератор;
НЕ	– накопичувач енергії;
ТЕП	– тяговий електропривод;
ШІМ	– широтно-імпульсна модуляція;

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** В умовах постійного подорожчання паливо-мастильних матеріалів досить важливим є питання підвищення енергоефективності залізничних компаній за для збереження їх конкурентних переваг як на вітчизняному ринку, так і на міжнародній арені.

Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, що затверджена постановою Кабінету Міністрів України №321-р від 07 квітня 2021 року, виділяє енергоефективність транспорту як один з найважливіших напрямків розвитку залізниць України. Підвищення енергоефективності планується досягти двома шляхами: зниженням витрат за рахунок раціонального використання ресурсів, а також завдяки розвитку електричного транспорту.

З огляду на відсутність електрифікації на 37% ділянок залізниці, а також через економічну недоцільність використання потужних вантажних локомотивів у вивізній роботі запровадження гібридної тепловозної тяги дає змогу вирішити як питання енергоефективності доставки вантажів споживачам.

Застарілий парк маневрових тепловозів із майже 98% морально та фізично зношеними тяговими одиницями вимагає пошуку рішень, які дали б змогу підвищити енергоефективність локомотивів з найменшими капітальними вкладеннями. Одним із шляхів вирішення цього питання є модернізація існуючого парку з впровадженням нових підходів світового локомотивобудування.

В наш час досить велика кількість робіт присвячена пошуку шляхів підвищення енергоефективності тепловозної тяги. Зокрема роботи Фалендиша А.П. [43, 85], Володарця М.В. [43], Деніса І.В. [42], Сергієнко М.І. [114], Аклі С.Р. [47] присвячені вирішенню проблеми енергоефективності маневрової тепловозної тяги за рахунок впровадження гібридних локомотивів.

Отже, актуальною є тема дисертаційної роботи, в якій вирішується **наукове завдання** з розробки комплексу методів та заходів із підвищення енергоефективності системи «тепловий двигун – тяговий електропривод» тепловоза для виконання маневрової та вивізної роботи на залізницях не тільки України, а й світу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Частини досліджень, результати яких викладено в дисертації, виконано в межах науково-дослідної роботи Українського державного університету залізничного транспорту «Дослідження роботи гібридного маневрового тепловоза», № ДР 0119U101900.

**Мета і задачі дослідження** відповідно до предмета та об'єкта дослідження.

*Об'єкт дослідження:* процеси, що протікають в системі «тепловий двигун – тяговий електропривод – накопичувач енергії».

*Предмет дослідження:* гібридний маневровий тепловоз з різними конфігураціями системи «тепловий двигун – тяговий електропривод – накопичувач енергії».

*Метою дисертаційного дослідження є* розробка методів та заходів з підвищення енергоефективності тепловозів з тяговою електричною передачею.

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи необхідно вирішити такі *завдання*:

- 1) аналіз існуючих типів тягових електричних передач та шляхів підвищення їх енергоефективності;
- 2) розробка імітаційних моделей роботи складових частин тягової електричної передачі гібридного тепловозу побудованого на базі ЧМЕЗ;
- 3) розробка імітаційної моделі руху тепловоза з навантаженням, що враховує реальний профіль ділянки шляху;
- 4) вибір оптимального режиму ведення поїзда, вибір основного джерела енергії на тепловозі, а також його співвідношення з допоміжним;

5) розробка математичної моделі вільно-поршневого двигуна внутрішнього згорання з лінійним генератором як бортового джерела енергії на тяговому рухомому складі.

**Методи дослідження.** Під час виконання завдань дослідження були використані методи: метод порівняльного аналізу технічних засобів на основі функції бажаності Харінгтона для визначення конфігурації системи «тепловий двигун – тяговий електропривод» тепловоза, метод узагальненої теорії електромеханічних перетворювачів енергії при побудові імітаційних моделей тягових асинхронних двигунів, методи апроксимації кубічними сплайнами при розробці імітаційних моделей, що базуються на діаграмах роботи системи, метод кінцевих елементів – при розробці імітаційної моделі лінійного електромеханічного перетворювача електромагнітного типу, методи динамічного програмування, а саме метод прямого проходу та метод на основі принципу оптимальності Белмана, під час вирішення оптимізаційної задачі пошуку кривої руху поїзда, методи синтезу регуляторів при налаштуванні контурів струму для заряду та розряду накопичувача енергії, контуру струму та контуру швидкості для векторної системи керування асинхронним двигуном, методи спрощення структурних схем при математичному моделюванні складових елементів системи «тепловий двигун – тяговий електропривод – накопичувач енергії».

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

*Вперше* проведено:

- вибір конфігурації системи «тепловий двигун – тяговий електропривод» тепловоза із використання функції бажаності Харінгтона, яка дозволяє виконати оцінку складових системи базуючись як на якісних показниках їх роботи, так і на кількісних;
- оптимізаційний пошук кривої руху поїзда з використанням гібридного маневрового тепловозу ділянкою шляху із застосуванням методу динамічного програмування на базі принципу оптимальності Белмана, що дає змогу визначити

енергооптимальні режими ведення поїзда і надати рекомендації щодо вибору співвідношень між потужностями основного та додаткового джерел живлення.

*Удосконалено:*

– математичну модель руху поїзда ділянкою із врахуванням впливу виникнення нестационарних режимів таких, як боксування та юз, що дозволяє дослідити процеси, які протікають при цьому в системі «тепловий двигун – тяговий електропривод – накопичувач енергії» тепловоза.

*Набули подальшого розвитку:*

– імітаційна модель дизельного двигуна, яка, на відміну від відомих, що базуються на індикаторній діаграмі його роботи, враховує залежність між силою, яка розвивається дизельним двигуном, та коефіцієнтом завантаження двигуна, даючи при цьому змогу підвищити точність розрахунку кількості спожитого пального при роботі дизель-генераторної установки без значного ускладнення моделі;

– імітаційна модель лінійного електромеханічного перетворювача електромагнітного типу, що є складовою частиною вільнопоршневого двигуна внутрішнього згорання та дозволяє провести дослідження і визначити основні особливості роботи такої дизель-генераторної установки в якості бортового джерела енергії на тепловозі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати дисертаційного дослідження мають прикладний характер та спрямовані на підвищення показників енергоефективності та екологічності тягового рухомого складу залізниць при виконанні ним маневрової та вивізної роботи. Фактичне застосування результатів дисертації відбувається під час виконання проектних робіт у ПрАТ «ЕЛАКС», науково-дослідних робіт у НДПКІ «Молнія» НТУ «ХП» та в освітньому процесі Українського державного університету залізничного транспорту.

Практична цінність результатів дисертації полягає в:

– підвищенні енергоефективності систем гібридної тяги при виконанні ними роботи із переміщення вантажів;



– зниженні капітальних витрат при проведенні модернізації існуючого рухомого складу за рахунок можливості оптимального вибору співвідношення потужностей основного та додаткового бортових джерел енергії;

– зниженні витрат паливно-мастильних матеріалів шляхом запровадження енергооптимальних режимів ведення поїзда ділянкою по заданій кривій швидкості;

– підвищенні ККД системи «тепловий двигун – тяговий електропривод» тепловоза за рахунок застосування нових конструкцій бортових дизель-генераторних установок.

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення і результати, які виносяться на захист, отримані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать: розроблена імітаційна модель роботи гібридного маневрового тепловоза [1, 2, 6, 7]; запропоновані методи підвищення енергоефективності тягової електричної передачі маневрового тепловоза за рахунок використання вільнопоршневого двигуна внутрішнього згорання [3]; структурна схема тягової електричної передачі гібридного маневрового тепловоза [4, 12]; імітаційна модель вільнопоршневого двигуна внутрішнього згорання з лінійним генератором електромагнітного типу [5]; функціональна схема моделі роботи тепловоза ЧМЕЗ [8]; імітаційна модель лінійного електромеханічного перетворювача електромагнітного типу [9]; програмно реалізований спосіб автоматизації процесу проведення розрахунку з використанням мови програмування Lua [10, 13]; метод вибору оптимальної конфігурації технічних засобів із використанням функції бажаності Харінгтона [11, 14]; математична модель процесу руху поїзда ділянкою шляху із параметрами реального профілю [15]; імітаційна модель системи регулювання рівня заряду накопичувача енергії із використанням двоключового DC-DC перетворювача [16]; конструкційне виконання вільнопоршневих модуль-генераторів на базі лінійних електромеханічних перетворювачів електромагнітного типу [17].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати дисертаційної

роботи доповідались і обговорювались на таких наукових конференціях: IV міжнародна науково-технічна конференція студентів, магістрів та аспірантів «Інформатика, управління та штучний інтелект» (м. Харків, Україна, 2017 р.); 80-та міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, Україна, 2018 р.); XXVI міжнародна науково-практична конференція «MicroCAD-2018» (м. Харків, Україна, 2018 р.);

9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (м. Чеське Будейовіце, Чехія, 2019 р.); XXVII міжнародна науково-практична конференція «MicroCAD-2019» (м. Харків, Україна, 2019 р.); International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (м. Кременчук, Україна, 2019 р.); V всеукраїнська науково-технічна конференція «ПАСЕБ-2019» (м. Харків, Україна, 2019 р.); 7th International Conference on Energy Smart Systems (м. Київ, Україна, 2020 р.); 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (м. Деггендорф, Німеччина, 2020 р.); Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (м. Кременчук, Україна, 2020 р.).

Повністю дисертація доповідалася, обговорювалася і була схвалена на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, а також на фаховому семінарі кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту за участю рецензентів.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 4 наукових статі у фахових виданнях, затверджених МОН України, з яких 2 включено до міжнародних наукометричної баз; 1 наукова стаття в іноземному виданні країни – члена ЄС; одна додаткова праця (патент на корисну модель); 11 праць апробаційного характеру (матеріали доповідей на наукових конференціях).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота оформлена на 210 сторінках, з яких 158 сторінок основного тексту, 90 рисунків, 12 таблиць, список джерел зі 123 назв на 13 сторінках і 5 додатків на 32 сторінках.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буряковський, С.Г., Маслій, А.С., Помазан Д.П., Деніс, І.В. Обґрунтування необхідності модернізації тепловозу ЧМЕЗ із використанням гібридної силової установки. *Електрифікація транспорту. Науковий журнал*. 2016. Вип.№ 12. С. 82 – 86.
2. Buriakovskiy S., Maslii A., Panchenko V., Pomazan D., Denys I. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model. *Electrical engineering & electromechanics*. 2018. No. 2, P. 59 – 62. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.2.10.
3. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Kovalchuk O. Analysis of ways of increasing the energy efficiency of traction electric transmission of shunting diesel locomotive. *COMPUTATIONAL PROBLEMS OF ELECTRICAL ENGINEERING*. 2019. Vol. 9. No. 1, P. 1 – 4.
4. Буряковський, С.Г., Маслій, А.С., Помазан Д.П., Сафронов, О.Е., Туренко О.Г. Підвищення енергоефективності маневрового тепловоза шляхом застосування накопичувачів енергії. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2019. Вип.№ 27(1352). С. 3 – 11.
5. Buriakovskiy S., Liubarskyi B., Maslii A., Pomazan D., Tavrina T. Research of a hybrid diesel locomotive power plant based on a free-piston engine. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2020. Vol. 22. No. 3, P. 103 – 109. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2020.3.103-109>.
6. Буряковський С.Г., Помазан Д.П. Застосування моделювання для створення енергоефективного тепловозу. *Інформатика, управління та штучний інтелект: матеріали четвертої міжнародної науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів, м. Харків (21 – 22 листопада 2017 р).* – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. С. 25.
7. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П. Дослідження роботи гібридного тепловоза на імітаційній моделі. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: тези доповідей 80 міжнародної науково-технічної*

конференції, м. Харків (24 – 26 квітня 2018 р). – Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 73.

8. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П., Деніс І.В. Дослідження режимів роботи тепловоза ЧМЕЗ за допомогою імітаційної моделі. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018, м. Харків (16 – 18 травня 2018 р). – Харків: НТУ «ХП», 2018. С. 182.

9. Buriakovskiy S., Liubarskiy B., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V. and Maslii A. Mathematical Modelling of Prospective Transport Systems Electromechanical Energy Transducers on Basis of the Generalized Model. *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2019 – Proceedings*. IEEE, 05 – 07 June 2019. P. 76–79. DOI: 10.1109/ACITT.2019.8779998.

10. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П., Карпенко Н.П., Маслій Н.В. Розрахунок тягового синхронного генератора з постійними магнітами маневрового тепловоза у програмному комплексі FEMM. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019, м. Харків (15 – 17 травня 2019 р). – Харків: НТУ «ХП», 2019. С. 224.

11. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D. Searching of the Optimum Configuration of the Traction Electric Transmission of the Shunting Locomotive. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019 – Proceedings*. IEEE, 23 – 25 September 2019. P. 22–25. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896525.

12. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П., Сафронов О.Е., Туренко О.Г. Підвищення енергоефективності маневрового тепловозу шляхом застосування накопичувачів енергії. *Практические аспекты совместимости электромагнитной и молниезащиты*: тези доповідей V всеукраїнської науково-технічної конференції ПАСЕБ-2019, м. Харків (16 – 18 жовтня 2019 р). – Харків: НТУ «ХП», 2019. С. 24–25.

13. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П., Карпенко Н.П.,

Маслій Н.В. Застосування методу кінцевих елементів для розрахунку магнітних полів електромеханічних перетворювачів. *Практические аспекты совместимости электромагнитной и молниезащиты: тезисы доповідей V всеукраїнської науково-технічної конференції ПАСЕБ-2019*, м. Харків (16 – 18 жовтня 2019 р). – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. С. 27.

14. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V., Overianova L., Omelianenko H. Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2020 – Proceedings*. IEEE, 12 – 14 May 2020. P. 158–163. DOI: 10.1109/ESS50319.2020.9160105.

15. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Maslii A. Mathematical Modeling of Non-stationary Processes during Train Movement. *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2020 – Proceedings*. IEEE, 16 – 18 September 2020. P. 213–216. DOI: 10.1109/ACIT49673.2020.9208919.

16. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Maslii A., Panchuk O., Rybin A. Study of Methods for Charging of Energy Storage Devices of Railway Traction Units. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice, PAEP 2020 – Proceedings*. IEEE, 21 – 25 September 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240794.

17. Пат. на корисну модель 122882, Україна, МПК F02B 7/04 (2006.01), F02B 7/00 (2006.01), H02J 3/00 (2006.01) Система генерування електричної енергії. Б.Г. Любарський, С.Г. Буряковський, А.С. Маслій, Д.П. Помазан. Заявка u201908198 від 14.07.2019; опубл. 10.02.2020, бюл. № 3.

18. Hill R. J. Electric railway traction. Part 1: Electric traction and DC traction motor drives. *Power Engineering Journal*. 1994 Vol. 8(1), P. 47–56. DOI:10.1049/pe:19940105

19. Nicholson T. J. DC & AC traction motors. *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*. 2008. DOI:10.1049/ic:20080505

20. ДСТУ EN 60034-1:2016. Машины електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики (EN 60034-1:2010; EN 60034-1:2010/AC:2010, IDT). [Чинний від 2016-11-30]. Вид. офіц. Київ : Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2018. 61 с.

21. Pacha M., & Stepanek J. Energy savings and performance optimizations of shunting hybrid locomotives. *2012 ELEKTRO*. 2012. P. 225–231. DOI:10.1109/elektro.2012.6225643

22. Захарчук В.І. Основи теорії та конструкції автомобільних двигунів : Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Луцьк : ЛНТУ, 2011 – 233 с.

23. Міщенко М. І., Заренбін В. Г., Колеснікова Т. М. та ін. Визначення механічних втрат у поршневому двигуні внутрішнього згорання. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2013. № 1. С. 51–55.

24. Wontka L. Methods for determining mechanical losses of marine diesel engines. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*. 2018. Vol. 214(3). P. 25–38. DOI:10.2478/sjpn-2018-0017

25. Free Piston Engine Seen. *Science News*. 1966. Vol. 90(19). P. 375. DOI:10.2307/3950417

26. Волков К.С., Волков С.Л., Казакова Н.Ф. Удосконалення розрахунків показників якості за функцією бажаності Харрінгтона. *Сучасний захист інформації*. 2017. № 1. С. 103–108.

27. Шутяк Ю.В. Використання функції бажаності для оцінки економічної безпеки підприємства. *Наукові студії*. 2010. №7. С. 147–154.

28. Harrington Edwin C., Jr. The Desirability Function. *Industrial Quality Control*. 1965. №21(10). P. 494 – 498.

29. Castillo, E.D. Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization. *Journal of Quality Technology*. 1996. Vol.28, No.3. P. 337–345.

30. Пуряев А. С. Теория и методология оценки эффективности инвестиционных проектов в машиностроении : монография. Набережные Челны : Камская госуд. инж.-экон. акад. 2007. 180 с.

31. Грищенко А.В. Новые электрические машины локомотивов : Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта Москва : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2008 271 с.

32. Безрученко В. М., Марченко В. К., Чумак В. В. Тягові електричні машини електрорухомого складу : Навч. посіб. Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна. 2003. 252 с.

33. Florentsev S. N., Polyukhovich V. S. Traction electric equipment set for industrial shunting locomotives. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*. 2018. DOI:10.1109/aced.2018.8341697

34. Рымша В. В. Моделирование и синтез реактивных и индукторных электромеханических преобразователей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.01 / Одесский национальный политехнический университет. Одесса, 2004. 336 с.

35. Hillmansen, S. (2009). Sustainable traction drives. IET Seminar Digests. doi:10.1049/ic.2009.0023

36. Двигатели внутреннего сгорания (тепловозные дизели и газотурбинные установки) : Учебник / А. Э. Симсон и др. Москва : Транспорт, 1980. 384 с.

37. Yamanaka Y., Nirei M., Sato M., Murata H., Yinggang B., Mizuno T. Design of linear synchronous generator suitable for free-piston engine linear generator system. *2017 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*. 2017. DOI:10.23919/ldia.2017.8097243

38. Moriya K., Goto S., Akita T., Kosaka H., Hotta Y., Nakakita K. Development of Free Piston Engine Linear Generator System Part3 -Novel Control Method of Linear Generator for to Improve Efficiency and Stability. *SAE Technical Paper Series*. 2016. DOI:10.4271/2016-01-0685

39. Railway applications. Rolling stock. Power supply with onboard energy storage system. (n.d.). DOI:10.3403/30288089u

40. Устройство и ремонт тепловозов : Учебник для нач. проф. образования / Л. А. Собенин и др. Москва: Издательский центр «Академия», 2004. 416 с.

41. Яровий Р.О. Підвищення експлуатаційних характеристик маневрових тепловозів шляхом використання комбінованих накопичувачів енергії : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. Сєверодонецьк, 2019. 175 с.

42. Деніс І.В. Покращення динамічних показників роботи гібридного тепловозу з вентиляно-індукторним приводом : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Державний університет інфраструктури та технологій. Київ, 2019. 187 с.

43. Фалендиш А.П., Володарець М.В. Аналіз витрат палива тепловозами серії ЧМЕЗ та ЧМЕЗ-П під час виконання вивізної роботи. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2011. Вип. 28. С. 196–202.

44. Грудин Н.А. Электронный регулятор дизеля тепловоза ЧМЭЗ : Учебное пособие. Москва : Маршрут. 2005. 79 с.

45. Залізецький А.М., Пізнюр О.В. Дослідження частотного електропривода в статичних режимах роботи. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2012. №3. С. 69–74.

46. Morawiec M. Sensorless Control of Induction Motor Supplied by Current Source Inverter. *Induction Motors - Modelling and Control*. 2012. DOI:10.5772/51133

47. C. R. Akli, X. Roboam, B. Sareni and A. Jeunesse. Energy management and sizing of a hybrid locomotive. *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. 2007. P. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2007.4417333.

48. Asynchronous Machine. URL: <https://ch.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html> (дата звернення: 20.06.2019).

49. Induction Motor. URL: <https://ch.mathworks.com/help/autoblks/ref/inductionmotor.html> (дата звернення: 20.06.2019).



50. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. *Электричество*. 1998. №4. С. 38–42.

51. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навчальний посібник. Київ : НТУУ«КПІ». 2016. 150 с.

52. Tze-Fun C., Keli Sh. Modeling and Simulation of Induction Motor. *Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives*. 2011. P. 31–74.

53. Терехов В.М. Системы управления электроприводов : Учебник для студ. высш. учеб. заведений. Москва : Издательский центр «Академия», 2005. 304 с.

54. Воронов А.А. Основы теории автоматического регулирования : учеб. пособие. – Москва : Энергия. 1980. 357с.

55. Фираго Б.И. Теория электропривода : Учеб. Пособие. Минск : Техноперспектива. 2007. 585 с.

56. Omar N., Monem M. A., Firouz Y., Salminen J., Smekens J., Hegazy O., Gaulous H., Mulder G., Van den Bossche, Coosemans T., Van Mierlo J. Lithium iron phosphate based battery — Assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Applied Energy*. 2014. Vol. 113. P. 1575–1585.

57. Saw L.H., Somasundaram K., Ye Y., Tay A.A.O. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 249. P. 231–238.

58. Tremblay O., Dessaint L.A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*. 2009. Vol. 3.

59. Zhu C., Li X., Song L., Xiang L. Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack. *Journal of Power Sources*. 2013. Vol. 223. P. 155–164.

60. Battery. URL: <https://ch.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html> (дата звернення: 15.09.2020).

61. Ramadass P., Haran B., White R. E., Popov B. N. Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells. *Journal of Power Sources*. 2003. Vol. 123, P. 230–240.

62. Li-ion аккумуляторная батарея LT-LYP 770. URL: <https://shop.ecoteco.ru/catalog/p5795/> (дата звернения: 16.09.2020)

63. Fukuda S., Takada N. PWM control of current source converter. *Electrical Engineering in Japan*. 1989. Vol. 109(5). P. 75–84. DOI:10.1002/eej.4391090509

64. PRACTICAL ISSUES WITH PWM CONVERTER MOTOR DRIVES. *Electric Drives*. 2005. P. 438–461. DOI:10.1201/b14985-16

65. Winder S. Boost–Buck Converter. *Power Supplies for LED Driving*. 2017. P. 117–154. DOI:10.1016/b978-0-08-100925-3.00007-0

66. Kadlimatti V. G., Bhat S. Shutdown mode implementation for Boost and Inverting Buck-Boost converter. *2021 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT)*. 2021. DOI:10.1109/vlsi-dat52063.2021.9427344

67. Giyantara A. G., Christover D., Priyanto Y. T. K. Design and Implementation Buck-boost Converter using Arduino Mega 2560. *Proceedings of the 1st International Conference on Industrial Technology*. 2019. DOI:10.5220/0009443301690176

68. Sangtaek Han, Divan D. Dual active bridge buck-boost converter. *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 2009. P. 2905–2911. doi:10.1109/ecce.2009.5316439

69. Himmelstoss F. A., Mossavinasab A., Zach F. C. A special buck-boost converter. *Fourteenth International Telecommunications Energy Conference - INTELEC '92*. (n.d.) DOI:10.1109/intlec.1992.268406

70. Robert S. Balog, Ali Davoudi. Batteries, Battery Management, and Battery Charging Technology. *Transportation Technologies for Sustainability*. New York, 2013. C. 122–157.

71. Hang C.C., Astrom K.J. and Ho W.K. Refinement of Zigler–Nichols Tuning Formula. *IEE Proc. Pt. D*. 1991. Vol. 138. P. 111–118.

72. Dalarsson, N. The buck-boost DC/DC converter. *INTELEC - Twentieth International Telecommunications Energy Conference (Cat. No.98CH36263)*. (n.d.). DOI:10.1109/intlec.1998.793605

73. Dalarsson, N. Exact Analytic Treatment Of The Buck-boost DC/DC Converter. *The Second International Telecommunications Energy Special Conference*. (n.d.). P. 163–170. doi:10.1109/telesc.1997.655711

74. Притула М.Г., Шпакович Р.Р. Моделювання та розрахунків оптимальних параметрів руху поїздів. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2007. №5. С. 139–145.

75. Шпакович Р. Р., Пасічник О. А., Притула М. Г. Задачі керування рухом з регульованим тертям. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2005. № 543. С. 189–195.

76. Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П. Тяга поездов и тяговые расчеты. Москва : Транспорт, 1971. 280 с.

77. Осипов С.И. Основы электрической и тепловозной тяги. : учеб. пособие. Москва : Транспорт, 1985. 272с.

78. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Москва : Транспорт, 1985. 287 с.

79. Болжеларський Я.В., Довганюк С.С. Гальмування маневрового состава при низьких значеннях коефіцієнта зчеплення коліс з рейками. *Залізничний транспорт України*. 2010. №5. С. 39–43.

80. Ноженко В.С. Поліпшення триботехнічних характеристик двоточкового контакту «колесо-рейка» активацією поверхонь : дис канд. техн. наук : 05.22.07 / Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. Сєверодонецьк, 2016. 152 с.

81. Дворук В. І., Борах К. В., Руденко В .Г., Добранський С. С., Бучко І. О. Дослідження статичного та динамічного коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та рослинними рештками. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2020. №1(83).

82. Аврутов В. В. К задаче определения трения скольжения. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*. 2011. Вип. 42. С. 195–199.
83. Петруковец М. И., Свириденюк А. И. Механика дискретного фрикционного контакта. Минск : Наука и техника, 1990. 271 с.
84. Чиликин М.Г. Основы автоматизированного электропривода. : учеб. пособие. Москва : Энергия, 1974. 567 с.
85. Тартаковський Е.Д., Агулов А.Ф., Фалендиш А.П. Теорія та конструкція локомотивів. Ч.2. Вибір та розрахунок основних вузлів локомотивів : Навч. посібник. Харків : УкрДАЗТ, 2009. 150 с.
86. Боднар Б. Є. Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина : підручник для ВНЗ залізн. трансп. Дніпропетровськ : ПП Ліра ЛТД, 2009. 284 с.
87. Далека В. Х., Пушков П. М., Андрійченко В. П., Мінеєва Ю. В. Основы электрической тяги : навч. Посібник. Харків : ХНАМГ, 2012. 312с.
88. Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н., Озеров М. И. Теория электрической тяги. Москва : Транспорт, 1995. 294 с.
89. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги : монография: в 2 т. Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1. 456 с.
90. Опір руху поїзда. URL: [http://ni.biz.ua/6/6\\_13/6\\_13230\\_soprotivlenie-dvizheniyu-poezda.html](http://ni.biz.ua/6/6_13/6_13230_soprotivlenie-dvizheniyu-poezda.html) (дата звернення: 08.02.2019).
91. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги : учебник для ВУЗов жд транспорта. Москва : Издательство «Маршрут», 2005. 448 с.
92. Френкель С.Я. Техника тяговых расчетов. Гомель : БелГУТ, 2007. 72 с.
93. Гольштейн Е.Г., Юдин Д.В. Задачи линейного программирования транспортного типа. Москва : Наука, 1969. 384 с.
94. Интрилигатор М. Математические модели оптимизации и экономическая теория. Москва : Наука, 2002. 553 с.
95. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Комбинаторное решение транспортной задачи. *Наука и технологии железных дорог*. 2019. №4(8). С. 3–10.

96. Сотникова Т.Г., Гулаков Д.Г. Применение метода динамического программирования для реализации задачи оптимизации режимов работы по уменьшению крупности гранул руды. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2015. №7(224). С. 91–95.

97. Цыпкин Я.З. Оптимальность в задачах и методах современной теории управления. *Вестник АН СССР*. 1982. № 9. С. 116–121.

98. Баранов Л.А., Ерофеев Е.В., Мелёшин И.С., Чинь Л.М. Оптимизация управления движением поездов. Учебное пособие. Москва : МИИТ, 2011. 164 с.

99. Маслій А.С. Структурний та параметричний синтез систем автоматичного керування лінійними електродвигунами моношпального стрілочного переводу : дис канд. техн. наук : 05.13.07 / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2017. 191 с.

100. Илютович А.Е. Выбор вариации спуска в задаче оптимального управления управления со смешанными ограничениями. Декомпозиционный подход. *Автоматика и телемеханика*. 1989. №9 С. 103–114.

101. Howlett P. G., Cheng J. Optimal driving strategies for a train on a track with continuously varying gradient. *The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics*. 1995. №38 (3). С. 388-410 DOI: 10.1017/S0334270000000746

102. Manuel A. Duarte, Patricia X. Sotomayor Minimum energy trajectories for subway systems. *Optimal control applications & methods*. 1999. №20. С. 283-296.

103. Kennedy J. O. S. Introduction to Dynamic Programming. *Dynamic Programming*. 1986. P. 27–49. doi:10.1007/978-94-009-4191-5\_2.

104. Bellman R. E. *Dynamic Programming*. 2010. doi:10.1515/9781400835386

105. Внутреннее сопротивление аккумулятора. URL: <https://batts.pro/vnutrennee-soprotivlenie-akkumulyato/> (дата звернення: 02.11.2020).

106. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. Москва : Наука, 1974. 832 с.

107. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов : Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». Челябинск : Изд. ЮУрГУ, 2005. 403 с.

108. Захарчук В.І. Розрахунок автомобільних двигунів. Навчально-методичний посібник до виконання курсового проекту з дисципліни «Автомобільні двигуни» студентами спеціальності «Автомобілі та автомобільне господарство». Луцьк : ЛДТУ, 2002. 95 с.

109. Динамічне програмування. URL: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj\\_komp'yuterne\\_modelyuvannya\\_system\\_procesiv/t2/510..htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp'yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t2/510..htm) (дата звернення: 18.05.2021).

110. Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є., Тимченко І. І. Автомобільні двигуни. Підручник. Друге видання. Київ : Арістей, 2004. 476 с.

111. Дьяченко Н.Х., Костин А.К., Пугачев Г.П. Теория двигателей внутреннего сгорания. Ленинград : Машиностроение, 1974. 551 с.

112. Закалов О.В. Основы тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.

113. Прорывная технология или утопия: линейный генератор + свободнопоршневой двигатель. URL: <https://naukatehnika.com/svobodnoporshnevoj-dvigatel.html> (дата звернення: 14.03.2019).

114. Сергієнко М.І., Пелепейченко В.І., Гончарів О.І., Гордієнко Д.О. Оцінка ефективності можливих варіантів модернізації енергетичної установки маневрового тепловоза ЧМЭЗ. *Залізничний транспорт України*. 2011. № 6. С. 35–38.

115. Володин А. И. Локомотивные двигатели внутреннего сгорания. Москва : Транспорт, 1978. 239 с.

116. Буряковский С. Г., Маслий Ар. С., Маслий Ан. С., Петрушин А. Д. Разработка электропривода стрелочного перевода с вентильно-индукторным электродвигателем и исследование на математической модели режимов его работы. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2013. № 36. С. 198–201.

117. Buryakovskiy S., Lyubarskiy B., Masliy Ar., Masliy An. Mathematical modeling of the electric drive turnouts based on a linear motor. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2015. № 19 (95). С. 75–78.

118. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual. 2020. 161 p.

119. Буряковский С. Г., Маслий А. С., Любарский Б. Г. Идентификация параметров математической модели вентильно-индукторного трехфазного двигателя непрерывными функциями на основе полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. № 3 (19) С. 605–606.

120. Седов В. И., Лушникова Л. Д. Расчет магнитного поля и электромагнитного момента индукторного электродвигателя методом конечных элементов. *Електровозостроение*. 2005. Т. 48. С. 25–32.

121. Датчик индуктивный LJ12A3-4-Z-CX. URL: <http://www.kosmodrom.com.ua/el.php?name=LJ12A3-4-Z-CX> (дата звернення: 21.08.2020).

122. TRZ 24VDC 1CO. URL: <https://catalog.weidmueller.com/catalog/Start.do?localeId=ru&ObjectID=1122880000> (дата звернення: 21.08.2020).

123. Arduino Leonardo. URL: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Leonardo> (дата звернення: 21.08.2020).