

Міністерство освіти і науки України
Державний університет інфраструктури та технологій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЗАІКА ДЕНИС ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 629.4.053

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ ТЯГОВОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ
МАНЕВРОВИХ ЛОКОМОТИВІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ
МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

273 – Залізничний транспорт

27 – Транспорт

Подається на здобуття ступеня доктор філософії

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

_____ Денис ЗАІКА

Науковий керівник

Олександр ГОРОБЧЕНКО
доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Заїка Д. О. Вдосконалення управління тяговою передачею маневрових локомотивів шляхом використання методів штучного інтелекту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 273 – Залізничний транспорт. Державний університет інфраструктури та технологій МОН України, Київ, 2024.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі вдосконалення управління тяговою передачею маневрових локомотивів шляхом використання методів штучного інтелекту, що дозволило зменшити витрати енергоресурсів на виконання маневрової роботи за рахунок зміни схеми підключення тягових електричних двигунів в залежності від режиму навантаження.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні наукової задачі інтелектуального управління тяговою передачею маневрових локомотивів шляхом використання методів штучного інтелекту, що дозволить удосконалити процес управління тяговою передачею на часткових навантаженнях, з метою підвищення експлуатаційних характеристик та зменшення витрат палива.

Вперше:

- розроблено математичну модель для визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ, яка на відміну від існуючих, має можливість визначення основних параметрів на часткових навантаженнях передачі. За результатами моделі отримано теоретично обґрунтовані данні для реалізації інтелектуальної автоматизованої системи управління тяговою електричною передачею локомотива у всьому діапазоні навантажень.

- розроблено математичну модель інтелектуальної автоматизованої системи управління тяговою передачею маневрового локомотивом ЧМЕЗ, використовуючи метод експертних оцінок та методи нечіткої логіки, зокрема, алгоритм Мамдані, що включає базу знань інтелектуальної системи, яка для

формалізації та представлення знань в пам'яті інформаційної системи використовує продукційну модель, поєднуючи елементи логічних та мережевих підходів керування.

Доопрацьовано:

- існуючи методи тягових розрахунків, шляхом врахування різної кількості підключених ТЕД (n_{ted}) відповідно до поїзної ситуації. Використання такого методу дозволило провести об'єктивне оцінювання роботи маневрового локомотива ЧМЕЗ на різних варіантах підключення ТЕД.

Практичне значення одержаних результатів роботи. Основні наукові результати роботи впроваджені в ТОВ НВП «Локомотив Транс Сервіс» при модернізації маневрових тепловозів типу ЧМЕЗ шляхом удосконалення систем управління тяговою електричною передачею. Результати роботи впроваджені у навчальний процес ДУІТ при підготовці магістрів за спеціальностями 273 «Залізничний транспорт», та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Локомотиви та локомотивне господарство», та «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, у тому числі 4 основних праці (1 стаття у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus та видана в країні ЄС, має квартиль Q2), 3 статті у наукових фахових виданнях України), 6 праць апробаційного характеру та 1 патент на корисну модель.

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.

В першому розділі виконано дослідження існуючих методів тягових розрахунків при маневровій роботі локомотива. Використовуючи тягові розрахунки можна визначити максимально допустиму масу поїзда, розрахувати швидкість та час руху, витрату палива та електроенергії на тягу поїздів, а також виконувати розв'язання задач пов'язаних з гальмуванням. Сучасні методи

тягових розрахунків базуються на використанні комп'ютерного моделювання, що дозволяє підвищити точність та автоматизувати розрахунки.

Для аналітичного опису тягової характеристики маневрового локомотива ЧМЕЗ було обрано наступні види регресії:

- Для 1-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 4.9%;
- для 2-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 2.2%;
- для 3-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 2.3%;
- для 4-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 4.3%;
- для 5-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 9%;
- для 6-ї позиції контролера машиніста – гіперболічна регресія похибка 12.2%;
- для 7-ї позиції контролера машиніста – гіперболічна регресія похибка 8.3%;
- для 8-ї позиції контролера машиніста – гіперболічна регресія похибка 3.9%;

Для аналітичного опису струмової характеристики тягового генератора маневрового локомотива ЧМЕЗ було обрано наступні види регресії:

- Для 1-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 1.2%;
- для 2-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 1.3%;
- для 3-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 1.9%;
- для 4-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 2.6%;
- для 5-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 12.3%;
- для 6-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 10.6%;
- для 7-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 9.7%;
- для 8-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 10.8%;

Для аналітичного опису навантажувальної характеристики маневрового локомотива ЧМЕЗ було обрано наступні види регресії:

- Для 1-ї позиції контролера машиніста – квадратична регресія похибка 0.05 %;

- для 2-ї позиції контролера машиніста – квадратична регресія похибка 0.4%;
- для 3-ї позиції контролера машиніста – квадратична регресія похибка 0.2%;
- для 4-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.4%;
- для 5-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.2%;
- для 6-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.3%;
- для 7-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.04%;
- для 8-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.5%.

Отримані аналітичні вирази необхідні для створення математичної моделі визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотив на часткових навантаженнях, використовуючи для руху різні позиції контролера машиніста.

Проведений аналіз охопив широкий спектр тем, пов'язаних з штучним інтелектом його основні концепції і теоретичні підходи, а також практичні аспекти застосування в залізничному транспорті. Аналіз сучасного стану сфери залізничного транспорту з огляду на цифрові технології та використання штучного інтелекту для процесів керування рухомим складом говорить про доцільність впровадження методів теорії штучного інтелекту для вдосконалення систем управління тяговою електричною передачею маневрових локомотивів, зокрема, для керування кількістю підключених тягових електричних двигунів під час часткового навантаження, дозволить зменшити витрати енергоресурсів та підвищити ефективність роботи локомотивів.

Досліджено процеси побудови нечітких систем керування, що включають етапи формування правил, фазифікацію вхідних змінних, агрегування підумов, активізації підвисновків, акумуляції висновків та дефазифікації вихідних змінних.

В другому розділі розроблено математичну модель для визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ, на відміну від

існуючих має можливість визначення основних параметрів на часткових навантаженнях. Модель дає можливість введення початкових параметрів, таких як:

- номер позиції контролера машиніста;
- кількість тягових електродвигунів;
- масу складу;
- середнє навантаження на вісь;
- початкова швидкість;
- інтервал часу;
- ухил профілю колії.

Модель дозволяє розрахувати наступні параметри:

- прискорення маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- силу тяги маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- потужність маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- опір руху 4-х вісних вагонів;
- опір руху маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- поточну швидкість руху маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- пройдений шлях маневровим локомотивом ЧМЕЗ;
- кількість витраченого палива на виконану роботу маневровим локомотивом ЧМЕЗ;
- силу струму тягового генератора маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- силу струму ТЕД маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- температуру перевищення над навколишньою середою ТЕД.
- коефіцієнт корисної дії тягового генератора маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- коефіцієнт корисної дії ТЕД маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- коефіцієнт корисної дії тягової передачі маневрового локомотива ЧМЕЗ.

Похибка математичної моделі складає 4,15 %. Модель має обмеження за: коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками; швидкістю руху локомотива; струму

тягового електричного генератора; струму тягового електричного двигуна; перевищення температури над навколишньою середою тягового електричного двигуна.

За результатами розрахунку математичної моделі тягово-енергетичних показників маневрового локомотиву ЧМЕЗ, створено графічні залежності сили тяги від швидкості; сили струму генератора від швидкості; сили струму ТЕД від швидкості; кількість витраченого часу на подолання заданої відстані; кількість витраченого палива локомотивом на роботу; перевищення температури двигуна над навколишнім середовищем. Дані залежності створено з 3-ї по 8-му позицію контролера машиніста, для 3-х варіантів підключення ТЕД. А саме для роботи локомотива на 2-х, 4-х та 6 ТЕД. Для аналізу був обраний поїзд з 10-тю 4-х вісними вагонами вагою 650т. на відстань руху 300 м. по прямій дільниці шляху.

Розраховано ККД електричної передачі локомотива серії ЧМЕЗ, який складається з кількох ключових компонентів: ККД тягового електричного двигуна TE006, ККД тягового генератора TD006 та ККД редуктора тепловоза.

Дослідження отриманих графіків ККД тягової електричної передачі, підтверджують доцільність та ефективність використання різних варіантів підключення електродвигунів для досягнення оптимальної енергоефективності.

В третьому розділі розроблено математичну модель автоматизованої системи управління тяговою передачею маневрового локомотива. За допомогою методів нечіткої логіки сформовано та теоретично обґрунтовано нечітку базу знань системи. Розроблено схему автоматизованої системи управління тяговою передачею маневрового локомотива з можливістю самонавчання, для реалізації використовується метод Мамдані.

Отримані результати роботи системи дозволяють реалізувати досить різноманітні режими управління тяговою передачею маневрового локомотива, що відрізняються від прийнятих при тягових розрахунках і зазначених в режимних картах. Використовуючи створену базу даних система реалізує рух маневрового локомотива на 4-х ТЕД використовуючи частково 3-тю, та повністю 4-ту та 5-ту позицію контролера машиніста. Такий режим руху

дозволяє зменшити витрати палива на маневрову роботу локомотива при часткових навантаження на тягову передачу.

В четвертому розділі за допомогою дослідних даних про режими роботи маневрових локомотивів ЧМЕЗ отримано відсоток використання позицій контролера машиніста за 12 годин роботи (не враховуючи час простою) на певній ділянці руху. Виконано розрахунок годинної витрати палива на різних варіантах підключення ТЕД для позицій контролера машиніста. Отримано загальні значення витрати палива за 12 годин роботи тепловоза використовуючи для руху 4 ТЕД на частково 3-й та повністю 4-й та 5-й позиції контролера машиніста.

Результати розрахунку показують економію палива в 12.31 кг, що складає 14.66 літрів за 12 годин роботи тепловозу. На 08.09.2024 року ціна дизельного палива складає 55.49 грн за одну літру, використовуючи прості математичні розрахунки отримуємо значення в 813 грн. 48 коп. фінансової економії. Термін окупності запропонованої системи складає 8 місяців та 3 тижні.

Ключові слова: залізничний транспорт, рухомий склад, тепловоз, інтелектуальне керування, тягові характеристики, математична модель, тягова електрична передача

ABSTRACT

Zaika D. O. Improvement of traction transmission control in shunting locomotives through the use of artificial intelligence methods. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 273 - Railway transport. State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Culture of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to solving a current scientific problem of improving the control of traction transmission in shunting locomotives by applying artificial intelligence methods. This approach has made it possible to reduce energy resource consumption during shunting operations by altering the connection scheme of traction electric motors depending on the load mode.

The scientific novelty of the dissertation lies in addressing the problem of intelligent control of traction transmission in shunting locomotives using artificial intelligence methods. This allows for the optimization of traction transmission control under partial loads, aiming to enhance operational performance and reduce fuel consumption.

For the first time:

- A mathematical model has been developed to determine the traction and energy performance indicators of the ČME3 shunting locomotive. Unlike existing models, it enables the determination of key parameters under partial load conditions of the transmission. Based on the model's results, theoretically substantiated data has been obtained to implement an intelligent automated control system for the locomotive's traction electric transmission across the entire load range.

- A mathematical model of an intelligent automated control system for the traction transmission of the ČME3 shunting locomotive has been developed. The model utilizes expert evaluation methods and fuzzy logic techniques, specifically the Mamdani algorithm. It incorporates a knowledge base for the intelligent system, which employs a production model for knowledge formalization and representation within the memory

of the information system, combining elements of logical and network-based control approaches.

Refined:

- Existing traction calculation methods have been improved by accounting for the varying number of connected traction electric drives (n_{TED}) according to the operational scenario. This approach enabled an objective evaluation of the ČME3 shunting locomotive's performance under different configurations of connected traction electric drives.

The key scientific findings of this work have been implemented at «Lokomotive Trans Service» during the modernization of ČME3 shunting diesel locomotives by improving the control systems for traction electric transmission. Additionally, the results have been integrated into the educational process at the State University of Infrastructure and Technologies (SUIT) for the training of master's students in specialties 273 «Railway Transport» and 141 «Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics». These findings are part of the educational and professional programs «Locomotives and Locomotive Economy» and «Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics».

Publications related to the dissertation a total of 11 scientific works have been published on the topic of the dissertation, including 4 major works (1 article in a scientific journal indexed in the Scopus database, published in an EU country with a Q2 quartile, and 3 articles in professional scientific journals of Ukraine), 6 works of an approbation nature, and 1 utility model patent.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, outlines its objectives and tasks, and describes its connection with the scientific programs, plans, and projects of the university. The scientific novelty, practical significance, and general characteristics of the dissertation are also presented.

In the first chapter, A study of existing traction calculation methods for shunting locomotive operations has been conducted. Traction calculations can determine the maximum allowable train mass, calculate speed and travel time, estimate fuel and electricity consumption for train traction, and solve problems related to braking.

Modern traction calculation methods are based on the use of computer modeling, which enhances accuracy and automates the calculations.

For the analytical description of the traction characteristics of the ČME3 shunting locomotive, the following types of regression were selected:

- For the 1st position of the driver's controller – cubic regression with a 4.9% error;
- For the 2nd position of the driver's controller – cubic regression with a 2.2% error;
- For the 3rd position of the driver's controller – cubic regression with a 2.3% error;
- For the 4th position of the driver's controller – cubic regression with a 4.3% error;
- For the 5th position of the driver's controller – cubic regression with a 9% error;
- For the 6th position of the driver's controller – hyperbolic regression with a 12.2% error;
- For the 7th position of the driver's controller – hyperbolic regression with an 8.3% error;
- For the 8th position of the driver's controller – hyperbolic regression with a 3.9% error.

For the analytical description of the current characteristic of the traction generator of the ČME3 shunting locomotive, the following types of regression were selected:

- For the 1st position of the driver's controller – cubic regression with a 1.2% error;
- For the 2nd position of the driver's controller – cubic regression with a 1.3% error;
- For the 3rd position of the driver's controller – cubic regression with a 1.9% error;
- For the 4th position of the driver's controller – cubic regression with a 2.6% error;
- For the 5th position of the driver's controller – cubic regression with a 12.3% error;

- For the 6th position of the driver's controller – cubic regression with a 10.6% error;
- For the 7th position of the driver's controller – cubic regression with a 9.7% error;
- For the 8th position of the driver's controller – cubic regression with a 10.8% error.

For the analytical description of the loading characteristic of the ČME3 shunting locomotive, the following types of regression were selected:

- For the 1st position of the driver's controller – quadratic regression with a 0.05% error;
- For the 2nd position of the driver's controller – quadratic regression with a 0.4% error;
- For the 3rd position of the driver's controller – quadratic regression with a 0.2% error;
- For the 4th position of the driver's controller – cubic regression with a 0.4% error;
- For the 5th position of the driver's controller – cubic regression with a 0.2% error;
- For the 6th position of the driver's controller – cubic regression with a 0.3% error;
- For the 7th position of the driver's controller – cubic regression with a 0.04% error;
- For the 8th position of the driver's controller – cubic regression with a 0.5% error.

Analytical expressions have been derived for creating a mathematical model to determine the traction and energy performance indicators of a shunting locomotive under partial load conditions, utilizing various positions of the driver's controller for motion.

The conducted analysis covered a wide range of topics related to artificial intelligence, including its core concepts, theoretical approaches, and practical applications in railway transport. An examination of the current state of the railway sector, with a focus on digital technologies and the use of artificial intelligence in rolling stock management processes, highlights the feasibility of applying AI theory to improve control systems for the traction electric transmission of shunting locomotives. Specifically, managing the number of connected traction electric motors under partial load conditions can reduce energy consumption and enhance locomotive efficiency.

The study also explored the processes involved in developing fuzzy control systems, including the stages of rule formation, fuzzification of input variables, aggregation of premises, activation of partial conclusions, accumulation of conclusions, and defuzzification of output variables.

In the second chapter, a mathematical model has been developed to determine the traction and energy performance indicators of the ČME3 shunting locomotive, which, unlike existing models, allows for the determination of key parameters under partial load conditions in various control scenarios. The model allows for the input of initial parameters, such as:

- driver controller position;
- number of traction electric motors;
- train mass;
- average axle load;
- initial speed;
- time interval;
- track gradient profile element relative to the horizontal line.

The model enables the calculation of the following parameters:

- acceleration of the ČME3 shunting locomotive;
- tractive force of the ČME3 shunting locomotive;
- power output of the ČME3 shunting locomotive;
- rolling resistance of 4-axle wagons;

- rolling resistance of the ČME3 shunting locomotive;
- current speed of the ČME3 shunting locomotive;
- distance traveled by the ČME3 shunting locomotive;
- fuel consumption for the work performed by the ČME3 shunting locomotive;
- current of the traction generator of the ČME3 shunting locomotive;
- current of the traction electric motors (TED) of the ČME3 shunting locomotive;
- temperature rise above ambient temperature of the TED of the ČME3 shunting locomotive;
- efficiency of the traction generator of the ČME3 shunting locomotive;
- efficiency of the TED of the ČME3 shunting locomotive;
- efficiency of the traction transmission of the ČME3 shunting locomotive.

Findings from the Mathematical Model Calculations of the Traction-Energy Performance of the ČME3 Shunting Locomotive:

Based on the calculations of the mathematical model, graphical dependencies were created, including:

- Traction force versus speed.
- Generator current versus speed.
- Traction motor current versus speed.
- Time required to cover a given distance.
- Fuel consumption for operation.
- Engine temperature rise above ambient conditions.

The error margin of the mathematical model is 4.15%. The model has limitations related to: the coefficient of adhesion between the wheels and rails, locomotive speed, traction electric generator current, traction electric motor current, and the temperature rise of the traction electric motor above the ambient temperature. Based on the calculations of the mathematical model for the traction and energy performance indicators of the ČME3 shunting locomotive, graphical dependencies have been created for: Traction force versus speed; Generator current versus speed; Traction electric motor current versus speed; Time spent to cover a specified distance; Fuel

consumption by the locomotive during operation; Temperature rise of the motor above the ambient temperature. These dependencies were created for controller positions 3 through 8, across three configurations of connected traction electric motors (TMs): operation with 2, 4, and 6 TMs.

For the analysis, a train consisting of ten four-axle cars, weighing 650 tons in total, was chosen, traveling a distance of 300 meters along a straight section of track.

The efficiency of the ČME3 locomotive's electric transmission was calculated, encompassing key components:

- Efficiency of the TE006 traction electric motor.
- Efficiency of the TD006 traction generator.
- Efficiency of the locomotive gearbox.

The analysis of the obtained efficiency graphs confirms the feasibility and effectiveness of using different TED connection configurations to optimize energy efficiency under varying operational conditions.

In the third chapter, the results obtained from the system enable the implementation of a variety of control modes for the traction transmission of the shunting locomotive, which differ from those used in traction calculations and specified in the operational maps. Using the created database, the system manages the movement of the shunting locomotive with 4 traction electric drives (TED), partially utilizing the 3rd position and fully utilizing the 4th and 5th positions of the driver's controller. This operating mode allows for reduced fuel consumption during shunting operations when partial loads are applied to the traction transmission.

In the fourth chapter, using experimental data on the operational modes of ČME3 shunting locomotives, the percentage of controller positions used during 12 hours of operation (excluding idle time) on a specific section of track was determined. Hourly fuel consumption was calculated for different configurations of traction electric drives (TED) based on the driver's controller positions. The total fuel consumption over 12 hours of operation was obtained for the locomotive using 4 TEDs, with partial use of the 3rd position and full use of the 4th and 5th positions of the driver's controller.

The calculation results show a fuel savings of 12.31 kg, equivalent to 14.66 liters over 12 hours of locomotive operation. As of August 9, 2024, the price of diesel fuel is 55.49 UAH per liter. Using simple mathematical calculations, this results in a financial savings of 813.48 UAH. The payback period for the proposed system is 8 months and 3 weeks.

Keywords: railway transport, rolling stock, diesel locomotive, intelligent control, traction characteristics, mathematical model, traction electric transmission.

Список публікацій здобувача.

Основні наукові праці:

Наукові праці у фахових виданнях інших держав (індексовані в базі Scopus та віднесені до квартиля Q2):

1. Gorobchenko, O., Holub, H., & Zaika, D. (2024). Theoretical basics of the self-learning system of intelligent locomotive decision support systems. *Archives of Transport*, 71(3), 169–186. <https://doi.org/10.61089/aot2024.gaevsp41> (Q2)

Наукові праці у фахових виданнях України:

2. Gorobchenko, O., Matsiuk, V., Holub, H., Zaika, D., & Gritsuk, I. (2023). The theoretical basis of the choice of new locomotives for Ukraine in the post-war period. *Transport Systems and Technologies*, (42), 34–44. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-42-3>

3. Горобченко, О. М., & Заїка, Д. О. (2024). Створення математичної моделі визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, (208), 146–162. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308485>

4. Gorobchenko, O., & Zaika, D. (2024). Creation of a model of automated traction control of shunting locomotives by using artificial intelligence methods. *Transport Systems and Technologies*, (44), 8–26. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-44-1>

Праці апробаційного характеру:

5. Горобченко, О. М., & Заїка, Д. О. (2022). Огляд методів та перспективи використання штучного інтелекту на залізничному транспорті. *Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference*, Vancouver, Canada, February 2–4, 2022 (pp. 184–192).

6. Горобченко, О. М., & Заїка, Д. О. (2024). Дослідження тяго-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ на різних варіантах підключення тягових електричних двигунів. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: тези доп. учасників 15-ї*

Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, Україна, 13-15 березня 2024 р. (с. 52–54.) Херсон: ХДМА.

7. Замостян, Ю. М., & Заїка, Д. О. (2023). Аналіз систем залізничної автоматизації SIEMENS AG. *Сучасні дослідження: транспортна інфраструктура та інноваційні технології: тези доповідей учасників II-ї Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців, м. Київ, Україна, 29–30 листопада 2023 р. (с. 112–117).* Київ: ДУІТ.

8. Романчук, Б. О., & Заїка, Д. О. (2023). Інновації та перспективи діагностування параметрів тягового електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням за допомогою програмного забезпечення MATLAB SIMULINK r2022b. *Сучасна наука: тези доповідей I-ї Міжнародної мультидисциплінарної науково-практичної конференції молодих дослідників, здобувачів вищої освіти та науковців, м. Київ, Україна, 6–7 квітня 2023 р. (с. 103–107).* Київ: ДУІТ.

9. Zakharchenko, K., & Zaika, D. (2024). Automatic train control system overview. *Виклики та перспективи розвитку транспортної інфраструктури України: тези доповідей учасників II Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Київ, Україна, 3–5 квітня 2024 р. (с. 77–79).* Київ: ДУІТ.

10. Gorobchenko, O., Zaika, D., Holub, H., & Kulbovskyi, I. (2024). Development of an intelligent control model for a maneuvering locomotive using the Mamdani method. *Innovations and Prospects of World Science. Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference: Current Trends in Scientific Research Development, Boston, USA, August 22–24, 2024 (pp. 70–77).*

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

11. Горобченко, О. М., Винокуров Д. В., Гулак С. О., Заїка, Д. О., Малюк С. В., Твердомед В. М., & Неведров О. В. (2022). Пристрій автоматизованого діагностування кіл керування електровозів ЧС-4 (Пат. на корисну модель №

151531). Україна: G05B 23/00 G05B 23/02. № u202103250. Заяв. 10.06.2021;
опубл. 10.08.2022, Бюл. № 32.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 22 |
| РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТЯГОВИХ РОЗРАХУНКІВ ТА АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЛОКОМОТИВІВ | 28 |
| 1.1 Аналіз та дослідження існуючих методів тягових розрахунків | 28 |
| 1.2 Аналіз та дослідження методів визначення опору руху рухомого складу | 34 |
| 1.3 Тягова характеристика маневрового локомотива ЧМЕЗ | 36 |
| 1.4 Струмова характеристика тягового генератора маневрового локомотива ЧМЕЗ | 41 |
| 1.5 Навантажувальна характеристика та витрати палива в режимі тяги маневрового локомотива ЧМЕЗ | 43 |
| 1.6 Аналіз та дослідження існуючих систем автоматизованого керування на основі теорії штучного інтелекту | 45 |
| Висновки до розділу 1 | 63 |
| РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА ЧМЕЗ | 66 |
| 2.1 Математична модель визначення тягово – енергетичних показників маневрового локомотиву ЧМЕЗ | 66 |
| 2.2 Розрахунок коефіцієнту корисної дії маневрового локомотива ЧМЕЗ | 76 |
| Висновки до розділу 2 | 86 |
| РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТЯГОВОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ МАНЕВРОВИХ ЛОКОМОТИВІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ | 90 |
| 3.1 Розробка теоретичного підґрунтя для створення бази знань моделі автоматизованого управління тяговою передачею маневрових локомотивів | 90 |

| | |
|---|-----|
| 3.2 Розробка математичної моделі інтелектуальної системи управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ за допомогою пакету прикладних програм Matlab Fuzzy Logic | 110 |
| Висновки до розділу 3 | 121 |
| РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ МАНЕВРОВИМ ЛОКОМОТИВОМ ЧМЕЗ | 124 |
| 4.1 Визначення витрати та економії палива маневровим локомотивом ЧМЕЗ за робочу зміну, при різних варіантах роботи тягової електричної передачі | 124 |
| 4.2 Розрахунок капітальних витрат на оснащення локомотива автоматизованою інтелектуальною системою управління тяговою передачею маневрового локомотива | 127 |
| Висновки до розділу 4 | 129 |
| ВИСНОВКИ | 131 |
| Список використаних джерел | 135 |
| Додаток А | 148 |
| Додаток Б | 150 |
| Додаток В | 151 |
| Додаток Г | 169 |
| Додаток І | 175 |

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток залізничного транспорту потребує постійного вдосконалення методів управління локомотивами, зокрема, маневровими, які відіграють важливу роль в організації залізничних перевезень. Ефективне використання локомотивів є основним завданням для залізниць. За 2021 – 2023 роки суттєво погіршились основні експлуатаційні показники роботи залізничного транспорту : вантажообіг, пасажирообіг, середньодобова продуктивність локомотиву. Відповідно до даних АТ «Укрзалізниця» на 01.01.2024р. інвентарний парк маневрових тепловозів складається з 1247 одиниць, в експлуатуючому парку – 817 одиниць. Інвентарний парк маневрових локомотивів серії ЧМЕЗ налічує 1014 одиниць з них 736 використовується в експлуатації. Експлуатуючий парк маневрових локомотивів перебільшив свій середній вік майже на 40 років. Працюючі тепловози при маневровій роботі використовують здебільшого режими часткового навантаження, за рахунок неможливості працювати на повну потужність.

Аналізуючи вище наведені фактори, які впливають на ефективне використання локомотивів, можна зробити висновок, що для покращення експлуатаційних характеристик, необхідно проводити модернізацію, та впроваджувати нові сучасні методи інтелектуального автоматизованого управління та діагностики локомотивів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у відповідності до «Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року», яку введено в дію наказом (розпорядження КМУ від 30.05.10 р. № 430-р). Наукові результати отримані при виконанні науково-дослідних робіт, зокрема: «Модернізація маневрових тепловозів типу ЧМЕЗ шляхом впровадження системи дистанційного управління і контролю» (№ДР0121U107991) та «Розробка наукових засад комплексного підвищення безпеки, ефективності експлуатації та управління критичними об'єктами залізничного транспорту в умовах післявоєнного розвитку України» (проект за грантової підтримки Національного фонду досліджень України,

реєстраційний номер проєкту 2022.01/0224), у яких автор дисертації є виконавцем і автором звітів.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у вирішенні наукового завдання вдосконалення управління тяговою передачею маневрових локомотивів шляхом використання методів штучного інтелекту.

Для досягнення вказаної мети у роботі поставлені такі наукові задачі:

- дослідити існуючі методи тягових розрахунків; методи визначення опору руху рухомого складу; тягову характеристику; струмову характеристику тягового генератора; навантажувальну характеристику та витрати палива в режимі тяги маневрового локомотива ЧМЕЗ, виконати апроксимацію даних характеристик для отримання аналітичних виразів;

- виконати аналіз існуючих систем автоматизованого керування на основі теорії штучного інтелекту;

- розробити математичну модель визначення тягово – енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ на часткових навантаженнях тягової електричної передачі;

- виконати розрахунок коефіцієнту корисної дії тягової електричної передачі маневрового локомотива ЧМЕЗ з урахуванням часткових режимів навантаження;

- створити базу знань інтелектуальної моделі автоматизованого управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ;

- розробити математичну модель інтелектуальної системи автоматизованого управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ;

- визначити економічну доцільність використання запропонованого методу управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ.

Об'єкт дослідження – тягова передача маневрових локомотивів.

Предмет дослідження – методи та моделі інтелектуального управління тяговою передачею маневрових локомотивів.

Методи дослідження. Використовуючи методи апроксимації отримано аналітичні вирази залежності сили тяги від швидкості, струму тягового

генератора від швидкості, витрати палива від швидкості та ін., на кожній із позицій контролера машиніста, які увійшли в основу математичної моделі. На методах тягових розрахунків базується математична модель визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива. Використовуючи методи штучного інтелекту розроблено базу знань інтелектуальної автоматизованої системи управління з можливістю самонавчання. За допомогою методів нечіткої логіки фазифіковано вхідні сигнали бази даних інтелектуальної автоматизованої системи управління тяговою передачею маневрового локомотива. Для реалізації розробленої моделі інтелектуальної автоматизованої системи управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ використано метод Мамдані.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні наукової задачі інтелектуального управління тяговою передачею маневрових локомотивів шляхом використання методів штучного інтелекту, що дозволить удосконалити процес управління тяговою передачею на часткових навантаженнях, з метою підвищення експлуатаційних характеристик та зменшення витрат палива.

Вперше:

- розроблено математичну модель для визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ, яка на відміну від існуючих, має можливість визначення основних параметрів на часткових навантаженнях передачі. За результатами моделі отримано теоретично обґрунтовані данні для реалізації інтелектуальної автоматизованої системи управління тяговою електричною передачею локомотива у всьому діапазоні навантажень.

- розроблено математичну модель інтелектуальної автоматизованої системи управління тяговою передачею маневрового локомотивом ЧМЕЗ, використовуючи метод експертних оцінок та методи нечіткої логіки, зокрема, алгоритм Мамдані, що включає базу знань інтелектуальної системи, яка для формалізації та представлення знань в пам'яті інформаційної системи використовує продукційну модель, поєднуючи елементи логічних та мережевих підходів керування.

Доопрацьовано:

- існуючи методи тягових розрахунків, шляхом врахування різної кількості підключених ТЕД (n_{ted}) відповідно до поїзної ситуації. Використання такого методу дозволило провести об'єктивне оцінювання роботи маневрового локомотива ЧМЕЗ на різних варіантах підключення ТЕД.

Практичне значення одержаних результатів роботи. На підставі отриманих теоретичних досліджень запропоновано інтелектуальну систему управління тяговою передачею маневрових локомотивів шляхом використання методів штучного інтелекту. Розроблено модель інтелектуального автоматизованого управління тяговою передачею маневрового локомотивом ЧМЕЗ, використовуючи методи нечіткої логіки, зокрема метод Мамдані. Використання моделі дозволяє здійснити свій оптимальний режим руху для конкретного поїзда та ділянки експлуатації. Такий спосіб керування дає можливість досягти найбільш економічних режимів руху локомотива на часткових навантаженнях.

Основні наукові результати роботи впроваджені в ТОВ НВП «Локомотив Транс Сервіс» при модернізації маневрових тепловозів типу ЧМЕЗ шляхом удосконалення систем управління тяговою електричною передачею. Результати роботи впроваджені у навчальний процес ДУІТ при підготовці магістрів за спеціальностями 273 «Залізничний транспорт», та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Локомотиви та локомотивне господарство», та «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, розробки і результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно і виконані в ДУІТ.

У основних наукових працях, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача визначається таким: в роботі [1] проведено аналіз робіт у галузі штучного інтелекту та теорії управління локомотивом, розроблено математичне моделювання нечіткого класифікатора, створено модель СППР у програмному

пакеті Matlab, проведено експериментальне дослідження СППР; в роботі [2] розроблено структуру ієрархії значущих критеріїв для вибору нових локомотивів, виконано розвинення методу Saaty шляхом перетворення ієрархії у штучну нейронну мережу; в роботі [3] проведено апроксимацію існуючих характеристик маневрового локомотива ЧМЕЗ, побудовано математичну модель руху маневрового локомотива ЧМЕЗ; в роботі [4] розроблено математичну модель автоматизованої системи управління тяговою передачею маневрового локомотива, використовуючи методи нечіткої логіки та метод експертних оцінок. Для запропонованої моделі використовується алгоритм Мамдані. Алгоритм включає базу знань інтелектуальної системи, яка для формалізації та представлення знань в пам'яті використовує продукційну модель, поєднуючи елементи логічних та мережевих підходів керування

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та ухвалені на 6-ти конференціях: *Proceedings of the 6th International scientific and practical conference*, (Vancouver February 2-4, 2022.), *15-та Міжнародна науково-практична конференції* (м. Херсон, 13-15 березня 2024 р.), *II-га Міжнародна науково-практична конференції здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців*, (29-30 листопада 2023 р.), *I-ша Міжнародна мультидисциплінарна науково – практична конференція молодих дослідників, здобувачів вищої освіти та науковців* (м. Київ, 6-7 квітня 2023 р.), *II-га Всеукраїнська науково-практичної конференція* (м. Київ, 3-5 квітня 2024 р.), *Proceedings of I International Scientific and Practical Conference* (Boston, August 22-24, 2024). Повністю дисертація доповідалася, обговорювалася і була схвалена на засіданні кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, а також на фаховому міжкафедральному семінарі в Київському інституті залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, за участю рецензентів.

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані у 4-х основних наукових працях, що відповідають п. 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти,

наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р. із змінами внесеними згідно з Постановою КМ №507 від 03.05.2024 р. , з яких 1-на праця у закордонних виданнях (індексована в наукометричній базі Scopus та має квартиль Q2), 3 праці у фахових виданнях затверджених МОН України. Також опубліковано 7 додаткових праць (1 патент України на корисну модель та 6 праць апробаційного характеру).

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків та додатків. Повний обсяг складає 180 сторінок, у тому числі 103 сторінки основного тексту, 34 сторінки додатків, 10 таблиць, 50 рисунків. Розташовані на окремих сторінках таблиці та рисунки займають 24 сторінку. Список використаних джерел включає 100 найменувань на 13 сторінках.

РОЗДІЛ 1.

ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТЯГОВИХ РОЗРАХУНКІВ ТА АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЛОКОМОТИВІВ.

1.1. Аналіз та дослідження існуючих методів тягових розрахунків.

Для ефективного використання локомотива застосовують багато методів для удосконалення процесів керування локомотивом[5,6]. В тому числі з використанням методів штучного інтелекту [7-12]. Для якісного керування локомотивом необхідно дослідити існуючу базу методів тягових розрахунків. Тягові розрахунки є ключовим елементом в залізничному транспорті та представляють собою одну з основних дій для організації залізничних робіт та їх проектування. Методологія тягових розрахунків включає різноманітні методи, що охоплюють визначення маси поїзда, обчислення швидкості та часу руху, витрат палива та електроенергії для тяги, а також розв'язання завдань, пов'язаних з гальмуванням [13,14]. Ключовим напрямком в розвитку методів тягових розрахунків є комп'ютерне моделювання з використанням програмного коду. Суть їх полягає в розробці теоретичного підґрунтя для оптимізації витрат палива та енергії, моделюванні руху поїзда на визначеному шляху для виявлення потенційних резервів підвищення ефективності залізниць і раціонального використання рухомого складу [15,16]. Для оптимізації витрат енергетичних ресурсів необхідно використовувати комплекс методів по раціональному використанню локомотива. Багато фахівців присвятили свої праці дослідженню та удосконаленню тягових розрахунків локомотива, які саме в цих комплексах і відображаються. У роботі [17] висвітлено основні положення для тягових розрахунків промислового залізничного транспорту, особливості тягових розрахунків для вантажних поїздів на тепловозній тязі, розглянуто основний питомий опір руху поїзда, додаткові питомі опори руху, повний опір руху поїзда. Посібник [18] описує точність розрахунків, координати та довжини шляхів маневрового рейсу, методи розрахунку параметрів руху на заданому інтервалі шляху, розрахунок шляху та часу руху локомотива на заданому інтервалі,

розрахунок максимальної швидкості розгону в маневровому напіврейсі методом ітерації. В монографії [19] був проведений аналіз математичної моделі руху, також розглянуто метод тягових розрахунків з використанням механіки Лагранжа. В статті [20] розглянуто питання підходів до проведення тягових розрахунків за допомогою автоматизованих комп'ютерних систем, було встановлено основну методику розрахунку для конкретних умов роботи для раціонального використання енергетичних ресурсів. В роботі [21] було запропоновано математичну модель руху маневрового локомотива ЧМЕЗ для окремої ділянки руху. Аналіз закордонних статей [22-26] відкриває сутність енергетичного моделювання залізничного транспорту [27-29]. Симуляції сили тяги локомотива є фундаментальною частиною таких моделей. В даних роботах створено першу двовимірну модель локомотива (без деталізації контакту колесо – рейка) та більш удосконалену 2-гу версію з повністю деталізованою моделлю контакту колесо-рейка. Авторами європейської країни [30] було представлено моделювання тягового електричного приводу рухомого складу, за допомогою якого можна аналізувати стан навантаження приводу локомотива. В статті [31] було вирішене питання збільшення надійності та зменшення витрати палива шляхом використання мікропроцесорних систем в процесі керування локомотивом. В роботі [32] використалися оптимізаційні розрахунки за допомогою створеної математичної моделі, яка відображає реальні умови роботи мотор-генераторної установки.

Основні властивості тягового електричного двигуна (ТЕД) виражаються робочими характеристиками, які діляться на електромеханічні характеристики, віднесені до валу ТЕД і електротягові характеристики на ободі рушійних коліс.

Електромеханічні характеристики віднесені до валу тягового двигуна – це залежності частоти обертання валу ТЕД n (хв^{-1}), обертового моменту M ($\text{Н} \cdot \text{м}$) і коефіцієнта корисної дії η (ККД) на валу ТЕД від струму в ланцюзі його якоря I_d (А) при постійній напрузі U (В) на його затискачах.

Електротягові характеристики на ободі рушійних коліс – це залежності дотичної сили тяги в точці дотику колісної пари з рейками F_k (кН), швидкості

руху локомотива v (км/год), і коефіцієнта корисної дії зубчатої передачі η ККД від струму в ланцюзі його якоря I_d (А) при постійній напрузі U (В) на його затискачах. Електротягові характеристики на ободі рушійних коліс перераховуються з електромеханічних з урахуванням передавального відношення тягового редуктора, діаметра рушійного колеса і ККД передачі.

Тягова характеристика локомотива являє собою графічну залежність дотичної сили тяги на ободі коліс F_k від швидкості руху v , тобто $F_k = f(v)$. Її можна побудувати по робочим характеристикам тягових електродвигунів (ТЕД), які встановлені на локомотивах[17,18].

Залежність дотичної сили тяги F_{kd} (кН) на ободі коліс від струму якоря I_d перераховують за значеннями обертового моменту $M_d = f(I_d)$, взятими з електромеханічної характеристики (рисунок 1.1.)

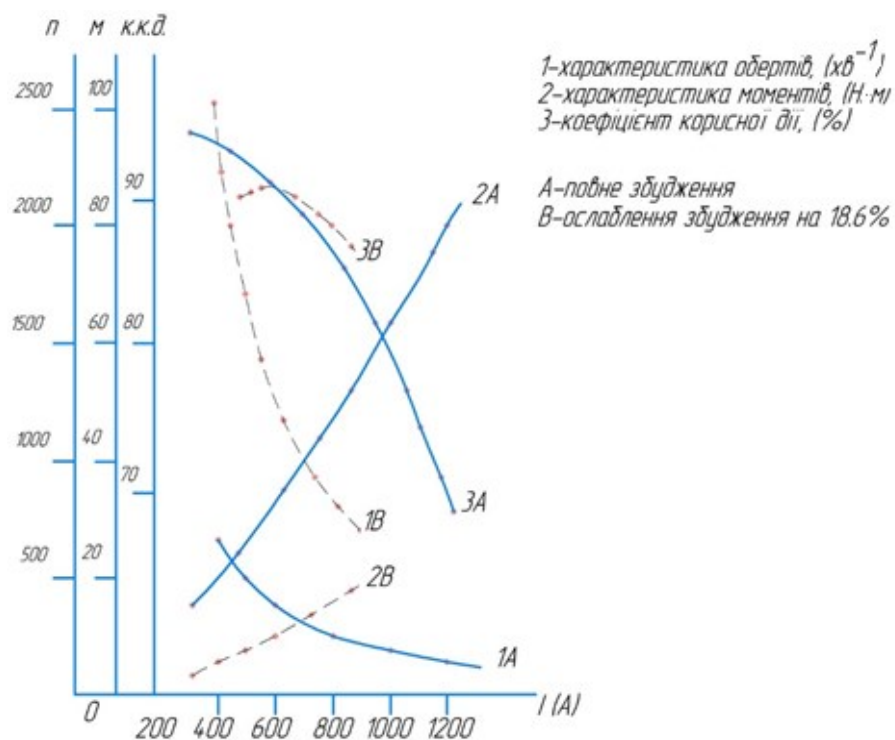


Рисунок 1.1. Електромеханічна характеристика тягового електричного двигуна TE006 тепловозу серії ЧМЕЗ

Сили тяги $F_{\kappa\mathcal{D}}$ (кН) віднесеної до валу двигуна і параметрами колісно-моторного блоку, визначають за формулою:

$$F_{\kappa\mathcal{D}} = 2 \cdot \mu \cdot \eta_p \cdot \frac{M_{\mathcal{D}}}{D_K}, \quad (1.1)$$

де D_K – діаметр колеса локомотива по колу катання, м;
 $M_{\mathcal{D}}$ – значення обертального моменту при різних струмах, Нм;
 μ – передаточне число зубчастої передачі колісно-моторного блоку;
 η_p – к.к.д. редуктора, (0,975).

$$\mu = Z_2 / Z_1, \quad (1.2)$$

де Z_2 – кількість зубів веденого зубчастого колеса;
 Z_1 – кількість зубів ведучої шестерні, $Z_1 \geq 15$.

Передаточне число μ являє собою також відношення крутного моменту на ободі колеса до моменту на валу тягового електродвигуна (ТЕД) яке визначається при тривалому режимі роботи колісно-моторного блока (КМБ) за умови руху поїзда із заданою швидкістю v_p на розрахунковому підйомі за формулою:

$$\mu = \frac{F_{\kappa\partial\infty} \cdot D_k}{2 \cdot M_{\mathcal{D}\infty}}, \quad (1.3)$$

де $F_{\kappa\partial\infty}$ – тривала сила тяги КМБ, кН;
 $M_{\mathcal{D}\infty}$ – тривалий крутний момент ТЕД, кН.м;

D_k – діаметр колеса, м.

Величини $F_{кД\infty}$, $M_{Д\infty}$ можуть бути визначені за наступними формулами:

$$F_{кД\infty} = \frac{3,6 \cdot P_{Д\infty}}{V_p}, \quad (1.4)$$

$$M_{Д\infty} = \frac{9,5 \cdot P_{Д\infty}}{n_{Д\max}}, \quad (1.5)$$

де $P_{Д\infty}$ – потужність одного ТЕД, кВт;

v_p – розрахункова швидкість руху тепловозу, км/год;

$n_{Д\infty}$ – тривала частота обертання якоря ТЕД, хв⁻¹.

$$n_{Д\infty} = n_{Д\max} \cdot \frac{V_p}{V_k}, \quad (1.6)$$

де, $n_{Д\max}$ – максимально допустима частота обертів якоря ТЕД;

V_k – конструкційна швидкість локомотива, км/год.

Підставляючи вирази (1.4), (1.5) у формулу (1.3) одержимо вираз:

$$M_1 = 0,9 \cdot \frac{n_{Д\max} \cdot D_k}{V_k}, \quad (1.7)$$

де $n_{Д\max}$ – максимально допустима частота обертів якоря ТЕД;

D_k – діаметр колеса, м;

V_k – конструкційна швидкість локомотива, км/год.

Передаточне відношення M_1 , яке визначено за формулою (1.7), не тільки забезпечує параметри $F_{\text{кдо}}$, $M_{\text{до}}$ при тривалому режимі, що відповідає тривалій швидкості руху локомотива, але і забезпечує умови міцності ТЕД, частота обертання якоря якого при конструкційній швидкості не перевищить допустимого значення $n_{\text{дmax}}$.

Кінцеве значення передаточного відношення встановлюється з урахуванням прийнятої довжини централі A , мм, що показує відстань між осями якоря ТЕД і колісної пари:

$$A = \frac{(z_1 + z_2) \cdot m}{2}, \quad (1.8)$$

де m – модуль зубчастого зчеплення;

Z_1, Z_2 – кількість зубів ведучої і веденої шестерні.

Для локомотивних тягових передач модуль зубчастого зачеплення, що являє собою відношення діаметра діляльного кола до кількості зубів шестерні, може прийматися в межах $m = 9 - 11$ залежно від моменту, який передається.

Кількості зубів ведучої шестерні Z_1 і веденого зубчастого колеса Z_2 визначаються зі спільного розв'язання двох рівнянь:

$$\begin{cases} Z_1 + Z_2 = \frac{2 \cdot A}{m} \\ \frac{Z_2}{Z_1} = \mu_1 \end{cases}, \quad (1.9)$$

Після округлення кількостей зубів Z_1 і Z_2 до цілих значень Z_1' і Z_2' остаточно встановлюється передаточне відношення зубчастої тягової передачі μ .

Швидкісна характеристика $v = f(I_d)$, віднесена до ободу колеса, розраховується з електромеханічної характеристики (рисунок 1.1) ТЕД $n_d = f(I_d)$ з урахуванням того, що швидкість руху локомотива прийнято виражати в км/год:

$$V = 0.188 \cdot n_d \cdot \frac{D_k}{\mu}, \quad (1.10)$$

де n_d – частота обертання валу ТЕД, об^{-1} ;
 D_k – діаметр колеса локомотива по колу катання, м;
 μ – передавальне число зубчастої передачі колісно-моторного блоку.

Для побудови тягової характеристики тепловоза необхідно задати декілька значень струму електродвигуна по електротяговій характеристиці (крайні значення струму брати по крайніх точках кривих). При вибраних значеннях I_d по електротяговим характеристикам $F_{kd} = f(I_d)$, $v = f(I_d)$ визначити їх значення.

Повна дотична сила тяги локомотива F_k (кН) визначається за формулою:

$$F_k = F_{kd} \cdot m', \quad (1.11)$$

де m' – кількість ТЕД на всіх секціях локомотива.

1.2. Аналіз та дослідження методів визначення опору руху рухомого складу.

Основний питомий опір локомотива при русі у режимі тяги визначається за формулою, в Н/кН [17-19]:

$$w'_o = 1,9 + 0,01 \cdot v + 0,0003 \cdot v^2, \quad (1.12)$$

де v – швидкість руху локомотива (км/год).

Основний питомий опір руху (Н/кН) вантажних вагонів (у складі поїзда) на ланковому шляху визначаються за формулою для чотири вісних вагонів на роликових підшипниках та вагонів рефрижераторних поїздів ($q_{04} > 6\text{т.}$):

$$w_{04}'' = 0.7 + \frac{3 + 0.1 \cdot v + 0.0025 \cdot v^2}{q_{04}}, \quad (1.13)$$

де v – швидкість руху локомотива (км/год);

q_{04} – середня маса, т/вісь, яка припадає відповідно на вісь чотиривісного вагона.

Основний питомий опір, Н/кН, восьмивісних завантажених вагонів з роликовими підшипниками визначається за формулою:

$$w_{08}'' = 0.7 + \frac{6 + 0.038 \cdot v + 0.0021 \cdot v^2}{q_{08}}, \quad (1.14)$$

q_{08} – середня маса, т/вісь, яка припадає відповідно на вісь восьмивісного вагона.

$$q_{04} = \frac{q_{04}}{4}, \quad (1.15)$$

де q_{04} – маса брутто вагонів, т.

Основний питомий опір складу, Н/кН, визначається за формулою:

$$w_o'' = \alpha w_{04}'' + \beta w_{08}'', \quad (1.16)$$

де α , β – відповідно доля по вазі (не у відсотках) чотиривісних та восьмивісних вагонів у складі.

1.3. Тягова характеристика локомотива маневрового локомотива ЧМЕЗ.

Відповідно до паспортних характеристик локомотивів серії ЧМЕЗ тягова характеристика по окремим позиціям контролера машиніста представлена на рисунку 1.2 [18].

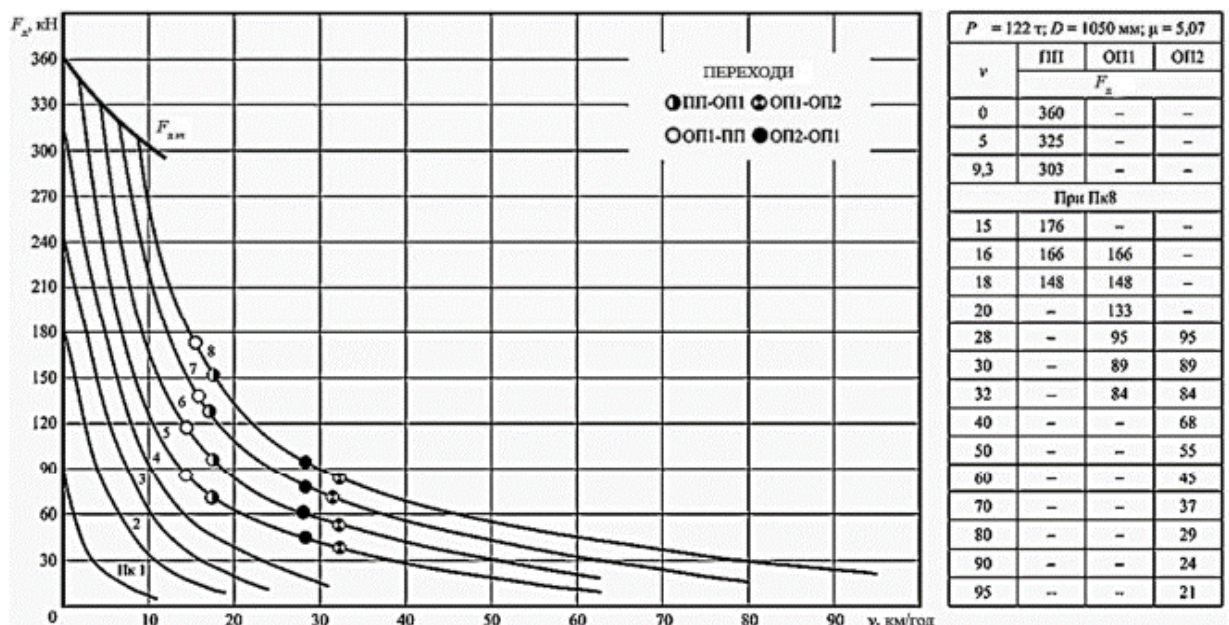


Рисунок 1.2. Тягова характеристика локомотива ЧМЕЗ від 1 до 8 позиції контролера машиніста F_k , кН; v , км/год

Для аналітичного опису представлених тягових характеристик (залежності сили тяги F_k , кН від швидкості v , км/год), проведено апроксимацію графіків по кожній позиції контролера машиніста.

Апроксимація – заміна одних математичних об'єктів іншими, у тому чи іншому сенсі, близькими до вихідних.

Апроксимація – метод наближення, при якому для знаходження додаткових значень, відмінних від табличних даних, наближена функція проходить не через вузли інтерполяції, а між ними рисунок 1.3. [33-37].

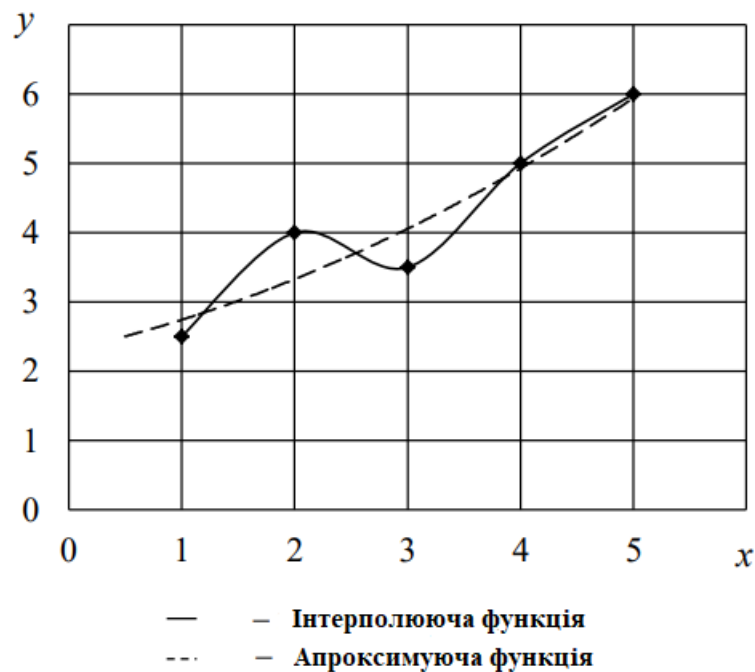


Рисунок 1.3. Вигляд інтерполюючої та апроксимуючої функцій

При побудові апроксимуючої залежності визначають:

- аналітичний характер емпіричної формули. Перевага віддається простим формулам, що мають хорошу точність;
- найкращі параметри емпіричної залежності.

Метод кубічної та гіперболічної регресії був використаний для апроксимації позицій тепловозу ЧМЕЗ. Розглянувши кубічну регресію в якій говориться, що побудова полінома проводиться на основі меншого числа точок, тому що в кожній точці можна обчислювати значення і функції, і її похідної [35,36].

Апроксимація кубічним поліномом записується у вигляді:

$$F(x) = a_0 + a_1(x - x_1) + a_2(x - x_1)(x - x_2) + a_3(x - x_1)^2(x - x_2), \quad (1.17)$$

Параметри рівняння (1.18) підбираються таким чином, щоб значення $F(x)$ та її похідні в точках x_1, x_2 збігалися зі значеннями $f(x), f'(x)$ в цих точках. Перша похідна функції $F(x)$ дорівнює:

$$\frac{dF(x)}{dx} = a_0 + a_1(x - x_1) + a_2(x - x_1)(x - x_2) + 2a_3(x - x_1)^2(x - x_2), \quad (1.18)$$

Коефіцієнти a_0, a_1, a_2, a_3 рівняння (1.18) знаходяться по відомим значенням $f(x_1), f(x_2), f'(x_1), f'(x_2)$ шляхом вирішення наступної системи рівнянь:

$$\begin{aligned} f_1 &= f(x_1) = a_0; \\ f_2 &= f(x_2) = a_0 + a_1(x_2 - x_1); \\ f'_1 &= f'(x_1) = a_1 + a_2(x_1 - x_2); \\ f'_2 &= f'(x_2) = a_1 + a_2(x_2 - x_1) + a_3(x_2 - x_1)^2, \end{aligned} \quad (1.19)$$

Ця система легко вирішується рекурсивним методом. Після того, як коефіцієнти знайдені, діючи за аналогією з випадком квадратичної апроксимації, можна оцінити координату стаціонарної точки $f(x)$ за допомогою полінома (1.18). При цьому прирівнювання до похідної нуля (1.19) призводить до квадратного рівняння.

Використовуючи формулу для обчислення коренів квадратного рівняння, запишемо рішення, що визначає стаціонарну точку кубічного полінома, у вигляді:

$$\vec{x} = \begin{cases} x_2, & \text{якщо } \mu < 0; \\ x_2 - \mu(x_2 - x_1), & \text{якщо } 0 \leq \mu \leq 1; \\ x_1, & \text{якщо } \mu > 1, \end{cases} \quad (1.20)$$

де

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{f'_2 + w - z}{f'_2 - f'_1 + 2w}; \\ z &= \left[\frac{3 \cdot (f_1 - f_2)}{x_2 - x_1} \right] + f'_1 + f'_2; \\ w &= \begin{cases} \sqrt{z^2 - f'_1 \cdot f'_2}, \text{ якщо } x_1 < x_2; \\ -\sqrt{z^2 - f'_1 \cdot f'_2}, \text{ якщо } x_1 > x_2, \end{cases}\end{aligned}\tag{1.21}$$

Формула для визначення значення w забезпечує належний вибір одного із двох коренів квадратного рівняння.

Для значення $\mu \in [0, 1]$ формула 1.21 гарантує, що точка яка отримується $\bar{x} \in [x_1, x_2]$.

Схема метода:

1. Виконуємо присвоєння $k=0$. Якщо задано початкові приближення x^0 та початковий крок Δ , переходимо на крок 2. Якщо заданий інтервал $[a, b]$, що містить шукану точку екстремуму, переходимо на крок 3.
2. Вважаємо $\bar{x}^0 = x^0$. Якщо $f'(\bar{x}^0) < 0$ то виконуємо присвоєння $x_1^0 = \bar{x}^0$. Далі шукаємо мінімальне значення m , таке, що в точці $x_2^0 = \bar{x}^0 + 2^m \cdot \Delta$ значення похідної $f'(x_2^0) > 0 (m = 0, 1, 2, \dots)$. Після переходимо до кроку 4. Інакше (якщо умова $f'(\bar{x}^0) < 0$, не виконується), виконуємо присвоєння $x_2^0 = \bar{x}^0$, далі шукаємо мінімальні значення m такі, що в точці $x_1^0 = \bar{x}^0 - 2^m \cdot \Delta$, значення похідної $f'(\bar{x}^0) < 0 (m = 0, 1, 2, \dots)$. Після переходимо на крок 4. Мета цього кроку – визначити відрізок $[x_1^0, x_2^0]$, який містить точку мінімуму. Тобто в лівій границі відрізка похідна повинна спадати, а правій — зростати.

3. Виконуємо присвоєння $x_1^0 = a, x_2^0 = b, \bar{x}^0 = \frac{a+b}{2}$.
4. По формулі (1.3.4.) визначаємо точку мінімуму \bar{x}^{k+1} полінома $F(x)$, побудованого по точках x_1^k та x_2^k . Причому згідно схеми алгоритму, нерівність $x_1^k < x_2^k$ виконується завжди, тому для визначення параметру w завжди використовуємо формулу:

$$w = \sqrt{z^2 - f'_1 \cdot f'_2}, \quad (1.22)$$

Отриманий аналітичний опис представлених тягових характеристик локомотива має наступний вигляд:

- Для 1 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 4.9%, та отримано математичний вираз:

$$y = -0.080505135850x^3 + 2.238027844591x^2 - 22.641524794786x + 89.921742894152$$
- Для 2 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 2.2%, та отримано математичний вираз:

$$y = -0.032150532924x^3 + 1.562047393700x^2 - 27.261434119980x + 183.580186742646$$
- Для 3 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 2.3%, та отримано математичний вираз:

$$y = -0.023211278269x^3 + 1.400358362989x^2 - 30.194326017237x + 249.846466524097$$
- Для 4 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 4.3%, та отримано математичний вираз:

$$y = -0.019800384389x^3 + 1.374500578106x^2 - 33.445068375640x + 316.639742033270$$

- Для 5 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 9%, та отримано математичний вираз:

$$y = -0.006130456034x^3 + 0.719834107961x^2 - 26.818071101212x + 355.178953482622$$

- Для 6 – ї позиції була обрана гіперболічна регресія похибка якої становила 12.2%, та отримано математичний вираз:

$$y = 5.544236118343 + 1570.811910729401/x$$

- Для 7 – ї позиції була обрана гіперболічна регресія похибка якої становила 8.3%, та отримано математичний вираз:

$$y = 0.029463790857 + 2170.893620785641/x$$

- Для 8 – ї позиції була обрана гіперболічна регресія похибка якої становила 3.9%, та отримано математичний вираз:

$$y = -6.569976284604 + 2881.547102950061/x$$

Обмеження по зчепленню (при швидкості від 0 до 9.3 км/год)

- $y = 0.2026x^2 - 8.0128x + 360.0000$

1.4. Струмова характеристика тягового генератора маневрового локомотива ЧМЕЗ.

Відповідно до паспортних даних локомотивів серії ЧМЕЗ струмова характеристика тягового генератора по окремим позиціям контролера машиніста представлена на рисунку 1.4 [18].

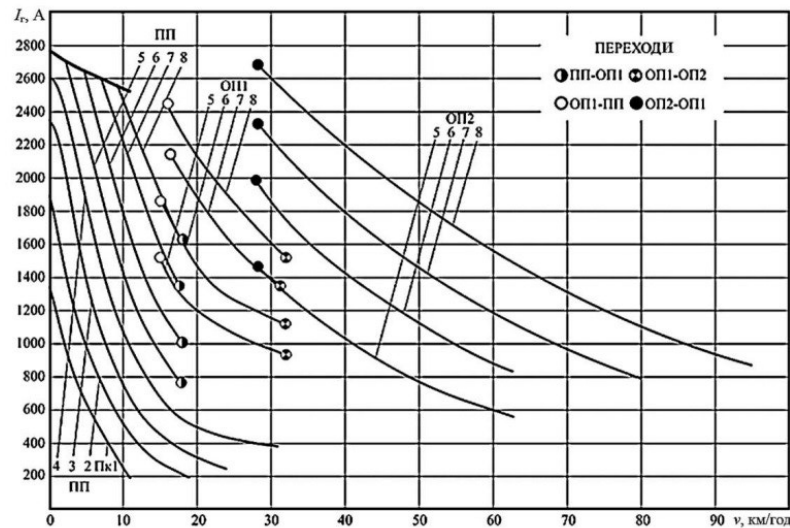


Рисунок 1.4. Струмова характеристика тягового генератора локомотива ЧМЕЗ від 1 до 8 позиції контролера машиніста $I_g, (A)$, $v, (км/год)$

Для аналітичного опису струмових характеристик тягового генератора (залежність струму генератора I_g, A від швидкості $v, км/год$, проведено апроксимацію графіків по кожній позиції контролера машиніста.

Отриманий аналітичний опис представлених струмових характеристик тягового генератора локомотива має наступний вигляд:

- Для 1 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 1.2%, та отримано математичний вираз:
- $y = -0.244283389122x^3 + 10.117645222611x^2 - 187.225943274650x + 1355.282116901837$
- Для 2 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 1.3%, та отримано математичний вираз:
- $y = -0.172580287098x^3 + 10.267841283206x^2 - 222.285147938202x + 1904.678075702185$
- Для 3 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 1.9%, та отримано математичний вираз:
- $y = -0.123756657010x^3 + 9.260371985943x^2 - 239.534045890959x + 2385.843400085908$

- Для 4 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 2.6%, та отримано математичний вираз:
- $y = -0.062800686297x^3 + 6.390252012658x^2 - 210.531352796392x + 2657.169136269626$
- Для 5 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 12.3%, та отримано математичний вираз:
- $y = -0.048439971261x^3 + 5.250673712658x^2 - 178.699401037599x + 2915.541398677036$
- Для 6 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 10.6%, та отримано математичний вираз:
- $y = -0.046333703081x^3 + 5.141898323636x^2 - 179.055333016683x + 3232.974202105790$
- Для 7 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 9.7%, та отримано математичний вираз:
- $y = -0.007916688563x^3 + 1.038431429679x^2 - 57.587817865437x + 2700.567884519725$
- Для 8 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 10.8%, та отримано математичний вираз:
- $y = -0.005271858772x^3 + 0.782642217206x^2 - 47.499846808688x + 2727.649898947369$

1.5. Навантажувальна характеристика та витрати палива в режимі тяги маневрового локомотива ЧМЕЗ.

За дослідженнями Демченка Є. Б. навантажувальна характеристика $g_e = f(N_e, n_k)$ тепловоза ЧМЕЗ зображена на рисунку 1.5. та витрата палива по позиціях в режимі тяги зображена на рисунку 1.6 [18]. Для визначення аналітичного опису даних характеристик проведено апроксимацію графіків по кожній позиції контролера машиніста:

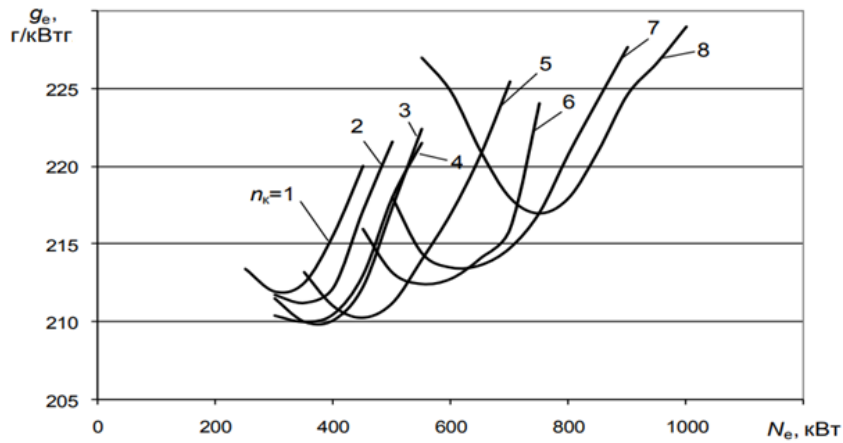


Рисунок 1.5. Навантажувальна характеристика $g_e = f(N_e, n_k)$ тепловоза ЧМЕЗ

g_e – витрата палива в г/кВтг;

N_e – потужність локомотива в кВт;

n_k – номер позиції локомотива.

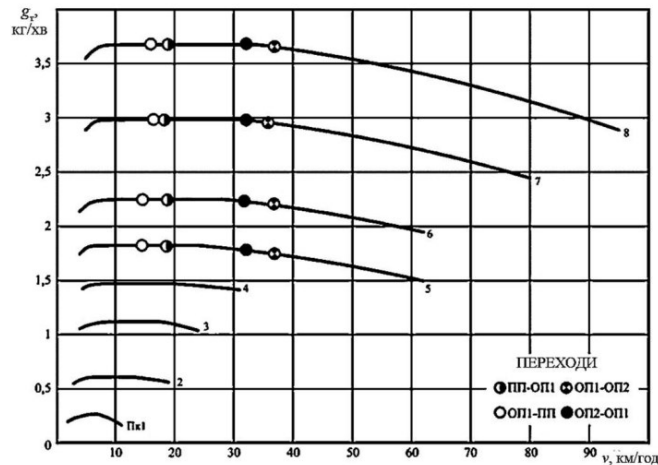


Рисунок 1.6. Витрата палива в режимі тяги маневрового локомотива ЧМЕЗ

Отриманий аналітичний опис даних характеристик локомотива ЧМЕЗ має наступний вигляд:

- Для 1 – ї позиції була обрана квадратична регресія похибка якої становила 0.05%, та отримано математичний вираз:

$$y=0.000481264530x^2-0.312913406169x+263.219267391556$$

- Для 2 – ї позиції була обрана квадратична регресія похибка якої становила 0.4%, та отримано математичний вираз:

$$y=0.000476662741x^2-0.331821612763x+269.226459118770$$

- Для 3 – ї позиції була обрана квадратична регресія похибка якої становила 0.2%, та отримано математичний вираз:

$$y=0.000419023539x^2-0.314625500417x+269.324921960171$$

- Для 4 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 0.4%, та отримано математичний вираз:

$$y=-0.000000858604x^3+0.001245707646x^2-0.532820384497x+280.257843464438$$

- Для 5 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 0.2%, та отримано математичний вираз:

$$y=-0.000000207790x^3+0.000546165820x^2-0.355855694781x+278.713172513817$$

- Для 6 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 0.3%, та отримано математичний вираз:

$$y=0.000000173038x^3+0.000056198282x^2-0.235582609766x+295.787247710861$$

- Для 7 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 0.04%, та отримано математичний вираз:

$$y=-0.000000304417x^3+0.000786400402x^2-0.612127301581x+363.399701937335$$

- Для 8 – ї позиції була обрана кубічна регресія похибка якої становила 0.5%, та отримано математичний вираз:

$$y=0.000000247008x^3-0.000249910245x^2-0.033851192798x+279.915981046855$$

1.6. Аналіз та дослідження існуючих систем автоматичного керування на основі теорії штучного інтелекту.

В матеріалах міжнародної конференції [38] було розглянуто методи та перспективи використання штучного інтелекту на залізничному транспорті.

Головна ідея синергетичної парадигми полягає в тому, що у складних системах існують такі стани, невеликі зміни яких можуть привести систему до нових станів. Ці нові стани пов'язані з існуванням зон біфуркації (придбання нової якості в рухах динамічної системи при малій зміні її параметрів), через які подальша поведінка системи стає практично непрогнозованою. Переходи від упорядкованої структури до хаотичної та назад є основною ідеєю самоорганізації синергетичних систем. Термін «синергетика» походить від грецького слова зі значенням «діяльність». За словами Г. Хакена, це поняття є достатньо адекватним у теорії самоорганізованих систем, оскільки «вивчаються спільні дії всіх елементів системи, а також для досягнення будь-якої поставленої мети потрібно об'єднання її частин». Основною метою синергетичної теорії штучного інтелекту (ШІ) служить розвиток теорії мультиагентних систем (МАС), які будуються на самоорганізації та вирішенні задач спільними зусиллями системи множини агентів. Таким чином, розвиток теорії складних самоорганізованих систем, таких як еволюційні алгоритми і МАС, що базуються на синергетичному підході. Синергетична концепція теорії МАС спирається на поняття ШІ, визначення якого досить складне і суперечливе, тому що є ключовим поняттям багатьох наукових дисциплін. Тому виділимо основні визначення інтелекту, які наводили вчені, які займаються ШІ. У 1980 році П. Уінстон дав таке визначення «Штучний інтелект — це наука про концепції, що дозволяють обчислювальним машинам робити такі речі, які у людей виглядають розумними. Центральні завдання ШІ полягають у тому, щоб зробити обчислювальні машини кориснішими. Методологія використовується, щоб зробити розумніші машини, може бути використана і для того, щоб зробити розумнішим за самих людей».

Подібне визначення дає і А. Хоффман: «ШІ прагне відкрити загальні принципи інтелекту. Ці загальні принципи можуть плідно застосовуватись навіть без використання програмних засобів». У 1973 році Н. Нільсон говорив, що мета робіт з ШІ полягає у «створенні машин, виконують такі дії, для яких зазвичай потрібний інтелект людини». Розвиваючи цю точку зору, творець терміна «штучний інтелект» у 1956 році Дж. Маккарті каже, що «проблематика ШІ

включає дві головні складові: проблему євристик та проблему уявлення (епістемологія ШІ)».

У 1969 р. першопрохідці в галузі реалізації систем на основі ШІ Г. Саймон та А. Ньюелл стверджували, що «дослідження в області ШІ як євристичний пошук у просторі станів. Кожен вузол представляє завдання, а кожен шлях у графі - проект, спрямований на вирішення цього завдання». Виходячи з цього, можна виділити основні етапи розробки будь-якої моделі ШІ:

1. Вибір галузі пізнавальної діяльності.
2. Припущення гіпотез та теорій опису моделі.
3. Реалізація побудованої моделі та її тестування.
4. Проведення аналізу визначення природи інтелекту.

Згодом у 1985 р. Н. Нільсон змінив свою точку зору з даного питання: «Штучний інтелект ставить собі серйозне завдання побудови теорії інтелекту, що базується на обробці інформації. Якби таку теорію інтелекту вдалося створити, то за її допомогою можна було б спрямовано розробку інтелектуальних машин».

Виходячи з усього вищесказаного, можна бачити, що поняття ШІ досить багатогранне та іноді навіть суперечливе. Однак на їх основі можна виділити два базові напрями в моделюванні інтелектуальних систем:

1. Прагматичний чи інформаційний підхід. Особливості даного підходу полягають у наступному: необов'язково копіювати всі принципи роботи природного інтелекту - дані можуть бути представлені лише у символній, а не у числовій формі; алгоритм вирішення загалом випадку представлений у вигляді «чорної скриньки», яка в свою чергу може бути незастосовним у світлі певного набору обмежень; цільова функція в цих завданнях або складно, або зовсім не формалізується. Все це не дозволяє використовувати під час вирішення завдань існуючі методи та алгоритми. Інформаційний підхід дозволяє моделювати лише

властивості інтелекту, пов'язані з обробкою інформації та аналізом євристик.

2. Нейробіоніка. Цей підхід ґрунтується на обов'язковій комп'ютерної реалізації процесів вирішення задач природним інтелектом та адекватністю використання теорії ШІ для їх визначення. Основною ідеєю даного підходу є те, що «успішне відтворення інтелектуальних процесів неможливе без відтворення їх матеріальних носіїв», тобто створення ШІ нерозривно пов'язане із моделюванням процесів мозку. Ключовим напрямом у цьому підході є аналіз прийняття рішень, формалізації завдань та параметрів тощо, що тісно пов'язує нейробіоніку з психологією, внаслідок чого виникла психоніка.

В даний час парадигма раціоналізму в галузі штучного інтелекту зазнає кризи. Поява складних самоорганізованих неоднорідних систем, серед яких є складно формалізовані, що відрізняються неможливістю точного опису. Такий підхід є протилежним підходу, заснованому на отриманні точних та несуперечливих знань. У 1976 році Л. Заде стверджував, що: «З урахуванням нашого поклоніння перед усім точним, строгим і кількісним і нашої зневаги до всього нечіткого, Нестрогому і якісному, недивним виявився прихід ери цифрових комп'ютерів; проте досі ці комп'ютери виявилися дуже ефективними лише під час роботи з механістичними, тобто неживими системами, поведінка яких визначається законами механіки, фізики, хімії, електромагнетизму. На жаль, цього не можна сказати про гуманістичні системи, в яких центральне місце займають люди». На додаток до цього вже 2001 року В. К. Фінн каже, що в багатьох областях, особливо пов'язаних з гуманітарними науками, що оперують не поняттями, а ідеями що означає «Наявність важливих обмежень на строгість міркувань». Таким чином, на перший план виходить напрям, що вивчає як інтелектуальні системи, і поняття штучного загалом, що у своє чергу призводить до реалізації синергетики у сфері ШІ. Синергетика - це крос науковий напрям, що вивчає універсальні закономірності процесів самоорганізації, еволюції та

кооперації. Основним завданням даного напрямку є побудова єдиної теорії складних систем, які мають свої специфічні особливості, такі як:

- неоднорідність - наявність безлічі відмінних один від одного частин;
- цілеспрямованість окремих компонентів та всієї системи в цілому;
- наявність взаємозв'язків між окремими компонентами системи, які впливають одна на одну асинхронно;
- семіотична природа взаємозв'язків;
- поведінка безлічі елементів системи як єдиного організму;
- відкритість;
- розподіленість;
- навченість.

У синергетиці особлива увага приділяється хаотичній природі освіти систем, особливо нестійкості початкового стану. Розвиток та оновлення систем відповідно до синергетичного підходу послідовністю нерівноважних фазових переходів. У роботах Хакена це описується як «послідовне проходження критичних областей (точок біфуркацій)», поблизу яких найчастіше і відбувається більшість відхилень від початкового стану. На даний момент основну роль несе саме непередбачуваність змін, які можуть призвести до того, що з самого початку нестійкої та хаотичної системи виникне суворо організована структура. Однак дані системи мають підвищену чутливість до впливів, що стосуються її властивостей та параметром, який називають фактором генерації нових структур. Даний процес призводить до появи підмножин можливих станів системи, званих атрactorами, що є асимптотично стійкими множинами.

Спираючись на праці Хакена, Заде та інших, можна виділити основні напрямки синергізму:

1. Принципи складності:

- 1.1. Принцип неадитивності. Складні системи генеруються як результат спільних дій, що несуть у собі синергізм (Наприклад, нелінійність процесів).

- 1.2. Принцип цілісності. Властивості цілого немає властивостей приватного і навпаки. Взаємодія елементів призводить до створення нових систем, але їх описи необхідно знати властивості цілого.
- 1.3. Принцип додатковості М. Бора. Необхідність обліку всіх можливих поєднань, які можуть призвести до створення нових систем.
- 1.4. Принцип спонтанного походження І. Пригожина. Існують такі критичні стани, коли будь-яке скільки завгодно мале відхилення може призвести до нових систем.
- 1.5. Принцип несумісності Л. Заде. Чим складніша система, тим гірша вона піддається точному та повному опису.
2. Принципи невизначеності:
 - 2.1. Принцип управління невизначеністю. Необхідність чіткої межі між усуненням невизначеності до їхнього управління.
 - 2.2. Принцип незнання. У складних системах знання часто є неповними та суперечливими, отже, особливу роль грає поняття часткового знання та незнання.
 - 2.3. Принцип множинності НЕ-факторів, таких як: невизначеність, нелінійність, нестійкість тощо.
 - 2.4. Принцип відповідності. Складна система має бути описана відповідною мовою, яка враховує всі її особливості.
3. Принципи еволюції:
 - 3.1. Принцип різноманітності шляхів розвитку. Існує безліч допустимих станів системи та шляхів їх розвитку.
 - 3.2. Принцип єдності та переходів від порядку до хаосу та назад. Процес моделювання системи проходить через фази нестійкості та порядку.
 - 3.3. Принцип коливальної (пульсуючої) еволюції. Система, розвиваючись, має циклічний характер, що несе в собі етапи

дивергентні (зростання різноманітності) та конвергентні (згортання різноманітності), а також фази нестійкості та порядку.

Аналіз поточного стану залізничної галузі у контексті розвитку цифрових технологій дозволив систематизувати напрямки застосування інтелектуальних технологій на залізничному транспорті (Таблиця 1.1.).

Таблиця 1.1. Основні напрямки штучного інтелекту на залізничному транспорті

| | | | |
|---|---|---|--|
| Розмовний штучний інтелект, автоматизація ручної обробки типових заявок, звернень | Інфраструктура та рухомий склад | Тяговий рухомий склад | Автоматизація рутинних операцій |
| Прийом голосових звернень. Синтез мови. Роботизації обробки заявок у технічну підтримку | Передиктивна діагностика. Технічне обслуговування та ремонт | Управління локомотивом з застосуванням методів штучного інтелекту | Технічна підтримка. Формування звітності. Ведення нормативно-довідкової інформації |

Інноваційні проекти з впровадження інтелектуальних систем на залізничному транспорті можна умовно розділити на реалізовані, наприклад, «Розумний локомотив» та «Розумний потяг», а також перспективні технології з терміном реалізації до 2025 р.: «Технологія машинного зору», «Автомашиніст на вантажних та пасажирських поїздах», «Технологія розпізнавання мови», "Cognitive Rail Pilot". За допомогою штучного інтелекту значного розвитку зазнав безпілотний рух поїздів. Розвиток якого проходить в два етапи реалізації. На першому етапі реалізується рівень автоматизації GoA 3, коли машиніст повинен бути присутнім на борту електропоїзда. На другому етапі планується перейти до

рівня GoA 4 без присутності машиніста рухомого складу. До бортової системи технічного зору для маневрового локомотива визначено такі вимоги:

- виявлення залізничної колії на відстані не менше 100 м. від локомотива для визначення регіону пошуку перешкод (похибка не повинна перевищувати 0,5 м із ймовірністю 99%);
- виявлення перешкод (об'єктів) на відстані не менше 100 м. по шляху руху та у зоні ± 5 м від осі колії. Перешкодами, які має виявляти у заданій зоні є: люди зріст яких має бути більше 1 м у положенні стоячи, вагони та локомотиви будь-якого типу, гальмівні черевики.

Для визначення шляху прямування та виявлення перешкод при русі локомотива застосовуються технічні засоби «машинного зору»: радари, лідари, стереокамери, інфрачервоні та SWIR камери, ультразвукові датчики. Бортова система здійснює виявлення перешкод, відстеження їх переміщень, класифікацію типу перешкод, пророцтво переміщення перешкод. Важливо не тільки виявити всі, що виникають перешкоди, але і знизити до мінімуму фіксування помилкових перешкод для виключення зривів графіка руху електропоїздів. Найбільші складнощі викликає виявлення перешкод на великих відстанях через значний гальмівний шлях поїзда. Всі ці засоби дозволяють побудувати систему технічного зору для безпечного керування та визначення перешкод на шляху. Таким чином, однією з Головних завдань при управлінні є своєчасне і точне розпізнавання об'єктів перешкод, а значить важливо мати реальну оцінку наявності перешкоди та враховувати підступність (дисперсію) помилок при прийнятті оптимального рішення. На сучасному етапі розвитку систем керування рухомим складом необхідно використовувати нові інтелектуальні підходи, що дозволяють найбільш ефективно використовувати всі останні досягнення в областях апаратного та математичного забезпечення. В матеріалах конференції [39] проаналізовано автоматизацію приміських перевезень та руху поїздів метро фірми Bombardier, яка розробила нове покоління системи керування поїздом CITYFLO 650, що в теперішній час діє в

тринадцяти містах по всьому світу. В метро Сантьяго, Парижу, Гонконгу та Пекіну компанія Alstom впроваджує свою розробку для автоматичного керування рухом. Ще один приклад впровадження таких технологій – копенгагенська підземка. Вона унікальна тим, що в поїздах метро немає машиніста, а управління здійснюється завдяки повністю автоматизованій системі АТС (Automatic Train Control). Дана система покликана виключити можливість людської помилки, а також більш чітко контролювати відстань між потягами (завдяки точно заданій величині гальмування і прискорення). Система АТС складається з трьох підсистем:

- Підсистема АТС (Automatic Train Supervisory) – система спостереження і контролю за маршрутами і напрямками руху потягів. Саме ця система вибирає маршрут руху потягу. Підсистема АТС, залежно від ситуації, вибирає сценарій для руху. Наприклад розрізняються сценарії: нормальний рух, рух вночі, рух при технічному обслуговуванні шляхів. Інформація про рух і маршрути потягів виводиться на монітори центру управління. Так само АТС зберігає інформацію про помилки та збої, заходи з ремонту та технічного обслуговування.
- Підсистема АТО (Automatic Train Operation) – система контролю руху на станціях, а саме зупинки потягів, відкриття дверей, очікування певного періоду часу, закриття дверей, продовження руху. Ця частина системи є аналогом автопілоту і виконує фізичну функцію машиніста потягу. Підсистема АТО працює на дуже високому рівні, і не може самостійно змінювати свої параметри, такі як швидкість гальмування або інтервал очікування на станції.
- Підсистема АТР (Automatic Train Protection) – система захисту від аварій в метро, пасажирів і персоналу від нещасних випадків (зокрема, схід з рейок, зіткнення потягів, відкривання дверей під час руху). Система перевіряє і контролює обмеження швидкості руху (три положення перемикача швидкості: початок руху або розгін, рух і гальмування), відстань між потягами, стрілочний перевід і вільний шлях (наявність на

шляху сторонніх предметів, проведення ремонтних робіт або робіт з технічного обслуговування).

В матеріалах міжнародної конференції [40] запропоновано модель тягового електричного двигуна постійного струму побудовану за допомогою MATLAB SIMULINK для можливості моделювання роботи двигуна. Практично на всіх вітчизняних локомотивах в якості тягових двигунів використовуються двигуни постійного струму з послідовним збудженням. Основне регулювання їх частоти обертання здійснюється зміною напруги живлення. Однак при збільшенні напруги до максимально можливого, подальше збільшення швидкості обертання двигуна здійснюється за допомогою зменшення магнітного потоку обмоток збудження. Блоки, які використовувалися для побудови моделі тягового електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням в програмному забезпеченні MATLAB SIMULINK [41-44]:

- Demux – демультиплексор. Розподіляє сигнали з одного входу (Вектора) на кілька виходів. У налаштуваннях блоку необхідно задати такі параметри: кількість виходів (Number of outputs); спосіб відображення (Display option). В останньому параметрі можна вибрати один з таких варіантів: вертикальний вузький прямокутник чорного кольору (bar); прямокутник з білим тлом без відображення тегів вхідні сигнали (none).
- Ideal Switch – ідеальний ключ. Здійснює замикання та розмикання ланцюгів. Має такі входи та виходи: «1» і «2» – силові контакти, між якими відбувається замикання або розмикання ланцюга; «g» - керуючий вхід; «m» - вимірювальний вихід. Розмикання ключа відбувається при подачі на керуючий вхід сигналу, що дорівнює нулю, а замикання – при подачі сигналу, що дорівнює 1 або більше. Вимірювальний вихід формує вектор, що складається з двох сигналів відповідно: струм, що проходить через силові контакти, A; напруга між затискачами силових контактів, B. Пристрій має вбудований іскрогасний RC-ланцюг, включений паралельно контактам ключа. У налаштуваннях блоку необхідно задати такі параметри: опір у замкнутому стані (Internal resistance); початкове значення

(Initial state); активний опір іскрогасної ланцюга (Snubber capacitance); ємнісний опір іскрогасного ланцюга (Snubber capacitance).

- DC Machine – електрична колекторна машина постійного струму. Має наступні входи та виходи: «A+» та «A-» – відповідно вхід та вихід обмотки якоря; «F+» і «F-» – відповідно вхід і вихід обмотки збудження; "TL" - завдання моменту опору обертанню валу якоря; "m" - вимірювальний вихід. Вимірювальний вихід формує вектор із чотирьох сигналів, відповідно: швидкість обертання; струм якоря; струм збудження; електромагнітний момент, що створюється якорем. У налаштуваннях блоку необхідно задати такі параметри: активний опір та індуктивність обмотки якоря (Armature resistance and inductance); активний опір та індуктивність обмотки збудження (Field resistance and inductance); взаємна індуктивність між обмоткою якоря та обмоткою збудження (Field-armature mutual inductance); момент інерції двигуна (Total inertia); коефіцієнт в'язкого тертя (Viscous friction coefficient); реактивний момент опору (Coulomb friction torque); початкова швидкість обертання якоря (Initial speed).

Крім представлених блоків, у моделі використовуються: Ground, DC Voltage Source, Scope, Gain, Step, Current Measurement, Series RLC Branch, Voltage Measurement.

Автоматичне керування рухомим складом [45-48] може підвищити безпеку та надійність експлуатації локомотивів, зменшити кількість споживання енергоресурсів та зменшити інтенсивність навантаження на роботу машиніста [9,49-52]. У роботах [53-55] пропонується підхід інтелектуальної експлуатації поїздів на основі поєднання експертних знань та алгоритмів видобутку даних. Досліджено роботу системи міського рейкового транспорту (URTS) з підтримкою машинного навчання (ML) включаючи сприйняття перешкод, сприйняття інфраструктури, прогнозування пасажиропотоку, прогнозування затримки поїздів, прогнозування несправностей, прогнозування залишкового терміну служби, оптимізації експлуатації та контролю поїздів, оптимізацію диспетчеризації поїздів і оптимізації наземних комунікацій поїздів. Також представлено дискусію щодо майбутніх викликів та напрямків розвитку URTS

на основі ML Одним із запропонованих – є алгоритм регресії під назвою CART (Classification And Regression Tree) інші алгоритми базуються на основі глибокого детермінованого градієнта (STOD), та на основі нормалізованої функції переваги (STON). Запропоновані алгоритми можуть реалізувати управління локомотивом неперервної дії та оптимізувати кілька критичних цілей без використання офлайн профілю швидкості. В статтях [56,57] розглянуто загальні алгоритми керування автоматичною системою керування поїздів, а саме: керування за допомогою алгоритмів штучної нейронної мережі та нечітке керування за допомогою нечіткого контролера який є важливою частиною всієї системи, яка складається з фазифікації, дефазифікації, бази знань та нечіткого висновку. Даний контролер з відкритим циклом зворотного зв'язку є відповідальним за усунення відхилення спричиненого перешкодами під час роботи поїзда за допомогою пропорційного контролера, інтегрального контролера та диференційного контролера. В роботі [57] розглянуто двохшарову структуру управління системою автоматичного керування поїздами: управління верхнього рівня полягає в оптимізації цільової швидкісної кривої, а управління нижнього рівня – в відстеженні міським залізничним транспортом оптимальної цільової швидкісної кривої. Для управління верхнього рівня спочатку створюється багатоцільова модель експлуатації поїздів з показниками витрати енергоресурсів, точністю часу руху як оптимізаційними індексами та застосовується метод ваги ентропії для вирішення коефіцієнта ваги кожного індексу. Також використовується генетичний алгоритм для оптимізації моделі та отримання оптимальної цільової швидкісної кривої. У дослідженні [58] використовується технологія нечіткого прогнозування для забезпечення ефективних умов експлуатації рухомого складу, що відкриває великий потенціал для керування складними системами. У роботі [59] поточна поїзна обстановка представляється у вигляді нечіткої ситуації. Отримана вхідна нечітка ситуація порівнюється з усіма типовими ситуаціями, що знаходяться в пам'яті інтелектуальної системи. Такий підхід дозволяє реалізувати найшвидший та нескладний алгоритм визначення стану поїзда під час руху для інтелектуальної

системи керування. В статті [60] пропонується система контролю боксування коліс локомотива на основі нечіткого логічного висновку, яка запобігає боксованню коліс та одночасно відстежує профіль ділянки та швидкість на ньому. За допомогою FOC (field-oriented control) в якому блок гістерезису генерує перемикаючий сигнал для інвертора, щоб виробити відповідну напругу та контролювати кутову швидкість тягового електричного двигуна. В статті [61] пропонується автоматичне керування вантажними поїздами на основі алгоритмів з нечіткими регуляторами ММ-FPID (Multi-modal fuzzy PID) та інтегрованим контролером. В роботі [62] пропонується ефективний метод аналізу на основі нечітких даних та нечіткого мислення для великих об'ємів даних системи керування швидкісними поїздами Китаю. В статті [63] використовується метод К-середніх кластеризацій для ідентифікації повторних подій затримок на високозавантажених залізничних лініях Копенгагена. Кластери визначають поведінкові данні, які генеруються автоматично та безперервно системою сигналізації залізниць. Результати методу показують коли необхідно коректувати дії, вказуючи випадки де відбувалася повторна затримка поїздів. Даний метод може ідентифікувати та відрізнати різні умови, які впливають на рух поїзда на однаковій ділянці. В статті [64] пропонується використовувати рекурентну нейронну мережу з LSTM (long-short-term memory) для виявлення та ідентифікації несправностей на залізничному транспорті, тестування даної системи показало, що мережа правильно з точністю 99,7 % класифікує та виявляє несправності.

У 1973 році Лотфі Заде опублікував свою другу найвпливовішу статтю [65] у якій виклав новий підхід до аналізу складних систем та запропонував описати процедуру людського висновку у нечітких правилах. Нечітке правило може бути визначено як умовний вираз у формі:

$$\text{ЯКЩО } (x) \text{ дорівнює } (A) \text{ тоді } (y) \text{ дорівнює } (B) \quad (1.23)$$

де $\backslash(x\backslash)$ та $\backslash(y\backslash)$ – лінгвістичні змінні.

У загальному випадку міркування **ЯКЩО – ТОДІ** включає дві окремі частини: оцінка правила (**ЯКЩО** частина правила) і застосування результату до наступного (**ТОДІ** частина правила). Класичне правило **ЯКЩО – ТОДІ** використовує двійкову логіку, тобто, якщо перша частина вірна, вірна і друга і навпаки. У разі вірності з деяким ступенем умови **ЯКЩО**, отримуємо, що з тим самим ступенем це буде вірно і для умови **ТОДІ**.

Одним з найбільш зручних засобів програмування в галузі нечіткої логіки є середовище Fuzzy Logic пакету прикладних програм Matlab [66-70]. Основна перевага цього методу – візуальне моделювання, коли можна створювати досить складні програми без написання програмного коду. Для створення програм моделювання в Matlab (Fuzzy Logic) використовуються алгоритми Мамдані або Сугено [71-75].

Алгоритм Мамдані [76-78] описує кілька етапів, що послідовно виконуються (рисунок 1.7) [79]. При цьому кожен наступний етап отримує на вхід значення, отримані на попередньому кроці.

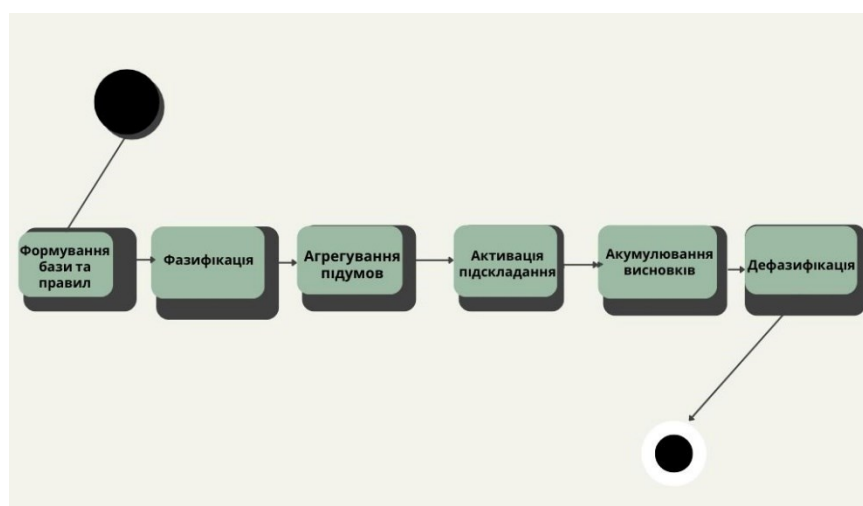


Рисунок 1.7. Діаграма діяльності процесу нечіткого висновку

Алгоритм працює за принципом «чорної скриньки» [80-82]. На проміжних етапах використовується апарат нечіткої логіки та теорія нечітких множин. У цьому полягає елегантність використання нечітких систем. Можна маніпулювати звичними числовими даними, але використовувати гнучкі можливості, які надають системи нечіткого висновку.

Для реалізації алгоритму використовувався об'єктно-орієнтований підхід. Вихідний код написаний мовою програмування Java. Діаграма (рисunek 1.8.) вказує на найбільш істотні зв'язки і відносини між класами, задіяними в алгоритмі.

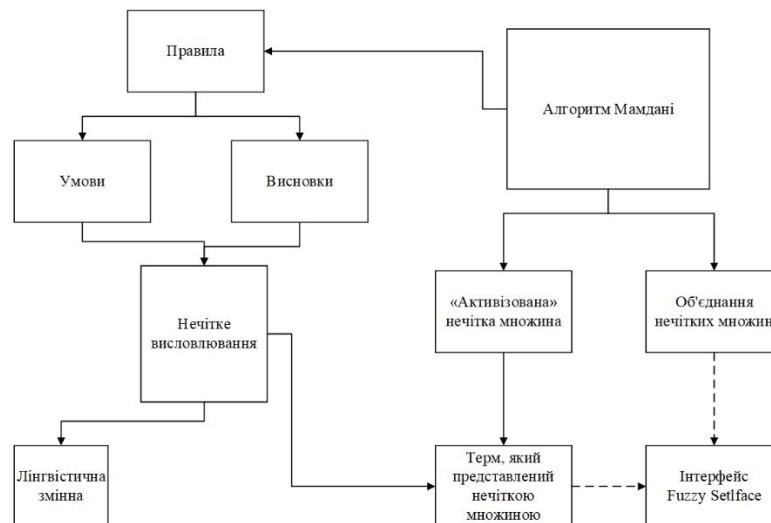


Рисунок 1.8. Діаграма класів реалізації алгоритму Мамдані

Правила (Rule) складаються з умов (Condition) та висновків (Conclusion), які у свою чергу є нечіткими висловлюваннями (Statement). Нечітке висловлювання включає лінгвістичну змінну (Variable) і терм, який представлений нечіткою множиною (FuzzySet). На нечіткій множині визначено функцію належності, значення якої можна отримати за допомогою методу `getValue()`. Це метод, визначений в інтерфейсі `FuzzySetIface`. При виконанні алгоритму необхідно буде скористатися «активізованою» нечіткою множиною (`ActivatedFuzzySet`), яка певним чином перевизначає функцію приналежності нечіткої множини (`FuzzySet`). Також в алгоритмі використовується об'єднання нечітких множин

(UnionOfFuzzySets). Об'єднання також є нечіткою множиною, і тому має функцію приналежності (визначену FuzzySetIface). Алгоритм Мамдані (MamdaniAlgorithm), включає всі етапи (рисунок 1.6.) і використовує базу правил (List<Rule>) як вхідних даних. Також алгоритм передбачає використання «активізованих» нечітких множин (ActivatedFuzzySet) та їх об'єднань (UnionOfFuzzySets).

Отже, етапи нечіткого виведення виконуються послідовно. І всі значення, набуті на попередньому етапі, можуть використовуватися на наступному.

Формування бази правил.

База правил — це множина правил, де кожному підвисновку відповідає певний ваговий коефіцієнт.

База правил може мати такий вигляд (для прикладу використовуються правила різних конструкцій):

RULE_1: IF «Condition_1» THEN «Conclusion_1» (F_1) AND «Conclusion_2» (F_2);

RULE_2: IF «Condition_2» AND «Condition_3» THEN «Conclusion_3» (F_3);

...

RULE_n: IF «Condition_k» THEN «Conclusion_(q-1)» (F_{q-1}) AND «Conclusion_q» (F_q),

F_i — вагові коефіцієнти, що означають ступінь впевненості в істинності отриманого підвисновку ($i = 1..q$). За замовчуванням ваговий коефіцієнт приймається рівним 1. Лінгвістичні змінні, присутні в умовах, називаються вхідними, а у висновках — вихідними.

Фазифікація вхідних змінних.

Цей етап часто називають приведенням до нечіткості. На вхід надходять сформована база правил та масив вхідних даних $A = \{a_1, ..., a_m\}$. У цьому масиві містяться значення всіх вхідних змінних. Метою цього етапу є отримання значень істинності для всіх підумов із бази правил. Це відбувається таким чином:

для кожної з підумов знаходиться значення $b_i = \mu(a_i)$. Таким чином отримується множина значень b_i ($i = 1..k$).

Агрегування підумов.

Як уже згадувалося вище, умова правила може бути складною, тобто включати підумови, пов'язані між собою за допомогою логічної операції «AND». Метою цього етапу є визначення ступеня істинності умов для кожного правила системи нечіткого висновку. Спрощено кажучи, для кожної умови знаходимо мінімальне значення істинності всіх його підумов. Формально це виглядає так:

$$c_j = \min \{b_i\}, \quad (1.24)$$

де $j=1..n$;

i – число з множини номерів підумов, у яких бере участь j -та вхідна змінна.

Активізація підвисновків.

На цьому етапі відбувається перехід від умов до підвисновків. Для кожного підвисновку знаходиться ступінь істинності $d_i = c_i \cdot F_i$ де, $i = 1..q$. Потім, кожному i -му підвисновку зіставляється множина D_i з новою функцією належності. Її значення визначається як мінімум з d_i та значення функції належності терма з підвисновку. Цей метод називається min-активізацією, який формально записується наступним чином:

$$\mu_i^*(x) = \min \{d_i, \mu_i(x)\}, \quad (1.25)$$

де $\mu_i^*(x)$ – «активізована» функція належності;

$\mu_i(x)$ – функція належності терма;

d_i – ступінь істинності i -го підвисновку.

Мета цього етапу полягає в отриманні набору "активізованих" нечітких множин D_i для кожного з підвисновків у базі правил ($i = 1..q$).

Акумуляція висновків.

Ціллю цього етапу є отримання нечітких множин (або їх об'єднання) для кожної з вихідних змінних. Це виконується так: i -й вихідній змінній зіставляється об'єднання множин $E_i = \cup D_j$ де, j — номери підвисновків, в яких бере участь i -та вихідна змінна ($i = 1..s$). Об'єднанням двох нечітких множин має представлення, як третя нечітка множина з такою функцією належності:

$$\mu_i(x) = \max \{ \mu_1(x), \mu_2(x) \}, \quad (1.26)$$

де $\mu_1(x), \mu_2(x)$ — функції належності об'єднуваних множин.

Дефазифікація вихідних змінних.

Ціллю дефазифікації є отримання кількісного значення (crisp value) для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Розглядається i -та вихідна змінна і належна до неї множина E_i ($i = 1..s$). Потім за допомогою методу дефазифікації знаходиться кінцеве кількісне значення вихідної змінної. У даній реалізації алгоритму використовується метод центру ваги (центра тяжіння), за яким значення i -тої вихідної змінної розраховується за формулою:

$$y = \frac{\int_{Min}^{Max} x \cdot \mu_i(x) dx}{\int_{Min}^{Max} \mu_i(x) dx}, \quad (1.27)$$

де $\mu_i(x)$ — функція належності відповідно] нечітко] множини E_i ;

Min та Max — границі універсуму нечітких змінних;

y_i — результат дефазифікації.

Висновки по розділу 1.

1. Проведений аналіз показує, що тягові розрахунки є ключовим елементом у залізничному транспорті. Вони включають визначення допустимої маси поїзда, обчислення швидкості та часу руху, розрахунку витрат палива та електроенергії, а також розв'язання задач, пов'язаних з гальмуванням. Сучасні методи тягових розрахунків базуються на використанні комп'ютерного моделювання, що дозволяє підвищити точність та автоматизувати розрахунки.

2. Аналіз методів визначення опору руху показав, що основний питомий опір локомотива та вагонів можна точно визначити за допомогою спеціальних формул, що враховують швидкість руху та середню масу вагонів. Визначення питомого опору для різних типів вагонів дозволяє точніше оцінювати опір руху складу та локомотива.

3. Для аналітичного опису тягової характеристики маневрового локомотива ЧМЕЗ було обрано наступні види регресії:

- Для 1-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 4.9%;
- для 2-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 2.2%;
- для 3-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 2.3%;
- для 4-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 4.3%;
- для 5-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 9%;
- для 6-ї позиції контролера машиніста – гіперболічна регресія похибка 12.2%;
- для 7-ї позиції контролера машиніста – гіперболічна регресія похибка 8.3%;
- для 8-ї позиції контролера машиніста – гіперболічна регресія похибка 3.9%;

Отримані аналітичні описи з 1 позиції контролера машиніста по 8 дозволяють визначити силу тяги локомотива в поточний момент швидкості, що необхідно для створення математичної моделі руху маневрових локомотивів.

Для аналітичного опису струмової характеристики тягового генератора маневрового локомотива ЧМЕЗ було обрано наступні види регресії:

- Для 1-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 1.2%;
- для 2-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 1.3%;
- для 3-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 1.9%;
- для 4-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 2.6%;
- для 5-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 12.3%;
- для 6-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 10.6%;
- для 7-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 9.7%;
- для 8-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 10.8%;

Отримані вирази, які відображають залежність струму генератора від швидкості руху локомотива на різних позиціях контролера машиніста є важливими для математичної моделі визначення тяго-енергетичних показників маневрового локомотива.

5. Для аналітичного опису навантажувальної характеристики маневрового локомотива ЧМЕЗ було обрано наступні види регресії:

- Для 1-ї позиції контролера машиніста – квадратична регресія похибка 0.05 %;
- для 2-ї позиції контролера машиніста – квадратична регресія похибка 0.4%;
- для 3-ї позиції контролера машиніста – квадратична регресія похибка 0.2%;
- для 4-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.4%;
- для 5-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.2%;
- для 6-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.3%;
- для 7-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.04%;
- для 8-ї позиції контролера машиніста – кубічна регресія похибка 0.5%.

Отримані вирази, які відображають залежність витрати палива від потужності локомотива на різних позиціях контролера машиніста необхідні для

математичної моделі визначення тяго-енергетичних показників маневрового локомотива.

6. Проведений аналіз охопив широкий спектр тем, пов'язаних зі штучним інтелектом, його основні концепції і теоретичні підходи, а також практичні аспекти застосування в залізничному транспорті. Аналіз сучасного стану сфери залізничного транспорту, з огляду на цифрові технології та використання штучного інтелекту для процесів керування, дозволив сформулювати наукову гіпотезу:

Впровадження методів теорії штучного інтелекту для вдосконалення систем управління тяговою електричною передачею маневрових локомотивів, зокрема, для управління схемою підключення тягових електричних двигунів на часткових навантаженнях, **дозволить** зменшити витрати енергоресурсів та підвищити ефективність експлуатації локомотивів.

7. Досліджено процеси побудови нечітких систем керування, що включають етапи формування правил, фазифікацію вхідних змінних, агрегування підумов, активізації підвисновків, акумуляції висновків та дефазифікації вихідних змінних.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА ЧМЕЗ

2.1. Математична модель визначення тягово – енергетичних показників маневрового локомотиву ЧМЕЗ.

Для визначення прискорення локомотива a , м/с^2 , використовуючи другий закон Ньютона [3] отримаємо математичний вираз 2.1:

$$F_k - F_{\text{опору}} = m \cdot a, \quad (2.1)$$

де F_k – сила тяги локомотива, Н;

$F_{\text{опору}}$ – сили опору руху, Н;

m – маса складу, кг;

a – прискорення, м/с^2 .

З виразу 2.1 отримуємо формулу для визначення прискорення:

$$a = \frac{F_k - F_{\text{опору}}}{\Sigma m} = \frac{F_k - (W_{04} + W_l)}{(m_s + m_l)}, \quad (2.2)$$

де F_k – сила тяги локомотива, Н;

W_{04} – основний питомий опір руху поїзда, Н;

W_l – основний питомий опір руху локомотива, Н;

$m_s + m_l$ – сумарна маса локомотива та рухомого складу, кг.

Для подальших розрахунків необхідно задати початкові значення, а саме:

n_{ted} – кількість тягових електричних двигунів задіяних під час руху, для наступних розрахунків приймаємо при 6 тягових електричних двигуна $n_{ted}=1$, при 4 тягових електричних двигунах $n_{ted}=0,66$, при 2 тягових електричних двигунах $n_{ted}=0,33$;

m_l – маса локомотива (маса локомотива ЧМЕЗ=123т=123000кг, значення $m_l = 123000$ кг);

m_s – маса складу (обираю для подальших розрахунків 10-ть 4 – х вісних вагонів вагою 65 т., та отримую значення ($m_s=65 \cdot 10=650$ т.=650000 кг.) $m_s = 650000$ кг);

q_{04} – середня маса, т/вісь, яка припадає відповідно на вісь чотиривісного вагона, розраховується за формулою та дорівнює $q_{04} = 65/4 = 16.25$ т/вісь.;

$V_{початкове}$ – початкова швидкість локомотива в км/год. (1 км/год);

t_{int} – інтервал часу (1 с.);

F_k – сила тяги локомотива в кН, яка розраховується за допомогою апроксимації тягових характеристик кожної позиції тепловозу ЧМЕЗ:

$$F_{k(v)(n=1-8)} = \left\{ \begin{array}{l} n(1) = (-0.080505135850 \cdot v_{початкове}^3 + 2.238027844591 \cdot v_{початкове}^2 - \\ -22.641524794786 \cdot v_{початкове} + 89.921742894152) / n_{ted}; \\ n(2) = (-0.032150532924 \cdot v_{початкове}^3 + 1.562047393700 \cdot v_{початкове}^2 - \\ -27.261434119980 \cdot v_{початкове} + 183.580186742646) / n_{ted}; \\ n(3) = (-0.023211278269 \cdot v_{початкове}^3 + 1.400358362989 \cdot v_{початкове}^2 - \\ -30.194326017237 \cdot v_{початкове} + 249.846466524097) / n_{ted}; \\ n(4) = (-0.019800384389 \cdot v_{початкове}^3 + 1.374500578106 \cdot v_{початкове}^2 - \\ -33.445068375640 \cdot v_{початкове} + 316.639742033270) / n_{ted}; \\ n(5) = (-0.006130456034 \cdot v_{початкове}^3 + 0.719834107961 \cdot v_{початкове}^2 - \\ -26.818071101212 \cdot v_{початкове} + 355.178953482622) / n_{ted}; \\ n(6) = (5.544236118343 + (1570.811910729401 / v_{початкове})) / n_{ted}; \\ n(7) = (0.029463790857 + (2170.893620785641 / v_{початкове})) / n_{ted}; \\ n(8) = (-6.569976284604 + (2881.547102950061 / v_{початкове})) / n_{ted}. \end{array} \right\}, \quad (2.3)$$

g_e – витрата палива в $г/кВт \cdot год$, визначається за допомогою навантажувальної характеристики $g_e = f(N_e, n_k)$ тепловоза ЧМЕЗ та за допомогою отриманих аналітичних описів даної характеристики.

Для розрахунку g_e – витрата палива в $г/кВт \cdot г$ необхідно розрахувати потужності локомотива N_e в кВт в момент швидкості за формулою:

$$N_{e(v)} = F_{k(v)}(n=1-8) \cdot v_{\text{початкове}}, \quad (2.4)$$

де F_k – сила тяги розрахована за формулою (2.3) в кН;

$v_{\text{початкове}}$ – початкова швидкість руху локомотива в км/год.

Маючи значення потужності N_e , розраховане в формулі (2.4) та використовуючи математичний вираз апроксимації навантажувальної характеристики визначаємо витрату палива:

$$g_{e(N_e)(n=1-8)} = \left\{ \begin{array}{l} n(1) = 0.000481264530 \cdot N_{e(v)}^2 - 0.312913406169 \cdot N_{e(v)} + \\ + 263.219267391556; \\ n(2) = (0.000476662741 \cdot N_{e(v)}^2 - 0.331821612763 \cdot N_{e(v)} + \\ + 269.226459118770; \\ n(3) = (0.000419023539 \cdot N_{e(v)}^2 - 0.314625500417 \cdot N_{e(v)} + \\ + 269.324921960171; \\ n(4) = (-0.000000858604 \cdot N_{e(v)}^3 + 0.001245707646 \cdot N_{e(v)}^2 - \\ - 0.532820384497 \cdot N_{e(v)} + 280.257843464438); \\ n(5) = (-0.000000207790 \cdot N_{e(v)}^3 + 0.000546165820 \cdot N_{e(v)}^2 - \\ - 0.355855694781 \cdot N_{e(v)} + 278.713172513817); \\ n(6) = (-0.000000173038 \cdot N_{e(v)}^3 + 0.000056198282 \cdot N_{e(v)}^2 - \\ - 0.235582609766 \cdot N_{e(v)} + 295.787247710861); \\ n(7) = (-0.000000304417 \cdot N_{e(v)}^3 + 0.000786400402 \cdot N_{e(v)}^2 - \\ - 0.612127301581 \cdot N_{e(v)} + 363.399701937335); \\ n(8) = (-0.000000247008 \cdot N_{e(v)}^3 + 0.000249910245 \cdot N_{e(v)}^2 - \\ - 0.033851192798 \cdot N_{e(v)} + 279.915981046855). \end{array} \right. , \quad (2.5)$$

Для визначення ваги Q'' в Н поїзда виконую наступний розрахунок:

$$Q'' = m_s \cdot g, \quad (2.6)$$

де m_s – маса складу в кг;

g – прискорення вільного падіння в м/с^2

Для визначення питомого опору руху для 4-х вісних вагонів w''_{04} , Н/кН необхідно розрахувати наступну формулу [9,17,18,19]:

$$w''_{04} = 0.7 + \frac{3 + 0.1 \cdot v_{\text{початкове}} + 0.0025 \cdot v_{\text{початкове}}^2}{16.25}, \quad (2.7)$$

Для визначення основного питомого опору руху поїзда W_{04} , Н необхідно використати отримані значення з формул (2.6), (2.7) та виконати наступний розрахунок:

$$W_{04} = \frac{(w_{04}'' \cdot Q'')}{1000}, \quad (2.8)$$

Для визначення ваги локомотива $Q''l$ в Н розраховуємо формулу:

$$Q''l = m_l \cdot g, \quad (2.9)$$

де m_l – маса складу в кг;

g – прискорення вільного падіння в м/с².

Визначаємо основний опір руху локомотива [9,17-19] w'_0 в Н/кН:

$$w'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot v_{\text{початкове}} + 0,0003 \cdot v_{\text{початкове}}^2, \quad (2.10)$$

де $v_{\text{початкове}}$ – початкова швидкість локомотива в км/год.

Для визначення основного опору руху локомотива Wl , Н необхідно використати отримані значення з формул (2.9), (2.10) та виконати наступний розрахунок:

$$Wl = \frac{(w'_0 \cdot Q''l)}{1000}, \quad (2.11)$$

Отримавши значення прискорення локомотива a , розраховані за формулою (2.2) визначаємо поточну швидкість $v_{\text{поточне}}$ локомотива через момент часу t_{int} в км/год.:

$$v_{\text{поточне}} = v_{\text{початкове}} + a \cdot t_{\text{int}}, \quad (2.12)$$

де $v_{\text{початкове}}$ — початкова швидкість локомотива в м/с;

a — прискорення локомотива в м/с²;

t_{int} — інтервал часу в секундах.

Для визначення пройденого шляху локомотивом S_{pr} в метрах через t_{int} часу необхідно розрахувати наступну формулу:

$$S_{pr} = v_{\text{поточне}} \cdot t_{\text{int}}, \quad (2.13)$$

де $v_{\text{поточне}}$ — поточна швидкість локомотива в м/с;

t_{int} — інтервал часу в секундах.

Отримавши значення пройденого шляху локомотивом можливо розрахувати скільки палива локомотив витратив на виконану роботу в г :

$$Ge = \sum_{i=t}^{t_{\text{заг}}} \frac{F_k \cdot S_{\text{пройдене}}}{t_{\text{int}}} \cdot \frac{g_e}{3600}, \quad (2.14)$$

Для визначення сили струму тягового генератора тепловоза необхідно розрахувати наступну формулу:

$$I_{g(n=1-8)} = \left\{ \begin{array}{l} n(1) = (-0.244283389122 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 10.117645222611 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -187.225943274650 \cdot v_{\text{поточне}} + 1355.282116901837); \\ n(2) = (-0.172580287098 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 10.267841283206 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -222.285147938202 \cdot v_{\text{поточне}} + 1904.678075702185); \\ n(3) = (-0.123756657010 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 9.260371985943 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -239.534045890959 \cdot v_{\text{поточне}} + 2385.843400085908); \\ n(4) = (-0.062800686297 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 6.390252012658 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -210.531352796392 \cdot v_{\text{поточне}} + 2657.169136269626); \\ n(5) = (-0.048439971261 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 5.250673712658 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -178.699401037599 \cdot v_{\text{поточне}} + 2915.541398677036); \\ n(6) = (-0.046333703081 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 5.141898323636 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -179.055333016683 \cdot v_{\text{поточне}} + 3232.974202105790); \\ n(7) = (-0.007916688563 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 1.038431429679 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -57.587817865437 \cdot v_{\text{поточне}} + 2700.567884519725); \\ n(8) = (-0.005271858772 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 0.782642217206 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -47.499846808688 \cdot v_{\text{поточне}} + 2727.649898947369). \end{array} \right. , \quad (2.15)$$

Для визначення перевищення температури ТЕД над навколишньою середою використовуємо отримані аналітичні вирази апроксимації струмової характеристики тягового електричного генератора маневрового локомотива для отримання значення струму тягового електричного двигуна ТЕ-006.

Значення струму ТЕ-006 розраховується за наступною формулою:

$$I_{Д(n=1-8)} = \left\{ \begin{array}{l} n(1) = (-0.244283389122 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 10.117645222611 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -187.225943274650 \cdot v_{\text{поточне}} + 1355.282116901837) / n_{\text{ted}} \\ n(2) = (-0.172580287098 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 10.267841283206 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -222.285147938202 \cdot v_{\text{поточне}} + 1904.678075702185) / n_{\text{ted}} \\ n(3) = (-0.123756657010 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 9.260371985943 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -239.534045890959 \cdot v_{\text{поточне}} + 2385.843400085908) / n_{\text{ted}} \\ n(4) = (-0.062800686297 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 6.390252012658 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -210.531352796392 \cdot v_{\text{поточне}} + 2657.169136269626) / n_{\text{ted}} \\ n(5) = (-0.048439971261 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 5.250673712658 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -178.699401037599 \cdot v_{\text{поточне}} + 2915.541398677036) / n_{\text{ted}} \\ n(6) = (-0.046333703081 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 5.141898323636 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -179.055333016683 \cdot v_{\text{поточне}} + 3232.974202105790) / n_{\text{ted}} \\ n(7) = (-0.007916688563 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 1.038431429679 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -57.587817865437 \cdot v_{\text{поточне}} + 2700.567884519725) / n_{\text{ted}} \\ n(8) = (-0.005271858772 \cdot v_{\text{поточне}}^3 + 0.782642217206 \cdot v_{\text{поточне}}^2 - \\ -47.499846808688 \cdot v_{\text{поточне}} + 2727.649898947369) / n_{\text{ted}} \end{array} \right\},$$

(2.16)

Температури перевищення над навколишньою середою ТЕД розраховуємо за формулою використовую теплову характеристику ТЕД ТЕ-006 [18]:

$$T = (0.000000364219 \cdot I_{Д}^3 - 0.000310314685 \cdot I_{Д}^2 + \\ + 0.148228438228 \cdot I_{Д} + 32.699300699231) * \\ * (1 - 2.72^{-\left(\frac{t}{0.000000065851 \cdot I_{Д}^3 - 0.000038170163 \cdot I_{Д}^2 + 0.014696969697 \cdot I_{Д} + 29.993006992981} \right)}),$$

(2.16)

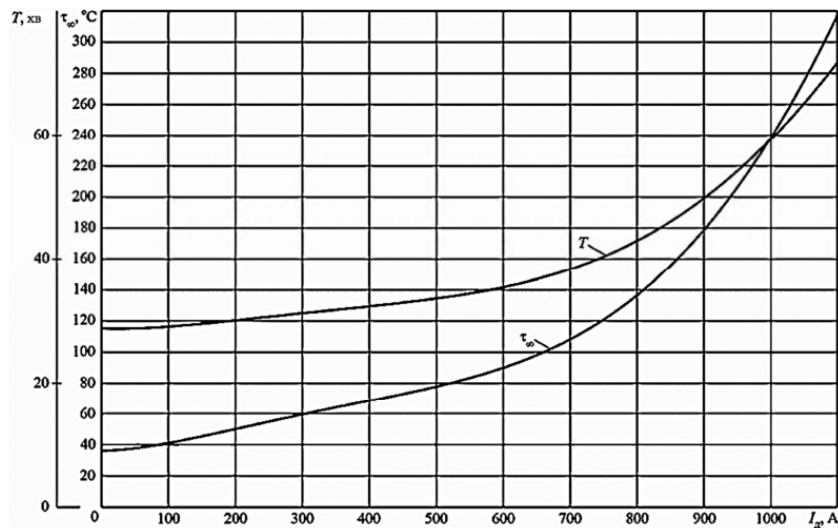


Рисунок 2.1. Теплова характеристика ТЕД ТЕ-006 тепловозу ЧМЕЗ

Розроблена математична модель визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ відрізняється від існуючих моделей можливістю розрахунку основних параметрів на часткових навантаженнях.

Основні формули на яких базується математичне модель мають наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
1) a &= \frac{F_k - F_{опору}}{\Sigma m} = \frac{F_k - (W_{04} + W_l)}{(m_s + m_l)}; \\
2) F_{k(v)(n=1-8)} &= -0.023211278269 \cdot v_{початкове}^3 + 1.400358362989 \cdot v_{початкове}^2 - \\
&- 30.194326017237 \cdot v_{початкове} + 249.846466524097 \cdot n_{ted}; \\
3) N_{e(v)} &= F_{k(v)(n=1-8)} \cdot v_{початкове}; \\
4) w_{04}'' &= 0.7 + \frac{3 + 0.1 \cdot v_{початкове} + 0.0025 \cdot v_{початкове}^2}{16.25}; \\
5) w_o' &= 1,9 + 0,01 \cdot v_{початкове} + 0,0003 \cdot v_{початкове}^2; \\
6) v_{поточне} &= v_{початкове} + a \cdot t_{int}; \\
7) S_{pr} &= v_{поточне} \cdot t_{int}; \\
8) G_e &= \sum_{i=t}^{t_{заг}} \frac{F_k \cdot S_{пройдене}}{t_{int}} \cdot \frac{g_e}{3600}; \\
9) I_{g(n=1-8)} &= (-0.062800686297 \cdot v_{поточне}^3 + 6.390252012658 \cdot v_{поточне}^2 - \\
&- 210.531352796392 \cdot v_{поточне} + 2657.169136269626); \\
10) I_{Д(n=1-8)} &= (-0.062800686297 \cdot v_{поточне}^3 + 6.390252012658 \cdot v_{поточне}^2 - \\
&- 210.531352796392 \cdot v_{поточне} + 2657.169136269626) / n_{ted}; \\
11) T &= (0.000000364219 \cdot I_{Д}^3 - 0.000310314685 \cdot I_{Д}^2 + \\
&+ 0.148228438228 \cdot I_{Д} + 32.699300699231) \cdot \\
&\cdot (1 - 2.72^{-\left(\frac{t}{0.000000065851 \cdot I_{Д}^3 - 0.000038170163 \cdot I_{Д}^2 + 0.014696969697 \cdot I_{Д} + 29.993006992981}\right)}); \\
12) \eta_{ов} &= 0.000000001033 \cdot I_{ted}^3 - 0.000002543096 \cdot I_{ted}^2 + \\
&+ 0.001610375133 \cdot I_{ted} + 0.661515391315; \\
13) \eta_{mг} &= 0.000000000014 \cdot I_g^3 - 0.000000106362 \cdot I_g^2 + \\
&+ 0.000343623240 \cdot I_g + 0.536283396886; \\
14) \eta_{лок.} &= \eta_{ов.} \cdot \eta_{mг.} \cdot \eta_{ред.}
\end{aligned} \right\}$$

Використовуючи результати розрахунку моделі тягового-енергетичних показників отримуємо графічні залежності $F_k = f(v)$; $I_g = f(v)$; $I_{ted} = f(v)$; $t = f(S_{pr})$; $G_e = f(S_{pr})$; $T = f(S_{pr})$ руху локомотива з різним з'єднанням ТЕД з 3 – 8 позицію контролера машиніста [83]. Для дистанції руху обрана пряма ділянка шляху довжиною 300 м. Отримані графічні залежності представлені в ДОДАТКУ В.

2.2. Розрахунок коефіцієнту корисної дії маневрового локомотива ЧМЕЗ.

Відповідно до характеристик локомотивів серії ЧМЕЗ коефіцієнт корисної дії (ККД) складається з декількох факторів:

- 1) ККД тягового електричного двигуна ТЕ006;
- 2) ККД тягового генератора ТД006;
- 3) ККД редуктора тепловоза;

- 1) ККД тягового електричного двигуна ТЕ006. Для аналітичного опису проведено апроксимацію графіків ККД ТЕД рисунок 1.1. та отримано аналітичний опис даної характеристики.

Аналітичний опис ККД ТЕД має наступний вигляд:

- Для опису була обрана кубічна регресія похибка якої становила 4.6 %, та отримано математичний вираз:

$$\eta_{\partial\partial} = 0.000000001033 \cdot I_{ted}^3 - 0.000002543096 \cdot I_{ted}^2 + 0.001610375133 \cdot I_{ted} + 0.661515391315, \quad (2.17)$$

де I_{ted} – сила струму тягового двигуна, А

Використовуючи розрахунки математичної моделі визначення тягово-енергетичних показників будуємо графіки ККД ТЕД в залежності від пройденого шляху для 3,4,5,6,7,8 позиції контролера машиніста при різних варіантах підключення двигунів з 10 4-х вісними вагонами.

Для 3-ї позиції графічна залежність ККД двигуна ($\eta_{дв}$) від пройденого шляху ($S_{пр}$) має наступний вигляд:

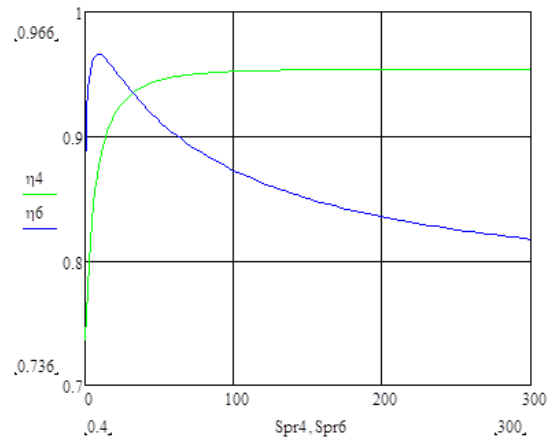


Рисунок 2.2. Графічна залежність $\eta_{\text{дв}} = f(S_{\text{пр}})$:

$\eta_4 = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_6 = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 4-ї позиції графічна залежність ККД двигуна ($\eta_{\text{дв}}$) від пройденого шляху ($S_{\text{пр}}$) має наступний вигляд:

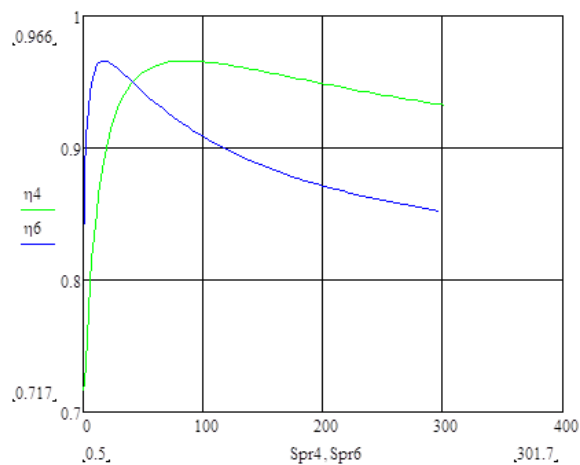


Рисунок 2.3. Графічна залежність $\eta_{\text{дв}} = f(S_{\text{пр}})$:

$\eta_4 = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_6 = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 5-ї позиції графічна залежність ККД двигуна ($\eta_{\text{дв}}$) від пройденого шляху ($S_{\text{пр}}$) має наступний вигляд:

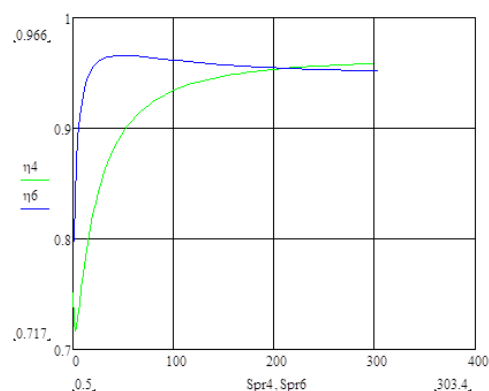


Рисунок 2.4. Графічна залежність $\eta_{\text{дв}} = f(S_{\text{пр}})$:

$\eta_4 = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_6 = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 6-ї позиції графічна залежність ККД двигуна ($\eta_{\text{дв}}$) від пройденого шляху ($S_{\text{пр}}$) має наступний вигляд:

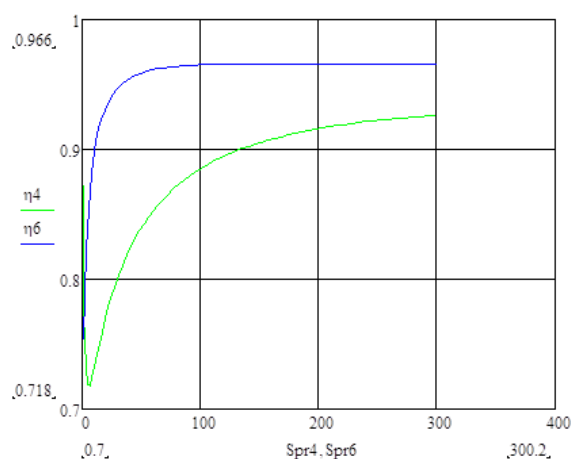


Рисунок 2.5. Графічна залежність $\eta_{\text{дв}} = f(S_{\text{пр}})$:

$\eta_4 = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_6 = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 7-ї позиції графічна залежність ККД двигуна ($\eta_{\text{дв}}$) від пройденого шляху ($S_{\text{пр}}$) має наступний вигляд:

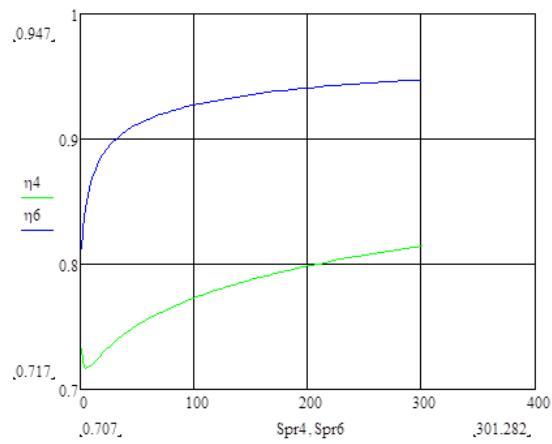


Рисунок 2.6. Графічна залежність $\eta_{\text{дв}} = f(S_{\text{пр}})$:

$\eta_4 = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_6 = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 8-ї позиції графічна залежність ККД двигуна ($\eta_{\text{дв}}$) від пройденого шляху ($S_{\text{пр}}$) має наступний вигляд:

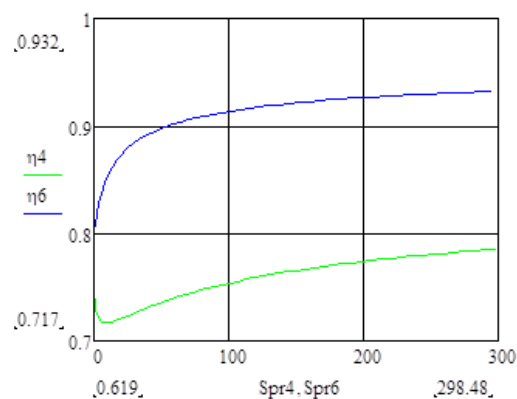


Рисунок 2.7. Графічна залежність $\eta_{\text{дв}} = f(S_{\text{пр}})$:

$\eta_4 = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_6 = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

- 2) ККД тягового генератора TD-008. Для аналітичного опису проведено апроксимацію графіків ККД генератора та отримано аналітичний опис.

Аналітичний опис ККД тягового генератора має наступний вигляд:

- Для опису була обрана кубічна регресія похибка якої становила 1 %, та отримано математичний вираз:

$$\eta_{mg} = 0.0000000000014 \cdot I_g^3 - 0.000000106362 \cdot I_g^2 + 0.000343623240 \cdot I_g + 0.536283396886, \quad (2.18)$$

де I_g – сила струму тягового генератора, А

Використовуючи розрахунки математичної моделі визначення тягово-енергетичних показників будуюмо графіки ККД генератора в залежності від пройденого шляху для 3,4,5,6,7,8 позиції контролера машиніста при різних варіантах підключення двигунів з 10 4-х вісними вагонами.

Для 3-ї позиції графічна залежність ККД тягового генератора (η_g) від пройденого шляху (S_{pr}) має наступний вигляд:

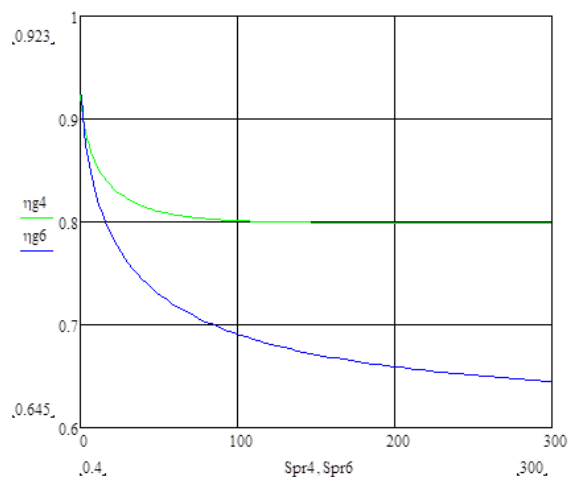


Рисунок 2.8. Графічна залежність $\eta_g = f(S_{pr})$:

$\eta_{g4} = f(S_{pr4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{g6} = f(S_{pr6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 4-ї позиції графічна залежність ККД тягового генератора (η_g) від пройденого шляху (S_{pr}) має наступний вигляд:

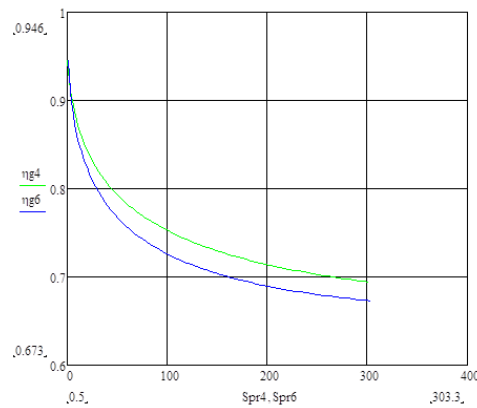


Рисунок 2.9. Графічна залежність $\eta_g = f(S_{pr})$:

$\eta_{g4} = f(S_{pr4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{g6} = f(S_{pr6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 5-ї позиції графічна залежність ККД тягового генератора (η_g) від пройденого шляху (S_{pr}) має наступний вигляд:

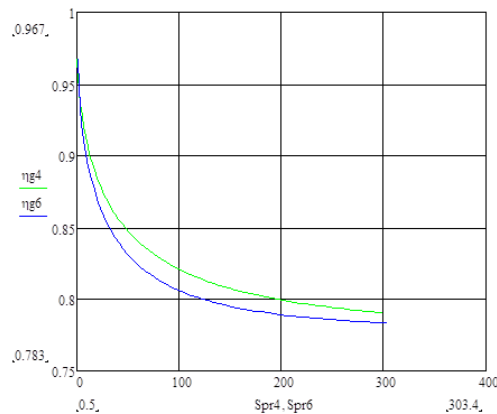


Рисунок 2.10. Графічна залежність $\eta_g = f(S_{pr})$:

$\eta_{g4} = f(S_{pr4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{g6} = f(S_{pr6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 6-ї позиції графічна залежність ККД тягового генератора (η_g) від пройденого шляху (S_{pr}) має наступний вигляд:

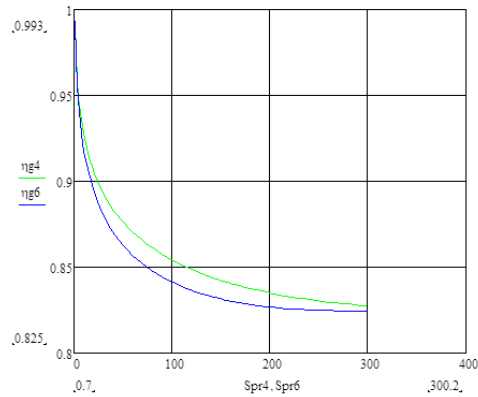


Рисунок 2.11. Графічна залежність $\eta_g = f(S_{pr})$:

$\eta_{g4} = f(S_{pr4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{g6} = f(S_{pr6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 7-ї позиції графічна залежність ККД тягового генератора (η_g) від пройденого шляху (S_{pr}) має наступний вигляд:

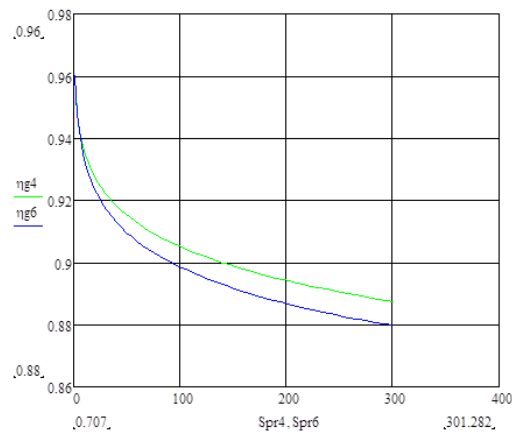


Рисунок 2.12. Графічна залежність $\eta_g = f(S_{pr})$:

$\eta_{g4} = f(S_{pr4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{g6} = f(S_{pr6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для 8-ї позиції графічна залежність ККД тягового генератора (η_g) від пройденого шляху (S_{pr}) має наступний вигляд:

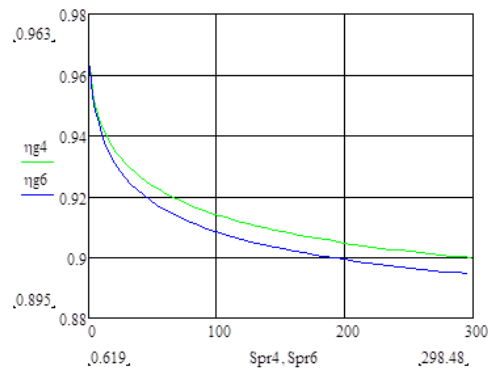


Рисунок 2.13. Графічна залежність $\eta_g = f(S_{pr})$:

$\eta_{g4} = f(S_{pr4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{g6} = f(S_{pr6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Отримавши результати розрахунків ККД тягового електричного двигуна, ККД тягового генератора та ККД редуктора маневрового локомотива ЧМЕЗ можна розрахувати ККД передачі локомотива за наступною формулою:

$$\eta_{лок.} = \eta_{дв.} \cdot \eta_{мг.} \cdot \eta_{ред.}, \quad (2.19)$$

де $\eta_{дв.}$ – ККД тягового електричного двигуна;

$\eta_{мг.}$ – ККД тягового генератора;

$\eta_{ред.}$ – ККД прямозубого редуктора.

За результатом розрахунків ККД передачі маневрового локомотива створено графічні залежності $\eta_{плок} = f(S_{pr})$ для кожної позиції контролера машиніста, які мають наступний вигляд:

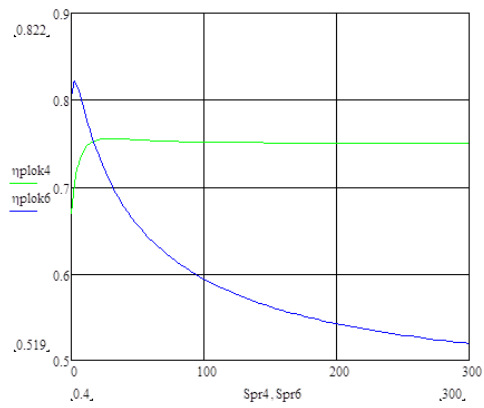


Рисунок 2.14. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 3-ї позиції:
 $\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;
 $\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

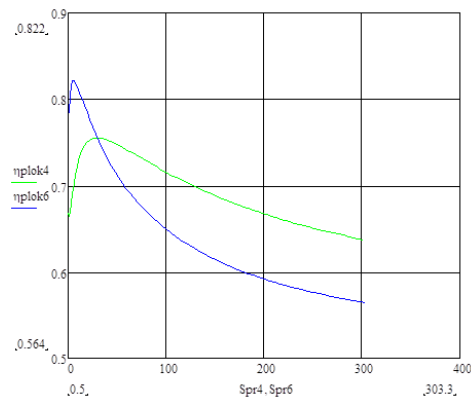


Рисунок 2.15. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 4-ї позиції:
 $\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;
 $\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

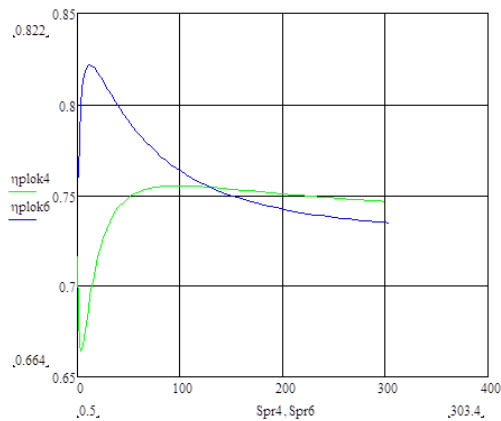


Рисунок 2.16. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 5-ї позиції:

$\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

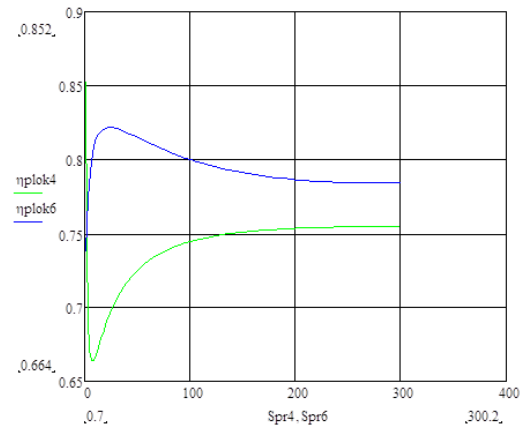


Рисунок 2.17. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 6-ї позиції:

$\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

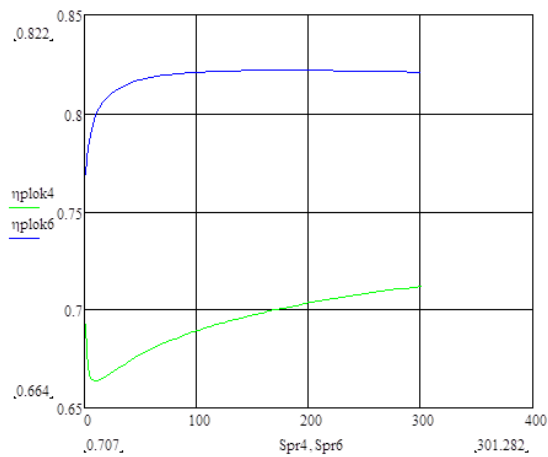


Рисунок 2.18. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 7-ї позиції:

$\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

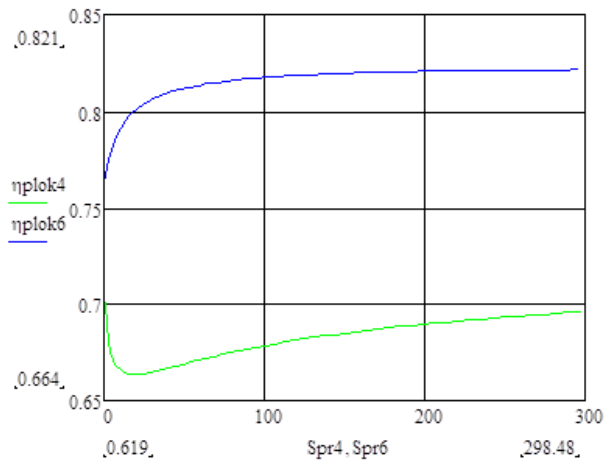


Рисунок 2.19. ККД $\eta_{\text{plok}} = f(S_{\text{pr}})$ для 8-ї позиції:

$\eta_{\text{plok4}} = f(S_{\text{pr4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{plok6}} = f(S_{\text{pr6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Для аналізу руху локомотива з різною вагою та кількістю ТЕД, додатково розраховано ККД для руху локомотива з 2-ма вагонами вагою 130 т. та руху локомотива резервом. Порівняльні графіки представлені в ДОДАТКУ Г.

Висновки по розділу 2.

1. Розроблено математичну модель для визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ, на відміну від існуючих має можливість визначення основних параметрів на часткових навантаженнях. Модель дає можливість введення початкових параметрів, таких як:

- номер позиції контролера машиніста;
- кількість тягових електродвигунів;
- масу локомотива та масу складу;
- середнє навантаження на вісь;
- початкова швидкість;
- інтервал часу;
- ухил профілю колії.

Модель дозволяє розрахувати наступні параметри:

- прискорення маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- силу тяги маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- потужність маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- опір руху 4-х вісних вагонів;
- опір руху маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- поточну швидкість руху маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- пройдений шлях маневровим локомотивом ЧМЕЗ;
- кількість витраченого палива на виконану роботу маневровим локомотивом ЧМЕЗ;
- силу струму тягового генератора маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- силу струму ТЕД маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- температуру перевищення над навколишньою середою ТЕД.
- коефіцієнт корисної дії тягового генератора маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- коефіцієнт корисної дії ТЕД маневрового локомотива ЧМЕЗ;
- коефіцієнт корисної дії тягової передачі маневрового локомотива ЧМЕЗ.

Похибка математичної моделі складає 4,15 %. Модель має обмеження за: коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками; швидкістю руху локомотива; струму тягового електричного генератора; струму тягового електричного двигуна; перевищення температури над навколишньою середою тягового електричного двигуна.

2. За результатами розрахунку моделі тягово-енергетичних показників маневрового локомотива створено графічні залежності $F_k = f(v)$; $I_g = f(v)$; $I_{ted} = f(v)$; $t = f(S_{pr})$; $G_e = f(S_{pr})$; $T = f(S_{pr})$. Дані залежності створено з 3-ї по 8-му позицію контролера машиніста, для 3-х варіантів підключення ТЕД. А саме для роботи локомотива на 2-х, 4-х та 6 ТЕД. Для аналізу був обраний поїзд з 10-тю 4-х вісними вагонами вагою 650т. на відстань руху 300 м. по прямій ділянці шляху. Розглядаючи отриману струмову характеристику двигунів на 3-й позиції контролера машиніста можна говорити про не можливість використання для

руху 2 ТЕД за рахунок великих струмів, які будуть протікати в них. Проте використовувати для руху 4 двигуни є можливість в певних діапазонах швидкостей. За рахунок отриманих даних в роботі досліджується робота маневрового локомотива на 4-х та 6-ти ТЕД. Результати розрахунку говорять про зменшення витрати палива на 504.5 грами в порівнянні з рухом локомотива на 6 ТЕД при 3-й позиції контролера машиніста В результаті можна зробити висновок, що при використанні різних варіантів підключення ТЕД, можливо отримати економію палива на виконання маневрової роботи, використовуючи при цьому часткові навантаження передачі в залежності від експлуатаційних умов. При цьому температура ТЕД залишається в межах допустимої для класу ізоляції F.

3. Розраховано ККД на часткових навантаженнях тягової електричної передачі маневрового локомотива ЧМЕЗ, який складається з таких основних компонентів: ККД тягового електричного двигуна ТЕ006, ККД тягового генератора ТД006 та ККД редуктора тепловоза. Для аналізу обрана однакова ділянка руху з 10-тю вагонами загальна вага яких становить 650т. на різних навантаженнях передачі локомотива. Для 3-ї позиції на відстань 300 метрів середнє ККД ТЕД становило 0,96%, ККД ТГ становило 0,83%, ККД передачі 0,76% для руху локомотива на 4-х двигунах. Для руху локомотива на 6-ти двигунах: ККД ТЕД становило 0,87%, ККД ТГ становило 0,71%, ККД передачі 0,61%. Збільшення ККД відбувається за рахунок роботи двигунів в діапазонах наближених до номінальних струмів. Отримані значення підтверджують раціональність використання різних варіантів підключених ТЕД при часткових навантаженнях локомотива.

4. Отримано значення ККД ТЕД, ККД ТГ, ККД передачі для руху локомотива резервом на 4-х ТЕД, які становлять 0,95% для двигуна, 0,79% для генератора та 0,74% для передачі. Для 6 ТЕД відповідні значення становлять 0,80% для двигуна, 0,64% для генератора та 0,50% для передачі локомотива. Додатково отримано значення ККД ТЕД, ККД ТГ, ККД передачі для руху локомотива на 4-х ТЕД з 2-ма вагонами вагою 130т. на відстань 300 м., які

становлять 0,95% для двигуна, 0,79% для генератора та 0,74% для передачі. Для 6 ТЕД відповідні значення становлять 0,82% для двигуна, 0,66% для генератора та 0,54% для передачі локомотива.

Дослідження отриманих графіків ККД електричної передачі при різних умовах експлуатації підтверджують доцільність використання різних варіантів підключення електродвигунів для досягнення оптимальної енергоефективності, виходячи з аналізу ККД використовувати даний метод керування необхідно на частково 3-й та повністю 4-й та 5-й позиції контролера машиніста.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТЯГОВОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ МАНЕВРОВИХ ЛОКОМОТИВІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.

3.1. Розробка теоретичного підґрунтя для створення бази знань моделі автоматизованого управління тяговою передачею маневрових локомотивів.

На сьогоднішній день інтелектуальні системи керування отримали значний розвиток у техніці [84,85]. Інтелектуальні системи керування – це системи, які здатні «розуміти» та навчатися, враховуючи об'єкт керування, зовнішнє середовище та умови роботи. Основна відмінність таких систем полягає в наявності механізму комплексної обробки знань. Ключова архітектурна особливість, що відрізняє інтелектуальні системи керування від традиційних, полягає в здатності отримувати, зберігати та обробляти знання для виконання функцій керування. Інтелектуальні системи які базуються на методах нечіткої логіки, штучних нейронних мережах та генетичних алгоритмах, все частіше застосовуються у різних галузях, включаючи залізничний транспорт. Ці технології дозволяють створювати більш адаптивні, надійні та ефективні системи, які здатні краще реагувати на змінні умови і невизначеності, ніж традиційні методи керування[86-88].

Створення інтелектуальних систем керування базується на двох основних принципах рисунок 3.1. :



Рисунок 3.1. Основні принципи створення інтелектуальної системи керування

Концепція інтелектуальності передбачає:

- здатність працювати з формалізованими знаннями людини (як у випадку з експертними системами та нечіткою логікою);
- використання властивих людині методів навчання та мислення (як у штучних нейронних мережах та генетичних алгоритмах).

Якість роботи систем штучного інтелекту безпосередньо залежить від структури, змісту та алгоритмів управління базою знань. До основних функцій баз знань належать: збирання та аналіз інформації, створення та зберігання правил, а також можливість самонавчання і адаптації. Крім того, важливими аспектами є інтеграція нових даних, перевірка їхньої достовірності та ефективне використання інформації для прийняття рішень.

Для інтелектуального автоматизованого управління тяговою електричною передачею маневрового локомотива пропонується наступна система з можливістю самонавчання зображена на рисунку 3.2.

Самонавчання — комплекс методів і алгоритмів для налаштування і функціонування автоматизованої систем керування тяговою передачею маневрових локомотивів [89-92].

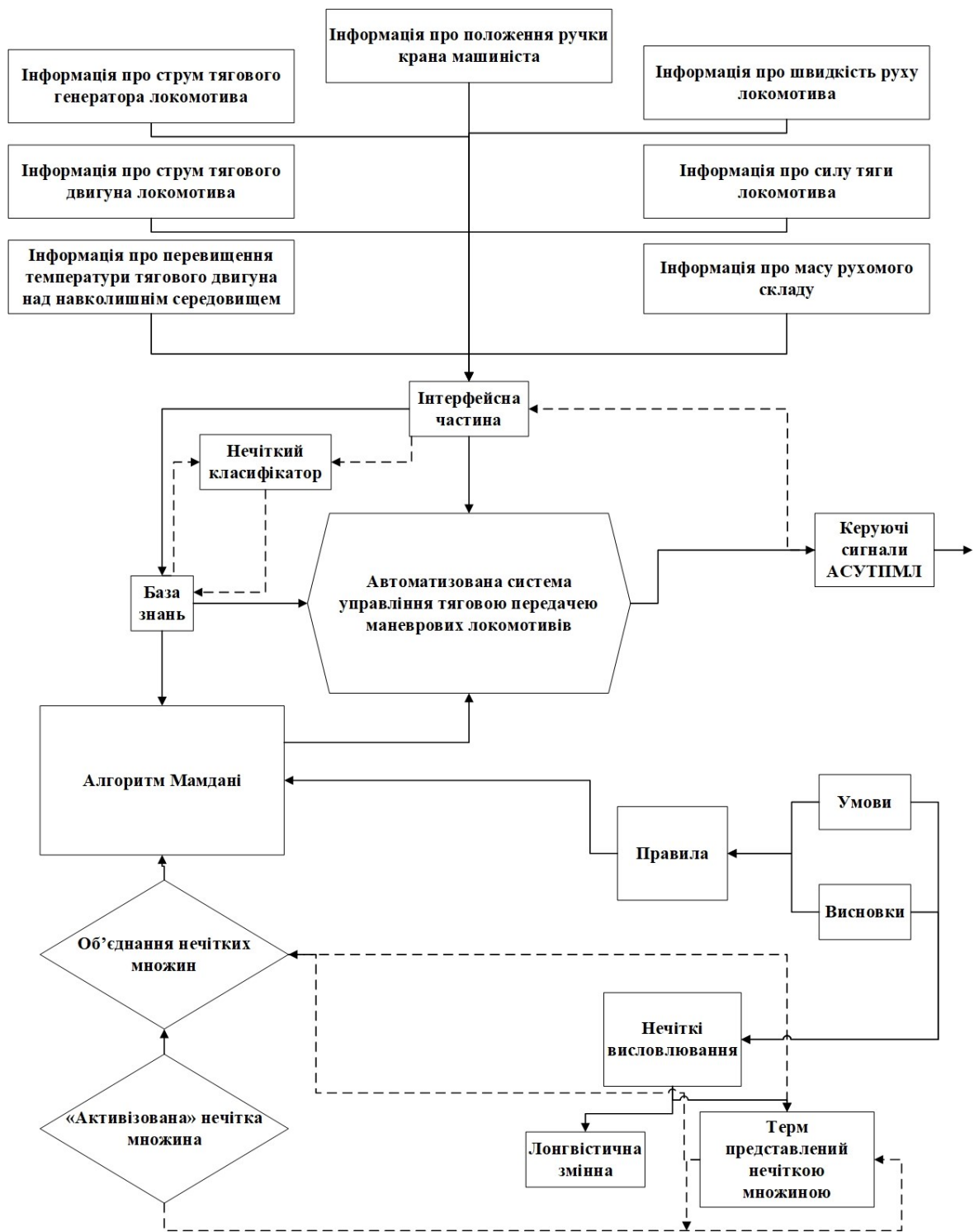


Рисунок 3.2. Автоматизована система управління тяговою передачею маневрового локомотива (АСУТПМЛ)

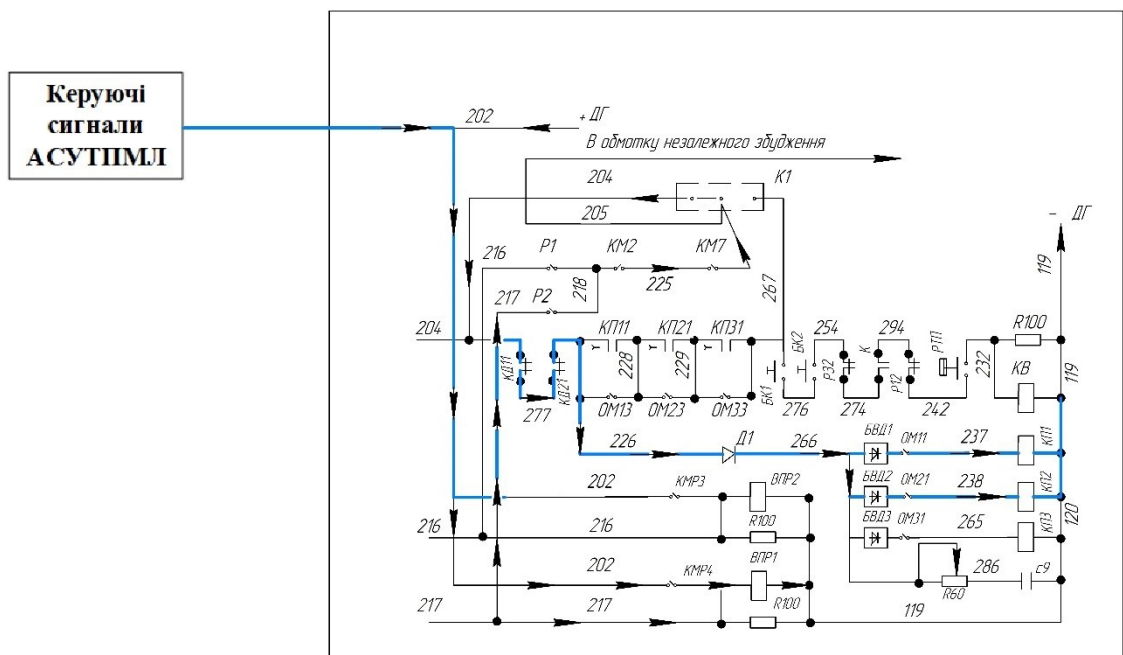


Рисунок 3.3. Керуючі сигнали АСУТПМЛ на блок вимкнення двигунів

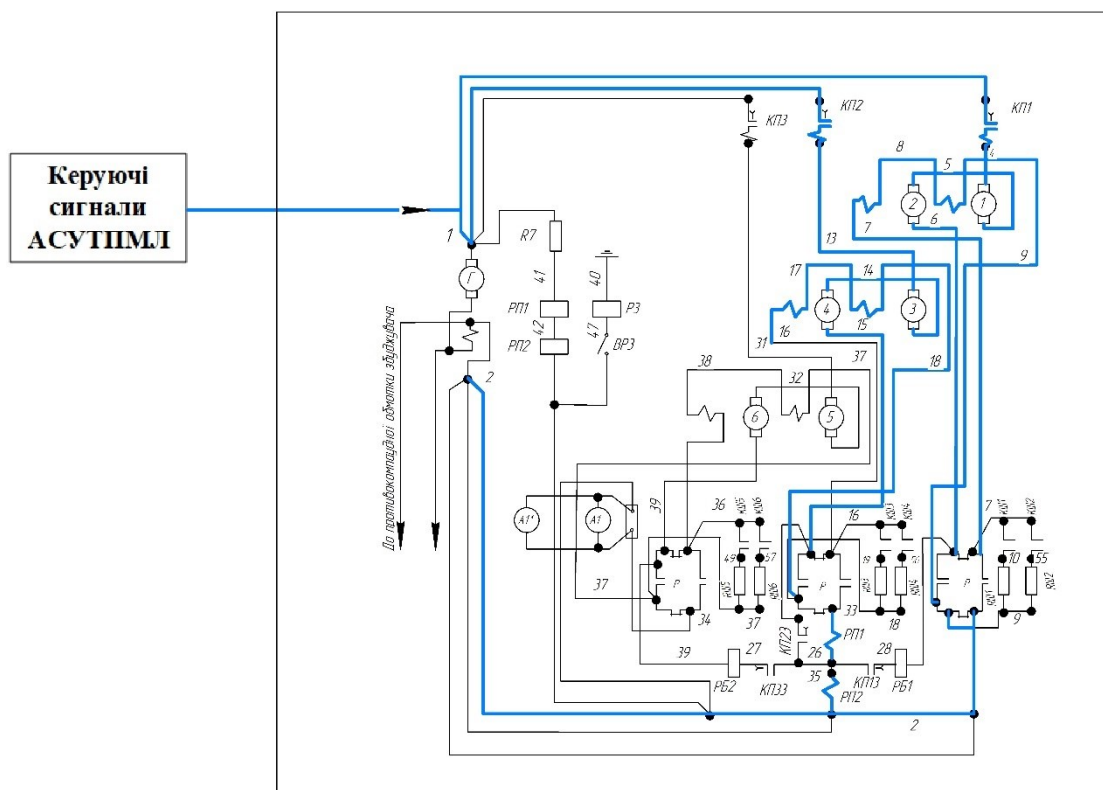


Рисунок 3.4. Керуючі сигнали АСУТПМЛ на електричну схему ТЕД

Для створення системи використовується алгоритм Мамдані. Алгоритм працює за принципом «чорної скриньки». На проміжних етапах використовується апарат нечіткої логіки та теорія нечітких множин. За рахунок

використання нечітких систем є можливість маніпулювати звичними числовими даними, але використовувати гнучкі можливості, які надають системи нечіткого висновку. Реалізація алгоритму описана в підпункті 1.6. 1-го розділу дисертації.

Перш ніж перейти до дії самого алгоритму необхідно ознайомитися з наступними визначеннями:

Нечітка змінна має наступний вигляд:

$$\langle \alpha, X, A \rangle, \quad (3.1)$$

де α – ім'я нечіткої змінної;

X – область визначення нечіткої змінної;

A – нечітка множина на універсумі X .

Лінгвістична змінна має наступний вигляд:

$$\langle \beta, T, X, G, M \rangle, \quad (3.2)$$

де β – ім'я лінгвістичної змінної;

T – множина її значень (термів);

X – універсум нечітких змінних;

G – синтаксична процедура створення нових термів;

M – семантична процедура, яка формує нечіткі множини для кожного терму даної лінгвістичної змінної.

Нечітким висловом будемо називати вислів вигляду:

$$\langle \beta \text{ IS } \alpha \rangle, \quad (3.3)$$

де β – лінгвістична змінна;
 α – один із термів змінної.

Формування бази правил алгоритму Мамдані:

$$\begin{aligned} \text{RULE_1: IF «Condition_1» THEN «Conclusion_1» (F1) AND «Conclusion_2» (F2);} \\ \text{RULE_2: IF «Condition_2» AND «Condition_3» THEN «Conclusion_3» (F3);} \\ \dots \\ \text{RULE_n: IF «Condition_k» THEN «Conclusion_ (q-1)» (F_{q-1}) AND «Conclusion_q» (F_q).} \end{aligned} \quad (3.4)$$

де F_i — вагові коефіцієнти, що означають ступінь впевненості в істинності отриманого підвисновку ($i = 1..q$), де q – загальне число підвисновків в базі правил. За замовчуванням ваговий коефіцієнт приймається рівним 1. Лінгвістичні змінні, присутні в умовах, називаються *вхідними*, а у висновках — *вихідними*.

Фаззифікація вхідних змінних алгоритмом Мамдан:

Цей етап часто називають приведенням до нечіткості. На вхід надходять сформована база правил та масив вхідних даних $A = \{a_1, \dots, a_m\}$, де m – кількість вхідних змінних. У цьому масиві містяться значення всіх вхідних змінних. Метою цього етапу є отримання значень істинності для всіх підумов із бази правил. Це відбувається таким чином: для кожної з підумов знаходиться значення $b_i = \mu(a_i)$, де $\mu(a_i)$ – функція приналежності для нечіткої множини. Таким чином отримується множина значень b_i ($i = 1..k$), де k – загальне число підумов в базі правил. Масив вхідних даних сформовано таким чином, що i -й елемент масиву відповідає i -й вхідній змінній (номер змінної зберігається в цілочисловому полі «id»).

Агрегування під-умов алгоритмом Мамдані:

Метою цього етапу є визначення ступеня істинності умов для кожного правила системи нечіткого висновку. Для кожної умови знаходимо мінімальне значення істинності всіх його під-умов. Формально це виглядає так:

$$c_j = \min \{b_i\}, \quad (3.5)$$

де $j=1..n$ (n – число правил нечітких продукцій);
 i – число з множини номерів під-умов, у яких бере участь j -та вхідна змінна.

Активізація підвисновків:

Цей метод називається *min-активізацією*, який формально записується наступним чином:

$$\mu_i'(x) = \min \{d_i, \mu_i(x)\}, \quad (3.6)$$

де $\mu_i'(x)$ – «активізована» функція належності;
 $\mu_i(x)$ – функція належності терма;
 d_i – ступінь істинності i -го під-висновку.

Акумуляція висновків:

i -й вихідній змінній зіставляється об'єднання множин $E_i \cup D_j$ де, j — номери під-висновків, в яких бере участь i -та вихідна змінна ($i = 1..s$), де s – кількість вхідних змінних. Об'єднанням двох нечітких множин має представлення, як третя нечітка множина з такою функцією належності:

$$\mu_i'(x) = \max \{\mu_1(x), \mu_2(x)\}, \quad (3.7)$$

де $\mu_1(x), \mu_2(x)$ – функції належності об'єднаних множин.

Дефазифікація вихідних змінних.

Розглядається i -та вихідна змінна і належна до неї множина E_i ($i = 1..s$), де s – кількість вхідних змінних. Потім за допомогою методу дефазифікації знаходиться кінцеве кількісне значення вихідної змінної. У даній реалізації алгоритму використовується метод центру ваги (центра тяжіння), за яким значення i -тої вихідної змінної розраховується за формулою:

$$y_i = \frac{\int_{Min}^{Max} x \cdot \mu_i(x) dx}{\int_{Min}^{Max} \mu_i(x) dx}, \quad (3.8)$$

де $\mu_i(x)$ – функція належності відповідної нечіткої множини E_i ;

Min та Max – границі універсуму нечітких змінних;

y_i – результат дефазифікації.

Процес управління виглядає наступним чином. Інформація про локомотив надходить в інтерфейсну частину. З інтерфейсної частини інформація розділяється на два потоки. Перший – база знань, призначена для накопичення інформації про управління тяговою передачею тепловоза. Другий – нечіткий класифікатор. НК представляє собою нечітку базу знань (рисунок 3.5.), на вхід якої подаються сигнали про поточний стан тягового рухомого складу. Для навчання (створення та уточнення правил нечіткої бази знань) використовується зовнішня база знань, яка відображає спектр керуючих сигналів в залежності від поточної поїзної ситуації. Утворена за результатами реальних поїздок в локомотивному депо «Дарниця» і показує яким чином виконувалось керування рухомим складом машиністами. На виході з класифікатора маємо керуючі сигнали, що згенеровані у відповідності до правил нечіткої бази знань.

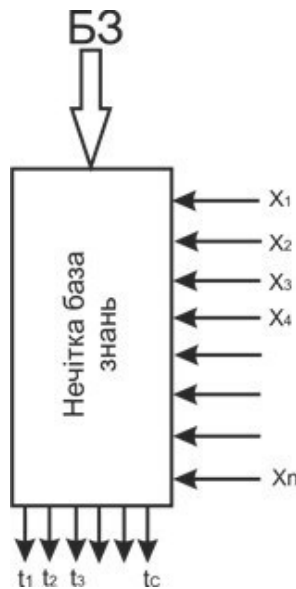


Рисунок 3.5. Нечіткий класифікатор

Завданням алгоритму Мамдані є вироблення керуючого сигналу для автоматизованої системи керування тяговою передачею маневрового локомотива (АСУТПМЛ). Система, аналізуючи дані про стан параметрів, що впливають на рух поїзду, генерує керуючі сигнали, найбільш доцільні в поточній ситуації (тобто рекомендації щодо керування тяговою передачею локомотива).

База знань передає сигнал на АСУТПМЛ, яка в свою чергу утворює керівні сигнали, на 1-й позиції замикаються контакти КМ2 та КМ7 головного барабану контролера, які залишаються замкнутими з 1-й по 8-му позицію (рисунок 3.3.). Тоді струм від дроту 218 потече через контакти КМ2, дріт 225, контакти КМ7, перемичку на панелі зажимів К1, дріт 204, розмикаючий контакт КД11, дріт 277, розмикаючий контакт КД21, дріт 226, діод Д1, дріт 266 до блоку вимкнення двигунів (БВД), основою якого є тиристор. Відповідно до поїзних ситуації через блоки БВД1 та БВД2 буде протікати струм до контактів вимкнення тягових електричних двигунів ОМ11, ОМ21 через дроти 237, 238 в катушки поїзних контакторів КП1 та КП2, пройшовши які по дротах 120 та 119 піде на мінус допоміжного генератора. Одночасно через резистор R60 та дріт 286 заряджається конденсатор С9, підключений паралельно катушкам контакторів КП1 та КП2.

Після вмикання контакторів КП1 та КП2 збирається ланцюг живлення катушки контактора КВ збудження тягового генератора: дріт 226, замикаючий контакт КП11, дріт 228, замикаючий контакт КП21, дріт 229, замикаючий контакт КП31, дріт 267, замкнуті контакти блокування верхніх дверей БК1 апаратної камери, дріт 276, замкнуті контакти блокування нижніх дверей БК2, дріт 254, розмикаючий контакт Р32, реле заземлення РЗ, дріт 274, замкнуті контакти К електропневматичного клапана автостопа, дріт 294, розмикаючий контакт Р12 проміжного реле Р1 апаратури АЛС, дріт 242, замкнуті контакти реле тиску повітря РТП, дріт 232, катушку контактора КВ, дріт 119, загальний мінус. Виходячи з цього, тяговий генератор отримує збудження після включення поїзних контакторів КП1 та КП2, тобто при зібраному силовому ланцюгу руху тепловоза. Отримавши збудження тяговий генератор подає струм в силовий ланцюг [93]. Від «плюса» тягового генератора по трьом дротам 1 струм надходить на загальну шину (рисунк 3.4.), від якої протікає двома паралельними ланцюгами.

Перший ланцюг: замкнуті силові контакти КП1, дріт 4 обмотки якорів та додаткових полюсів першого та другого тягового двигуна, дріт 6, силові контакти реверсора, дріт 7, обмотки збудження другого та першого ТЕД, дріт 9, силові контакти реверсора, далі на шину 2.

Другий ланцюг: замкнуті силові контакти КП2, дріт 13 обмотки якорів та додаткових полюсів третього та четвертого ТЕД, дріт 15, силові контакти реверсора, дріт 16, обмотки збудження третього та четвертого ТЕД, дріт 18, силові контакти реверсора, далі на шину 33, струмові катушки реле переходів РП1 та РП 2, потім на шину 2.

Обидві шини 2 приєднані до мінусового зажиму шунта амперметра А1, від якого по 3-м кабелям 2 і обмотки додаткових полюсів тягового генератора струм повертається на «мінус».

Протікаючий по обмоткам ТЕД струм утворює обертовий момент на валах якорів двигунів, який через тягові редуктори передається на колісні пари тепловоза.

Згідно рис.1., НК контактує з базою знань, в котрій знаходиться та оновлюється інформація про реальні дії машиністів під час руху поїзду. На підставі цих даних утворюється навчаюча вибірка з M пар «вхід-вихід»:

$$(X_r, Y_r), r = \overline{1, M}, \quad (3.9)$$

де X_r – вектор інформаційних ознак об’єкту класифікації;

$Y_r \in (t_1, t_2, \dots, t_C)$, де (t_1, t_2, \dots, t_C) – класи рішень;

$r = \overline{1, M}$ – r -тий рядок вибірки M ;

Введемо наступні позначення:

P – вектор параметрів функцій приналежності нечітких термів бази знань (9);

W – вектор вагових коефіцієнтів правил бази знань;

$F(K, X_r) \in (t_1, t_2, \dots, t_C)$ – результат класифікації по нечіткій базі з параметрами

$K = (P, W)$ при вхідному значенні X_r з r -ого рядка вибірки (9).

Навчання нечіткого класифікатора полягає в знаходженні вектора K , що мінімізує відстань між результатами логічного висновку і експериментальними даними. Розглянемо спосіб розрахунку цієї відстані, який називаються критерієм навчання. Відстань між бажаною і дійсною поведінкою моделі можна визначити через безпомилковість класифікації на навчаючій вибірці. Тоді навчання нечіткого класифікатора:

$$\frac{100\%}{M} \sum_{r=\overline{1, M}} \Delta_r(K) \rightarrow \min, \quad (3.10)$$

$$\text{де } \Delta_r(K) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } y_r \neq F(K, X_r) \\ 0, & \text{якщо } y_r = F(K, X_r) \end{cases} \quad - \quad \text{помилка класифікації}$$

об'єкта X_r .

Переваги даного критерію, містяться в його простоті і ясній змістовній інтерпретації. Процент помилок часто використовується як критерій навчання різних систем розпізнавання образів. Цільова функція (3.10) приймає дискретні значення, що ускладнює використання швидких градієнтних методів оптимізації, особливо для малих навчаючих вибірок.

Для визначення керуючих дій, які необхідно реалізувати в конкретній поїзній ситуації необхідно сформувати базу даних. Прикладом такого формату може служити база, наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Приклад бази даних

| № фрейму | Значення, що характеризують режим руху поїзду | | | | | | Положення органів керування | | | |
|----------|---|---------------|-------------------|------------------------------|--------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| | Маса складу, т | Сила тяги, кН | Швидкість, км/год | Струм тягового генератора, А | Струм ТЕД, А | Температура перевищення над навколишньою середою ТЕД, °С | Положення рукоятки КМ | Положення рукоятки крану ум.№ 395 | Положення рукоятки крану ум.№ 254 | Кількість підключених ТЕД |
| 1 | 763 | 187,8 | 1,8 | 1619 | 809 | 3 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 2 | 763 | 171,5 | 2,6 | 1513 | 757 | 5 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 3 | 763 | 157,7 | 3,3 | 1422 | 711 | 7 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 4 | 763 | 145,9 | 3,9 | 1342 | 671 | 9 | 4 | 2 | 2 | 4 |

| | | | | | | | | | | |
|----|-----|-------|------|------|-----|----|---|---|---|---|
| 5 | 763 | 135,7 | 4,5 | 1272 | 636 | 11 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 6 | 763 | 126,8 | 5,1 | 1210 | 605 | 13 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 7 | 763 | 118,9 | 5,6 | 1154 | 577 | 14 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 8 | 763 | 112,0 | 6,0 | 1104 | 552 | 16 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 9 | 763 | 105,8 | 6,5 | 1059 | 529 | 17 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 10 | 763 | 100,3 | 6,9 | 1018 | 509 | 18 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 11 | 763 | 95,4 | 7,3 | 980 | 490 | 20 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 12 | 763 | 90,9 | 7,7 | 946 | 473 | 21 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 13 | 763 | 86,8 | 8,1 | 915 | 457 | 22 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 14 | 763 | 83,1 | 8,4 | 886 | 443 | 23 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 15 | 763 | 79,7 | 8,7 | 859 | 429 | 24 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 16 | 763 | 76,6 | 9,1 | 834 | 417 | 25 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 17 | 763 | 73,8 | 9,4 | 811 | 405 | 26 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 18 | 763 | 71,2 | 9,6 | 789 | 394 | 27 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 19 | 763 | 68,7 | 9,9 | 769 | 384 | 28 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 20 | 763 | 66,5 | 10,2 | 750 | 375 | 29 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 21 | 763 | 64,4 | 10,4 | 732 | 366 | 29 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 22 | 763 | 62,5 | 10,7 | 715 | 357 | 30 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 23 | 763 | 60,7 | 10,9 | 699 | 350 | 31 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 24 | 763 | 59,0 | 11,2 | 684 | 342 | 32 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 25 | 763 | 57,4 | 11,4 | 670 | 335 | 32 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 26 | 763 | 55,9 | 11,6 | 657 | 328 | 33 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 27 | 763 | 54,5 | 11,8 | 644 | 322 | 34 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 28 | 763 | 53,2 | 12,0 | 632 | 316 | 34 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 29 | 763 | 52,0 | 12,2 | 620 | 310 | 35 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 30 | 763 | 50,8 | 12,4 | 609 | 305 | 36 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 31 | 763 | 49,7 | 12,6 | 599 | 299 | 36 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 32 | 763 | 48,7 | 12,8 | 589 | 294 | 37 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 33 | 763 | 47,7 | 13,0 | 579 | 290 | 37 | 4 | 2 | 2 | 4 |

| | | | | | | | | | | |
|----|-----|------|------|-----|-----|----|---|---|---|---|
| 34 | 763 | 46,7 | 13,2 | 570 | 285 | 38 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 35 | 763 | 45,8 | 13,3 | 561 | 281 | 38 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 36 | 763 | 45,0 | 13,5 | 553 | 276 | 39 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 37 | 763 | 44,2 | 13,7 | 545 | 272 | 39 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 38 | 763 | 43,4 | 13,8 | 537 | 269 | 39 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 39 | 763 | 42,7 | 14,0 | 530 | 265 | 40 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 40 | 763 | 42,0 | 14,1 | 523 | 261 | 40 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 41 | 763 | 41,4 | 14,3 | 516 | 258 | 41 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 42 | 763 | 40,7 | 14,4 | 509 | 255 | 41 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 43 | 763 | 40,1 | 14,6 | 503 | 251 | 41 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 44 | 763 | 39,5 | 14,7 | 497 | 248 | 42 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 45 | 763 | 39,0 | 14,8 | 491 | 245 | 42 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 46 | 763 | 38,5 | 15,0 | 485 | 242 | 42 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 47 | 763 | 38,0 | 15,1 | 479 | 240 | 43 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 48 | 763 | 37,5 | 15,2 | 474 | 237 | 43 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 49 | 763 | 37,0 | 15,4 | 469 | 234 | 43 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 50 | 763 | 36,5 | 15,5 | 464 | 232 | 43 | 4 | 2 | 2 | 4 |

Проектуємо автоматизовану систему управління тяговою електричною передачею маневрового локомотива з такими входами:

- 1 – маса складу;
- 2 – сила тяги;
- 3 – швидкість;
- 4 – струм тягового генератора;
- 5 – струм тягового двигуна;
- 6 – перевищення температури тягового електричного двигуна над навколишньою середою;

Для входів необхідно провести фазифікацію. В розділі «Необхідне положення органів керування» сигнали «Положення рукоятки контролера

машиніста», «Положення рукоятки крану ум.№ 395», «Положення рукоятки крану ум.№ 254» та «Кількість підключених ТЕД» доцільно реалізувати як чіткі множини. На підставі таблиці 3.1 формується нечітка база знань вигляду таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Приклад нечіткої бази знань

| № правила | Значення рівня сигналів на вході | | | | | | Необхідне положення органів керування | | | |
|-----------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|------|--------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Положення рукоятки КМ | Положення рукоятки крану ум.№ 395 | Положення рукоятки крану ум.№ 254 | Кількість підключених ТЕД |
| 1 | middle | low | very_low | low | high | middle | position is 4ps | position is 2 | position is 2 | nted is 4ted |
| 2 | middle | middle | very_low | middle | high | middle | position is 4ps | position is 2 | position is 2 | nted is 4ted |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| n | middle | very_high | very_high | very_high | high | middle | position is 4ps | position is 2 | position is 2 | nted is 4ted |

Кількість правил n в базі знань визначається кількістю усіх можливих комбінацій значень рівнів сигналів на вході. Для кожного варіанта на вході формується своя комбінація сигналів, що ідуть на органи керування.

Процес самонавчання полягає в тому, що під час руху поїзду виконується періодичне опитування значень сигналів на вході та сигналів кількості під'єднаних ТЕД. Виконується порівняння поточного значення сигналів з органів керування для даного правила зі значеннями в базі знань. Далі розділ бази знань «Кількість підключених ТЕД» корегується з урахуванням нового досвіду, отриманого під час руху.

Для формалізації та представлення знань в пам'яті інформаційних систем існує низка моделей, які можна структурувати наступним чином:

- Логічні моделі – використовують формальні логічні системи, де знання представлені у вигляді фактів і правил, за допомогою яких здійснюються висновки. Вони базуються на логічних операторах і формують основу для побудови логічних висновків.
- Мережеві моделі – представляють знання у вигляді графів або мереж, де вузли відповідають об'єктам, а зв'язки між ними відображають відношення. Прикладом може служити семантична мережа, яка ілюструє взаємозв'язки між поняттями.
- Фреймові моделі – знання організовані у вигляді фреймів, які є структурами даних для представлення стереотипних ситуацій. Фрейм містить слоти, що відповідають атрибутам об'єкта, і значення, що описують стан об'єкта. Фрейми корисні для моделювання знань у контексті ситуацій або сценаріїв.
- Продукційні моделі – використовують набір правил «якщо-то» (продукцій), які визначають, які дії слід виконувати в певних умовах. Ці правила дозволяють здійснювати висновки та приймати рішення на основі наявної інформації.

Кожна з моделей представлення знань у штучному інтелекті має свої обмеження та недоліки. Розглянемо основні недоліки логічних, мережевих, фреймових та продукційних моделей:

Логічні моделі:

Складність масштабування: Логічні моделі можуть бути складними для масштабування на великі обсяги знань. Коли кількість фактів і правил зростає, управління ними стає важчим.

Відсутність гнучкості: Логічні моделі суворо дотримуються правил і мають обмежену гнучкість. Це може бути проблемою в ситуаціях, де потрібна невизначеність або неоднозначність.

Чутливість до неповноти даних: Якщо дані неповні або суперечливі, логічні моделі можуть не в змозі зробити правильні висновки, оскільки вони залежать від чітко визначених правил і фактів.

Мережеві моделі:

Складність побудови та обслуговування: Створення та підтримка великих семантичних мереж може бути складним завданням. Вузли та зв'язки потребують постійного оновлення, щоб залишатися актуальними.

Обмеженість у вираженні складних концепцій: Мережеві моделі можуть бути обмеженими у вираженні складних або абстрактних концепцій, які важко представити у вигляді вузлів і зв'язків.

Проблеми з продуктивністю: У великих мережах пошук і обробка інформації можуть займати значний час, що знижує продуктивність системи.

Фреймові моделі:

Жорсткість структури: Фрейми мають фіксовану структуру, що робить їх менш гнучкими для представлення нових або незвичайних ситуацій. Адаптація до нових даних може вимагати суттєвих змін у фреймі.

Проблеми з обробкою невизначеності: Фреймові моделі погано справляються з ситуаціями, де є багато невизначеності або варіативності, оскільки вони покладаються на чітко визначені слоти і значення.

Проблеми з взаємодією фреймів: Інтеграція та взаємодія між різними фреймами може бути складною, особливо якщо фрейми описують різні аспекти або контексти.

Продукційні моделі:

Складність управління великою кількістю правил: Коли кількість правил зростає, стає важко управляти їхнім порядком виконання і взаємодією. Це може призводити до конфліктів і помилок у висновках.

Проблеми з ефективністю: Виконання великої кількості правил може займати багато часу, особливо якщо правила є складними або мають багато умов.

Підтримка та оновлення: Зміни в знаннях або правилах вимагають постійного оновлення продукційної бази, що може бути трудомістким процесом.

Для задачі управління тяговою передачею маневрового локомотива використовується продукційна модель, що поєднує елементи логічних і мережевих підходів. Від логічних моделей запозичено концепцію правил висновку, які називаються продукціями, а від мережевих моделей – представлення знань у формі семантичної мережі.

Семантична мережа — це форма графічного представлення знань, де вузли позначають об'єкти або поняття, а зв'язки між вузлами відображають відношення між цими об'єктами чи поняттями. Ця структура дозволяє наочно представляти та моделювати знання, встановлювати зв'язки та робити логічні висновки.



Рисунок 3.6. Основні елементи семантичної мережі

В загальному випадку продукційну модель можна представити в наступному вигляді

$$N = \langle A, U, C, I, R \rangle, \quad (3.1)$$

де N – ім'я продукції;

A – сфера застосування продукції;

U – умова використання продукції;

C – ядро продукції;

I – постумови продукції, що актуалізуються при позитивній реалізації продукції;

R – коментар, неформальне пояснення (обґрунтування) продукції, час введення в базу знань, тощо.

Для проектування бази знань управління тяговою передачею маневрового локомотива нам потрібно визначити параметри U , C , I . Параметр A буде

однаковий для всіх продукцій, що належать до бази, що проектується, а параметр R не приймає безпосередньої участі в роботі системи та є допоміжним.

Ядро продукції можна представити у наступній формі:

$$C = (z_{j1} \& z_{j2} \& \dots \& z_{ji} \Rightarrow d_{j1} \& d_{j2} \& \dots \& d_{ji}), \quad (3.2)$$

де $z_{j1} \dots z_{ji}$ – значення умов;

$d_{j1} \dots d_{ji}$ – значення дій.

Для кожного порядкового номера умов множина значень визначена при проектуванні бази, тобто $z_{ji} \in Z_i$.

Наприклад існує множина умови Z_k – «Сила тяги». В процесі проектування бази визначено, що до цієї множини потрібно ввести значення, наведені в таблиці 3.3. Фактично, значення елементів множини, наведені в таблиці 3.3, є нечіткими лінгвістичними змінними. Тому їх отримання повністю визначається методами нечіткої логіки.

Використання лінгвістичних значень дозволяє проектувати базу з використанням звичайної мови спілкування, що значно спрощує як сам процес проектування, так і аналіз ефективності роботи системи.

Таблиця 3.3 Значення множини «Сила тяги»

| Позначення елемента множини | Значення елемента множини |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Z_{1k} | «дуже мала» |
| Z_{2k} | «мала» |
| Z_{3k} | «середня» |
| Z_{4k} | «велика» |

Однак є і такі множини, де використання нечітких змінних неможливе. Для описання множини «Положення рукоятки КМ» в базі використовуються такі значення: «1-ша позиція», «2-га позиція», «3-тя позиція», «4-та позиція», «5-та позиція», «6-та позиція», «7-ма позиція»; «8-ма позиція»; множина «Положення рукоятки крану ум.№ 395 та №254» складається з одного положення «2-поїзне», за необхідністю можна розширити множину на всі гальмівні положення кранів; множина «Кількість підключених ТЕД» має три положення: «Робота на 2 ТЕД», «Робота на 4 ТЕД», «Робота на 6 ТЕД». Наведені значення є чіткими і сигнали з відповідних датчиків використовуються в базі без перетворень.

Аналогічно з описом умов, для кожного порядкового номера дії множина значень визначена при проектуванні бази, тобто $d_{ji} \in D_i$. Для опису дій $d_{j1} \dots d_{ji}$ використовуються як чіткі, так і фазифіковані змінні.

3.2. Розробка математичної моделі інтелектуальної системи управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ за допомогою пакету прикладних програм Matlab Fuzzy Logic

Одним з найбільш зручних засобів програмування в галузі нечіткої логіки є середовище Fuzzy Logic пакету прикладних програм Matlab. Для створення бази знань використано правила у вигляді логічних продукцій «Якщо умова, то дія». Для свого дослідження в якості дій було обрано кількість підключених ТЕД при часткових навантаженнях, але потрібно відзначити, що перелік керуючих дій можливо розширити за необхідністю.

При проектуванні нечіткої бази знань системи автоматизованого управління тяговою передачею маневрового локомотива отримано структуру наведену на рис. 3.7, 3.8.. Вхідні та вихідні сигнали якої відповідають даним в таблиці 3.1..

```

1  [System]
2  Name='ISK_CHME3 ver3'
3  Type='mamdani'
4  Version=2.0
5  NumInputs=6
6  NumOutputs=4
7  NumRules=54
8  AndMethod='min'
9  OrMethod='max'
10 ImpMethod='min'
11 AggMethod='max'
12 DefuzzMethod='centroid'
13
14 [Input1]
15 Name='Qskladu'
16 Range=[0 1]
17 NumMFs=5
18 MF1='very_low': 'trimf', [-0.417 0 0.0940803382663847]
19 MF2='low': 'trimf', [0 0.191 0.45]
20 MF3='middle': 'trapmf', [0.202 0.45 0.55 0.8]
21 MF4='high': 'trimf', [0.55 0.8 1]
22 MF5='very_high': 'trimf', [0.9 1 1]
23
24 [Input2]
25 Name='Fk'
26 Range=[0 1]
27 NumMFs=5

```

Рисунок 3.7. М-файл структури вхідних і вихідних даних бази знань

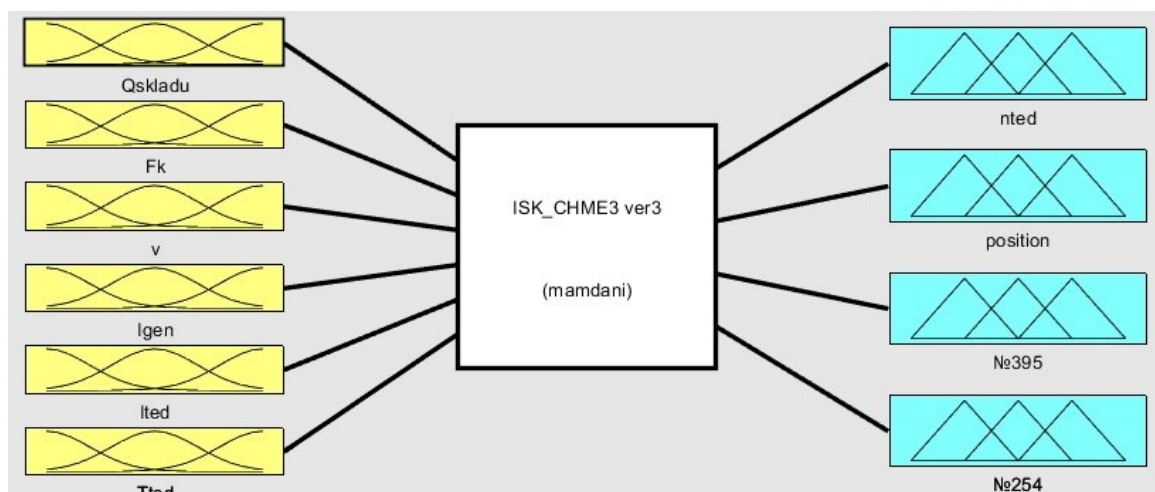


Рисунок 3.8. Структура вхідних і вихідних даних бази знань

Всі сигнали на вході нормалізовано в інтервалі $[0;1]$. Для представлення їх у вигляді нечітких величин для кожного вхідного сигналу призначено множина характеристичних функцій [2]. На рисунках 3.6. – 3.11. наведено фазифікація величин «Маси складу», «Сили тяги», «Швидкості», «Струму тягового генератора», «Струму ТЕД», «Температура перевищення над навколишньою

середою ТЕД». Вони представлені наступними нечіткими величинами: «very_low», «low», «middle», «high», «very_high».

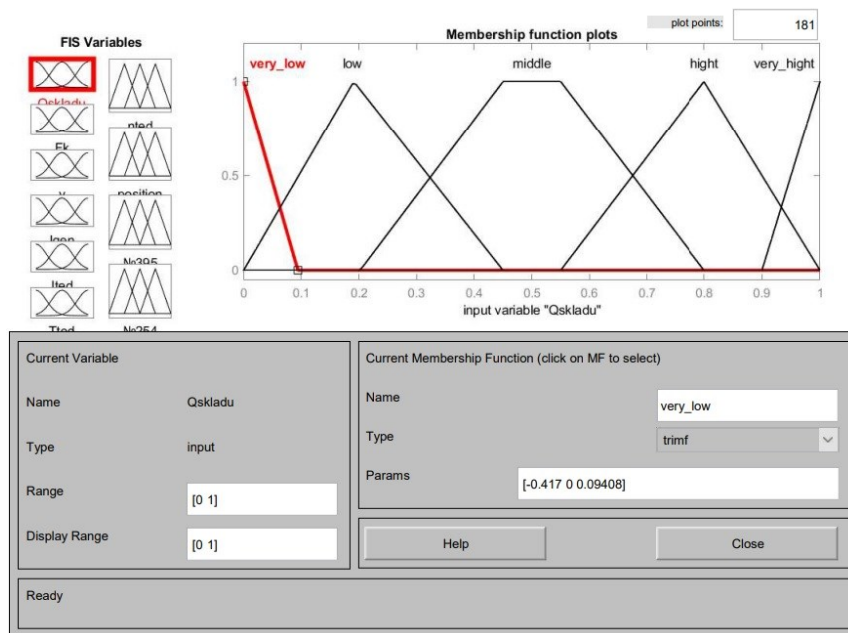


Рисунок 3.6. Фазифікація величини «Маси складу»

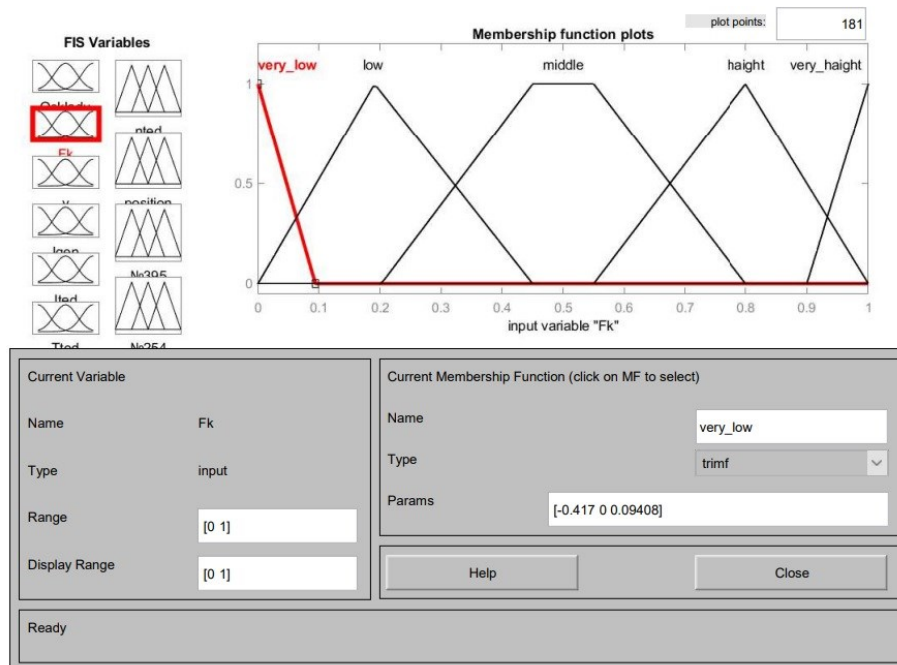


Рисунок 3.7. Фазифікація величини «Сила тяги»

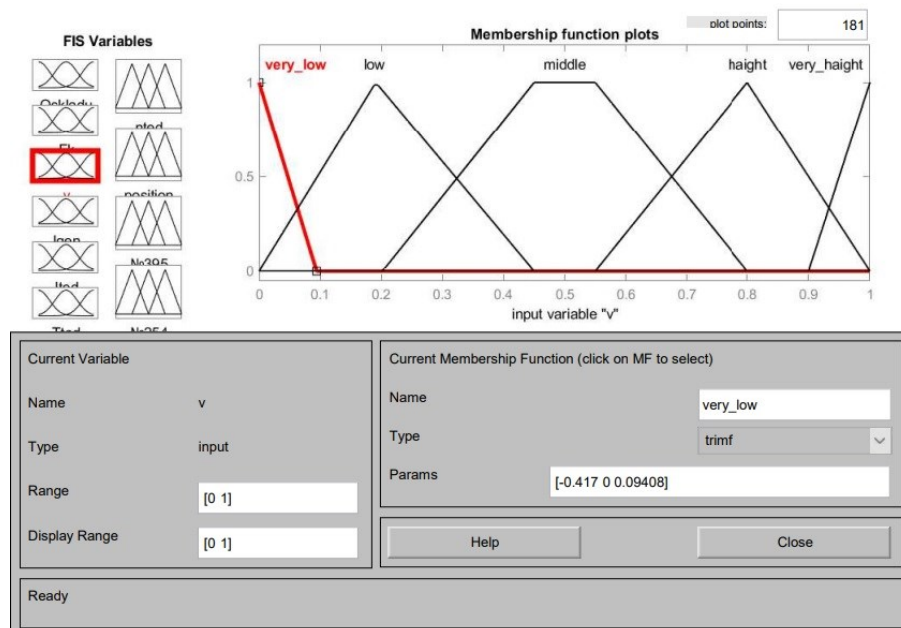


Рисунок 3.8. Фазифікація величини «Швидкість»

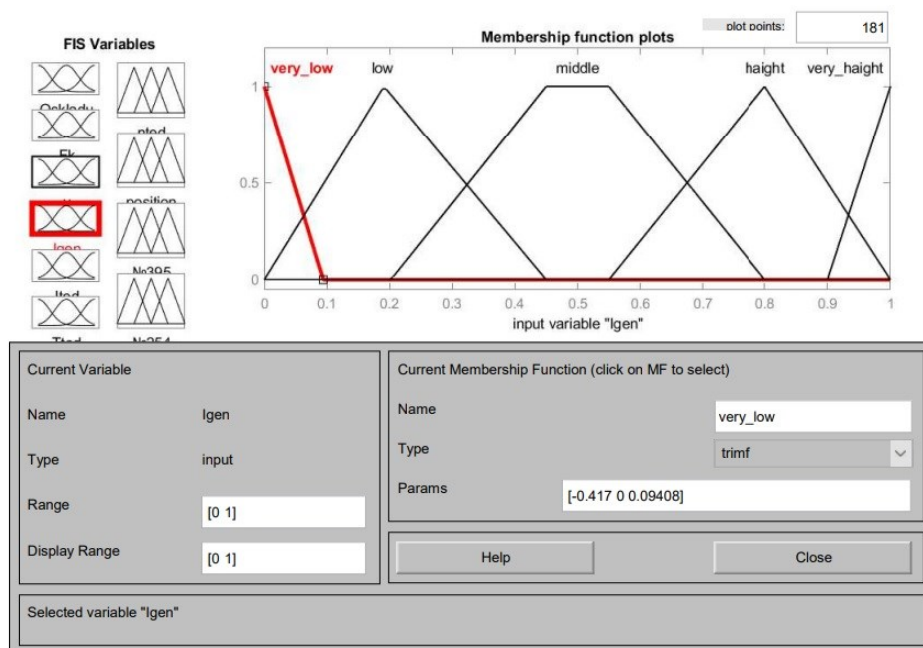


Рисунок 3.9. Фазифікація величини «Струм тягового генератора»

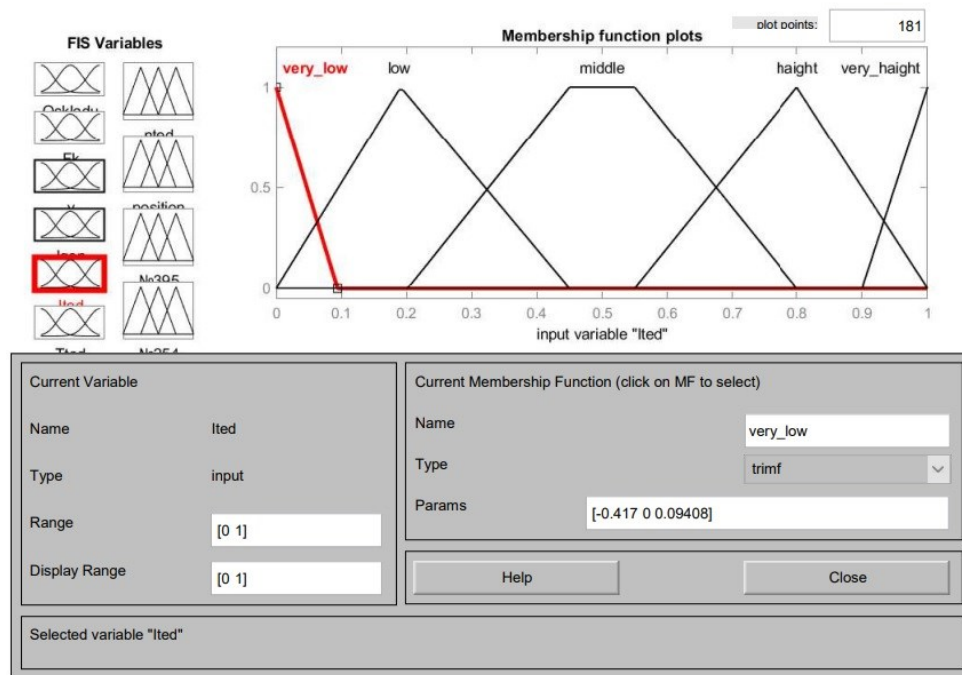


Рисунок 3.10. Фазифікація величини «Струм ТЕД»

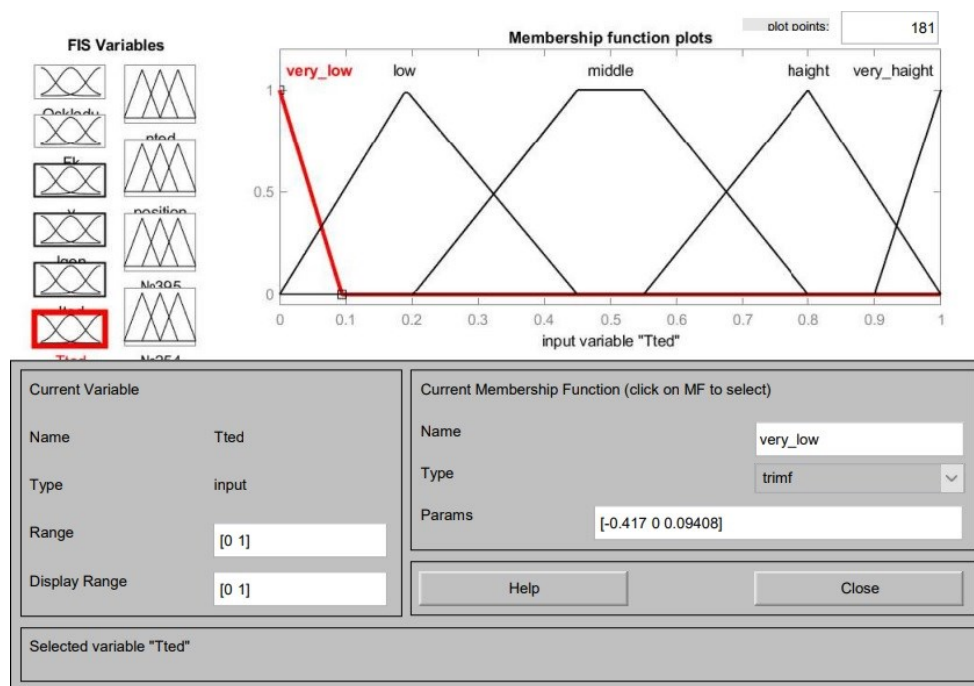


Рисунок 3.11 Фазифікація величини «Температура перевищення над навколишньою середою ТЕД»

На рисунках 3.12. – 3.15. представлено дефазифікацію вихідних величин «Положення контролера машиніста» , «Кількість підключених ТЕД»,

«Положення рукоятки крану машиніста № 395», «Положення рукоятки крану машиніста № 254»



Рисунок 3.12. Дефазифікація «Положення рукоятки контролера машиніста»



Рисунок 3.13. Дефазифікація «Кількість підключених ТЕД»



Рисунок 3.14. Дефазифікація «Положення рукоятки крану машиніста № 395»



Рисунок 3.15. Дефазифікація «Положення рукоятки крану машиніста № 254»

За допомогою методу експертних оцінок та логіки керування тяговим рухомим складом в пакеті Fuzzy Logic Designer створено базу знань, частина якої представлена на рисунку 3.16. та повний перелік логічних правил представлений в ДОДАТКУ І.

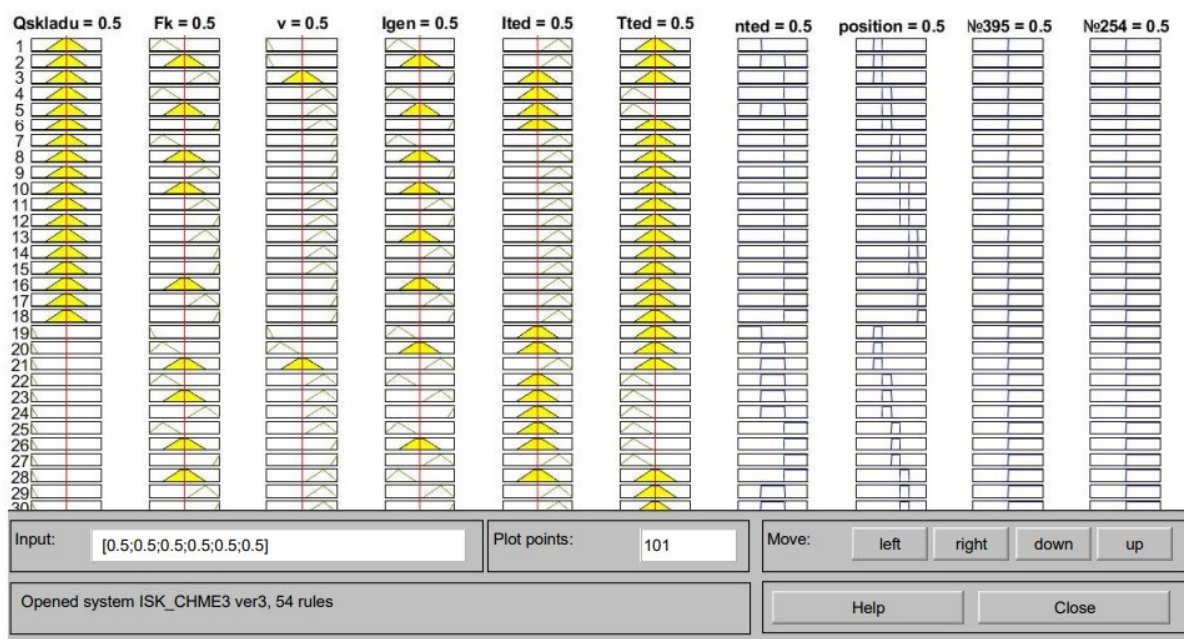


Рисунок 3.16. Загальний вигляд правил в базі знань

Результати розрахунку математичної моделі автоматизованого управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ дають можливість дослідити залежності вихідної змінної від вхідної та отримати тривимірні поверхневі діаграми за допомогою функції Fuzzy Logic Surface:

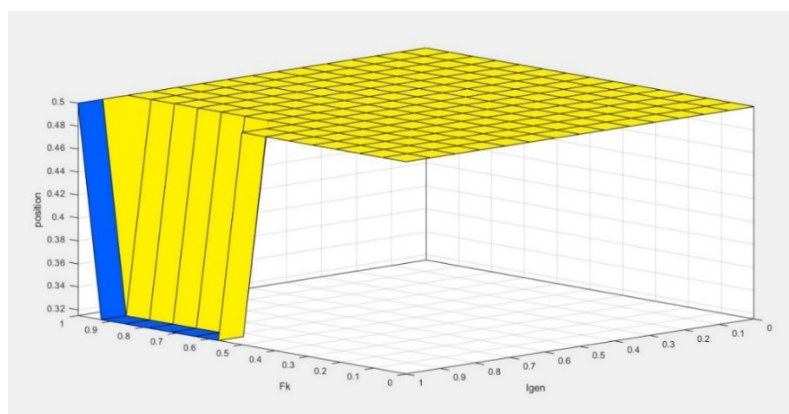


Рисунок 3.17. Тривимірна поверхня залежності вихідної змінної «Положення контролера машиніста» від вхідних «Сила тяги» та «Струм тягового генератора»

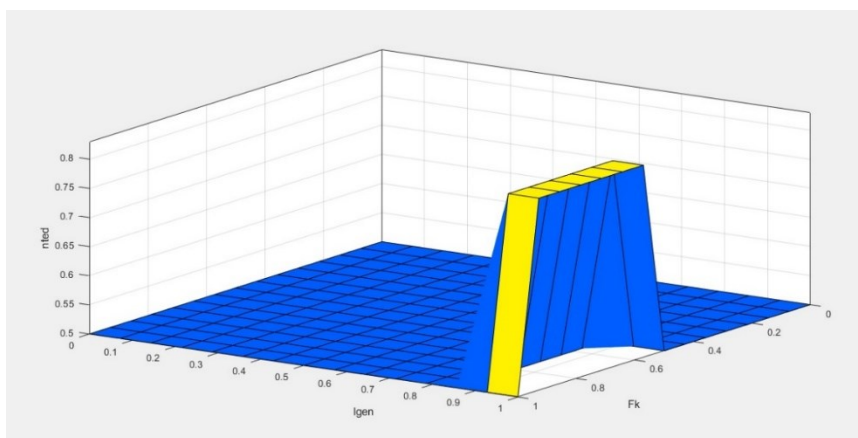


Рисунок 3.18. Тривимірна поверхня залежності вихідної змінної «Кількість підключених ТЕД» від вхідних «Сила тяги» та «Струм тягового генератора»

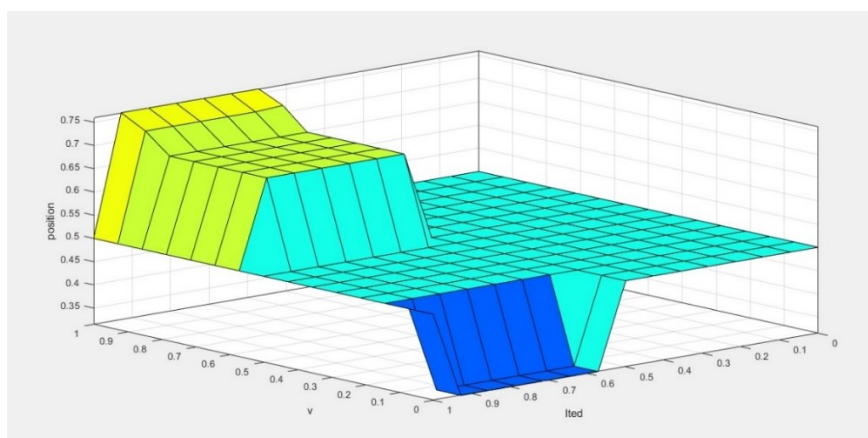


Рисунок 3.19. Тривимірна поверхня залежності вихідної змінної «Положення контролера машиніста» від вхідних «Швидкість» та «Струм ТЕД»

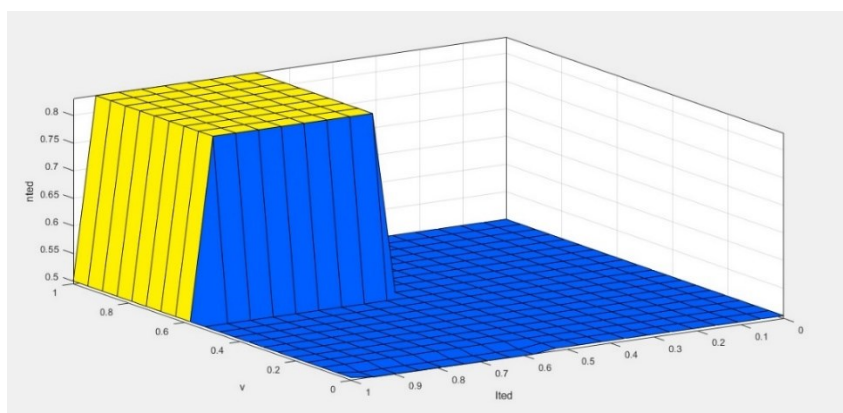


Рисунок 3.20. Тривимірна поверхня залежності вихідної змінної «Кількість підключених ТЕД» від вхідних «Швидкість» та «Струм ТЕД»

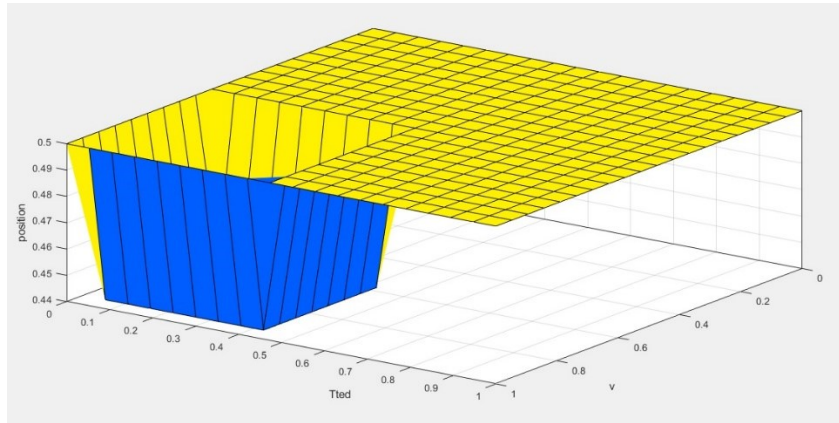


Рисунок 3.21. Тривимірна поверхня залежності вихідної змінної «Положення контролера машиніста» від вхідних «Температура перевищення над навколишньою середою ТЕД» та «Швидкість»

В процесі розробки автоматизованої системи було визначено перелік факторів, що впливають на прийняття керуючого рішення при управлінні тяговою електричною передачею маневрового локомотива (таблиця 1). Необхідно відмітити, що цей перелік факторів може змінюватися та розширюватися відповідно до серії локомотива та умов експлуатації. Для задачі управління тяговою передачею маневрового локомотива використовується продукційна модель, що поєднує елементи логічних і мережевих підходів. До основних недоліків якої відноситься – складність управління великою кількістю правил, коли кількість правил зростає, стає важко управляти їхнім порядком виконання і взаємодією. Це може призводити до конфліктів і помилок у висновках. Проблеми з ефективністю, виконання великої кількості правил може займати багато часу, особливо якщо правила є складними або мають багато умов. Підтримка та оновлення, зміни в знаннях або правилах вимагають постійного оновлення продукційної бази, що може бути трудомістким процесом. Для запропонованої системи використовується 54 нечітких логічних правил, для подальших досліджень пропонується розширити базу, додавши правила про виконання маневрової роботи локомотивом з 15-тю 4-х вісними вагонами. Результатами розрахунку автоматизованої моделі управління тяговою

передачею маневрового локомотива є керівні сигнали. За допомогою яких, можна реалізувати оптимальний режим руху для конкретного поїзда та ділянки експлуатації. Для подальших досліджень пропонується дослідити різні серії маневрових тепловозів, їх технічний стан тягових електричних передач. Проаналізувати більшу кількість ділянок експлуатації, для можливості створення універсальної нечіткої бази знань системи.

В даному вигляді модель автоматизованої системи управління тяговою передачею локомотива показує свою адекватність. Для фазифікації вхідних та вихідних величин в основному використовуються характеристичні функції трапецієвидної та трикутної форми. В подальших дослідженнях для збільшення якості та точності системи, необхідно дослідити вибір та обґрунтування кожної функції приналежності для сигналів на вході. Для системи використовується діапазон понять в множині функції такий, як: [дуже малий, малий, середній, великий, дуже великий]. Для покращення роботи системи в наступних дослідженнях слід розширити перелік даних понять до: [дуже малий, малий, нижче за середній, середній, вище за середній, великий, дуже великий], розширення даних понять підвищує складність структури, але додасть гнучкості системи.

Отримані результати роботи системи дозволяють реалізувати досить різноманітні режими управління тяговою передачею маневрового локомотива, що відрізняються від прийнятих при тягових розрахунках і зазначених в режимних картах. Раціональні режими водіння поїздів значно варіюються в залежності від експлуатаційних умов, що робить неможливим визначення єдиного оптимального режиму для всіх можливих сценаріїв руху на конкретній ділянці. Це пояснюється тим, що навіть на одній і тій самій ділянці експлуатаційні умови можуть змінюватися досить часто. Додатково, технічні характеристики тягових передач і окремих локомотивів можуть відхилятися від паспортних значень у певних межах залежно від їхнього фактичного технічного стану, що також впливає на вибір оптимального режиму водіння. Отримана автоматизована модель управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ пропонує свій оптимальний режим руху для конкретного поїзда та

ділянки, використовуючи створену базу даних та пропонує рух маневрового локомотива на 4 ТЕД використовуючи частково 3, та повністю 4 та 5 позицію контролера машиніста. Такий режим руху дозволяє зменшити витрати палива на маневрову роботу локомотива при часткових навантаження на тягову передачу.

Висновки по розділу 3.

1. Під час розробки теоретичного підґрунтя для створення бази знань моделі автоматизованого управління тяговою передачею маневрових локомотивів проаналізовано методи створення інтелектуальних систем керування які базуються на ситуаційному керуванні та використанні сучасних інформаційних технологій для обробки знань таких, як експертні системи, штучні нейронні мережі, нечітка логіка, еволюційні методи та генетичні алгоритми.
2. Якість роботи систем штучного інтелекту безпосередньо залежить від структури, змісту та алгоритмів управління базою знань. До основних функцій баз знань належать: збирання та аналіз інформації, створення та зберігання правил, а також можливість самонавчання і адаптації. Крім того, важливими аспектами є інтеграція нових даних, перевірка їхньої достовірності та ефективне використання інформації для прийняття рішень.
3. База знань є одним із ключових компонентів інтелектуальних систем управління. Для представлення знань можуть використовуватися різні моделі, такі як логічні, мережеві, фреймові та продукційні, які дозволяють організувати та обробляти інформацію. Для задачі управління тяговою передачею маневрових локомотивів використовується продукційна модель, що поєднує елементи логічних і мережевих підходів. Від логічних моделей запозичено концепцію правил висновку, які називаються продукціями, а від мережевих моделей – представлення знань у формі семантичної мережі, яка дозволяє наочно представляти та моделювати знання, встановлювати зв'язки та робити логічні висновки.

4. Описано методи самоорганізації та самонавчання, які дозволяють системам адаптуватися до змінних умов експлуатації. Визначено основні параметри для побудови моделей, що враховують різні сценарії керування, використовуючи методи нечіткої логіки та методи експертних оцінок. Модель включає створення бази знань, що дозволяє автоматизовано керувати тяговою передачею маневрового локомотивом, зокрема, різними варіантами підключення ТЕД використовуючи дані про поточний стан тягових характеристик, швидкість, струм тягових генераторів та двигунів, а також інші параметри.

5. Створено математичну модель інтелектуальної системи управління тяговою передачею маневрового локомотива та реалізовано за допомогою програмного забезпечення MATLAB (Fuzzy Logic), який використовує для побудови моделі метод Мамдані. Всі сигнали на вході нормалізовано в інтервалі $[0;1]$. Для представлення їх у вигляді нечітких величин для кожного вхідного сигналу призначено множина характеристичних функцій та проведено фазифікацію таких вхідних змінних як, маса складу, сила тяги, швидкість, струм тягового генератора, струм ТЕД, температура перевищення над навколишньою середою ТЕД та представлено наступними нечіткими величинами – «very_low», «low», «middle», «high», «very_high». Проведено фазифікацію вихідних змінних таких як положення рукоятки контролера машиніста, кількість підключених ТЕД, положення рукоятки крану машиніста № 395, положення рукоятки крану машиніста № 254.

6. Використовуючи отримані результати математичної моделі тягово-енергетичних показників маневрового локомотива, логіку управління та метод експертних оцінок в пакеті Fuzzy Logic Designer створено базу знань яка представляє собою набір логічних продукцій «Якщо умова, то дія».

7. За результатами розрахунку отриманої моделі, можна провести дослідження роботи системи за рахунок функції Fuzzy Logic Surface та отримати тривимірні поверхневі залежності вихідної змінної «Положення контролера машиніста» від вхідних «Сила тяги» та «Струм тягового генератора», «Кількість підключених ТЕД» від вхідних «Сила тяги» та «Струм тягового генератора», «Положення

контролера машиніста» від вхідних «Швидкість» та «Струм ТЕД», «Кількість підключених ТЕД» від вхідних «Швидкість» та «Струм ТЕД», «Положення контролера машиніста» від вхідних «Температура перевищення над навколишньою середою ТЕД» та «Швидкість».

8. Отримана автоматизована модель управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ пропонує свій оптимальний режим руху для конкретного поїзда та ділянки, використовуючи створену базу даних та пропонує рух маневрового локомотива на 4 ТЕД використовуючи частково 3-тю та повністю 4-ту та 5-ту позицію контролера машиніста. Такий режим руху дозволяє зменшити витрати палива на маневрову роботу локомотива при часткових навантаження на тягову передачу.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ ТЯГОВОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВОМ ЧМЕЗ

4.1. Визначення витрати та економії палива маневровим локомотивом ЧМЕЗ за робочу зміну при різних варіантах роботи тягової електричної передачі.

У зв'язку з військового станом та постійним зростанням цін на дизельне паливо в Україні, важливості набувають питання підвищення продуктивності маневрових тепловозів та зменшення ними споживання дизельного палива в будь яких розмірах [94,95,96].

Використовуючи наведену вище модель розрахунку тягово-енергетичних показників [3] та модель автоматизованого управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ [4,97] (які використовуються майже в 87% маневрової роботи [98]) вдалося отримати оптимальні режими руху, які дозволять зменшити витрати палива на виконання маневрової роботи на часткових навантаженнях.

Використовуючи отримані дослідні данні та дослідження [99] про режими роботи маневрових локомотивів ЧМЕЗ отримано таблицю 4.1. відсоткового використання позицій контролера машиніста за 12 годин роботи (не враховуючи час простою) на певній ділянці руху.

Таблиця 4.1. Відсоток використання позиції контролера машиніста за 12-ти годину робочу зміну

| № позиції | Відсоток використання позиції, % | Час використання позиції, хв. |
|-----------|----------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 13 | 93.6 |
| 2 | 18 | 129.6 |

| | | |
|---|----|------|
| 3 | 30 | 216 |
| 4 | 25 | 180 |
| 5 | 11 | 79.2 |
| 6 | 1 | 7.2 |
| 7 | 1 | 7.2 |
| 8 | 1 | 7.2 |

Отримавши відсоток використання позиції можна розрахувати годинну витрату палива використовуючи математичну модель визначення тягово-енергетичних показників з другого розділу дисертації. За результатами розрахунку сформовано таблицю 4.2.

Таблиця 4.2. Показники витрати палива та пройденого шляху за 1 годину роботи тепловоза на різних варіантах підключення ТЕД для позицій контролера машиніста.

| № позиції | t_{int} , хв. | S_{pr2} , м. | G_{e2} , г. | S_{pr4} , м. | G_{e4} , г. | S_{pr6} , м. | G_{e6} , г. |
|-----------|-----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| 1 | 60 | 1124 | 1173 | 4352 | 2463 | 12134 | 11359 |
| 2 | 60 | 1980 | 1524 | 6584 | 3986 | 18652 | 13596 |
| 3 | 60 | 2808 | 1702 | 7404 | 4671 | 23909 | 17649 |
| 4 | 60 | 23626 | 17553 | 29189 | 22638 | 30552 | 24025 |
| 5 | 60 | 28603 | 23024 | 54582 | 56692 | 57494 | 60883 |
| 6 | 60 | 31397 | 28236 | 33125 | 30000 | 33651 | 30488 |
| 7 | 60 | 34905 | 36300 | 36832 | 38348 | 37425 | 39053 |
| 8 | 60 | 43988 | 47118 | 79940 | 123458 | 86664 | 140403 |

Використовуючи значення таблиць 4.1, 4.2 розраховуємо кількість витрати палива на кожній із задіяних позицій та отримуємо загальне значення за 12-ти годинну роботу маневрового локомотива ЧМЕЗ.

Таблиця 4.3 Загальні значення витрати палива на кожній позиції контролера машиніста протягом поїздки на 6 ТЕД

| № позиції | Витрати палива G_e , кг | Кількість часу роботи на кожній позиції контролера машиніста, год |
|-----------|------------------------------|---|
|-----------|------------------------------|---|

| | | |
|---|-----------------------|-------------|
| 1 | 17.72 | 1.56 |
| 2 | 29.4 | 2.16 |
| 3 | 63.54 | 3.6 |
| 4 | 72.1 | 3 |
| 5 | 80.4 | 1.32 |
| 6 | 3.6 | 0.12 |
| 7 | 4.7 | 0.12 |
| 8 | 16.84 | 0.12 |
| | $\Sigma G_{e1}=288.3$ | $\Sigma 12$ |

Таблиця 4.4 Загальні значення витрати палива на кожній позиції контролера машиніста протягом поїздки на 6 та 4 ТЕД

| № позиції | Витрати палива G_e , кг | Кількість часу роботи на кожній позиції контролера машиніста, год |
|-----------|------------------------------|--|
| 1 | 17.72 | 1.56(Рух на 6 ТЕД) |
| 2 | 29.4 | 2.16(Рух на 6 ТЕД) |
| 3 | 60 0.934 | 3.4 (Рух на 6 ТЕД) 0.2 (Рух на 4 ТЕД) |
| 4 | 68 | 3 (Рух на 4 ТЕД) |
| 5 | 74.8 | 1.32 (Рух на 4 ТЕД) |
| 6 | 3.6 | 0.12(Рух на 6 ТЕД) |
| 7 | 4.7 | 0.12(Рух на 6 ТЕД) |
| 8 | 16.84 | 0.12(Рух на 6 ТЕД) |
| | $\Sigma G_{e2}=275.99$ | $\Sigma 12$ |

Отримані значення з таблиць 4.3 та 4.4 використовуємо для розрахунку економії палива за 12 годин роботи тепловоза[100]:

$$\sum_{n=1...8}^{t=1...12} G_e = G_{e1} - G_{e2} = 288.3 - 275.99 = 12,31 \text{ кг., або } 14,66 \text{ л.} \quad (4.1)$$

де G_{e1} – загальні значення витрати палива використовуючи тільки 6 ТЕД;
 G_{e2} – загальні значення витрати палива використовуючи 4 та 6 ТЕД;

Аналізуючи отримані значення на різних варіантах підключення ТЕД можна говори про доцільність використання даного методу керування тяговою передачею маневрового локомотива. Результати розрахунку показують економію палива в 12.31 кг, що складає 14.66 літрів за 12 годин роботи тепловозу. На 08.09.2024 року ціна дизельного палива складає 55.49 грн за одну літру, використовуючи прості математичні розрахунки отримуємо значення в 813 грн. 48 коп.

4.2. Розрахунок капітальних витрат на оснащення локомотива автоматизованою інтелектуальною системою управління тяговою передачею маневрового локомотива.

Розрахунок витрат починається з оцінки капітальних вкладень КВ на вартість необхідного обладнання, матеріалів, оплати праці працівників, які задіяні в процесі модернізації. Вартість комплектуючих B_k , що застосовуються для виготовлення запропонованої системи, представлена в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 Кошторисна вартість комплектуючих

| Тип обладнання | Кількість, од. | Ціна, грн. | Вартість, тис. грн. |
|--------------------------------|-------------------|------------|------------------------|
| Персональний мікрокомп'ютер | 1 | 120 000 | 120 000 |
| Мікропроцесор | 1 | 150 000 | 150 000 |
| Інтерфейсна частина | 1 | 100 000 | 100 000 |
| Теристори | 3 | 20 000 | 60 000 |
| Разом | | | 430 000 |

Таблиця 4.6 - Заробітна плата за встановлення

| Вид робіт | Розряд робіт | Трудовісткість, чол. година | Годинна тарифна ставка, грн. | Сума, тис. грн |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| Встановлення системи на локомотив | 6 | 96 | 436,6 | 41 913.6 |
| Разом | | | | 41 913.6 |

Разом капітальні вкладення:

$$KB = B_{\kappa} + \Phi O \Pi = 430000 + 41914 = 471914 \text{ тис. грн.}, \quad (4.2)$$

де B_{κ} – вартість комплектуючих;

$\Phi O \Pi$ – фонд оплати праці.

Визначимо економію палива на маневрову роботу локомотива за рік:

$$E_{en} = A_n \cdot C_e = 10220 \cdot 55.49 = 567108 \text{ тис. грн.}, \quad (4.3)$$

де A_n – кількість палива за рік, яку зекономлено в л.;

C_e – вартість дизельного пального за 1 літру в грн.

Термін окупності системи становитиме:

$$T_{ок} = \frac{KB}{E_{en}} = \frac{471914}{567108} = 0,83 \text{ роки, або 8 місяці та 3 тижні}, \quad (4.4)$$

Річна економічна ефективність від запропонованої системи складає 567 108 тис. грн.. Термін окупності запропонованої системи становить 8 місяців та 3 тижні.

Висновки по розділу 4.

1. За допомогою отриманих дослідних даних про режими роботи маневрових локомотивів ЧМЕЗ отримано відсоток використання позицій контролера машиніста за 12 годин роботи (не враховуючи час простою) на певній ділянці руху, який становить:

- 13% для 1-ї ПКМ;
- 18% для 2-ї;
- 30% для 3-ї;
- 25% для 4-ї;
- 11% для 5-ї
- по 1% для 6,7,8 ПКМ.

2. Використовуючи математичну модель визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива розраховано годинну витрату палива тепловоза на різних варіантах підключення ТЕД для позицій контролера машиніста. Для 4-ї ПКМ годинна витрата палива складає 22.7 кг/год використовуючи для руху 4 ТЕД, а 24 кг/год витрачає локомотив для руху на 6 ТЕД. Для 5-ї ПКМ годинна витрата палива складає 56.7 кг/год використовуючи для руху 4 ТЕД, а 60,8 кг/год витрачає локомотив для руху на 6 ТЕД.

3. Виконано розрахунок 12-ти годинної витрати палива на кожній із задіяних ПКМ. За 12 годину роботу тепловоза, який використовує для руху 6 ТЕД, знадобиться 288,3 кг дизельного пального, або 343,2 літрів, та використовуючи змішане керування на 4 та 6 ТЕД знадобиться 275,99 кг дизельного пального, або 328,6 літрів.

4. Аналізуючи отримані показники можна говори про доцільність використання даного методу керування тяговою передачею маневрового локомотива на часткових навантаженнях. Результати розрахунку показують економію палива в 12.31 кг, що складає 14.66 літрів за 12 годин роботи тепловозу. На 08.09.2024 року ціна дизельного палива складає 55.49 грн за одну літру, використовуючи прості математичні розрахунки отримуємо значення в 813 грн. 48 коп. фінансової економії.

5. Річна економічна ефективність від запропонованої системи складає 567 108 тис. грн.. Термін окупності запропонованої системи становить 8 місяців та 3 тижні.

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Існуючі методів тягових розрахунків при маневровій роботі локомотива які є основним елементом в залізничному транспорті. Використовуючи тягові розрахунки можна визначити максимально допустиму масу поїзда, розрахувати швидкість та час руху, витрату палива та електроенергії на тягу поїздів, а також виконувати розв'язання задач пов'язаних з гальмуванням. Сучасні методи тягових розрахунків базуються на використанні комп'ютерного моделювання, що дозволяє підвищити точність та автоматизувати розрахунки.

Досліджено та апроксимовано існуючі характеристики маневрового локомотива ЧМЕЗ, отримано аналітичні вирази кожної із позицій контролера машиніста.

2. Проведений аналіз використання інтелектуальних систем управління рухомим складом, говорить про перспективність даних методів. Ці технології дозволяють створювати більш адаптивні, надійні та ефективні системи, які здатні краще реагувати на змінні умови і невизначеності, ніж традиційні методи керування.

3. Створено математичну модель для визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ, яка на відміну від існуючих має можливість визначення основних параметрів на часткових навантаженнях тягової передачі. За результатами розрахунку моделі створено графічні залежності сили тяги від швидкості; сили струму генератора від швидкості; сили струму ТЕД від швидкості; кількість витраченого часу на подолання заданої відстані; кількість витраченого палива локомотивом на роботу; перевищення температури двигуна над навколишнім середовищем. Дані залежності створено з 3-ї по 8-му позицію контролера машиніста, для 3-х варіантів підключення ТЕД. А саме для роботи локомотива на 2-х, 4-х та 6 ТЕД. Для аналізу був обраний поїзд з 10-тю 4-х вісними вагонами вагою 650т. на відстань руху 300 м. по прямій дільниці шляху. Розглядаючи отриману струмову характеристику двигунів на 3-

й позиції контролера машиніста можна говорити про не можливість використання для руху 2 ТЕД за рахунок великих струмів, які будуть протікати в них. Проте використовувати для руху 4 двигуни є можливість в певних діапазонах швидкостей. За рахунок отриманих даних в роботі досліджується робота маневрового локомотива на 4-х та 6-ти ТЕД. Результати розрахунку демонструють зменшення витрати палива на 504.5 грами в порівнянні з рухом локомотива на 6 ТЕД та 4 ТЕД, при 3-й позиції контролера машиніста. В результаті можна зробити висновок, що при використанні різних варіантів підключення ТЕД, можливо отримати економію палива на виконання маневрової роботи, використовуючи при цьому часткові навантаження передачі в залежності від експлуатаційних умов. При цьому температура ТЕД залишається в межах допустимої для класу ізоляції F.

4. Розраховано ККД на часткових навантаженнях тягової електричної передачі маневрового локомотива ЧМЕЗ, який складається з таких основних компонентів: ККД тягового електричного двигуна ТЕ006, ККД тягового генератора TD006 та ККД редуктора тепловоза. Для аналізу обрана однакова ділянка руху з 10-тю вагонами загальна вага яких становить 650т. на різних навантаженнях передачі локомотива. Для 3-ї позиції на відстань 300 метрів середнє ККД ТЕД становило 0,96%, ККД ТГ становило 0,83%, ККД передачі 0,76% для руху локомотива на 4-х двигунах. Для руху локомотива на 6-ти двигунах: ККД ТЕД становило 0,87%, ККД ТГ становило 0,71%, ККД передачі 0,61%. Збільшення ККД відбувається за рахунок роботи двигунів в діапазонах наближених до номінальних струмів. Отримані значення підтверджують раціональність використання різних варіантів підключених ТЕД при часткових навантаженнях локомотива.

Отримано значення ККД ТЕД, ККД ТГ, ККД передачі для руху локомотива резервом на 4-х ТЕД, які становлять 0,95% для двигуна, 0,79% для генератора та 0,74% для передачі. Для 6 ТЕД відповідні значення становлять 0,80% для двигуна, 0,64% для генератора та 0,50% для передачі локомотива. Додатково отримано значення ККД ТЕД, ККД ТГ, ККД передачі для руху локомотива на 4-

х ТЕД з 2-ма вагонами вагою 130т. на відстань 300 м., які становлять 0,95% для двигуна, 0,79% для генератора та 0,74% для передачі. Для 6 ТЕД відповідні значення становлять 0,82% для двигуна, 0,66% для генератора та 0,54% для передачі локомотива.

Дослідження отриманих графіків ККД електричної передачі при різних умовах експлуатації підтверджують доцільність використання різних варіантів підключення електродвигунів для досягнення оптимальної енергоефективності, виходячи з аналізу ККД використовувати даний метод керування необхідно на частково 3-й та повністю 4-й та 5-й позиції контролера машиніста.

5. Створено базу знань моделі автоматизованого управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ. Якість роботи систем штучного інтелекту безпосередньо залежить від структури, змісту та алгоритмів управління базою знань. До основних функцій баз знань належать: збирання та аналіз інформації, створення та зберігання правил, а також можливість самонавчання і адаптації. Крім того, важливими аспектами є інтеграція нових даних, перевірка їхньої достовірності та ефективне використання інформації для прийняття рішень. Для задачі управління тяговою передачею маневрових локомотивів використовується продукційна модель, що поєднує елементи логічних і мережевих підходів.

6. Створено математичну модель інтелектуальної системи управління тяговою передачею маневрового локомотива та реалізовано за допомогою програмного забезпечення MATLAB (Fuzzy Logic), використано для побудови метод Мамдані. За результатами отриманої моделі в Fuzzy Logic Surface отримано тривимірні поверхні залежності вихідних змінних від вхідних, які дозволяють реалізувати досить різноманітні режими управління тяговою передачею маневрового локомотива, що відрізняються від прийнятих при тягових розрахунках і зазначених в режимних картах. Раціональні режими водіння поїздів значно варіюються в залежності від експлуатаційних умов, що робить неможливим визначення єдиного оптимального режиму для всіх можливих сценаріїв руху на конкретній ділянці. Отримана автоматизована

модель управління тяговою передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ пропонує свій оптимальний режим руху для конкретного поїзда та ділянки, використовуючи створену базу даних та пропонує рух маневрового локомотива на 4 ТЕД частково використовуючи 3-тю, та повністю 4-ту та 5-ту позицію контролера машиніста. Такий режим руху дозволяє зменшити витрати палива на маневрову роботу локомотива при часткових навантаженнях на тягову передачу.

7. За результатами розрахунків отримано значення витрати палива за 12 годину роботи тепловоза. Для руху на 6 ТЕД знадобиться 288,3 кг дизельного пального, або 343,2 літрів, використовуючи змішане керування на 4 та 6 ТЕД знадобиться 275,99 кг дизельного пального, або 328,6 літрів, за даними показниками розраховуємо економії палива локомотива, яка складає 12.31 кг, або 14.66 літрів. На 08.09.2024 року ціна дизельного палива складає 55.49 грн за одну літру, використовуючи математичні розрахунки отримуємо значення в 813 грн. 48 коп. фінансової економії. Термін окупності запропонованої системи становить 8 місяців та 3 тижні.

Список використаних джерел.

1. Gorobchenko, O., Holub, H., & Zaika, D. (2024). Theoretical basics of the self-learning system of intelligent locomotive decision support systems. *Archives of Transport*, 71(3), 169–186. <https://doi.org/10.61089/aot2024.gaevsp41>
2. Gorobchenko, O., Matsiuk, V., Holub, H., Zaika, D., & Gritsuk, I. (2023). The theoretical basis of the choice of new locomotives for Ukraine in the post-war period. *Transport Systems and Technologies*, (42), 34–44. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-42-3>
3. Горобченко, О. М., & Заїка, Д. О. (2024). Створення математичної моделі визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, (208), 146–162. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308485>
4. Gorobchenko, O., & Zaika, D. (2024). Creation of a model of automated traction control of shunting locomotives by using artificial intelligence methods. *Transport Systems and Technologies*, (44), 8–26. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-44-1>
5. Zvolenský, P., Barta, D., Grenčík, J., Drożdziel, P., & Kašiar, Ľ. (2021). Improved method of processing the output parameters of the diesel locomotive engine for more efficient maintenance. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 23(2), 315 – 323. <https://doi.org/10.17531/ein.2021.2.11>
6. Kisliy, D. M., Desiak, A. Y., Bobyr, D. V., & Bodnar, E. B. (2023). Determination of Energy-Optimized Locomotive Control During Train Acceleration. *Science and Transport Progress*, 4 (104), 25 – 38. <https://doi.org/10.15802/stp2023/298713>
7. Gorobchenko, O., & Nevedrov, O. (2020). Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its effectiveness. *Archives of Transport*, 56(4), 47 – 58. <http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0014.5517>
8. Горобченко, О. М. (2021). Теоретичні основи оцінки інформативності ознак поїзної ситуації для роботи інтелектуальних систем керування локомотивом. *Транспортні системи і технології*, (38), 223–231. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-220-21>

9. Тартаковський, Е. Д., & Горобченко, О. М. (2015). Застосування байєсівських мереж при розробленні інтелектуального модуля керування гальмами поїзда. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, (157). 155–159. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.157.2015.61989>
10. Yin, M., Li, K., & Cheng, X. (2020). A review on artificial intelligence in high-speed rail. *Transportation Safety and Environment*, 2(4), 247–259. <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa022>
11. Gaibnazarova, Z. (2024). Artificial Intelligence and Smart Railway Transport as a Tool to Accelerate the Transformation Process in Uzbekistan. In *Digital Transformation: What are the Smart Cities Today*, 846. 261–274. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49390-4_19
12. Plissonneau, A., Trentesaux, D., Ben-Messaoud, W., & Bekrar, A. (2021). AI-based speed control models for the autonomous train: A literature review. *Proceedings of the Third International Conference on Transportation and Smart Technologies (TST)* (pp. 9–15). <https://doi.org/10.1109/TST52996.2021.00009>
13. Bodnar, B., Kapitsa, M., Bobyr, D., & Kyslyi, D. (2019). Defining the limits of application and the values of integration variables for the equations of train movement. *Scientific Bulletin of National Mining University*. (6). 59–65. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/9>
14. Krasulin, O. (2024). On the issue of operational rationing of energy resources for train traction. *SWorldJournal*, (25-01), 138–145. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-25-00-052>.
15. Барибін, М.А., Фалендиш, А. П., Гатченко, В. О., Клецька, О. В., & Кіріцева, О. В. (2020). Інформаційно-розрахунковий комплекс «Тягові розрахунки» та математичні методи пошуку основних параметрів руху поїзда як основи оптимізації витрат ресурсів на тягу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 25(4), 15–27. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v25i4.219530>
16. Притула, М.Г., & Пасечник, О.А. (2019). Оптимізаційні тягові задачі на залізничній мережі. Наука та прогрес транспорту. *Вісник Дніпропетровського*

- національного університету залізничного транспорту, 2019, № 3 (81). 44-64.
<https://doi.org/10.15802/stp2019/171774>
17. Бобирь, Д. В., Капіца, М. І., & Сердюк, В. Н. (2022). *Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для промислового залізничного транспорту* (112 с.). Дніпро: Дріант-друк.
18. Бобирь, Д. В., Білоконь, І. М., Очкасов, О. Б., & Сердюк, В. Н. (2023). *Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для маневрової роботи* (129 с.). Дніпро: Дріант-друк.
19. Сорока, К. О. (2022). *Тягові розрахунки на основі аналізу процесів перетворення енергії: монографія*. (242 с.). Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
20. Фалендиш, А. П., Гатченко, В. О., Возненко, С. І., Клецька, О. В., & Барибін, М. А. (2020). Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках. *Транспортні системи і технології*, (35), 102 – 112.
<https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>
21. Kostenko, I., Bilokon, I., Lysenko, Y., Chernyshenko, Y., & Riabov, I. (2023). Analysis of shunting locomotive operating modes when performing traction tasks. *Транспортні системи і технології*, (42), 18 – 33. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-42-2>
22. Wu, Q., Spiryagin, M., & Cole, C. (2020). Train energy simulation with locomotive adhesion model. *Railway Engineering Science*, (28), 75 – 84.
<https://doi.org/10.1007/s40534-020-00202-1>
23. Wu, Q., Spiryagin, M., Wolfs, P., & Cole, C. (2018). Traction modelling in train dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(4), 382 – 395. <https://doi.org/10.1177/0954409718795496>
24. Fernández, P. M., Sanchís, I. V., Yepes, V., & Franco, R. I. (2019). A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 222, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.037>

25. Arboleya, P., Mayet, C., Mohamed, B., Aguado, J. A., & de La Torre, S. (2020). A review of railway feeding infrastructures: Mathematical models for planning and operation. *eTransportation*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100063>
26. Riabov, I., Goolak, S., & Neduzha, L. (2024). An Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*, 6(2), 611–631. <https://doi.org/10.3390/vehicles6020028>
27. Aredah, A., Fadhloun, K., & Rakha, H. A. (2024). Energy optimization in freight train operations: Algorithmic development and testing. *Applied Energy*, 364. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123111>
28. Aredah, A., Du, J., Hegazi, M., List, G., & Rakha, H. A. (2024). Comparative analysis of alternative powertrain technologies in freight trains: A numerical examination towards sustainable rail transport. *Applied Energy*, 356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122411>
29. Aredah, A. S., Fadhloun, K., Rakha, H. A. (2024). NeTrainSim: a network-level simulator for modeling freight train longitudinal motion and energy consumption. *Railway Engineering Science*, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00331>
30. Macii, D., Dalpez, S., Passerone, R., Corrà, M., Avancini, M., & Benciolini, L. (2015). A safety instrumented system for rolling stocks: Methodology, design process and safety analysis. *Measurement*, (67), 164 – 176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.002>
31. Liudvinavičius, L., & Jastremskas, V. (2017). Modernization of diesel-electric locomotive 2M62 and TEII-70 locomotives with respect to electrical subsystem. *Procedia Engineering*, (187), 272 – 280. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.375>
32. BABeł, M., & Szkoda, M. (2016). Diesel locomotive efficiency and reliability improvement as a result of power unit load control system modernisation. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 18(1), 38 – 49. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.1.6>
33. DeVore, R., Hanin, B., Petrova, G. (2021). Neural network approximation. *Acta Numerica*, (30), 327–444. <https://doi.org/10.1017/S0962492921000052>

34. Ern, A., & Guermond, J. L. (2021). Finite elements I: Approximation and interpolation. Cham: Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56341-7>
35. Jazar, R. N. (2020). *Approximation methods in science and engineering*. New York: NY: Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-0716-0480-9>
36. Argyros, I. K. (2022). *The theory and applications of iteration methods*. (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003042273>
37. Leader, J. J. (2022). *Numerical analysis and scientific computation*. (2nd ed.). New York: Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003042273>
38. Горобченко О. М., & Заїка Д. О. (2022). Огляд методів та перспективи використання штучного інтелекту на залізничному транспорті. *Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference*, Vancouver, Canada, February 2–4, 2022 (pp. 184–192).
39. Прийма, Ю. А., & Заїка, Д. О. Перспективи використання сучасних систем автоматизованого керування тяговим рухомим складом. «Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку»: тези доп. учасників IV Всеукраїнської інтернет-конференції здобувачів вищої освіти, молодих вчених та викладачів, м. Київ, 17-18 листопада 2022 р. (с. 208 – 210.) Київ: ДУІТ.
40. Романчук, Б. О., & Заїка, Д. О. Діагностування параметрів тягового електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням за допомогою програмного забезпечення MATLAB SIMULINK r2022b. Міжнародна мультидисципліна науково-практична інтернет-конференції молодих дослідників, здобувачів вищої освіти та науковців «СУЧАСНА НАУКА: ІННОВАЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ»: тези доп. учасн. Міжнар. мультидис. наук.-практ. інт. конф., м. Київ, Україна, 6-7 квітня 2023 р. (с. 103 – 107.) Київ: ДУІТ.
41. qbal, A., Moinoddin, S., & Reddy, B. P. (2021). *Electrical machine fundamentals with numerical simulation using MATLAB/SIMULINK*. Chichester: John Wiley & Sons, Inc..
42. Hui, L., Zhenhai, S., Jinping, F., & Zihui, H. (2020). Modeling and simulation of multi-vehicle DC traction power supply system based on MATLAB/Simulink.

- Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT)*, 7 April 2020, Singapore (pp. 623–634).
43. Spiryagin, M., Persson, I., Wu, Q., Bosomworth, C., Wolfs, P., & Cole, C. (2019). A co-simulation approach for heavy haul long distance locomotive-track simulation studies. *Vehicle System Dynamics*, 57(9), 1363–1380. <https://doi.org/10.1080/00423114.2018.1504088>
44. Spiryagin, M., Wolfs, P., Wu, Q., Cole, C., & McSweeney, T. (2021). What is the Right Way to Model Traction Power Distribution in Complex Heavy Haul Locomotive Models. In *The IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, 342-351. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07305-2_35
45. Горобченко, О. М., & Заїка, Д. О. Аналіз останніх досліджень у сфері автоматичного керування локомотивом. *Виклики та перспективи розвитку транспортної інфраструктури України: тези доп. учасників II Всеукраїнської науково-практичної конференції*, м Київ, 3-5 квітня 2024р. (с. 795–797.) Київ: ДУІТ.
46. Zakharchenko, K., Zaika, D. Automatic train control system overview. *Виклики та перспективи розвитку транспортної інфраструктури України: тези доп. учасників II Всеукраїнської науково-практичної конференції*, м Київ, 3-5 квітня 2024р. (с. 797–798.) Київ: ДУІТ.
47. Главчев, Д.М. (2019). Програмні компоненти бортової комп'ютерної системи дизель-потяга. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 5(57), 11-15. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.5.011>
48. Jing, Shang., Yong, Liu., & Fan, Jiang. (2023). Research and application of locomotive automatic operation technology. *Electric Drive for Locomotives*, (1), 1-12. <https://doi.org/10.13890/j.issn.1000-128X.2023.01.001>
49. Yin, J., Tang, T., Yang, L., Xun, J., Huang, Y., & Gao Z. (2017). Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: *A survey. Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, (85). 548 – 572. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.09.009>

50. Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., Vu, X., & Zhou P. (2016). The key principles of optimal train control—Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points. *Transportation Research Part B: Methodological*, (94). 482 – 508. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.023>
51. Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., Vu, X., & Zhou P. (2016). The key principles of optimal train control—Part 2: Existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques. *Transportation Research Part B: Methodological*, (94). 509 – 538. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.024>
52. Shvets, A. (2023). Influence of the instability form on the traffic safety indicator of freight rolling stock. *Engineering Applications*, 2(3), 206–217. Retrieved from <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/enap/article/view/873>
53. Wang, H., Hao, L., Sharma, A., & Kukkar A. (2022). Automatic control of computer application data processing system based on artificial intelligence. *Journal of Intelligent Systems*, 31(1). 177 – 192. <https://doi.org/10.1515/jisys-2022-0007>
54. Yin, J., Chen, D., & Li, Y. (2016). Smart train operation algorithms based on expert knowledge and ensemble CART for the electric locomotive. *Knowledge-Based Systems*, 92(C). 78 – 91. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.10.016>
55. Скалозуб, В. В., Очкасов, О. Б., & Кібець, Д. В. (2020). Автоматизований експертний комплекс із дослідження та прогнозування параметрів силових енергетичних установок локомотивів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 25(2), 8–18. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v25i2.206832>
56. Zhou, K., Song, S., Xue, A., You, K., & Wu H. (2022). Smart train operation algorithms based on expert knowledge and reinforcement learning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(2). 716–727. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.3000073>
57. Гончаров, К. В., & Нагорна, Н. А. (2019). Застосування штучних нейронних мереж для визначення лінійної координати поїзда. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*, (18). 97–103. <https://doi.org/10.15802/ecsrt2019/254780>

58. Shen, H., & Yan J. (2017). Optimal control of rail transportation associated automatic train operation based on fuzzy control algorithm and PID algorithm. *Automatic Control Computer Sciences*, 51(6). 435 – 441. <https://doi.org/10.3103/S0146411617060086>
59. Liu, Kai-wei., Wang, Xing-Cheng., & Qu, Zhi-hui. (2019). Research on multi-objective optimization and control algorithms for automatic train operation. *Energies*, 12(20). 1 – 22. <https://doi.org/10.3390/en12203842>
60. Cao, Y., Ma, L., & Zhang Y. (2018). Application of fuzzy predictive control technology in automatic train operation. *Clust. Comput*, (22). 14135–14144. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2258-0>
61. Moaveni, B., Rashidi, Fathabadi F., & Molavi, A. (2022). Fuzzy control system design for wheel slip prevention and tracking of desired speed profile in electric trains. *Asian Journal of Control*. 24(1). 388–400. <https://doi.org/10.1002/asjc.2472>
62. Yang, J., Jia, L., Yunxiao, F., & Lu S. (2017). Speed tracking based energy-efficient freight train control through multi-algorithms combination. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, (9). 76–90. <http://dx.doi.org/10.1109/mits.2017.2666580>
63. Zhang, D. (2017). High-speed Train Control System Big Data Analysis Based on Fuzzy RDF Model and Uncertain Reasoning. *International Journal of Computers, Communications & Control*, 12(4). 577–591. <http://dx.doi.org/10.15837/ijccc.2017.4.2914>
64. Cerreto, F., Nielsen, B.F., Nielsen, O.A., & Harrod, S. (2018). Application of Data Clustering to Railway Delay Pattern Recognition. *Journal of Advanced Transportation*, (2018). 1–18. <https://doi.org/10.1155/2018/6164534>
65. de Bruin, T., Verbert, K., & Babuska, R. (2016). Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, (28). 1–11. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2551940>
66. Zadeh, L. A. (2023). *Fuzzy logic. In Granular, Fuzzy, and Soft Computing*. New York: NY: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_234

67. Kaczorek, M., & Jacyna, M. (2022). Fuzzy logic as a decision-making support tool in planning transport development. *Archives of Transport*, 61(1). 51–70. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.8154>
68. Ciani, L., Guidi, G., Patrizi, G., & Galar, D. (2021). Improving Human Reliability Analysis for railway systems using fuzzy logic. *IEEE Access*, (9). 128648–128662. DOI:[10.1109/ACCESS.2021.3112527](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112527)
69. Alnuman, H. H., Gladwin, D. T., Foster, M. P., & Ahmed, E. M. (2022). Enhancing energy management of a stationary energy storage system in a DC electric railway using fuzzy logic control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (142). 108345. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108345>
70. Rodriguez, R., Trovão, J. P. F., & Solano, J. (2022). Fuzzy logic-model predictive control energy management strategy for a dual-mode locomotive. *Energy Conversion and Management*, (253). 115111. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115111>
71. Eckert, J. J., Pavani Teodoro, Í., Valente Lopes, M., Wu, Q., & Santos, A. A. (2024). Multi-objective optimization of electro-pneumatic braking process with fuzzy logic control for heavy haul railway applications. *International Journal of Rail Transportation*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/23248378.2024.2338837>
72. Dong, H., Ning, B., Cai, B., & Hou Z. (2010). Automatic train control system development and simulation for high-speed railways. *IEEE circuits and systems magazine*, 10(2). 6–18.
73. Siahvashi, A., & Moaveni B. (2010) Automatic train control based on the multi-agent control of cooperative systems. *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 1(4). 247–257.
74. Gao, S., Dong, H., & Ning B. (2014) Characteristic model-based all-coefficient adaptive control for automatic train control systems. *Science China Information Sciences*. (57). 1–12.
75. Fazlollahtabar, H., & Saidi-Mehrabad, M. Methodologies to optimize automated guided vehicle scheduling and routing problems: A review study. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 77(3-4). 525–545. <https://doi.org/10.1007/s10846-013-0003-8>

76. Wang, L., Han, M., Li, X., Zhang, N., & Cheng, H. (2021). Review of classification methods on unbalanced data sets. *IEEE Access*, (9), 64606–64628. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074243>
77. Wang, C. (2015). *A study of membership functions on Mamdani-type fuzzy inference system for industrial decision-making*. Chicago: Lehigh University.
78. Zhang, D., Mohammed, S., & Calvi, A. (2021). Fuzzy logic systems for transportation engineering. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 41(4), 4705–4712. <https://doi.org/10.3233/JIFS-189957>
79. Herpratiwi, H., Maftuh, M., Firdaus, W., Tohir, A., Daulay, M. I., & Rahim, R. (2022). Implementation and Analysis of Fuzzy Mamdani Logic Algorithm from Digital Platform and Electronic Resource. *TEM Journal*, 11(3), 1028–1033. <https://doi.org/10.18421/TEM113-06>
80. Kacimi, M. A., Guenounou, O., Brikh, L., Yahiaoui, F., & Hadid, N. (2020). New mixed-coding PSO algorithm for a self-adaptive and automatic learning of Mamdani fuzzy rules. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103417>
81. Abdulgader, M., & Kaur, D. (2019). Evolving Mamdani fuzzy rules using swarm algorithms for accurate data classification. *Ieee Access*, 7, 175907–175916. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957735>
81. Lilly, J. H. (2011). *Fuzzy control and identification*. Hoboken: John Wiley & Sons.
82. Абрамова, А. О. (2022). Розроблення алгоритму нечіткого виводу MATLAB для прийняття рішень в умовах невизначеності для проєктованих об'єктів. *Контроль і управління в складних системах: тези доповідей учасників XVI International Conference Measurement and Control in Complex System (MCCS-2022)*, м. Вінниця, Україна, 15–17 листопада 2022 р. (с. 1–8). <https://doi.org/10.31649/mccs2022.17>
83. Горобченко, О. М., & Заїка, Д. О. (2024). Дослідження тяго-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ на різних варіантах підключення тягових електричних двигунів. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: тези доп. учасників 15-ї*

Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, Україна, 13-15 березня 2024р. (с. 52– 54.) Херсон: ХДМА.

84. Замостян, Ю. М., & Заїка, Д. О. (2023). Аналіз систем залізничної автоматизації SIEMENS AG. *СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ: ТРАНСПОРТНА ІНФРАСТРУКТУРА ТА ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: тези доп. учасників II Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців*, м. Київ, Україна, 29-30 листопада 2023р. (с. 112–117.) Київ: ДУІТ.

85. Шмельов, Ю. М. (2021). Застосування інтелектуальних систем на транспорті. *Інтелектуальні системи автоматизації: монографія* (Розд. 2, с. 69–122). Кременчук: Новабук.

86. Аврунін, О. Г., Владов, С. І., Петченко, М. В., & Семенець, В. В. (2021). *Інтелектуальні системи автоматизації: монографія* (322 с.). Кременчук: Видавництво «НОВАБУК».

87. Романчук, Б. О., & Заїка, Д.О. (2023). Інновації та перспективи, діагностування параметрів тягового електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням за допомогою програмного забезпечення MATLAB SIMULINK r2022b. *СУЧАСНА НАУКА: тези доп. I-шої Міжнародної мультидисциплінарної науково – практичної конференції молодих дослідників, здобувачів вищої освіти та науковців*, м. Київ, Україна, 6-7 квітня 2023р. (с. 103–107.) Київ: ДУІТ.

88. Устенко О. В., & Пузир В. Г. Перспективи впровадження системи «розумний локомотив». *Людина, суспільство, комунікативні технології: X-та Міжнар. науково-практ. конф.*, м. Харків, Україна, 27-28 жовтня 2022 р. (с. 273.) Харків.

89. Горобченко, О., Слободянюк, М., & Неведров О. (2019). Формалізація поїзних ситуацій при керуванні локомотивом на основі методів нечіткої логіки. *Транспортні системи і технології*, (34). с. 65–70. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-5>

90. Тартаковський Е.Д., Горобченко О.М., & Антонович А.О. (2016) Удосконалення процесу керування локомотивом шляхом використання систем

підтримки прийняття рішень. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 5/3 (83) 4 – 11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80198>

91. Gorobchenko, O., Fomin, O., Gritsuk, I., Saravas, V., Grytsuk, Y., Bulgakov, M., ... & Zinchenko, D. (2018). Intelligent locomotive decision support system structure development and operation quality assessment. *In 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine, 10 – 14 September 2018. (pp. 239 – 243). <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559487>

92. Горобченко, О. М. (2016). *Розвиток наукових основ функціонування ергатичної системи «локомотивна бригада – поїзд»* (Дис. доктора технічних наук, спеціальність 05.22.20). Харків.

93. Горобченко, О. М., Винокуров Д. В., Гулак С. О., Заїка, Д. О., Малюк С. В., Твердомед В. М., & Неведров О. В. (2022). Пристрій автоматизованого діагностування кіл керування електровозів ЧС-4 (Пат. на корисну модель № 151531). Україна: G05B 23/00 G05B 23/02. № u202103250. Заявл. 10.06.2021; опубл. 10.08.2022, Бюл. № 32.

94. Лаврухін, О. В., Миронець, С. Р., & Богомолов, В. А. (2022). Удосконалення технології управління рухом поїздів на основі абстрактного моделювання оперативних процесів. *Science and Transport Progress*, (3-4 (99-100)), 25–32.

95. Hu, H., Feng, F., Lai, Z., Yang, J., & Wang, T. (2021). Optimization of Self-Learning Speed-Tracking Control for Permanent Magnet Synchronous Motor. *In International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation*, Singapore (pp. 232–240).

96. Liu, W., Tang, T., Su, S., Cao, Y., Bao, F., & Gao, J. (2018). An intelligent train control approach based on the Monte Carlo reinforcement learning algorithm. *In 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 1944–1949). <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569399>

97. Gorobchenko, O., Zaika, D., Holub, H., & Kulbovskyi I. Development of an intelligent control model for a maneuvering locomotive using the Mamdani method. Innovations and prospects of world science. *Proceedings of I International Scientific*

and Practical Conference: CURRENT TRENDS IN SCIENTIFIC RESEARCH DEVELOPMENT, Boston, USA, 22-24 August 2024, (pp. 70–77.)

98. Буряковський, С. Г., Маслій, А. С., Панченко, В. В., Помазан, Д. П., & Деніс, І. В. (2018). Дослідження режимів роботи тепловоза ЧМЕЗ на імітаційній моделі. *Електротехніка і електромеханіка*, (2), 59-62. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.10>

99. Сиротенко, Ю. В. (2014). Визначення потужності маневрового тепловоза з урахуванням місця його експлуатації. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 1(8 (67)), 41-45.

100. Maghfiroh H., & Hermanu, C. (2019). Optimal energy control of railway traction motor: Comparative study. *AIP Conference Proceedings: The 4th International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering*, 23 April 2019, Vol. 2097(1). p. 030020. <https://doi.org/10.1063/1.5098195>

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Ректор Державного університету
інфраструктури та технологій



Надія БРАЙКОВСЬКА

« 08 » жовтня 2024 р.

АКТ

«08» жовтня 2024 р.

Про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи Дениса ЗАІКИ на тему: **«Вдосконалення управління тяговою передачею маневрових локомотивів шляхом використання методів штучного інтелекту».**

Складений комісією у складі:

Голова комісії: директор Київського інституту залізничного транспорту ДУІТ к.т.н., доцент Володимир ТВЕРДОМЕД.

Члени комісії: завідувач кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць ДУІТ д.т.н., професор Віктор ТКАЧЕНКО;
декан факультету інфраструктури і рухомого складу залізниць ДУІТ д.т.н., професор Олександр ГОРОБЧЕНКО;
аспірант кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць ДУІТ Денис ЗАІКА.

Комісія визначила фактичне впровадження наступних результатів дисертаційної роботи аспіранта Дениса ЗАІКИ в навчальний процес підготовки магістрів за спеціальностями 273 «Залізничний транспорт» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Впроваджено:

1. В теоретичну складову дисципліни «Інтелектуальні технології в локомотивному господарстві» (обсяг дисципліни 6 кредитів, 15 лекцій, 30 лабораторних робіт, 15 практичних занять) **додано теоретичні основи**

створення бази знань інтелектуальної системи управління тяговим рухомим складом.

2. В практичну складову дисципліни «Інтелектуальні технології в локомотивному господарстві» (обсяг дисципліни 6 кредитів, 15 лекцій, 30 лабораторних робіт, 15 практичних занять) додано практичне заняття «Створення моделі автоматизованого керування тяговою електричною передачею маневрового локомотива шляхом використання методу Мамдані»

Голова комісії:



Володимир ТВЕРДОМЕД

Члени Комісії

Віктор ТКАЧЕНКО

Олександр ГОРОБЧЕНКО

Денис ЗАІКА



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТОВ НВП «Локомотив
Транс Сервіс»

Олександр НЕВЕДРОВ

« 15 » жовтня 2024 р.

АКТ

«14» жовтня 2024 р.

Про впровадження результатів дисертаційної роботи Дениса ЗАІКИ на тему: **«Вдосконалення управління тяговою передачею маневрових локомотивів шляхом використання методів штучного інтелекту».**

В ТОВ НВП «Локомотив Транс Сервіс» впроваджено наступні результати дисертаційної роботи Дениса ЗАІКИ:

- методи тягових розрахунків локомотива, які враховують зміни схеми підключення тягових електричних двигунів в залежності від режиму навантаження;
- алгоритм системи управління тяговою електричною передачею маневрового локомотива шляхом використання методу Мамдані.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при:

розробці автоматизованої системи управління тяговою електричною передачею маневрового локомотива ЧМЕЗ, що дозволило покращити процес управління тепловозом завдяки розширенню режимів управління тяговою передачею. В результаті впровадження очікується економія палива при виконанні маневрової роботи локомотивом ЧМЕЗ в середньому на 14 літрів за 12-ти годинну робочу зміну.


Акт складений в п'ятьох екземплярах:

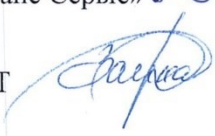
екз. №1 – ТОВ НВП «Локомотив Транс Сервіс»

екз. №2 – Державний університет інфраструктури та технологій

екз. №3,4,5 – аспірант Деніс ЗАІКА

Головний технолог

ТОВ НВП «Локомотив Транс Сервіс»  Станіслав АНГЕЛОВ

Аспірант ДУІТ 

Деніс ЗАІКА

Для 3-ї позиції контролера машиніста:

Графічна залежність $F_k = f(v)$ має наступний вигляд:

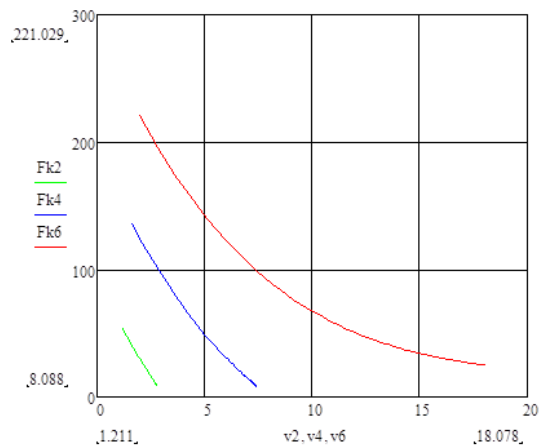


Рисунок В1. $F_k = f(v)$ (F_k – кН, v – км/год):

$F_{k2} = f(v_2)$ для 2 ТЕД;

$F_{k4} = f(v_4)$ для 4 ТЕД;

$F_{k6} = f(v_6)$ для 6 ТЕД.

Графічна залежність $I_{ted} = f(v)$:

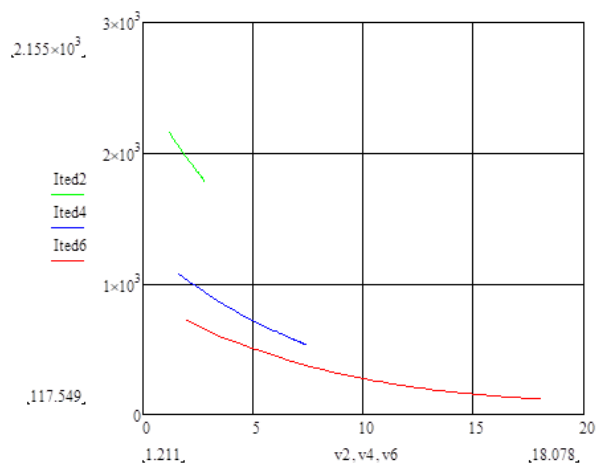


Рисунок В2. $I_{ted} = f(v)$ (I_{ted} – А, v – км/год):

$I_{ted2} = f(v_2)$ для 2 ТЕД;

$$I_{ted4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$I_{ted6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $I_g = f(v)$:

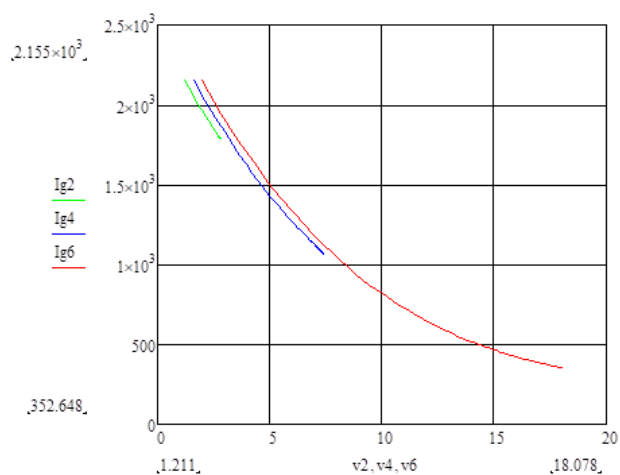


Рисунок В3. $I_g = f(v)$ (I_g – А, v – км/год):

$$I_{g2} = f(v_2) \text{ для 2 ТЕД;}$$

$$I_{g4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$I_{g6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $t = f(S_{pr})$:

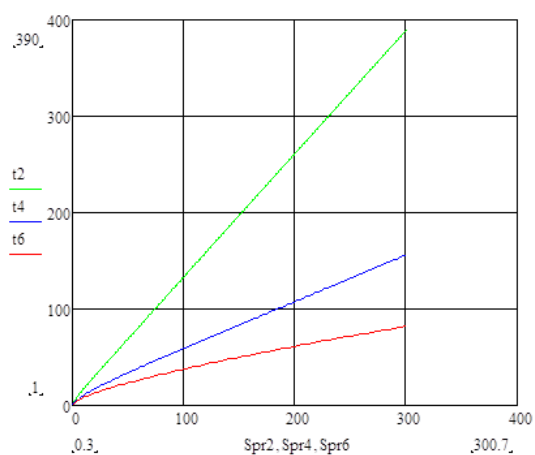


Рисунок В4. $t = f(S_{pr})$ (t – с., S_{pr} – МВ):

$$t_2 = f(S_{pr2}) \text{ на 2-х ТЕД;}$$

$$t_4 = f(S_{pr4}) \text{ на 4-х ТЕД;}$$

$$t_6 = f(S_{pr6}) \text{ на 6-ти ТЕД.}$$

Графічна залежність $G_e = f(S_{pr})$:

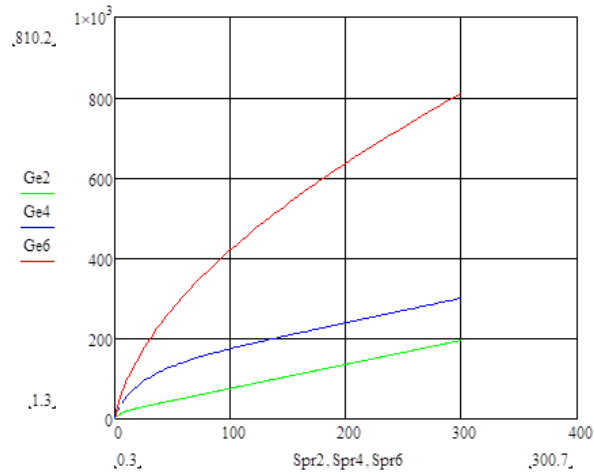


Рисунок В5. $G_e = f(S_{pr})$ ($G_e - \Gamma.$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$G_{e2} = f(S_{pr2}) \text{ для 2 ТЕД;}$$

$$G_{e4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$G_{e6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність: $T = f(S_{pr})$

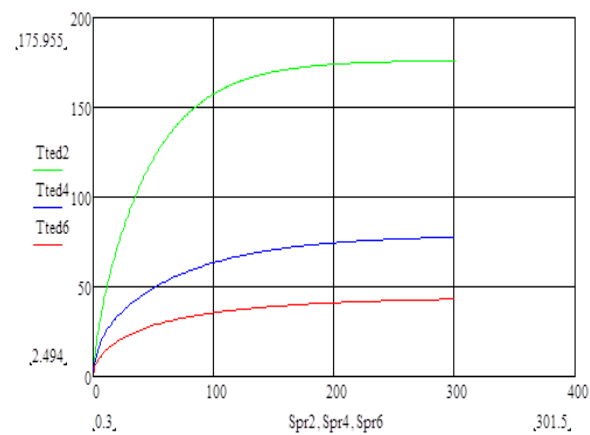


Рисунок В6. $T = f(S_{pr})$ ($T - ^\circ\text{C}$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$T_{ted2} = f(S_{pr2}) \text{ для 2 ТЕД;}$$

$$T_{ted4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$T_{ted6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД;}$$

Для 4-ї позиції контролера машиніста:

Графічна залежність $F_k = f(v)$ має наступний вигляд:

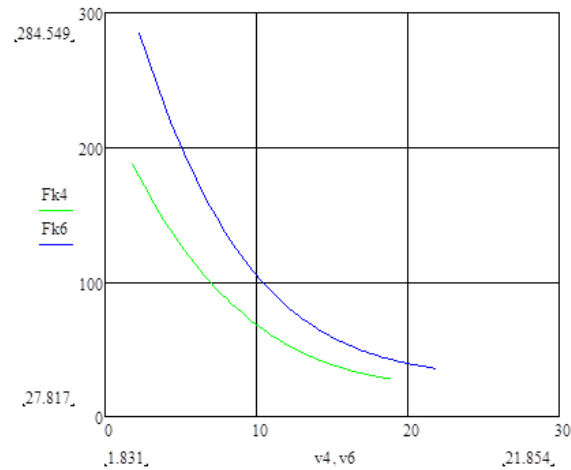


Рисунок В7. $F_k = f(v)$ (F_k – кН, v – км/год):

$F_{k4} = f(v_4)$ для 4 ТЕД;

$F_{k6} = f(v_6)$ для 6 ТЕД.

Графічна залежність $I_{ted} = f(v)$:

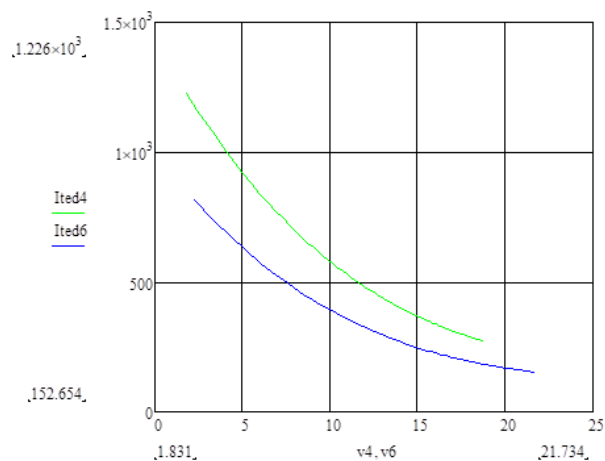


Рисунок В8. $I_{ted} = f(v)$ (I_{ted} – А, v – км/год):

$I_{ted4} = f(v_4)$ для 4 ТЕД;

$I_{ted6} = f(v_6)$ для 6 ТЕД.

Графічна залежність $I_g = f(v)$:

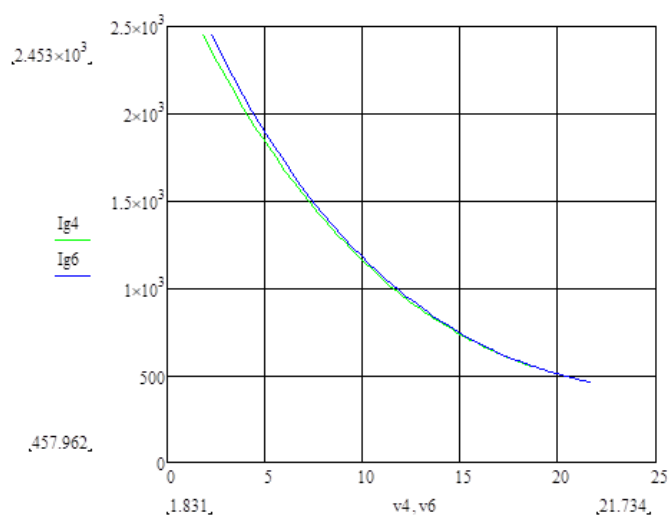


Рисунок В9. $I_g = f(v)$ ($I_g - A$, $v - \text{км/год}$):

$$I_{g4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$I_{g6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $t = f(S_{pr})$:

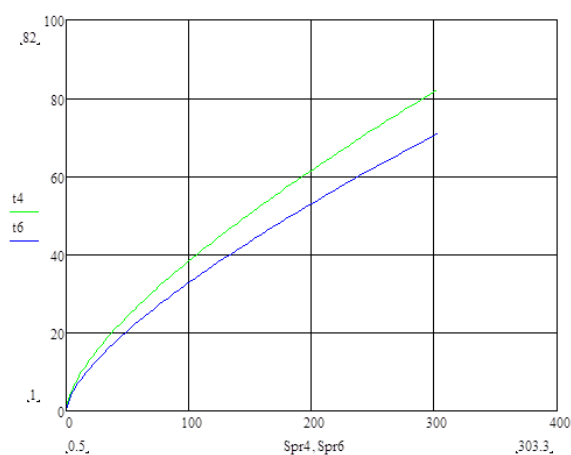


Рисунок В10. $t = f(S_{pr})$ ($t - \text{с.}$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$t_4 = f(S_{pr4}) \text{ для 4-х ТЕД;}$$

$$t_6 = f(S_{pr6}) \text{ для 6-ти ТЕД.}$$

Графічна залежність $G_e = f(S_{pr})$:

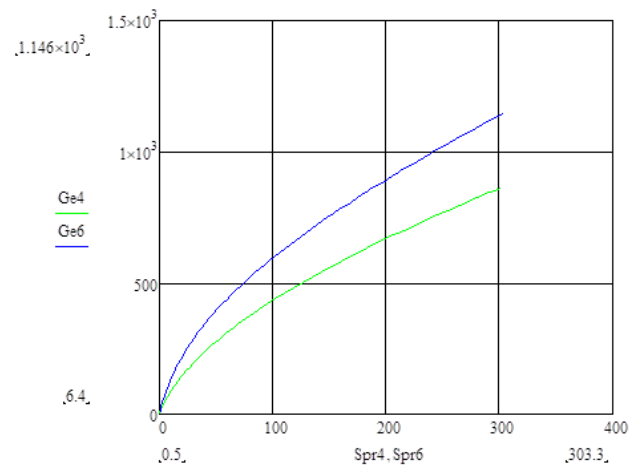


Рисунок В11. $G_e = f(S_{pr})$ ($G_e - \Gamma$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$G_{e4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$G_{e6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $T = f(S_{pr})$:

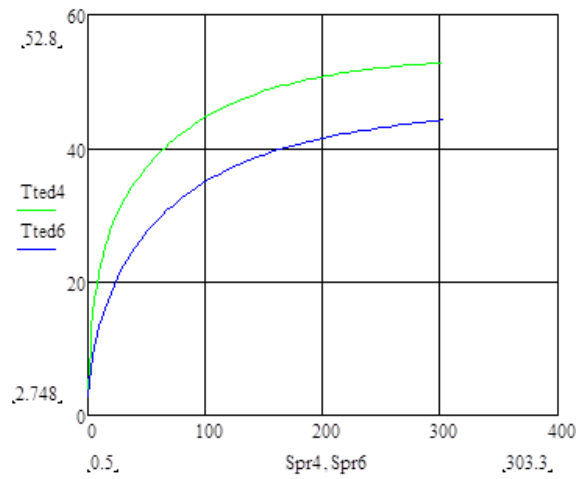


Рисунок В12. $T = f(S_{pr})$ ($T - ^\circ\text{C}$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$T_{ted4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$T_{ted6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД;}$$

Для 5-ї позиції контролера машиніста:

Графічна залежність $F_k = f(v)$ має наступний вигляд:

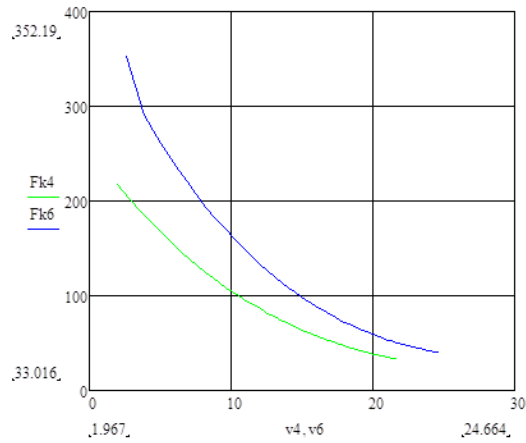


Рисунок В13. $F_k = f(v)$ (F_k – кН, v – км/год):

$$F_{k4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$F_{k6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $I_{ted} = f(v)$:

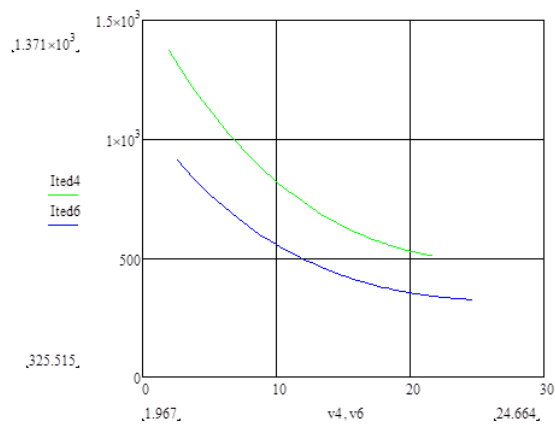


Рисунок В14. $I_{ted} = f(v)$ (I_{ted} – А, v – км/год):

$$I_{ted4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$I_{ted6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $I_g = f(v)$:

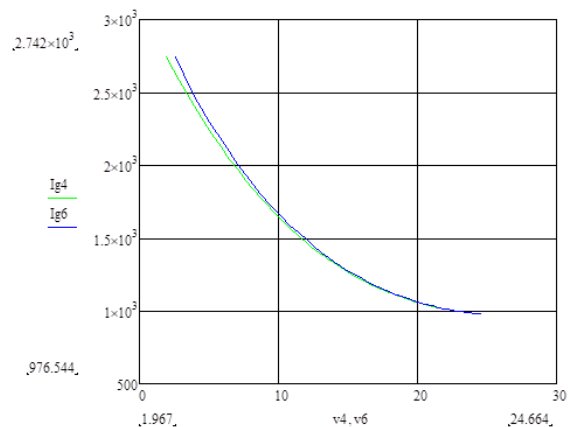


Рисунок В15. $I_g = f(v)$ (I_g – А, v – км/год):

$I_{g4} = f(v_4)$ для 4 ТЕД;

$I_{g6} = f(v_6)$ для 6 ТЕД.

Графічна залежність $t = f(S_{pr})$:

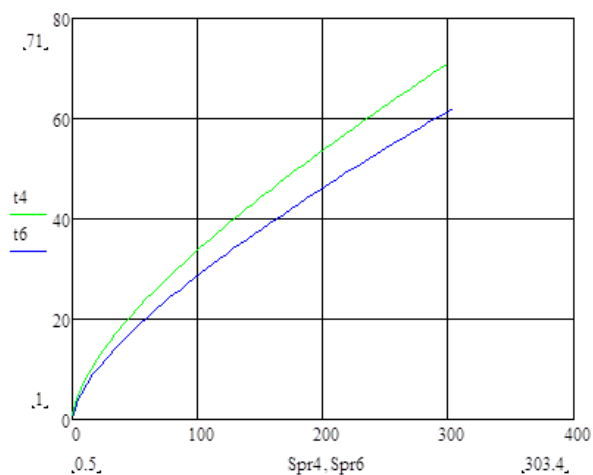


Рисунок В16. $t = f(S_{pr})$ (t – с., S_{pr} – м):

$t_4 = f(S_{pr4})$ на 4-х ТЕД;

$t_6 = f(S_{pr6})$ на 6-ти ТЕД.

Графічна залежність $G_e = f(S_{pr})$:

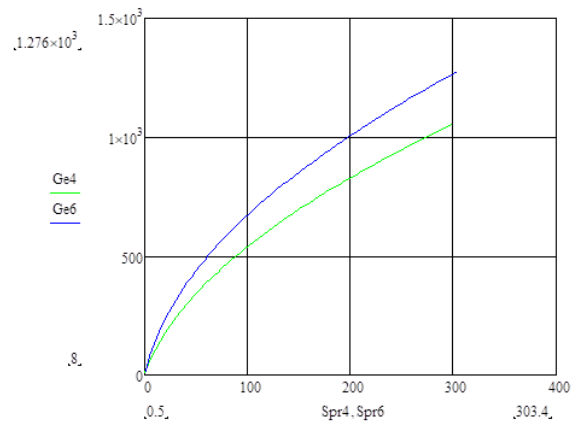


Рисунок В17. $G_e = f(S_{pr})$ ($G_e - \Gamma$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$G_{e4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$G_{e6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $T = f(S_{pr})$:

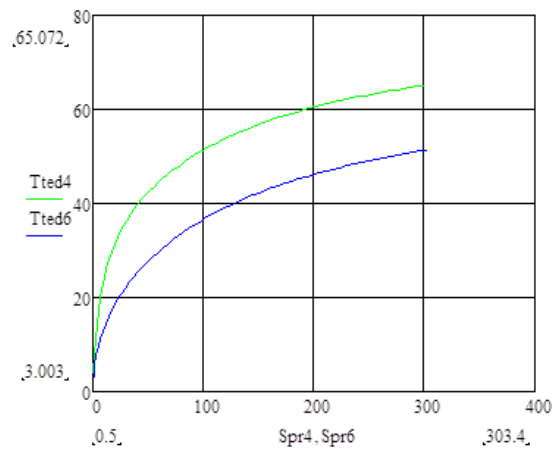


Рисунок В18. $T = f(S_{pr})$ ($T - ^\circ\text{C}$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$T_{ted4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$T_{ted6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Для 6-ї позиції контролера машиніста:

Графічна залежність $F_k = f(v)$ має наступний вигляд:

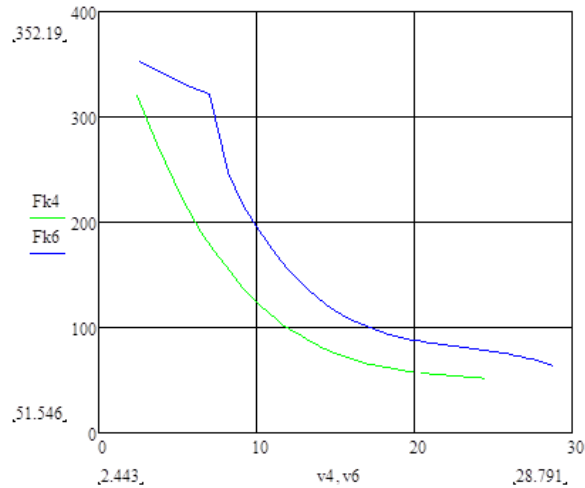


Рисунок В19. $F_k = f(v)$ (F_k – кН, v – км/год):

$$F_{k6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД;}$$

$$F_{k4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$F_{k2} = f(v_2) \text{ для 2 ТЕД;}$$

Графічна залежність $I_{ted} = f(v)$:

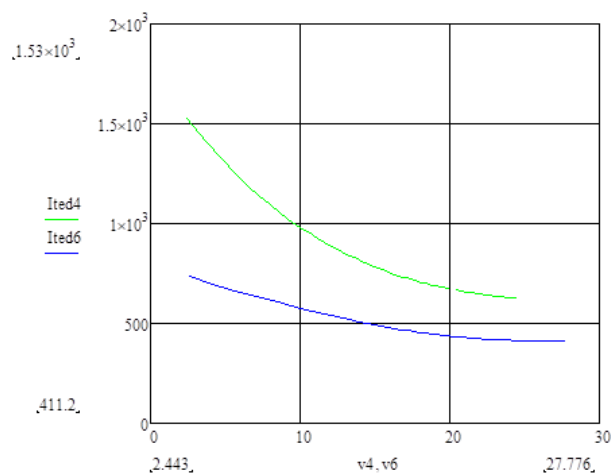


Рисунок В20. $I_{ted} = f(v)$ (I_{ted} – А, v – км/год):

$$I_{ted4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$I_{ted6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $I_g = f(v)$:

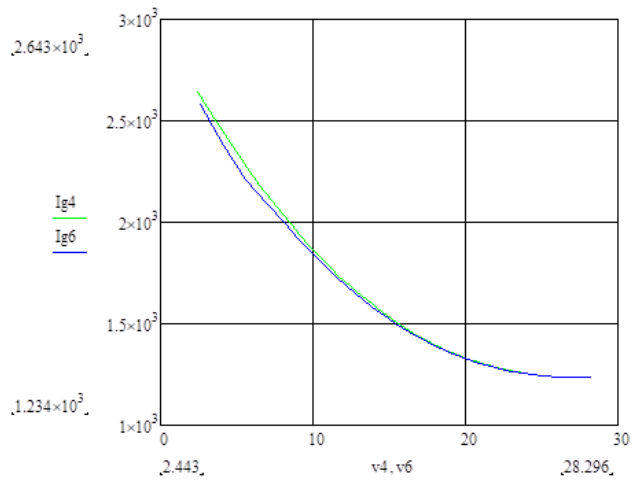


Рисунок В21. $I_g = f(v)$ (I_g – А, v – км/год):

$$I_{g4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$I_{g6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $t = f(S_{pr})$:

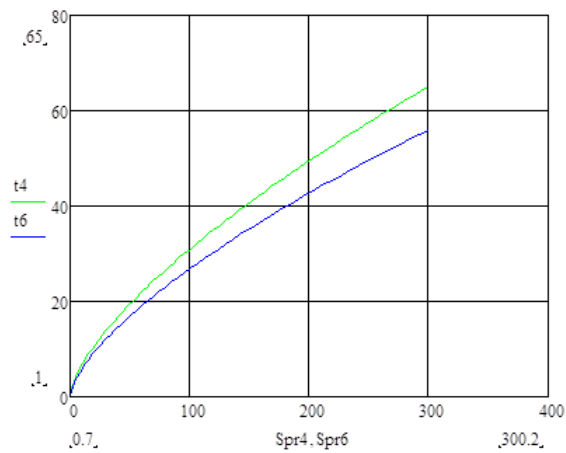


Рисунок В22. $t = f(S_{pr})$ (t – с., S_{pr} – м):

$$t_4 = f(S_{pr4}) \text{ на 4-х ТЕД;}$$

$$t_6 = f(S_{pr6}) \text{ на 6-ти ТЕД.}$$

Графічна залежність $G_e = f(S_{pr})$:

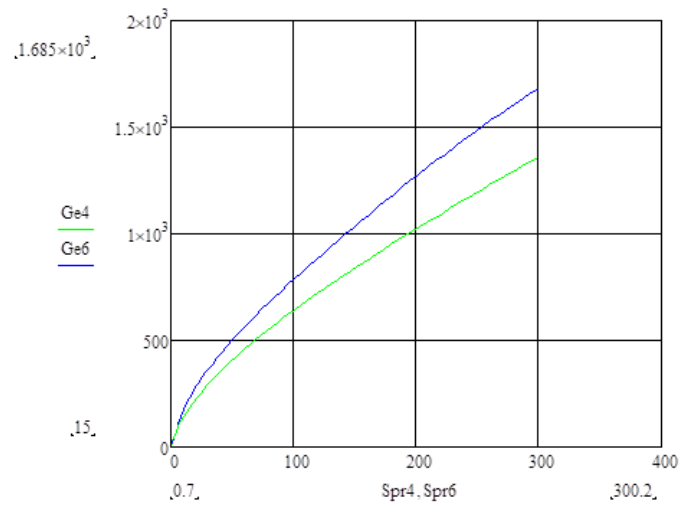


Рисунок В23. $G_e = f(S_{pr})$ ($G_e - \Gamma$., $S_{pr} - \text{м}$):

$$G_{e4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$G_{e6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $T = f(S_{pr})$:

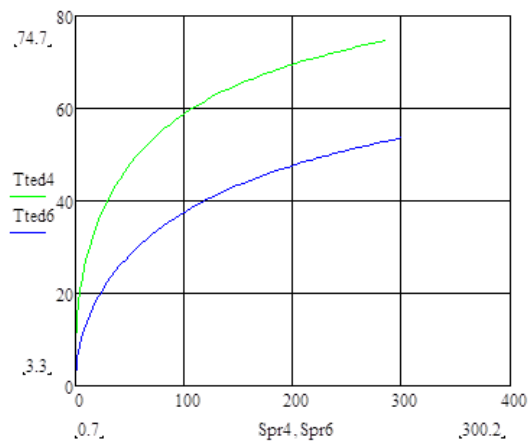


Рисунок В24. $T = f(S_{pr})$ ($T - ^\circ\text{C}$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$T_{ted2} = f(S_{pr2}) \text{ для 2 ТЕД;}$$

$$T_{ted4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$T_{ted6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД;}$$

Для 7-ї позиції контролера машиніста:

Графічна залежність $F_k = f(v)$ має наступний вигляд:

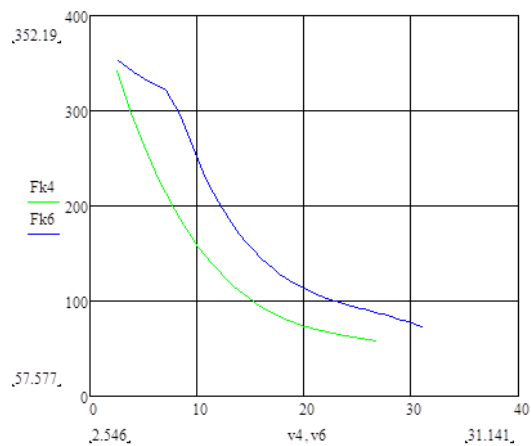


Рисунок В25. $F_k = f(v)$ (F_k – кН, v – км/год):

$$F_{k4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$F_{k6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $I_{ted} = f(v)$:

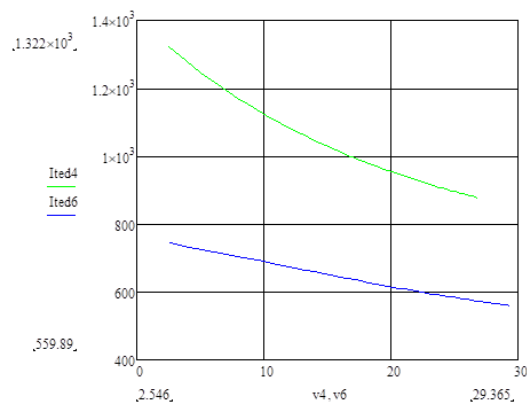


Рисунок В26. $I_{ted} = f(v)$ (I_{ted} – А, v – км/год):

$$I_{ted4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$I_{ted6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $I_g = f(v)$:

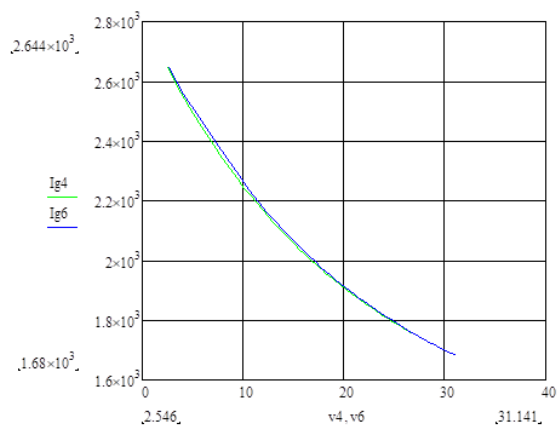


Рисунок В27. $I_g = f(v)$ (I_g – А, v – км/год):

$I_{g4} = f(v_4)$ для 4 ТЕД;

$I_{g6} = f(v_6)$ для 6 ТЕД.

Графічна залежність $t = f(S_{pr})$:

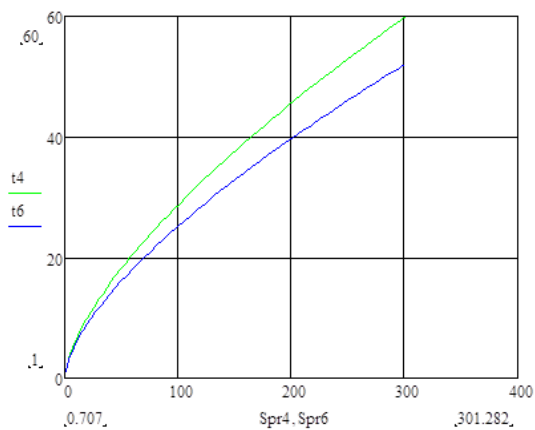


Рисунок В28. $t = f(S_{pr})$ (t – с., S_{pr} – м):

$t_4 = f(S_{pr4})$ на 4-х ТЕД;

$t_6 = f(S_{pr6})$ на 6-ти ТЕД.

Графічна залежність $G_e = f(S_{pr})$:

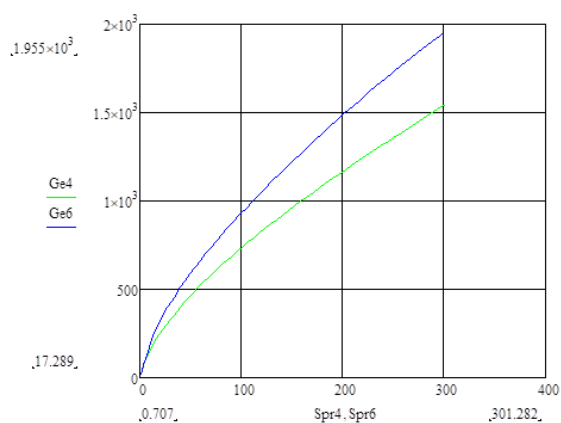


Рисунок В29. $G_e = f(S_{pr})$ ($G_e - \Gamma$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$G_{e4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД};$$

$$G_{e6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД}.$$

Графічна залежність $T = f(S_{pr})$:

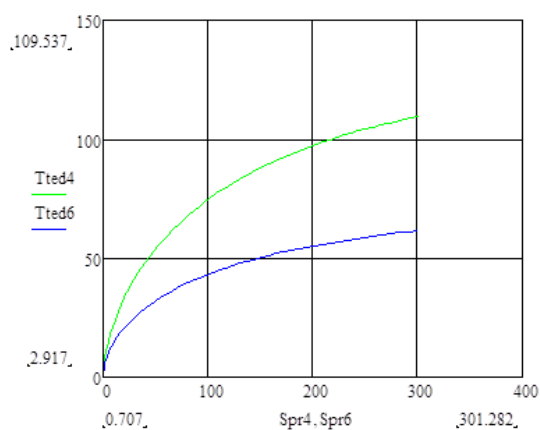


Рисунок В30. $T = f(S_{pr})$ ($T - ^\circ\text{C}$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$T_{ted4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД};$$

$$T_{ted6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД}.$$

Для 8-ї позиції контролера машиніста:

Графічна залежність $F_k = f(v)$ має наступний вигляд:

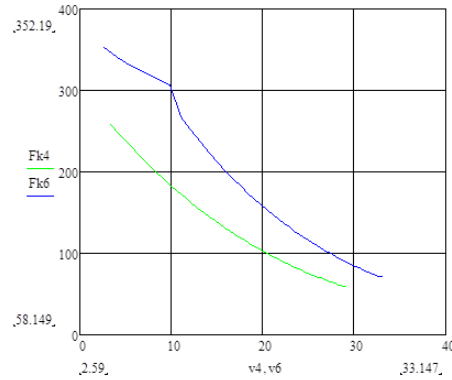


Рисунок В31. $F_k = f(v)$ (F_k – кН, v – км/год):

$F_{k4} = f(v_4)$ для 4 ТЕД;

$F_{k6} = f(v_6)$ для 6 ТЕД;

Графічна залежність $I_{ted} = f(v)$:

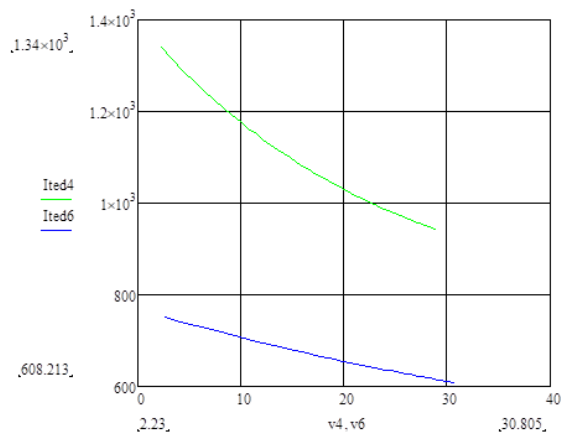


Рисунок В32. $I_{ted} = f(v)$ (I_{ted} – А, v – км/год):

$I_{ted4} = f(v_4)$ для 4 ТЕД;

$I_{ted6} = f(v_6)$ для 6 ТЕД.

Графічна залежність $I_g = f(v)$:

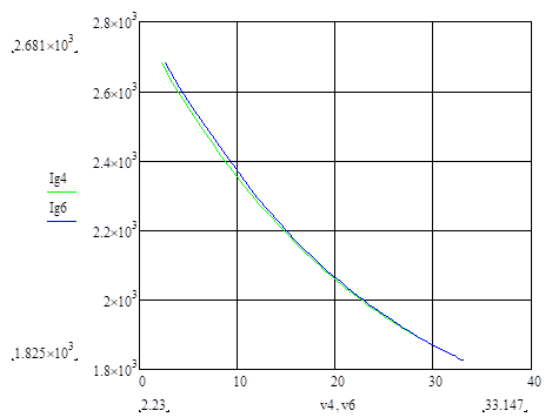


Рисунок В33. $I_g = f(v)$ (I_g – А, v – км/год):

$$I_{g4} = f(v_4) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$I_{g6} = f(v_6) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $t = f(S_{pr})$:

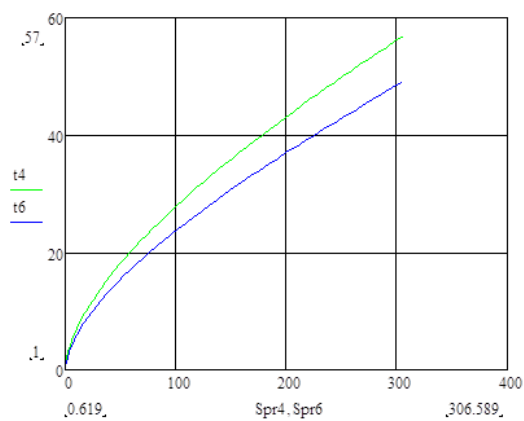


Рисунок В34. $t = f(S_{pr})$ (t – с., S_{pr} – м):

$$t_4 = f(S_{pr4}) \text{ на 4-х ТЕД;}$$

$$t_6 = f(S_{pr6}) \text{ на 6-ти ТЕД.}$$

Графічна залежність $G_e = f(S_{pr})$:

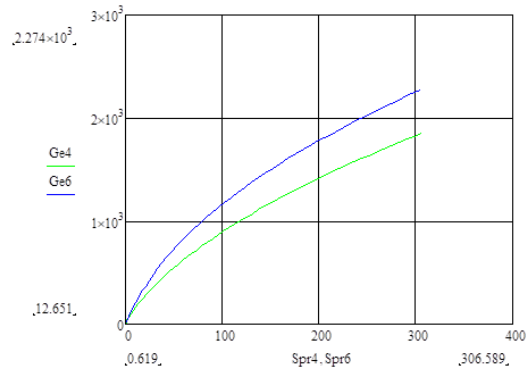


Рисунок В35. $G_e = f(S_{pr})$ ($G_e - \Gamma.$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$G_{e4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$G_{e6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД.}$$

Графічна залежність $T = f(S_{pr})$:

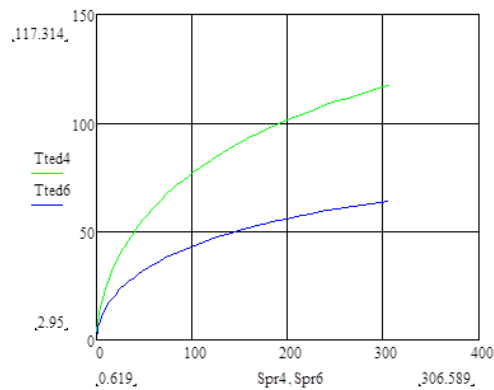


Рисунок В36. $T = f(S_{pr})$ ($T - ^{\circ}\text{C}$, $S_{pr} - \text{м}$):

$$T_{ted4} = f(S_{pr4}) \text{ для 4 ТЕД;}$$

$$T_{ted6} = f(S_{pr6}) \text{ для 6 ТЕД;}$$

Порівняльні ККД електричної передачі маневрового локомотива ЧМЕЗ для 3,4,5,6,7 та 8 позиції контролера машиніста при русі з 10-тю 4-х вісними вагонами масою 650000 кг та руху маневрового локомотива резервом, при різних варіантах підключення ТЕД виглядають наступним чином:

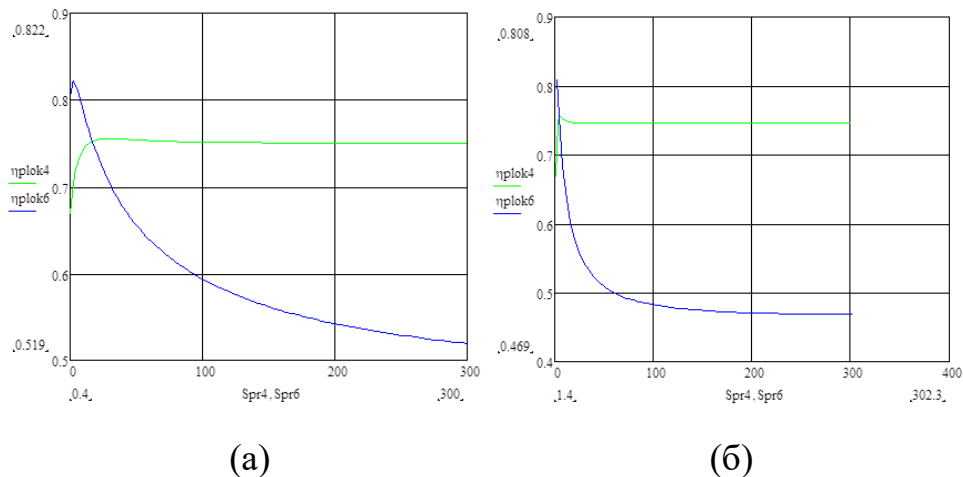


Рисунок Г1. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 3-ї позиції (а – рух локомотива з 10-тю вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

$\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

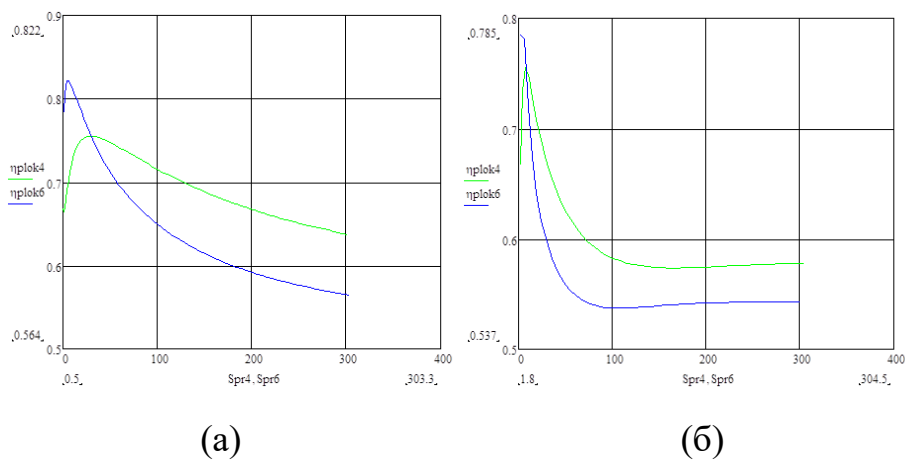
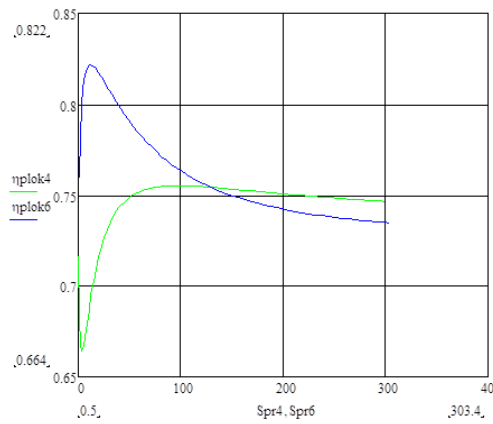


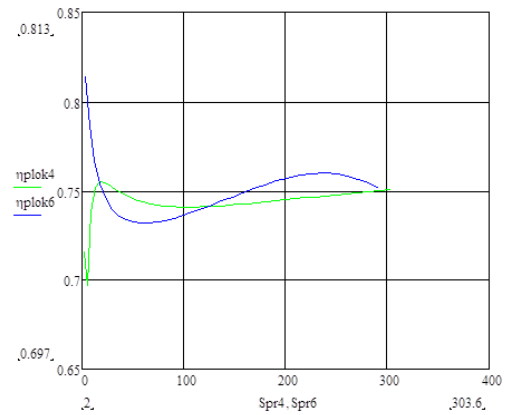
Рисунок Г2. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 4-ї позиції (а – рух локомотива з 10-тю вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

$\eta_{\text{плок}4} = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок}6} = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.



(а)

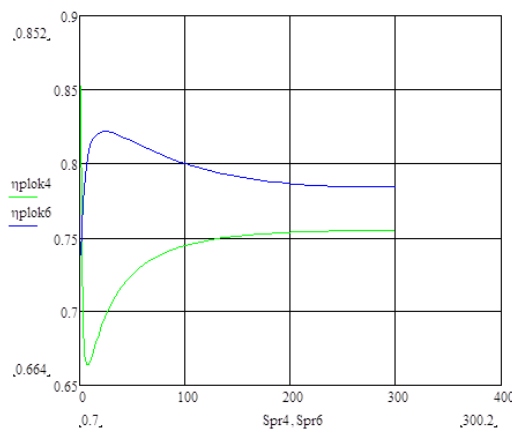


(б)

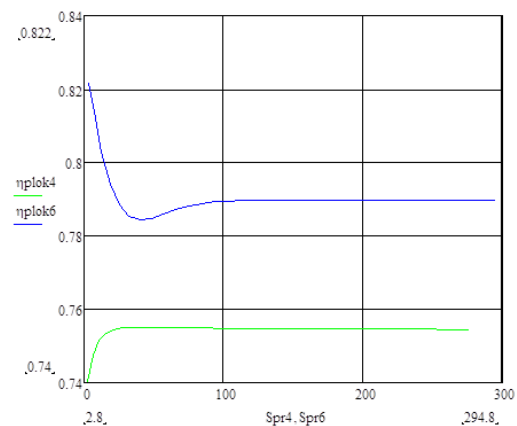
Рисунок Г3. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 5-ї позиції (а – рух локомотива з 10-тю вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

$\eta_{\text{плок}4} = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок}6} = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.



(а)



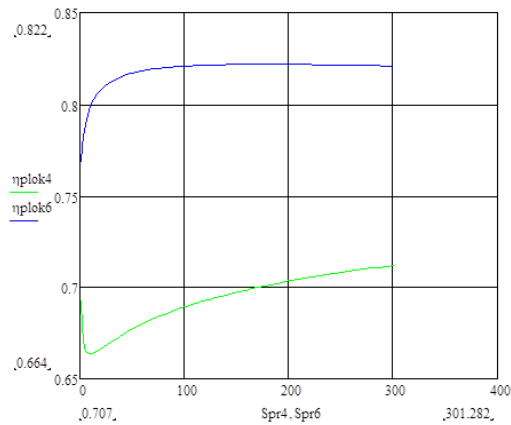
(б)

Рисунок Г4. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 6-ї позиції (а – рух локомотива з 10-тю вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

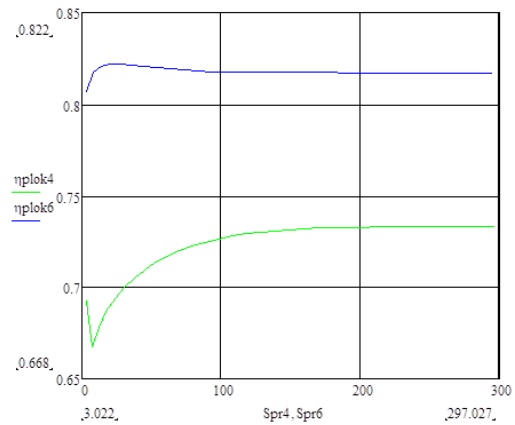
$\eta_{\text{плок}2} = f(S_{\text{пр}2})$ – ККД для 2-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок}4} = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок}6} = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.



(а)

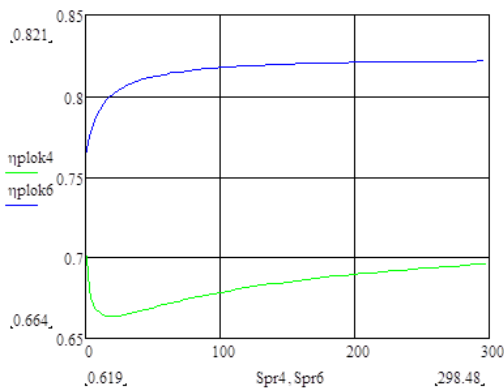


(б)

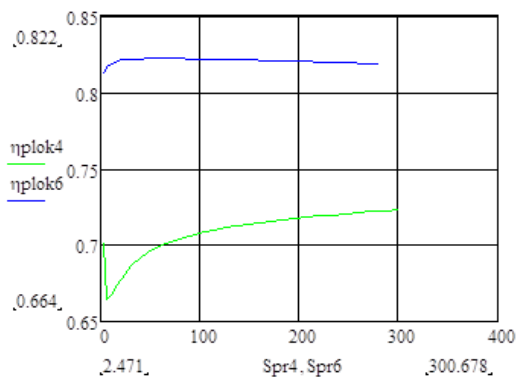
Рисунок Г5. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 7-ї позиції (а – рух локомотива з 10-тю вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

$\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.



(а)



(б)

Рисунок Г6. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 8-ї позиції (а – рух локомотива з 10-тю вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

$\eta_{\text{плок2}} = f(S_{\text{пр2}})$ – ККД для 2-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Порівняльні ККД електричної передачі маневрового локомотива ЧМЕЗ для 3,4,5,6,7 та 8 позиції контролера машиніста при русі з 2-ма 4-х вісними вагонами

масою $m_s=130000$ кг та руху маневрового локомотива резервом при різних варіантах підключення ТЕД має наступний вигляд:

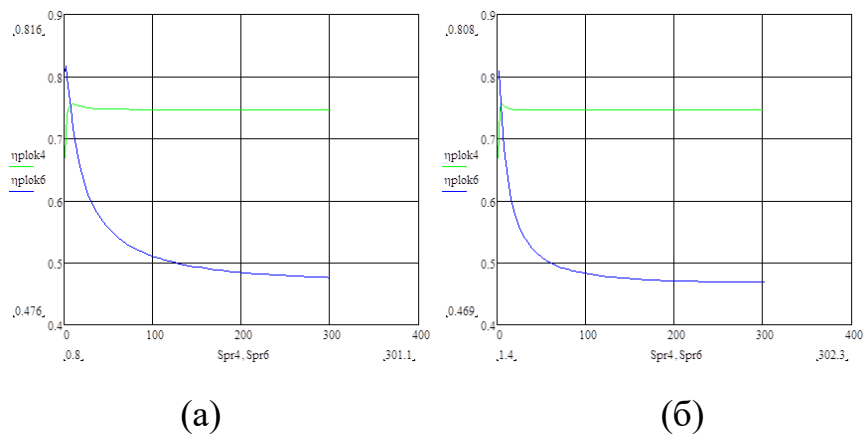


Рисунок Г7. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 3-ї позиції (а – рух локомотива з 2-ма вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

$\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

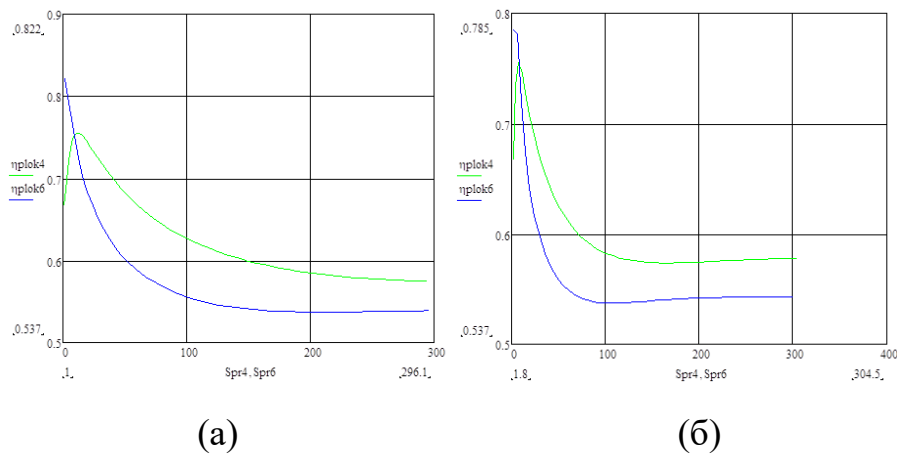
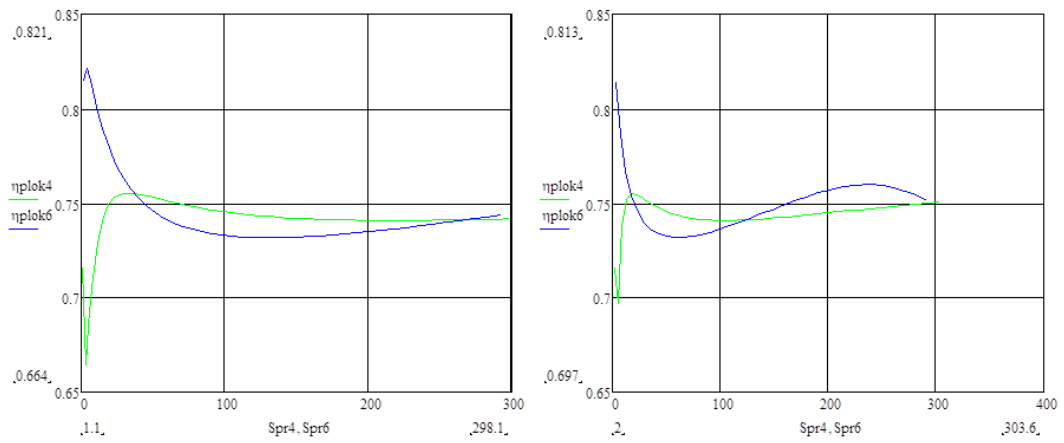


Рисунок Г8. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 4-ї позиції (а – рух локомотива з 2-ма вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

$\eta_{\text{плок4}} = f(S_{\text{пр4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок6}} = f(S_{\text{пр6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.



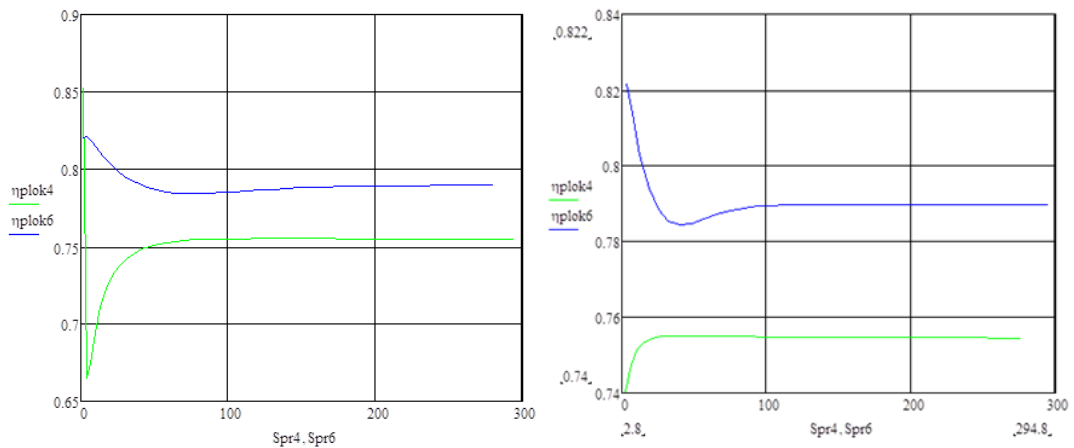
(а)

(б)

Рисунок Г9. ККД $\eta_{\text{plok}} = f(S_{\text{pr}})$ для 5-ї позиції (а – рух локомотива з 2-ма вагонами; б – рух локомотива резервом) (η_{plok} – %, S_{pr} – м):

$\eta_{\text{plok4}} = f(S_{\text{pr4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{plok6}} = f(S_{\text{pr6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.



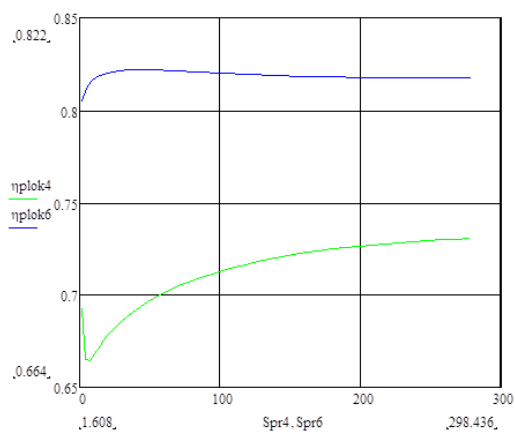
(а)

(б)

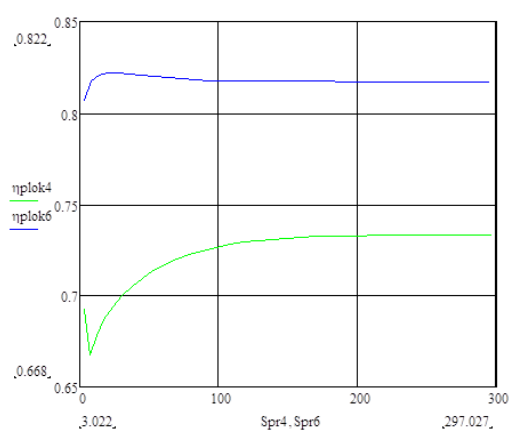
Рисунок Г10. ККД $\eta_{\text{plok}} = f(S_{\text{pr}})$ для 6-ї позиції (а – рух локомотива з 2-ма вагонами; б – рух локомотива резервом) (η_{plok} – %, S_{pr} – м):

$\eta_{\text{plok4}} = f(S_{\text{pr4}})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{plok6}} = f(S_{\text{pr6}})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.



(а)

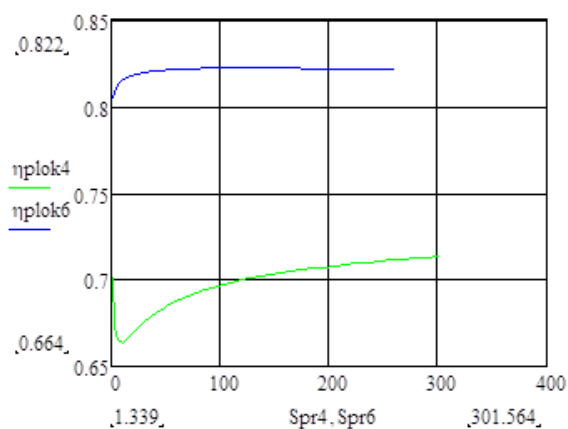


(б)

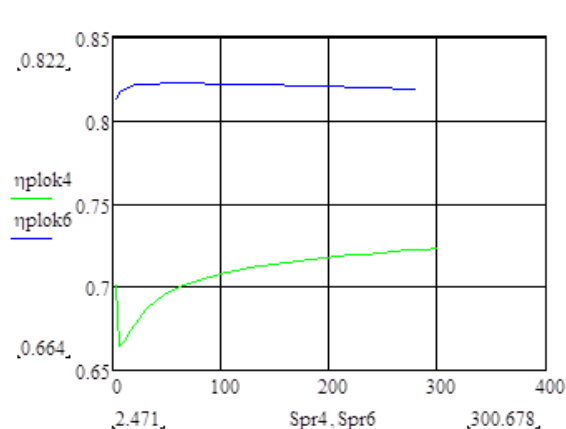
Рисунок Г11. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 7-ї позиції (а – рух локомотива з 2-ма вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

$\eta_{\text{плок}4} = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок}6} = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.



(а)



(б)

Рисунок Г12. ККД $\eta_{\text{плок}} = f(S_{\text{пр}})$ для 8-ї позиції (а – рух локомотива з 2-ма вагонами; б – рух локомотива резервом) ($\eta_{\text{плок}}$ – %, $S_{\text{пр}}$ – м):

$\eta_{\text{плок}4} = f(S_{\text{пр}4})$ – ККД для 4-х ТЕД на відстань 300 м;

$\eta_{\text{плок}6} = f(S_{\text{пр}6})$ – ККД для 6-х ТЕД на відстань 300 м.

Перелік логічних правил Fuzzy Logic Matlab:

1. If (Qskladu is middle) and (Fk is low) and (v is very_low) and (Igen is low) and (Ited is haight) and (Tted is middle) then (nted is 2ted)(position is 3ps)(№395 is 2)(№254 is 2) (1)
2. If (Qskladu is middle) and (Fk is middle) and (v is very_low) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 4ted)(position is 3ps)(№395 is 2)(№254 is 2) (1)
3. If (Qskladu is middle) and (Fk is high) and (v is middle) and (Igen is very_high) and (Ited is middle) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 3ps)(№395 is 2)(№254 is 2) (1)
4. If (Qskladu is middle) and (Fk is low) and (v is high) and (Igen is low) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 6ted)(position is 4ps))(№395 is 2)(№254 is 2) (1)
5. If (Qskladu is middle) and (Fk is middle) and (v is high) and (Igen is middle) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 4ps)(№395 is 2)(№254 is 2) (1)
6. If (Qskladu is middle) and (Fk is very_high) and (v is high) and (Igen is very_high) and (Ited is middle) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 4ps)(№395 is 2)(№254 is 2) (1)
7. If (Qskladu is middle) and (Fk is low) and (v is very_high) and (Igen is low) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 5ps)(№395 is 2)(№254 is 2) (1)
8. If (Qskladu is middle) and (Fk is middle) and (v is very_high) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 5ps)(№395 is 2)(№254 is 2) (1)
9. If (Qskladu is middle) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 5ps)(№395 is 2)(№254 is 2) (1)

10. If (Qskladu is middle) and (Fk is middle) and (v is high) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 6ps)(N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)
11. If (Qskladu is middle) and (Fk is high) and (v is high) and (Igen is high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 6ps)(N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)
12. If (Qskladu is middle) and (Fk is very_high) and (v is high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 6ps)(N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)
13. If (Qskladu is middle) and (Fk is high) and (v is high) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 7ps)(N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)
14. If (Qskladu is middle) and (Fk is very_high) and (v is high) and (Igen is high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 7ps)(N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)
15. If (Qskladu is middle) and (Fk is very_high) and (v is high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 7ps)(N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)
16. If (Qskladu is middle) and (Fk is middle) and (v is very_high) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 8ps)(N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)
17. If (Qskladu is middle) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 8ps) (N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)
18. If (Qskladu is middle) and (Fk is very_high) and (v is very_high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 8ps) (N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)
19. If (Qskladu is very_low) and (Fk is very_low) and (v is very_low) and (Igen is low) and (Ited is middle) and (Tted is middle) then (nted is 2ted)(position is 3ps) (N₃₉₅ is 2)(N₂₅₄ is 2) (1)

20. If (Qskladu is very_low) and (Fk is low) and (v is low) and (Igen is middle) and (Ited is middle) and (Tted is middle) then (nted is 4ted)(position is 3ps) (№395 is 2)(№254 is 2)
21. If (Qskladu is very_low) and (Fk is middle) and (v is middle) and (Igen is high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 4ted)(position is 3ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
22. If (Qskladu is very_low) and (Fk is low) and (v is high) and (Igen is low) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 4ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
23. If (Qskladu is very_low) and (Fk is middle) and (v is high) and (Igen is high) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 4ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
24. If (Qskladu is very_low) and (Fk is high) and (v is high) and (Igen is very_high) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 4ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
25. If (Qskladu is very_low) and (Fk is low) and (v is high) and (Igen is low) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 6ted)(position is 5ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
26. If (Qskladu is very_low) and (Fk is middle) and (v is very_high) and (Igen is middle) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 6ted)(position is 5ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
27. If (Qskladu is very_low) and (Fk is very_high) and (v is very_high) and (Igen is high) and (Ited is high) and (Tted is low) then (nted is 6ted)(position is 5ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
28. If (Qskladu is very_low) and (Fk is middle) and (v is high) and (Igen is low) and (Ited is middle) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 6ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
29. If (Qskladu is very_low) and (Fk is high) and (v is high) and (Igen is high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 4ted)(position is 6ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)

30. If (Qskladu is very_low) and (Fk is very_high) and (v is high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 4ted)(position is 6ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
31. If (Qskladu is very_low) and (Fk is middle) and (v is high) and (Igen is low) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 7ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
32. If (Qskladu is very_low) and (Fk is high) and (v is high) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 7ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
33. If (Qskladu is very_low) and (Fk is high) and (v is high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 7ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
34. If (Qskladu is very_low) and (Fk is middle) and (v is very_high) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 8ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
35. If (Qskladu is very_low) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is low) then (nted is 6ted)(position is 8ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
36. If (Qskladu is very_low) and (Fk is very_high) and (v is very_high) and (Igen is middle) and (Ited is very_high) and (Tted is low) then (nted is 6ted)(position is 8ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
37. If (Qskladu is low) and (Fk is very_low) and (v is very_low) and (Igen is middle) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 3ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
38. If (Qskladu is low) and (Fk is low) and (v is very_low) and (Igen is middle) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 3ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
39. If (Qskladu is low) and (Fk is middle) and (v is high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 3ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)

40. If (Qskladu is low) and (Fk is very_low) and (v is middle) and (Igen is low) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 4ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
41. If (Qskladu is low) and (Fk is middle) and (v is high) and (Igen is middle) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 4ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
42. If (Qskladu is low) and (Fk is high) and (v is high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is low) then (nted is 4ted)(position is 4ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
43. If (Qskladu is low) and (Fk is low) and (v is middle) and (Igen is low) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 6ted)(position is 5ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
44. If (Qskladu is low) and (Fk is middle) and (v is very_high) and (Igen is middle) and (Ited is middle) and (Tted is low) then (nted is 6ted)(position is 5ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
45. If (Qskladu is low) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is low) then (nted is 6ted)(position is 5ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
46. If (Qskladu is low) and (Fk is middle) and (v is very_high) and (Igen is low) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 6ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
47. If (Qskladu is low) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 6ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
48. If (Qskladu is low) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 6ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)
49. If (Qskladu is low) and (Fk is middle) and (v is very_high) and (Igen is low) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 7ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)

50. If (Qskladu is low) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 7ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)

51. If (Qskladu is low) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is very_high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 7ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)

52. If (Qskladu is low) and (Fk is middle) and (v is very_high) and (Igen is middle) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 8ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)

53. If (Qskladu is low) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is high) and (Ited is high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 8ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)

54. If (Qskladu is low) and (Fk is high) and (v is very_high) and (Igen is very_high) and (Ited is very_high) and (Tted is middle) then (nted is 6ted)(position is 8ps) (№395 is 2)(№254 is 2) (1)