

С.Г. Буряковський, А.С. Маслій, В.В. Панченко, Д.П. Помазан, І.В. Деніс

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕПЛОВОЗА ЧМЕЗ НА ІМІТАЦІЙНІЙ МОДЕЛІ

Розроблено імітаційну модель тепловоза ЧМЕЗ, що складається з дизеля з регулятором кількості обертів колінчастого валу, тягового генератора постійного струму незалежного збудження та тягового електричного приводу. Проведено тестування роботи імітаційної моделі на профілі ділянки шляху Харків - Мерефа, при цьому основними обмеженнями є час руху, який для даного перегону не повинен перевищувати 45 хв., а також максимальна допустима швидкість, яка для вантажних потягів складає 80км/год. Отримана тривимірною поверхня, що показує залежність витрат палива локомотива від режиму ведення потяга машиністом при виконанні однакової роботи, тобто однакового часу руху по перегону. Бібл. 8, рис. 6.

Ключові слова: тепловоз, імітаційна модель, дизель, тяговий електропривод, профіль шляху, витрати палива, режим ведення поїзда.

Разработана имитационная модель тепловоза ЧМЭЗ, которая состоит из дизеля с регулятором числа оборотов колчатого вала, тягового генератора постоянного тока независимого возбуждения и тягового электрического привода. Проведено тестирование работы имитационной модели на профиле участка пути Харьков - Мерефа, при этом основными ограничениями являются время движения, для данного перегона не должно превышать 45 мин., а также максимальная допустимая скорость, которая для грузовых поездов составляет 80км/ч. Получена трехмерная поверхность, которая показывает зависимость расхода топлива локомотива от режима ведения поезда машинистом при выполнении одинаковой работы, то есть одинакового времени движения по перегону. Библ. 8, рис. 6.

Ключевые слова: тепловоз, имитационная модель, дизель, тяговый электропривод, профиль пути, расход топлива, режим ведения поезда.

Вступ. Ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів є однією з найважливіших задач, що стоять перед економікою України. Закон України «Про енергозбереження» визначає енергетичну ефективність економіки одним з головних стратегічних орієнтирів довгострокової державної енергетичної політики [1].

Залізничний транспорт є одним з найбільших споживачів енергоресурсів в країні. Енергетична ефективність в сучасних умовах є найважливішим фактором підвищення конкурентоспроможності українських залізниць на внутрішньому і міжнародному ринку транспортних послуг. У 2010 році постановою Кабінету Міністрів України була затверджена Транспортна стратегія України на період до 2020 року, метою якої, зокрема, є оптимізація енергоспоживання при безумовному виконанні послуг з перевезення вантажів і збереженні енергобезпеки компанії.

Основна частка витрат паливно-енергетичних ресурсів в компанії доводиться на тягу поїздів. Сьогодні це 82% всього обсягу споживання компанією електроенергії і 90% дизельного палива [2]. Тому і упор в енергозбереженні зроблений, передусім, на основний вид діяльності – перевізний процес. У зв'язку з цим питання підвищення енергоефективності є досить актуальним для залізниць та вимагає подальших досліджень.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Проведений огляд [3] показує, що тепловози ЧМЕЗ складають 97 % усього парку маневрових локомотивів української залізниці. Окрім маневрової роботи на станціях ці тепловози часто використовуються для вивізної роботи, а також у приміському русі. В умовах запровадження швидкісного руху особливого значення набуває оптимізація режимів ведення даних типів поїздів ділянками. В умовах підвищення швидкості проходження ділянки слід не забувати про витрати паливно-енергетичних ресурсів.

Як зазначено у [4], умови роботи локомотива при веденні поїздів характеризуються безперервною зміною сили тяги і швидкості руху, до цього також ділянки шляху з недостатнім зчепленням. При цьому потужність локомотива залежить від багатьох обставин, вона змінюється в залежності від швидкості, що реалізується, вибраної позиції контролера машиніста та

ступеня ослаблення поля збудження. Ці обставини дозволяють реалізувати досить різноманітні режими керування тяговим рухом складом, що часто відрізняються від прийнятих при тягових розрахунках і зазначених в режимних картах.

Для різних умов експлуатації раціональні режими водіння поїздів мають суттєві особливості. Це не дозволяє рекомендувати один режим ведення поїзда як оптимальний для всіх практично можливих умов руху по ділянці, оскільки навіть на одній і тій самій ділянці ці умови часто змінюються. Крім того, характеристики електричних машин і конкретних локомотивів в залежності від їх технічного стану можуть в певних межах відрізнятися від відповідних паспортних даних.

Все це створює труднощі при розробці та практичному використанні раціональних режимів водіння поїздів. Однак досвід показує, що навіть при наявності режимних карт і реалізації рекомендованих режимів водіння поїздів, технічно обґрунтованих для деяких середніх експлуатаційних умов, фактичні витрати електроенергії і палива у різних машиністів на одних і тих же ділянках різних, відхилення можуть бути як в більшу, так і в меншу сторону від встановленої норми (до 10%).

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що дослідження режимів ведення поїзда ділянкою є дуже важливим. Найбільш прийнятним способом дослідження є імітаційне моделювання, тому що воно дає змогу отримати важливі статистичні дані з достатньою точністю [5].

Ціль та задачі дослідження. Метою роботи є дослідження різних режимів ведення поїзда тепловозом ЧМЕЗ на предмет їх оптимальності за показниками часу проходження ділянки та витрат палива.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- розробити імітаційну модель усіх складових елементів тепловозу, що приймають участь у створенні та реалізації сили тяги;
- обрати та змоделювати ділянку шляху, на якій буде виконуватись дослідження;
- визначити режими ведення поїзда та дослідити кожен з них.

© С.Г. Буряковський, А.С. Маслій, В.В. Панченко, Д.П. Помазан, І.В. Деніс

Викладення основного матеріалу. Дизель-генераторна установка разом з електричною частиною об'єкта дослідження складається з таких основних конструкційних елементів: пульта керування, дизеля з регулятором кількості обертів колінчастого валу, тягового генератора постійного струму незалежного збудження та тягового електричного приводу. Структурна схема такого об'єкта дослідження наведена на рис. 1.

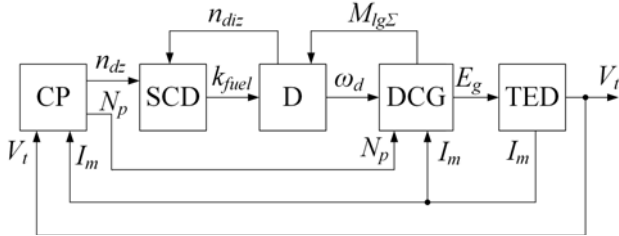


Рис. 1. Функціональна схема моделі тепловозу ЧМЕЗ: CP – пульт керування; SCD – регулятор кількості обертів дизеля; D – дизель; DCG – генератор постійного струму зі збуджувачем; TED – тяговий електропривод

Вхідними параметрами для блоку CP є швидкість поїзда V_t та струм двигуна I_m , від величин яких залежить номер позиції контролера машиніста N_p та задана кількість обертів дизелю n_{dz} , яка є вхідною величиною для блоку SCD. В залежності від n_{dz} та n_{diz} SCD визначає необхідну кількість палива k_{fuel} . На основі k_{fuel} та моменту навантаження M_{lgz} DCG отримує від D значення ω_d . Величина E_g , що є вхідним параметром блоку TED, розраховується DCG в залежності від N_p та I_m . На виході TED формується значення V_p .

Пульт машиніста CP тепловозу ЧМЕЗ має 8 позицій зміни напруги на тягових двигунах та дві позиції послаблення поля. На кожній позиції за допомогою автоматичних регуляторів підтримуються сталі значення частоти обертання колінчастого валу дизеля та напруги на клеммах збуджувача [6].

Змодельований пульт керування здійснює переключення позицій контролера машиніста в залежності від двох координат, а саме: струму двигунів та швидкості руху поїзда. Робота блоку, що моделює пульт, здійснюється за наступними умовами:

$$N_p = \begin{cases} N_p - 1 & \text{якщо } I_m > I_n \vee V_t > V_s \\ N_p & \text{якщо } I_m < I_n \wedge V_s - 5 \leq V_t \leq V_s \\ N_p + 1 & \text{якщо } I_m < I_n \wedge V_t < V_s - 5 \end{cases} \quad (1)$$

де N_p – номер позиції контролера машиніста, I_m – струм двигуна, I_n – номінальний струм двигуна, V_t – поточна швидкість руху поїзда, V_s – задана швидкість руху поїзда.

Для виключення можливості занадто частого переключення позицій аналіз необхідності переключення відбувається з інтервалом 1 с. Для виключення великої кількості переключень у сталому режимі, коли фактична швидкість близька до заданої, встановлена мертва зона у 5 км/год, у якій не відбувається переключень, а рух здійснюється на обраній раніше позиції.

Структурна схема, що реалізує умову (1), наведена на рис. 2, де PS – блок вибору позиції. Обраний номер позиції, також, перетворюється у задану частоту обертів дизеля n_{dz} .

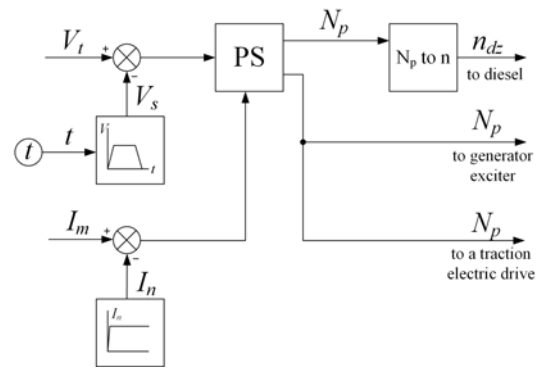


Рис. 2. Структурна схема моделі пульта керування

Усі дизелі за характером своєї роботи дуже чутливі до зміни навантаження. Збільшення навантаження на дизель викликає зниження частоти обертання колінчастого валу («просадку обертів»), що може призвести до зупинки дизеля, а зменшення навантаження супроводжується різким зростанням частоти обертання валу, тобто дизель може піти у «рознос» [7].

Для підтримання постійної частоти обертання валу в умовах змінного навантаження на дизель потрібен спеціальний регулятор, що автоматично керує паливними насосами. Встановлений на дизелі K6S310DR відцентровий всережимний регулятор непрямої дії захищає його від перевантаження, виконуючи функції регулятора потужності. Об'єднаний регулятор можна представити як ПІ-регулятор швидкості обертання колінчастого валу дизеля, вихідною величиною якого є кількість палива, що необхідно подати до циліндру.

В основу імітаційної моделі дизеля покладена індикаторна діаграма його роботи. Процеси, що відбуваються в циліндрах поршневого двигуна, можуть бути зображені у вигляді індикаторної діаграми. Індикаторна діаграма – це графічне відображення зміни тиску газу в циліндрі поршневого двигуна в залежності від переміщення поршня або кута повороту кривошипу [8]. Для дизеля K6S310DR розрахована та побудована індикаторна діаграма його роботи. Індикаторна діаграма побудована у вигляді залежності зміни тиску P у циліндрі двигуна від зміни об'ємів V під час переміщення поршня.

Для моделі дизелю користування діаграмою у осях P та V є досить незручним, тому наведену діаграму перетворено у діаграму в осях F та S , де F – сила, що діє на поршень, S – переміщення поршня. Діаграма залежності сили, що діє на поршень від переміщення наведена на рис. 3.

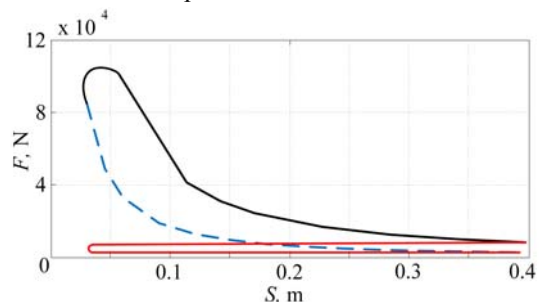


Рис. 3. Діаграма роботи дизеля K6S310DR

На тепловозі встановлений генератор, що є десятиполюсною машиною постійного струму з незалеж-

ним збудженням. Живлення незалежної обмотки збудження генератора здійснюється від збуджувача – машини постійного струму, що об'єднана валом із допоміжним генератором.

Блок, що моделює тяговий електропривод включає в себе, окрім тягового електродвигуна, блоки, що моделюють рух потяга ділянкою та гальмування потяга.

Модель блоків опору руху поїзда виконана за емпіричними формулами для локомотива та вагонів. У якості профілю шляху використаний профіль ділянки Харків – Мерефа. Вхідним параметром для блоку вибору ухилу є шлях, що пройшов потяг, який отримується шляхом інтегрування швидкості руху поїзда.

Вхідними змінними для роботи блоку гальмування є задана швидкість V_s , поточна швидкість потяга V_t та номер позиції контролера машиніста тепловоза N_p . Для виключення режиму, при якому відбувається гальмування з працюючими тяговими двигунами, виконується перевірка поточного положення ручки контролера машиніста. Якщо положення ненульове, то гальмування не відбувається.

Тестування роботи імітаційної моделі проводилось при параметрах, що наведені вище. При цьому основними обмеженнями були час руху, який для перегону Харків – Мерефа не повинен перевищувати 45 хв., а також максимальна допустима швидкість, яка для вантажних потягів складає 80 км/год. З урахуванням цього існує можливість використовувати різні інтенсивності розгону потяга з подальшим утриманням середньої швидкості по перегону. На рис. 4 представлено два види тахограм руху потяга.

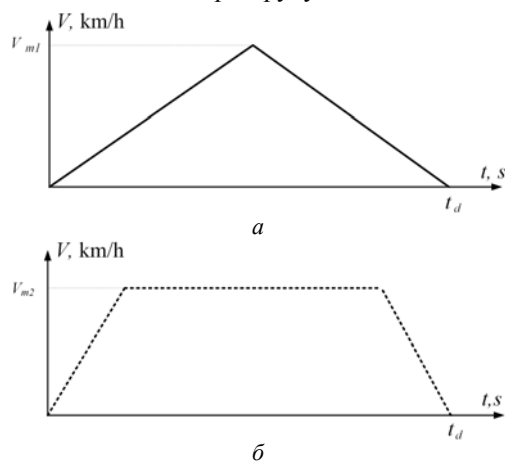


Рис. 4. Різновиди тахограм розгону поїзда:
а – трикутна; б – трапецієдальна

На показаних тахограмах t_d – це час руху по перегону, який для двох тахограм мають однакові значення. Зміна інтенсивності розгону потяга приводить до зміни максимальних швидкостей, що на приведених діаграмах представлені як V_{m1} , V_{m2} . В програмному комплексі Matlab за допомогою m-файла була написана підпрограма, в якій проводився розрахунок інтенсивності розгону та гальмування потяга від заданої максимальної швидкості при умові дотримання часу руху по перегону. При дослідженні роботи потяга на імітаційній моделі задавались тахограми з максимальними швидкостями в інтервалі 40-80 км/год з кроком 10 км/год. На рис. 5 показані осцилограми роботи маневрового тепловозу з 10 вагонами, при максимальній швидкості 60 км/год.

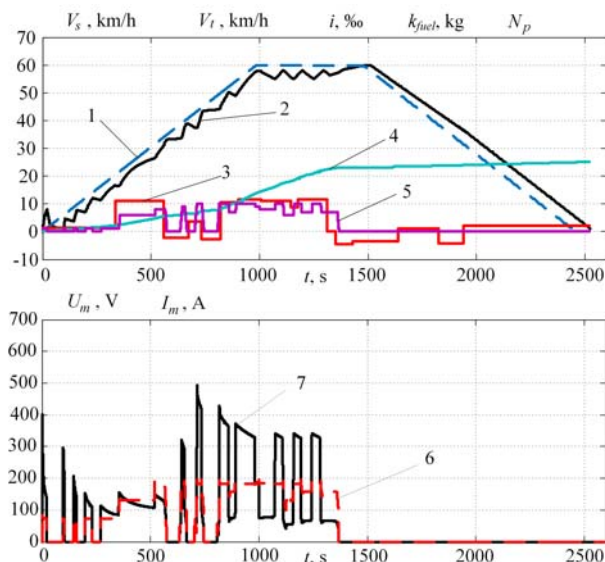


Рис. 5. Осцилограми роботи локомотива при максимальній швидкості 60 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – напруга на тяговому двигуні; 7 – струм тягового двигуна

На отриманих осцилограмах кривою 3 показано процес набору позицій, який змінюється при різних величинах максимальної швидкості. Кожній позиції відповідає зміна напруги на тягових двигунах (крива 6) та величини струму (крива 7) в них, яка обмежувалась на рівні 600 А. На графіках просліджується тенденція зростання витрати палива при збільшенні максимальної швидкості, що потребує більш детального дослідження. Змінюючи максимальну швидкість трикутної діаграми в діапазоні 70-95 км/год з кроком 5 км/год були отримані результати, які представлені у вигляді тривимірної поверхні (рис. 6).

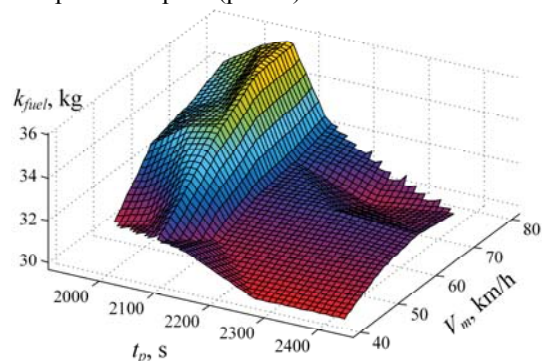


Рис. 6. Зміна витрат палива в залежності від максимально швидкості заданої діаграми

Отримана поверхня підтверджує залежність витрат палива локомотива від режиму ведення потяга машиністом (від часу роботи локомотива на певній позиції та інтенсивності переходу з позиції на позицію) при виконанні однакової роботи, тобто однакового часу руху по перегону. Найменші витрати палива, а саме 29-31 кг мають місце при встановленні максимальної швидкості на рівні 40-50 км/год. А тому існує необхідність в оптимізації заданої тахограми ведення поїзда та розробці системи автоматичного керування з використанням регулятора швидкості, який би більш точно відпрацьовував таку тахограму.

Висновки. Розроблена імітаційна модель тепловозу ЧМЕЗ, яка складається з пульта керування, дизе-

ля з регулятором кількості обертів колінчастого валу, тягового генератора постійного струму незалежного збудження та тягового електричного приводу з двигунами постійного струму послідовного збудження. Розроблений алгоритм, що імітує роботу машиніста, тобто здійснює переключення позицій контролера та керує гальмами. В основу моделювання дизеля покладена індикаторна діаграма його роботи, що апроксимована неперервними залежностями. Отримана імітаційна модель дає змогу отримати важливі статистичні дані для проведення аналізу режимів ведення поїзда.

Проведений ряд досліджень режимів при зміні тахограми швидкості. Змінюючи максимальну швидкість трикутної діаграми в діапазоні 70-95 км/год з кроком 5 км/год отримані осцилограми роботи тепловоза з постійним завантаженням на реальній ділянці шляху Харків – Мерефа.

З осцилограм видно, що струм при русі ділянкою був нижче, ніж номінальний, і у пікових режимах досягав 500А. Час проходження ділянки із заданим темпом розгону та обмеженням швидкості на рівні 60 км/год склав 2530 с.

До моделі включений блок, що обчислює витрати палива тепловозом. На основі даних, що отримані у результаті моделювання, збудована тривимірна поверхня, яка відображає залежність витрат палива від часу проходження ділянки та максимальної швидкості руху. Встановлено, що найменші витрати палива, а саме 29-31 кг мають місце при встановленні максимальної швидкості на рівні 40-50 км/год.

Отримані в ході дослідження результати показують, що існує потреба у створенні системи автоматичного керування з використанням регулятора швидкості, який би більш точно відпрацьовував задану тахограму, а також оптимізації режимів ведення поїзда.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. http://www.uz.gov.ua/about/general_information.
2. Ефименко Ю.И., Ковалев В.И., Логинов С.И. Железные дороги. Общий курс: Учебник. – М.: УМЦ ЖДТ, 2014. – 503 с.
3. Кулаев Ю.Ф. Экономика железнодорожного транспорта: навчальний посібник. – Ніжин: Вид-во Аспект. Поліграф, 2006. – 232 с.
4. Franzitta V., Curto D., Milone D., Trapanese M. Energy Saving in Public Transport Using Renewable Energy // Sustainability. – 2017. – vol.9. – no.12. – p. 106. doi: 10.3390/su9010106.
5. Velten K. Mathematical Modeling and Simulation. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2008. doi: 10.1002/9783527627608.
6. Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П., Деніс І.В. Обґрунтування необхідності модернізації тепловозу ЧМЕЗ із використанням гібридної силової установки // Електрифікація транспорту. – 2016. – №12. – С. 82-86.
7. Xin Q. Engine-vehicle matching analysis in diesel power-train system design // Diesel Engine System Design. – 2013. – pp. 348-394. doi: 10.1533/9780857090836.2.348.
8. Diesel Engine. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia. John Wiley & Sons, Inc., 2005. doi: 10.1002/0471743984.vse2527.

REFERENCES

1. Available at: http://www.uz.gov.ua/en/about/general_information (accessed 08 May 2017).
2. Efimenko Yu.I., Kovalev V.I., Loginov S.I. Zheleznyie dorogi. Obschiy kurs [Railways. General course]. Moscow, UMC ZhDT Publ., 2014. 503 p. (Rus).
3. Kulaev Yu.F. Ekonomika zallznicnogo transportu. Navchalniy posibnik [The Economics of Railway Transport. A Textbook]. Nizhyn, Aspect. Poligraph Publ., 2006. 232 p. (Ukr).

4. Franzitta V., Curto D., Milone D., Trapanese M. Energy Saving in Public Transport Using Renewable Energy. Sustainability, 2017, vol.9, no.12, p. 106. doi: 10.3390/su9010106.
5. Velten K. Mathematical Modeling and Simulation. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2008. doi: 10.1002/9783527627608.
6. Buryakovskyy S.H., Masliy A.S., Pomazan D.P., Denys I.V. Rationale for modernization of diesel locomotives CHME3 using hybrid propulsion system. Electrification of Transport, 2016, no.12, pp. 82-86. (Ukr).
7. Xin Q. Engine-vehicle matching analysis in diesel power-train system design. Diesel Engine System Design, 2013, pp. 348-394. doi: 10.1533/9780857090836.2.348.
8. Diesel Engine. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia. John Wiley & Sons, Inc., 2005. doi: 10.1002/0471743984.vse2527.

Надійшла (received) 13.02.2018

Буряковський Сергій Геннадійович¹, д.т.н., директор,
Маслій Артем Сергійович², к.т.н., доц.,
Панченко Владислав Вадимович², к.т.н., доц.,
Помазан Данило Павлович², аспірант,
Деніс Ігор Валерійович³, генеральний директор,
¹ НДПКІ «Молнія»

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
e-mail: sergbyut@i.ua

² Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків, пл. Фейєрбаха 7,
e-mail: a.masliy@ukr.net, vlad_panchenko@ukr.net,
daniil.pomazan@ukr.net

³ ПрАТ «КАРТЕЛЬ»,
50026, вул. Дніпровське шосе, 84а, Кривий Ріг,
e-mail: div99@ukr.net

S.G. Buriakovskiy¹, A.S. Masliy², V.V. Panchenko²,
D.P. Pomazan², I.V. Denis³

¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² Ukrainian State University of Railway Transport,
7, Feierbakh Square, Kharkiv, 61050, Ukraine.

³ PJSC «CARTEL»,
84a, Dnieper highway Str., Kriviy Rig, 50026, Ukraine.

The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model.

Introduction. Fuel consumption by diesel locomotive during operation depends significantly on many factors, among which the main is the mode of driving a train. **Purpose.** Research on the mathematical model of the modes of driving a train on the site of Kharkiv-Merefa with the purpose of the main oscillograms of the operation of the locomotive on the site. **Methodology.** A mathematical model of the operation of the main units of the locomotive CHME3 in the Matlab environment was developed. The model of the diesel engine is based on the calculated indicator diagram of its operation, which is approximated by a continuous dependence. The control panel operates on a system of conditions, the purpose of which is to maintain the set speed. **Results.** In the course of the simulation, statistical data were obtained on the fuel consumption of the diesel locomotive when it operated on a section with a train of constant mass. Based on the data obtained, a three-dimensional surface is constructed showing the dependence of the fuel consumption on the time of the site's exploration and the maximum speed on the site. **Practical value.** The dependence obtained can be used to optimize the driving behavior of trains along a section. The apparent dependence of fuel consumption on the driver's behavior is the basis for the further development of automatic locomotive speed control systems. References 8, figures 6.

Key words: diesel locomotive, imitation model, diesel engine, traction electric drive, road profile, fuel consumption, train mode.