

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені Володимира Даля
КАФЕДРА ЗАЛІЗНИЧНОГО, АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ ТА
ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА
НА ТЕМУ:**

**«Оптимізація енергоефективності тепловозів шляхом прогнозування їх
тягово-енергетичних показників»**

Обсяг роботи: - графічна частина – 11 слайдів;
- пояснювальна записка – 62 с.

**Студент групи ЗТ-22д
Керівник роботи**

**Шклярський А. Ю.
к.т.н. Ковтанець М. В.**

Київ 2026

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Навчально-науковий інститут транспорту і будівництва
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної випускної роботи

освітній ступінь	<u>бакалавр</u> (бакалавр, магістр)
спеціальність	<u>273 Залізничний транспорт</u> (шифр і назва спеціальності)
спеціалізація	<u>Локомотиви та локомотивне господарство</u> (назва спеціалізації)

на тему «Оптимізація енергоефективності тепловозів шляхом прогнозування їх тягово-енергетичних показників»

Виконав: студент групи ЗТ-22д		<u>Шклярський А. Ю.</u>
	(підпис)	(ініціали і прізвище)
Керівник		<u>Ковтанець М. В.</u>
	(підпис)	(ініціали і прізвище)
Завідувач кафедри		<u>Климаш А. О.</u>
	(підпис)	(ініціали і прізвище)
Рецензент		
	(підпис)	(ініціали і прізвище)

Київ - 2026

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Навчально-науковий інститут транспорту і будівництва
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин
(повна назва кафедри)

Освітній ступінь бакалавр
(бакалавр, магістр)

спеціальність 273 Залізничний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

спеціалізація Локомотиви та локомотивне господарство
(назва спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

“ ____ ” _____ 20 ____ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ ВИПУСКНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Шклярський Андрій Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **«Оптимізація енергоефективності тепловозів шляхом прогнозування їх тягово-енергетичних показників»**

Керівник роботи Ковтанець Максим Володимирович, к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджений наказом університету від “ ____ ” _____ 20 ____ року № ____

2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: Принципи роботи та діагностика систем регулювання потужності дизель-генератора тепловоза 2ТЕ116У. Економія палива та теплотехнічна модернізація тепловозів. Методи розрахунку оптимальних програм ведення поїзда.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналіз сучасного стану проблеми енергоефективного управління поїздом, прогнозування та управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів. 2. Основне рівняння руху поїзду і його складові. 3. Управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників):

- | | |
|---|---------|
| 1. Мета, об'єкт та задачі дослідження | - 2 сл. |
| 2. Статистичний ряд розподілу потужності на виході випрямної установки тепловозів 2ТЕ116У | - 1 сл. |
| 3. Зміна параметрів ДГУ тепловоза 2ТЕ116У | - 1 сл. |
| 4. Класифікація методів пошуку енергооптимальних режимів | - 1 сл. |
| 5. Схема стенду для перевірки роботи розподільника повітря | - 1 сл. |
| 6. Структура процесу пошуку енергооптимальних режимів | - 1 сл. |
| 7. Результати дослідження | - 2 сл. |
| 8. Висновки | - 1 сл. |

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «16» березня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної випускної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Вступ. Актуальність проблеми. Постановка задачі дослідження, обґрунтування об'єкту дослідження		
2	Аналіз сучасного стану проблеми енергоефективного управління поїздом, прогнозування та управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів		
3	Основне рівняння руху поїзду і його складові		
4	Управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів		
5	Методика управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів		
6	Представлення результатів дослідження		
7	Підготовка ілюстративного матеріалу до захисту кваліфікаційної випускної роботи		
8	Пояснювальна записка до кваліфікаційної випускної роботи		

Студент

(підпис)

Шклярський А. Ю.

(ініціали і прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Ковтанець М. В.

(ініціали і прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна випускна робота: 62 с., 27 рис., 15 бібл. назв,
11 слайдів.

Ключові слова: енергоефективність, управління, тягово-енергетичні характеристики, оптимізація,

Робота присвячена зниженню витрат палива на тягу поїздів та підвищення ефективності роботи тепловозів за рахунок урахування фактичного стану силової установки та його коригування з подальшим визначенням енергооптимальних режимів ведення поїзда дільницею.

Аналіз переваг та недоліків різних методів пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда дозволяють зробити висновок про те, що відомі методи не передбачають врахування фактичних тягово-енергетичних властивостей тепловозів та орієнтовані в основному на електричний транспорт залізниць.

В роботі встановлено, що використання фактичних тягових характеристик локомотивів у тягових розрахунках дозволяє зменшити помилку визначення швидкості та перегінного часу ходу з 5 до менш як 2 %.

В результаті дослідження поточного стану питання енергооптимального управління рухом поїзда з'ясовано, що, незважаючи на наявність інформації про реальний технічний стан енергетичної установки сучасних тепловозів, при виконанні варіантних та оптимізаційних тягових розрахунків вона практично не використовується, що знижує точність тягових розрахунків та, як наслідок, рівень енергоефективності тепловозів в експлуатації.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Реферат			Літ.	Арк.	Акрушіє	
Розроб.		Шклярський									
Перевір.		Ковтанець								3	
Консульт.								СНУ ім. В. Даля Кафедра ЗАТ ПТМ			
Н. Контр.											
Затверд.											

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПОЇЗДОМ, ПРОГНОЗУВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ТЯГОВО- ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЕПЛОВОЗІВ	8
1.1 Аналіз тягово-енергетичних характеристик тепловозів в експлуатації	8
1.2 Удосконалення методів оптимізаційних тягових розрахунків та підготовки вихідних даних для них	11
1.3 Енергетична ефективність тепловоза та фактори, що її визначають	16
2 ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ РУХУ ПОЇЗДУ І ЙОГО СКЛАДОВІ	21
2.1 Гальмові сили поїзда при використанні пневматичного та електропневматичного гальмування	21
2.2 Гальмові сили поїзда під час використання електричного гальмування	31
2.3. Порядок практичної реалізації методики пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда	36
2.4 Пошук енергооптимальних режимів ведення поїзда з використанням програми для виконання тягових розрахунків	37
3 УПРАВЛІННЯ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЕПЛОВОЗІВ	40
3.1 Аналіз причин, що викликають відхилення потужності дизель- генераторної установки від паспортних значень	40
3.2 Методика визначення тягово-енергетичних характеристик при коригуванні рівня тепловозної характеристики дизеля	44
3.3 Аналіз ефективності управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів	48
3.4 Методика управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів	58
ВИСНОВКИ	59
ЛІТЕРАТУРА	61

ВСТУП

Енергоефективність характеризується зменшенням обсягу паливно-енергетичних ресурсів, що використовуються при збереженні відповідного корисного ефекту від їх використання, у тому числі обсягу виробленої продукції, виконаних робіт, наданих послуг.

До початку застосування на тепловозах мікропроцесорних систем управління та діагностики, пошук оптимальних режимів ведення поїзда здійснювався з використанням паспортних характеристик тягового рухомого складу.

Необхідною умовою побудови ефективної системи автоведення тепловозу є оперативне коригування експлуатаційних характеристик залежно від реального технічного стану його енергетичної установки у встановлених і перехідних режимах роботи при виконанні прогнозних тягових розрахунків і формуванні алгоритмів управління енергетичною установкою. Донедавна ця умова була важко здійснена через відсутність оперативної інформації про поточний стан обладнання локомотива та неможливість виконання оперативного коригування наявних параметрів обладнання.

Ситуація змінилася з початком серійного випуску тепловозів нового покоління (2TE116У, 2TE25А, 2TE25KM, ТЕР70БС, ТЕМ18ДМ, 3TE28 та ін.), обладнаних бортовими мікропроцесорними системами автоматичного управління силовою установкою з вбудованою підсистемою діагностики, яка здійснює безперервне вимірювання та накопичування в пам'яті значень кількох сотень аналогових та дискретних параметрів, що характеризують режими роботи та технічний стан основних агрегатів тепловоза. Крім того, подібні системи дозволяють оперативно виконувати коригування їх тягово-енергетичних характеристик шляхом зміни коефіцієнтів у програмі, яка управляє.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Проте досі оперативна інформація про поточні тягово-енергетичні характеристики тепловозів при прогнозуванні їхньої майбутньої роботи не враховується.

Також відсутні науково-обґрунтовані методи їхнього оперативного коригування. Усі розрахунки, пов'язані з організацією роботи локомотивів, у тому числі пошук енергооптимальних траєкторій руху поїзда, виконуються на підставі їх усереднених паспортних характеристик.

Це знижує як точність розрахунку траєкторії руху поїзда, так і рівень довіри локомотивних бригад до режимних карт, що розробляються на основі таких розрахунків. Також залишається відкритим питання повного та економічного використання потужності тепловозних дизелів.

Вирішенням проблеми є оперативне коригування закладених в алгоритм розрахунків тягово-енергетичних характеристик тепловозів з урахуванням даних, що безперервно надходять від бортових систем управління та діагностики. При цьому зміна режимів управління локомотивом, що рекомендуються або задаються (в системі автоведення), також повинна здійснюватися безперервно за результатами оперативних тягових розрахунків, що враховують поточний технічний стан і режими роботи його силової установки і виконуються з використанням бортових обчислювальних засобів.

Таким чином, підвищення енергоефективності тепловозів за рахунок удосконалення методів оперативних тягових розрахунків на основі аналізу поточного стану енергетичної установки та її коригування за даними мікропроцесорних систем управління та діагностики є актуальним завданням, що вимагає розробки технічних та технологічних рішень, які дозволять знизити витрату палива на тягу поїздів, підвищити надійність роботи тепловозів та повноту використання їх тягових можливостей.

Об'єктом дослідження є енергетичний ланцюг тепловоза.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Предметом дослідження є методи аналізу даних бортових засобів діагностики, коригування фактичних експлуатаційних характеристик тепловозів та розрахунку енергооптимальних режимів ведення поїзда.

Метою дослідження є зниження витрат палива на тягу поїздів та підвищення ефективності роботи тепловозів за рахунок урахування фактичного стану силової установки та його коригування з подальшим визначенням енергооптимальних режимів ведення поїзда дільницею.

					РДБ.3Т-220.02 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПОЇЗДОМ, ПРОГНОЗУВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЕПЛОВОЗІВ

1.1 Аналіз тягово-енергетичних характеристик тепловозів в експлуатації

При вирішенні задачі пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда потрібна наявність інформації про реальні тягово-енергетичні характеристики локомотивів, під якими розуміються залежність сили тяги $F_k = f(v, p_u)$ (Н) та хвилинної витрати палива $G = f(v, p_u)$ (кг/хв) від швидкості руху v (км/г) та режиму управління (p_u) локомотивом. Значення параметрів даних залежностей, наведені у нормативній літературі [1], можуть суттєво відрізнятися від реалізованих у процесі експлуатації.

Сила тяги, що реалізується на цій позиції контролера (ПКМ), може бути визначена, виходячи з наступної залежності:

$$F_k = 3,6 \cdot \frac{(N_e - N_{всп}) \cdot \eta_{п}}{v} = \frac{3,6 \cdot P_{ву} \cdot \eta_{тэд} \cdot \eta_{ор}}{v} \text{ (Н);}$$

де N_e – вільна ефективна потужність дизеля, Вт;

$N_{всп}$ та $P_{ву}$ – потужність, що витрачається на допоміжні потреби, та потужність на виході випрямної установки відповідно, Вт;

$\eta_{п} = \eta_{тэд} \eta_{ор}$ – коефіцієнт корисної дії тягової передачі, тягового електродвигуна та тягового редуктора.

Хвилинна витрата палива локомотивом $G = f(n_d, g_e, N_e)$ залежить від частоти обертання валу дизеля n_d (режим управління – p_u), питомої ефективної витрати палива (g_e), ефективної потужності дизеля N_e , що реалізується.

Однак відомо, що реальна потужність на виході випрямної установки (ВУ) більшості тепловозів експлуатованого парку не відповідає своїм

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

паспортним значенням. На рисунку 1.1 показаний групований статистичний ряд середньої потужності на виході випрямної установки, отриманий для 23 секцій тепловозів 2ТЕ116У на 11 позиції контролера машиніста (ПКМ).

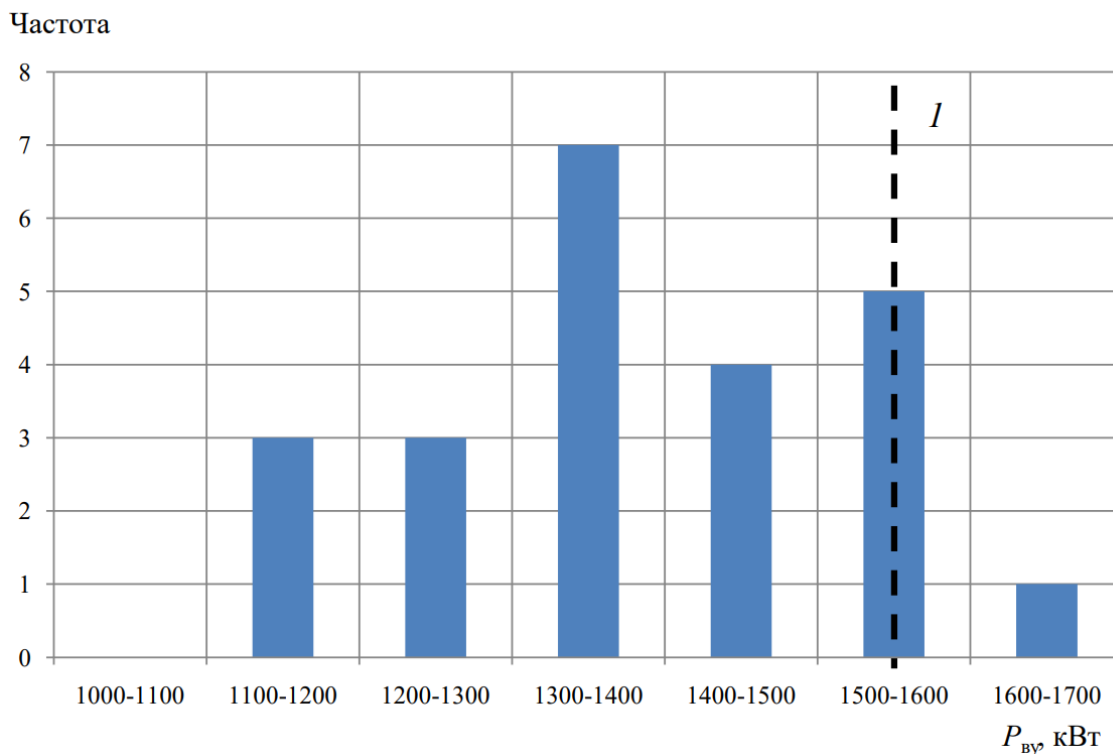


Рисунок 1.1 – Статистичний ряд розподілу потужності на виході випрямної установки тепловозів 2ТЕ116У при 11-й ПКМ:

1 - паспортне значення потужності на виході ВУ при 11-й ПКМ

Згідно з даними, середня потужність на виході ВУ для аналізованої вибірки становить 1390 кВт, що суттєво менше паспортного значення 1550 кВт. При цьому потужність 78% локомотивів менша за номінальне значення, а 25% тепловозів експлуатуються зі зменшенням потужності більш ніж на 20%. Це призводить до суттєвих відмінностей фактичних тягово-енергетичних характеристик від їхніх паспортних значень.

Показані на рисунку 1.1 значення потужності на виході ВП отримані для режимів ДГУ, що встановилися. Однак, як відомо, протягом від 8% до 58% часу роботи магістрального тепловоза його силова установка працює в неусталених (перехідних) режимах.

					РДБ.3Т-220.02 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Як випливає з рисунку 1.2, при зміні ПКМ потужність на виході ВУ досягає свого значення, що встановилося тільки через певний інтервал часу, тривалість якого може становити 25 - 30 сек і більше (крива 4). Однак у Правилах тягових розрахунків (ПТР) приймається припущення про миттєвий перехід з однієї тягової характеристики на іншу (лінія 3 на рисунку 1.2).

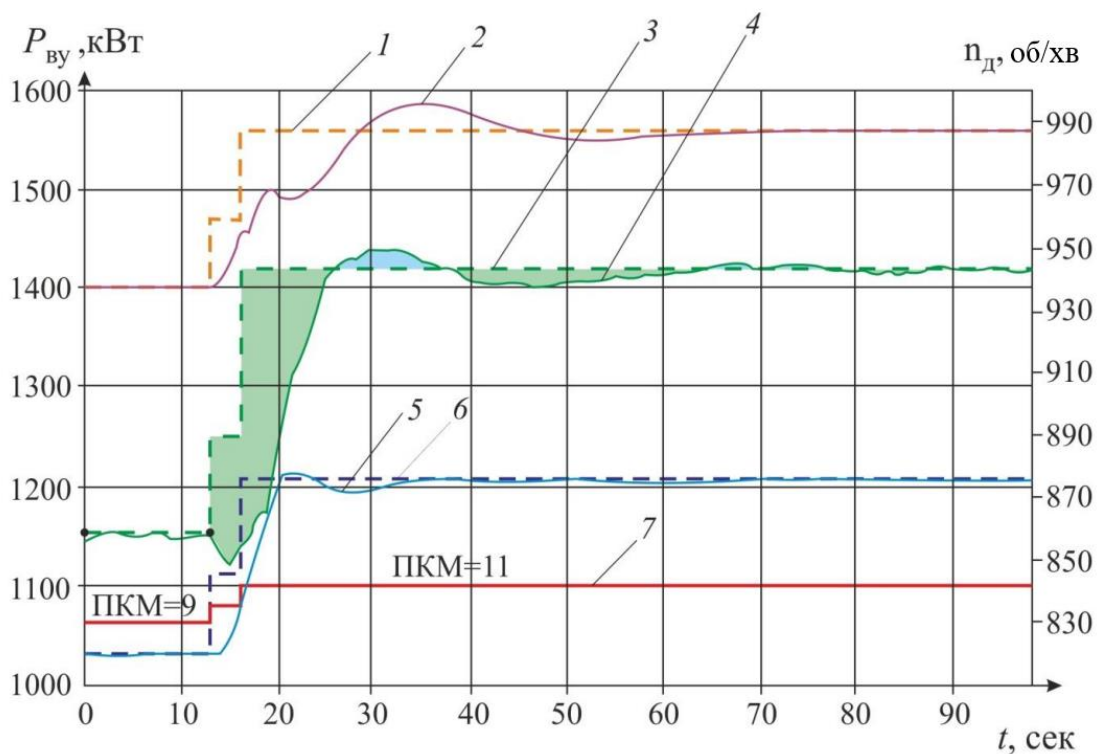


Рисунок 1.2 – Зміна параметрів ДГУ тепловоза 2ТЕ116У зі збільшенням позиції контролера машиніста:

- 1 – положення рейок ТНВД при режимі роботи, що встановився;
- 2 – фактичне становище рейок ТНВД; 3 – значення потужності ТГ, що встановилося; 4 – фактичне значення потужності тягового генератора;
- 5 – фактична частота обертання валу дизеля; 6 – частота обертання валу дизеля, що встановилася; 7 – зміна позицій контролера машиніста

Такі припущення призводять до суттєвого зниження точності тягових розрахунків та перевитрати палива при реалізації їх результатів у процесі експлуатації. Відсутність реальних даних про тягово-енергетичні характеристики локомотивів призводить до зниження ефективності методів

оптимізації керування поїздом через суттєву помилку при пошуку енергооптимальних режимів його ведення.

1.2 Удосконалення методів оптимізаційних тягових розрахунків та підготовки вихідних даних для них

1.2.1 Методи пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда

Проблема вибору оптимальних режимів керування поїздом є предметом пильної уваги вчених та фахівців протягом усього періоду існування залізниць. Підходи до її вирішення нерозривно пов'язані з розвитком теорії тяги поїздів, удосконаленням методів тягових розрахунків та розвитком обчислювальної техніки.

Під оптимальним керуванням рухом поїзда розуміється послідовність режимів роботи силової установки локомотива та гальмівної системи поїзда, що забезпечує мінімізацію заданого критерію оптимальності при виконанні всіх обмежень, що накладаються на параметри руху поїзда ділянкою станом колії, режимами роботи локомотива та його технічним станом, а також вимог безпеки руху.

При оптимізації управління рухом поїзда як критерії оптимальності можуть застосовуватися:

- мінімум часу на переміщення дільницею;
- мінімум перевізних витрат на рух поїзда дільницею.

Оптимізація за часом ходу є найпростішим випадком та здійснюється класичними методами тягових розрахунків шляхом переміщення поїзда з максимально можливою (з урахуванням обмежень по ділянках) швидкістю руху. Такий тип управління називають оптимальним за швидкодією.

Розв'язання задачі мінімізації перевізних витрат при заданому часі ходу, як правило, зводиться до мінімізації витрати палива (енергоресурсів) на одиницю перевізної роботи, оскільки інші складові перевізних витрат (витрати

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

на ремонт рухомого складу, шляхи, оплату праці персоналу) можуть вважатися такими, що не залежать від режимів ведення поїзда.

Таким чином, рішення задачі оптимізації режимів ведення поїзда зводиться до пошуку керування $u(t)$ (позиція контролера або гальмівна позиція), що доставляє мінімум функціоналу:

$$B = \int_0^T G(u(t), v) \cdot dt \rightarrow \min ;$$

де B – витрата палива (електроенергія), кг (кВт·год);

T – заданий час ходу дільницею;

G – витрати палива (електроенергії) за одиницю часу;

v – швидкість руху поїзда.

Можливі різні постановки задачі, серед яких найчастіше застосовується розгляд її як завдання із закріпленими кінцями траєкторії, тобто з відомими значеннями початкової v_n та кінцевої швидкості руху v_k . Методи пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда прийнято розділяти на аналітичні, чисельні, чисельно-аналітичні.

Класифікацію методів пошуку енергооптимальних режимів роботи наведено на рисунку 1.3.

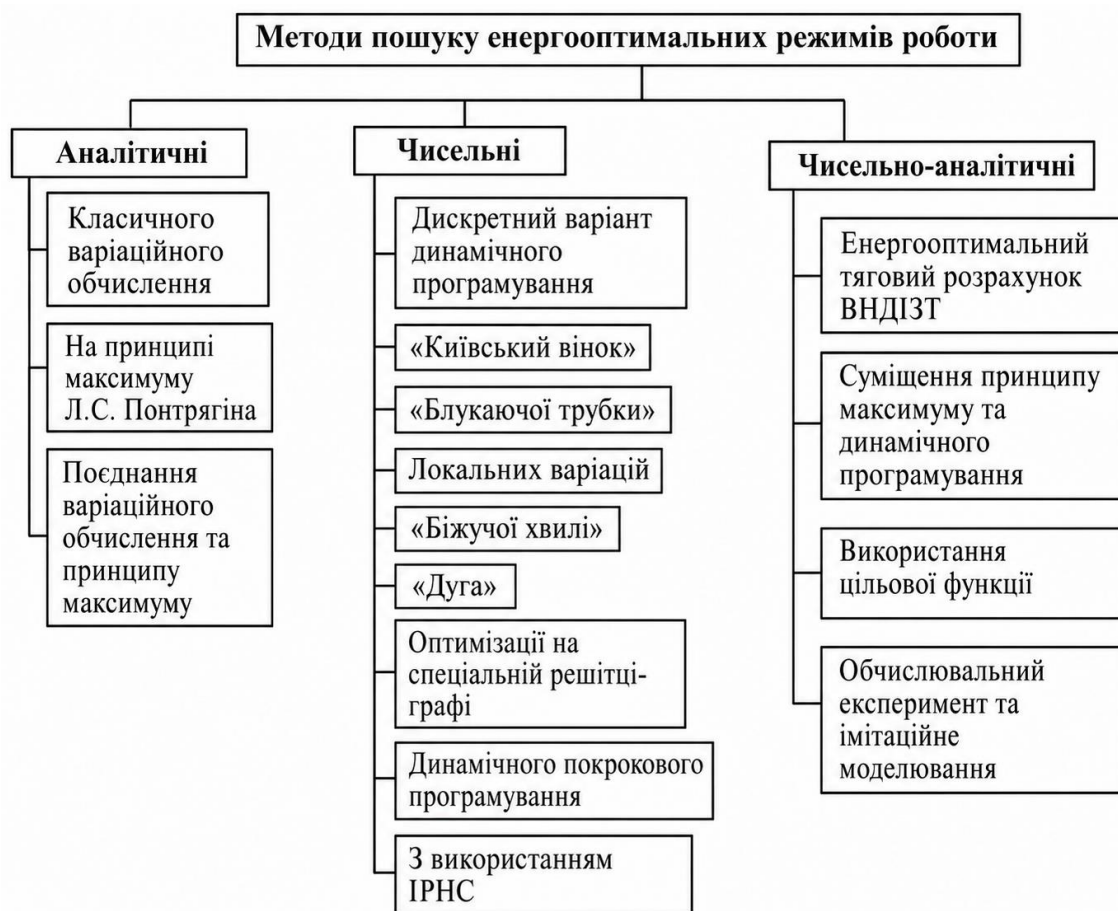


Рисунок 1.3 – Класифікація методів пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда

Аналіз переваг та недоліків різних методів пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда дозволяють зробити висновок про те, що відомі методи не передбачають врахування фактичних тягово-енергетичних властивостей тепловозів та орієнтовані в основному на електричний транспорт залізниць. Найбільш перспективним для подальшого розвитку є використання чисельних методів пошуку, таких як «київський віник» та метод «Дуг».

1.2.2 Врахування поздовжніх динамічних зусиль при побудові енергооптимальних траєкторій руху

Питанням зменшення поздовжніх динамічних зусиль в автозчіпних пристроях поїзда при виборі критеріїв оптимальності та методів оптимізації

режимів керування присвячено багато досліджень. Особливу увагу приділено режимам ведення вантажного поїзда під час електричної тяги. Для вирішення поставленої задачі автори використовують досить складні моделі поїзда, що враховують кожен одиницю рухомого складу як окрему масу або систему мас, пов'язаних з нелінійними пружними зв'язками.

Як додаткові специфічні критерії якості регулювання швидкості руху вантажного поїзда використовують:

- максимальні величини поздовжніх динамічних сил у різних режимах ведення;
- величина накопичених втомних ушкоджень автозчіпних пристроїв;
- плавність ходу в перехідних режимах руху, що оцінюється за величиною похідної від прискорення поїзда, яка не повинна перевищувати 0,5-1,0 м/с³.

При цьому складність одержуваних математичних моделей істотно обмежує вибір методів оптимізації та безліч варіантів, що розглядаються.

Завданням системи автоматичного регулювання є:

- розгін або гальмування до величини заданої швидкості із заданим прискоренням;
- підтримка постійної швидкості руху при зміні опору руху поїзда;
- плавне зменшення до нуля сили тяги під час переходу на вибіг.

Вводиться завдання двох можливих інтенсивностей рівня розгону поїзда та перехідна функція між ними. Для зменшення обсягу та часу виконання обчислень доцільним є використання поздовжньо-динамічного моделювання під час перевірки оптимальної за іншими критеріями траєкторії руху поїзда на відсутність неприпустимих поздовжніх динамічних зусиль.

В результаті спільної науково-дослідної роботи було розроблено та апробовано програмний комплекс «Тяга-прогноз», призначений для пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда. Структура програмного комплексу представлена на рисунку 1.4.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою створення програмного комплексу було формування гнучкого інструменту на вирішення науково-технічних завдань у сфері оперативних тягових розрахунків.



Рисунок 1.4 – Структура програмного комплексу "Тяга-прогноз"

Даний програмний комплекс має велику гнучкість формування режимів ведення поїзда, можливість реалізації різних підходів до завдання основного та додаткового опору руху, налаштування параметрів гальмівної системи та тягової характеристики локомотивів.

При завданні основного опору руху можуть використовуватись як залежності, наведені в нормативних документах, так і власні залежності користувача. Додатковий опір від ухилу та кривих може визначатися як для поїзда, що подається у вигляді матеріальної точки, так і для нерівномірно розподіленої по довжині поїзда маси. Є можливість урахування плавної зміни сили тяги при зміні позицій контролера та гальмівних сил при гальмуванні та відпустці пневматичних гальм.

Однією з основних властивостей комплексу «Тяга-прогноз» є можливість формування режимів ведення поїзда різними способами, а саме:

- ручний режим ведення поїзда, у якому оператор визначає точки зміни режимів ведення;
- виконання перевірочних розрахунків по заздалегідь сформованій режимній карті;

- автоматичний вибір режимів ведення поїзда за критерієм мінімального часу;
- автоматичний вибір режимів ведення поїзда з проходженням ділянок за заданий час ходу.

В останньому випадку можливий розрахунок до 30 різних траєкторій руху з однаковим часом ходу, з яких оператор вибирається оптимальна витрата енергоресурсів, кількості змін режимів управління та інших показників. Висока точність та достовірність результатів, що одержуються з використанням даного комплексу, підтверджуються результатами дослідних поїздок із динамометричним вагоном.

1.3 Енергетична ефективність тепловоза та фактори, що її визначають

1.3.1 Особливості конструкції, технічний стан та режими навантаження агрегатів силового ланцюга

Сучасне тепловозостроение перебуває у постійному пошуку шляхів підвищення енергетичної ефективності силового ланцюга локомотива. Одним із трендів є використання багатодизельних силових установок локомотивів із забезпеченням оптимальності їхньої спільної роботи. Удосконалюються системи керування тяговими електродвигунами постійного струму і дедалі більше уваги приділяється використанню асинхронного тягового приводу.

У роботі [2] виконано аналіз складових втрат енергії в елементах силового ланцюга електровозів змінного струму, на підставі якого запропоновано метод вибору та обґрунтування критеріїв економічності режимів роботи локомотивів під час вирішення оптимізаційного завдання. Як основні рекомендації обґрунтовано умови для відключення частини тягових електродвигунів локомотивів, що дозволяють зменшити рівень втрат у силовому приводі.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати аналогічних досліджень, що обґрунтовують можливу ефективність відключення частини ТЕД постійного та змінного струму для електровозів, наведено у роботі [3].

В роботах [4-5] з метою підвищення к.п.д. тепловоза обґрунтовується перехід на відключення тягових електродвигунів та впровадження багатодизельних установок та накопичувачів енергії. Крім того, велика увага приділяється балансу енергії локомотива в режимі тяги та складання карт енергетичних ізоляцій, з використанням яких пропонується здійснювати пошук енергооптимальних режимів роботи за допомогою включення/вимкнення тягових електродвигунів, накопичувачів енергії та двигунів внутрішнього згоряння.

У міру вдосконалення та зміни структури енергетичного ланцюга локомотива необхідно уточнювати порядок розрахунку його тягової характеристики у зв'язку зі зміною рівня втрат у тяговому приводі та витрат на привід допоміжних навантажень.

У роботах показано, що технічний стан та відхилення у налаштуванні та регулюванні елементів силового ланцюга локомотива призводять до суттєвих відхилень потужності на виході дизель-генераторної установки порівняно з її паспортними характеристиками. Розбіжність потужностей на виході випрямних установок може досягати 300-400 кВт.

У дослідженні [6] як основні причини невідповідності характеристик силової установки тепловоза вимогам, що висуваються, виділяються наступні:

- несправність датчика лінійних переміщень рейок паливних насосів високого тиску (силового валу виконавчого пристрою регулятора дизеля);
- низький тиск наддуву;
- несправність та неправильне регулювання об'єднаного регулятора;
- несправність паливної апаратури циліндрів;
- перепад тиску палива за фільтром тонкого очищення;
- несправність датчиків струму та напруги тягового генератора;
- відхилення оборотів дизеля на ПКМ від заданих значень.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

У роботі [7] на основі моделювання отримано оцінку впливу на показники енергоефективності локомотивних дизелів таких параметрів як:

- кут випередження відкриття впускних та випускних клапанів;
- розсинхронізація впускних та випускних клапанів;
- витікання робочого тіла з циліндра дизеля;
- втрати тиску в повітряному фільтрі;
- протитиск за турбіною (втрати в глушнику);
- втрати тиску в охолоджувачі наддувного повітря;
- зміна кута випередження подачі палива;
- зменшення затягування пружини голки форсунки.

Як показано у роботах [8, 9], основними причинами зниження середньоексплуатаційної економічності дизель-генераторної установки є:

- зниження ефективного к.п.д. дизелі на неномінальних режимах роботи;
- збільшення тривалості роботи дизеля на режимах холостого ходу та підвищена величина витрати палива на цих режимах, особливо в зимовий час;
- перехідні процеси при зміні режимів навантаження тепловозів.

При цьому зазначається, що навіть магістральні тепловози основний час працюють при навантаженнях, що не перевищують 50-60% від номінальних. Для магістральних локомотивів час роботи на номінальній позиції становить середньому 4,69 %, але в холостому ході – 43,91 %. Аналогічні дані, що підтверджують переважне використання неномінальних режимів роботи, отримані у низці інших досліджень. Розкид потужності на виході випрямної установки під час роботи на проміжних позиціях контролера може значно перевищувати відповідний показник на номінальній позиції.

1.3.2 Витрати енергії на привод допоміжних навантажень локомотива

Виконано аналіз впливу витрат потужності на привід допоміжного обладнання тепловоза на його к.п.д. Діяльність показано, що частку допоміжних навантажень на номінальної потужності припадає від 9,7 до 17,4%. Причому зі зростанням секційної потужності частка витрат енергії на допоміжні навантаження має тенденцію до збільшення. Найбільші витрати потужності припадають на такі агрегати допоміжного обладнання:

- вентилятори охолодження теплоносія дизеля;
- вентилятори охолодження електричних машин та апаратів;
- компресор;
- порушення тягових генераторів.

Показано, частка витрат енергії на допоміжні потреби впливає к.п.д. тепловоза, як і величина втрат енергії у передачі потужності. Наголошується, що той самий економічний ефект може бути досягнутий як за рахунок підвищення к.п.д. передачі, і з допомогою зниження витрат енергії на допоміжні потреби.

Зі зростанням секційної потужності тепловоза від 1000 до 3000 к.с. витрати потужності на охолодження теплоносіїв зростають від 4 до 5,5% ефективної потужності дизеля. Частка витрат потужності на збудження тягових електричних машин вважається практично незалежною від ефективної потужності дизеля і становить близько 1,5% від її величини.

Потужність, що витрачається на привід гальмівного компресора, залежить від ваги поїзда і, отже, потужності дизеля. Пропонується приймати потужність гальмівного компресора на рівні 2,1% від ефективної потужності дизеля для вантажних тепловозів та на рівні 1,5-1,7% для пасажирських. Потужність, що витрачається на охолодження тягових електричних машин, головним чином залежить від частоти обертання колінчастого валу дизеля n_d і визначається залежно від $N_{ве} = k n_m^D$ ($m > 2$ – показник ступеня).

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		19

Аналіз результатів дозволяють зробити висновок про нелінійну залежність потужності, що відбирається на привід допоміжних навантажень, від ефективної потужності дизеля і істотний вплив потужності допоміжних навантажень на к.п.д. тепловоза загалом. Аналогічної картини слід очікувати і при часткових режимах навантаження дизеля.

Також є інформація про вплив незадовільного стану та неправильного налаштування допоміжного обладнання на загальний рівень енергоефективності електрорухомого складу.

У роботах [10, 11] виконано аналіз впливу параметричних відмов допоміжного обладнання на тягово-енергетичні властивості локомотивів. Як показано в даних дослідженнях, зміна відбору потужності на допоміжне обладнання через зміну його технічного стану впливає на вибір режимів ведення поїзда, що забезпечують витримку заданого часу ходу та енергооптимальну траєкторію руху.

У дослідженнях [12, 13] виконано аналіз причин, що впливають на енергоефективність гідравлічних приводів вентиляторів, що охолоджують пристрій тепловозів. Запропоновано шляхи зниження втрат енергії у приводі вентиляторів охолодження тепловозів 2ТЕ10.

Робота [14] присвячена вдосконаленню режимів керування приводом допоміжних асинхронних електродвигунів електрорухомого складу. Запропонована авторами система управління допоміжними машинами електровоза призначена для підвищення енергоефективності приводу за рахунок застосування нового алгоритму вибору оптимальної величини потокозчеплення ротора, що дозволяє знизити величину споживаного асинхронним двигуном енергії.

					<i>РДБ.3Т-22д.02 ПЗ</i>	Арк.
						20
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ РУХУ ПОЇЗДУ І ЙОГО СКЛАДОВІ

2.1 Гальмові сили поїзда при використанні пневматичного та електропневматичного гальмування

Гальмівні сили в поїзді можуть виникати внаслідок дії наступних видів гальмівних засобів та їх поєднань:

- пневматичні гальма поїзда (локомотива та складу);
- електропневматичні гальма пасажирського поїзда (локомотива та складу);
- електронні пневматичні гальма з керуванням електронними розподільниками повітря по радіоканалу;
- пневматичний гальмо локомотива;
- електричне (реостатне або рекуперативне) гальмо локомотива.

Оскільки метою дослідження є оптимізація керування поїздами із тепловозною тягою, можливість використання рекуперативного гальмування не розглядається. Гальмівні сили B_t , що діють на поїзд при пневматичному та електропневматичному гальмуванні, можуть бути визначені з виразу:

$$B_t = \sum K_p^k \cdot \varphi_{kp}^k + \sum K_p^c \cdot \varphi_{kp}^c + \sum K_p^d \cdot \varphi_{kp}^d ;$$

де $\sum K_p^k$ та $\sum K_p^c$ – відповідно сумарне розрахункове натискання всіх композиційних та чавунних колодок у поїзді на колісні пари (Н);

$\sum K_p^d$ – сумарне розрахункове натискання гальмівних накладок на всі гальмівні диски, наведене до колісних пар (Н);

φ_{kp}^k , φ_{kp}^c та φ_{kp}^d – розрахункові коефіцієнти тертя композиційних та чавунних гальмівних колодок та гальмівних накладок дискового гальма, що визначаються за відомими залежностями.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункові сили натискання гальмівних колодок та накладок також визначаються за відомими залежностями, що враховують конструктивні параметри гальмівних важільних передач, та залежать від величин тиску в гальмівних циліндрах рухомого складу. Так як при вирішенні основного рівняння руху оперують питомими силами, то для визначення питомих гальмівних сил b_T (Н/т).

Найбільш складний щодо гальмівних сил облік інерційності роботи пневматичної гальмівної системи поїзда (швидкості поширення гальмівної і відпускної хвилі), що виражається у тривалому та неодночасному процесі наповнення гальмівних циліндрів поїзда, і, особливо, у тривалому процесі відпустки гальм поїзда, під час якого використання тягових режимів керування поїздом не допускається, а гальмівна сила поступово зменшується до нуля.

Теоретичному та практичному визначенню характеру зміни гальмівних сил у поїзді у процесі наповнення гальмівних циліндрів присвячено велику кількість досліджень. У роботі щодо характеру наповнення гальмівних циліндрів використовується стандартна методика «Правил тягових розрахунків». Порівняльні розрахунки підтверджують хорошу збіжність результатів розрахунку за даною методикою з даними, отриманими раніше.

При цьому в тягових розрахунках при використанні пневматичних гальм поїзда застосовується три щаблі регульовального гальмування. Зазначене обмежене число щаблів регульовального гальмування обумовлено, насамперед, низькою точністю управління пневматичними гальмами. Відповідно до цих джерел при зупинках на станціях і роздільних пунктах, передбачених графіком руху, розрахунковий гальмівний коефіцієнт приймається на рівні 50% від максимального значення для вантажних поїздів і на рівні 60% від максимального значення для пасажирських, що відповідає другому ступені регульовального гальмування.

Крім того, у разі застосування пневматичних гальм обмежується мінімальний час використання гальмівного режиму та час повної відпустки та

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

підзарядки гальм, протягом якого для поїзда приймається режим вибігу (суміщення тягового та гальмівного режимів не допускається в експлуатації та не застосовується у розрахунках).

Окремим питанням є характер зменшення гальмівної сили під час відпустки гальм. Нормативно-довідковою літературою встановлено час повної відпустки та зарядки гальм 90-120 сек при регульовальному службовому гальмуванні вантажних поїздів та 30-60 сек при регульовальному гальмуванні пасажирських поїздів. Результати низки досліджень показують, що швидкість поширення відпускної хвилі при пневматичному гальмуванні залежить від цілої рядки факторів і за оцінками становить 50-70 м/с. Як впливає з наведених у діаграм наповнення та випорожнення гальмівних циліндрів (рисунок 2.1), час безпосередньо відпуску гальм одного вагона після повного службового гальмування не перевищує 40-50 секунд.

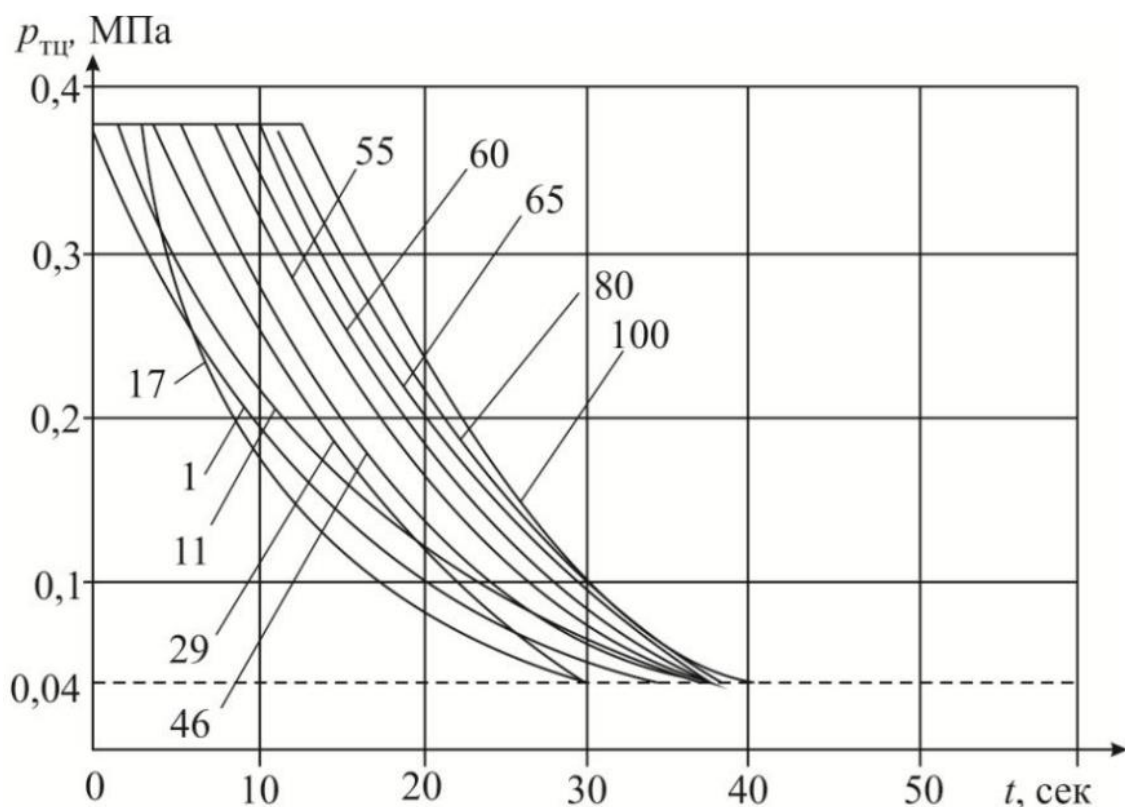
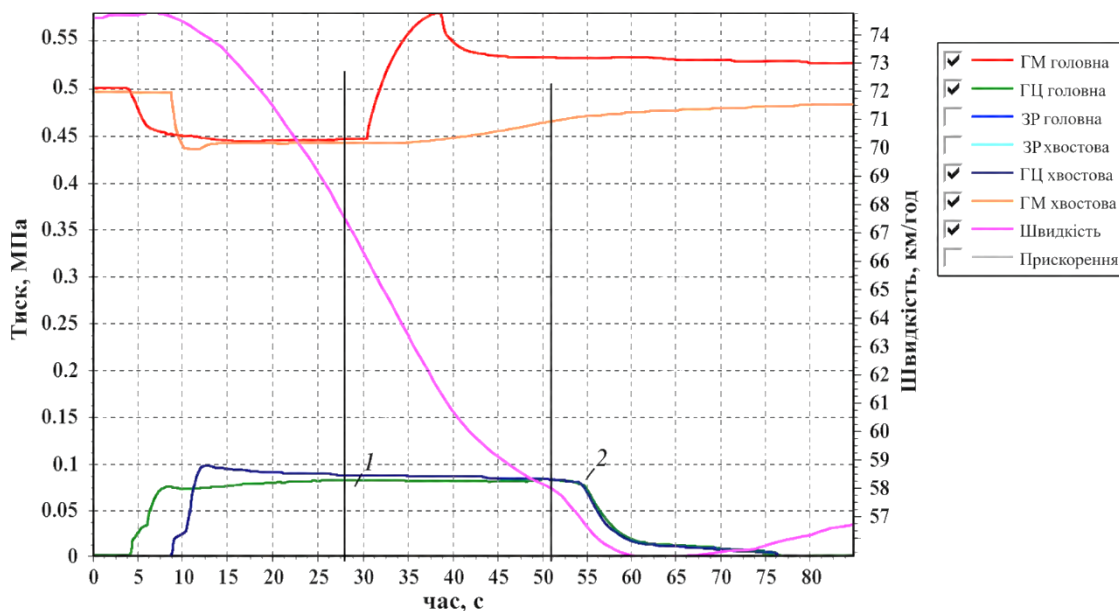


Рисунок 2.1 – Діаграма відпустки гальм у вантажному поїзді зі 100 вагонів після повного службового гальмування

Тим часом ці дані були отримані, як правило, для випадків застосування повного службового та екстреного гальмування. Крім того, результати отримані понад 20 років тому, відтоді влаштування гальмівних систем вантажних вагонів зазнало суттєвих змін.

З метою отримання актуальної інформації про перехідні процеси у гальмівній системі вантажного поїзда у процесі відпустки після регулювальних гальмування було проаналізовано записи автономних пристроїв реєстрації пневматичних та динамічних процесів у вантажному поїзді (АПР). Було проаналізовано результати 14 досвідчених поїздок з поїздами, що складаються з чотиривісних вантажних вагонів. При цьому поїзди складалися з чотиривісних цистерн або напіввагонів завдовжки 12,2-14,3 м. Кількість вагонів у складах коливалася від 65 до 70 вагонів. Розглядалися режими службового регулювального гальмування одним ступенем зі зниженням тиску у гальмівній магістралі 0,6-0,7 кгс/см² (0,06-0,07 МПа). Загалом було проаналізовано 165 вимірів регулювального службового гальмування вантажних поїздів.



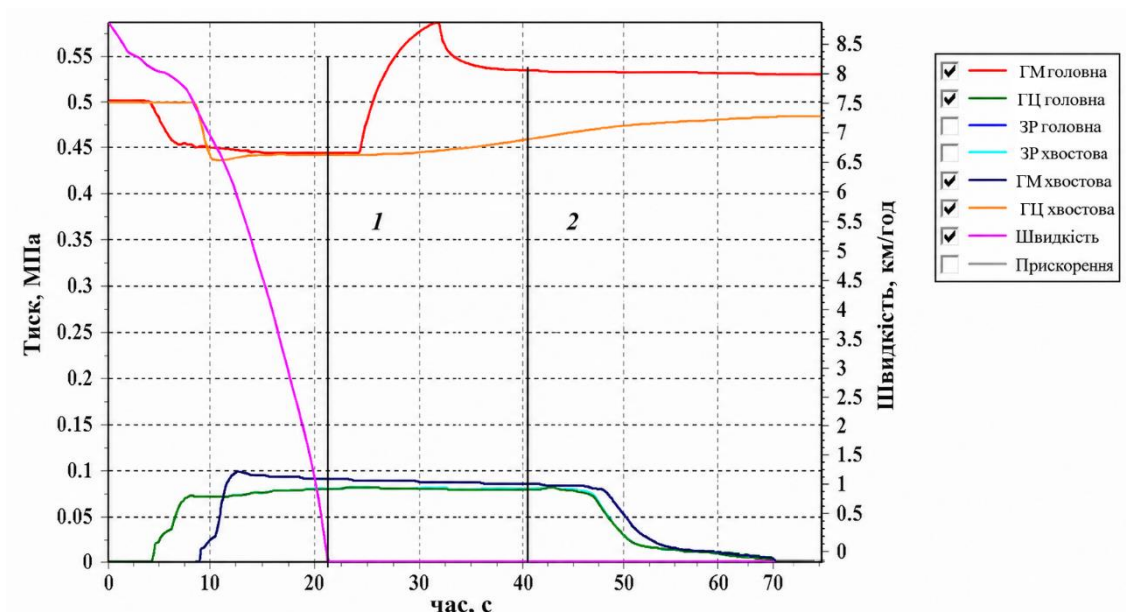
а)

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

РДБ.3Т-220.02 ПЗ

Арк.

24



б)

Рисунок 2.2 – Записи процесу регулювального гальмування системою автономних пристроїв реєстрації пневматичних та динамічних процесів у вантажному поїзді

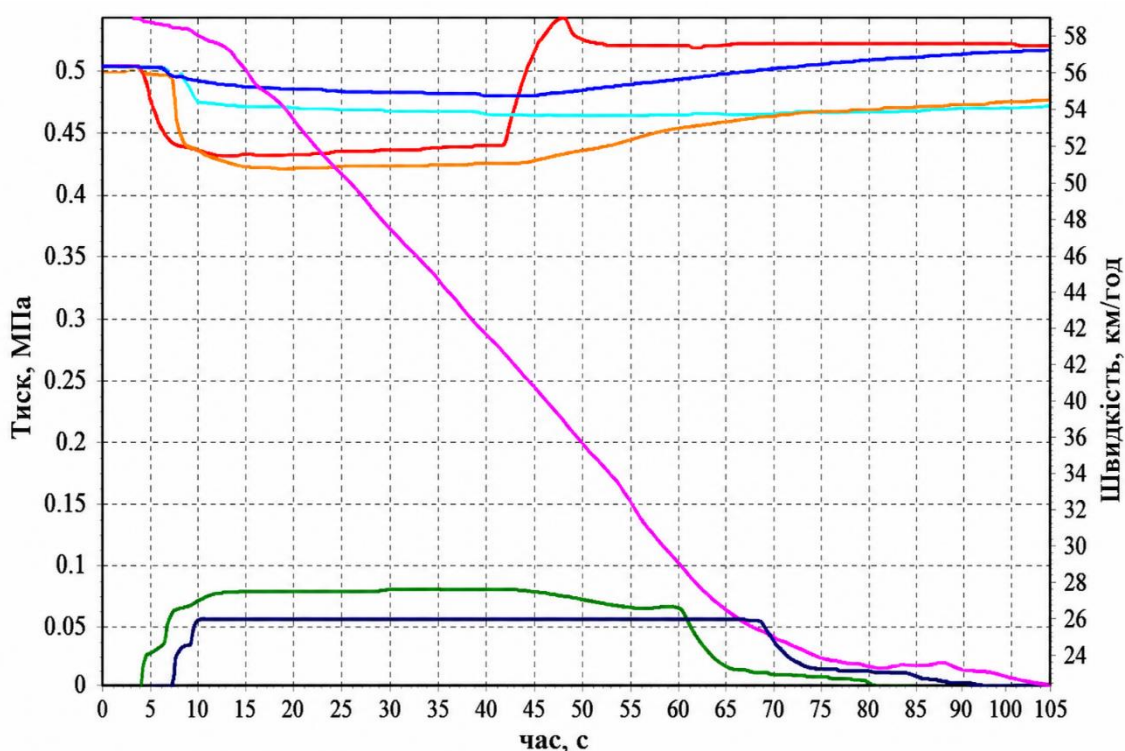
Як видно із залежностей, наведених на рисунку 2.2, між моментом постановки ручки крана машиніста у відпускне положення (лінія 1) та моментом початку відпустки гальм (лінія 2) у поїзді проходить близько 20-25 секунд. Однак, варто зазначити, що в даному випадку не зовсім коректно вважати даний час - часом поширення відпускнуї хвилі, так як на рисунку показано, що відпуск гальм у головному та хвостовому вагонах поїзда відбувається практично синхронно на рисунку 2.2 а, а на рисунку 2.2 б різниця у часі відпустки не перевищує 3 секунди. При цьому протягом тривалого часу з початку відпустки тиск у гальмівних циліндрах незмінно, а потім відбувається його зменшення у всіх вагонах поїзда з невеликою різницею за часом. Аналогічні результати отримано у 9 поїздках. У деяких випадках гальма у хвостовому вагоні відпускали навіть раніше, ніж у головному.

Відмінний від вищеописаного результат було отримано у п'яти поїздках, де між часом відпустки у головних та хвостових вагонах

спостерігається суттєва (від 10 до 25 секунд) різниця в часі протікання відпускних процесів.

На рисунку 2.3 видно суттєва різниця в часі початку та завершення відпустки головних та хвостових вагонів. Для характеристики відпускних процесів пропонується використовувати такі параметри:

- час від моменту постановки органу управління гальмами поїзда у відпускне положення до початку відпустки гальм головного вагона $t_{нг}$;
- час від моменту постановки органу управління гальмами поїзда у відпускне положення до закінчення відпустки гальм головного вагона $t_{кг}$;
- час від часу постановки органу управління гальмами поїзда у відпускне становище до початку відпустки гальм хвостового вагона $t_{хн}$;
- час від часу постановки органу управління гальмами поїзда у відпускне становище до закінчення відпустки гальм хвостового вагона $t_{хк}$.



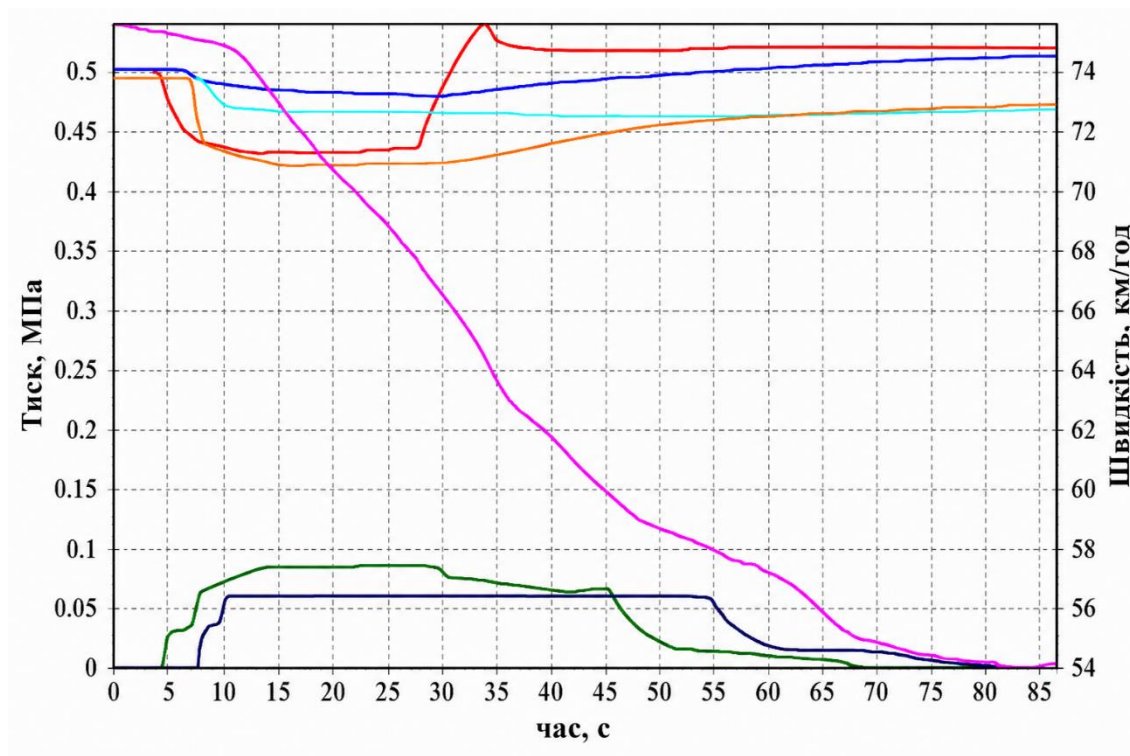
а)

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

РДБ.3Т-220.02 ПЗ

Арк.

26



б)

Рисунок 2.3 – Записи процесу регулювального гальмування системою автономних пристроїв реєстрації пневматичних та динамічних процесів у вантажному поїзді

Отримані за результатами обробки записів статистичні характеристики наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристика відпускних процесів у вантажному поїзді після ступеня службового гальмування 0,6-0,7 кгс/см².

Параметр	$t_{\text{НГ}}$	$t_{\text{КГ}}$	$t_{\text{ХН}}$	$t_{\text{ХК}}$
Математичне очікування	10,1	33,5	18,1	39,3
Середньоквадратичне відхилення	3,5	5,6	5,1	6,9
Асиметрія	0,12	0,04	0,47	0,4
Екссес	-0,07	0,05	0,07	-0,06

Відповідно до методу Є.І. Пустельника для того, щоб закон розподілу випадкових величин при 165 вимірах міг вважатися нормальним асиметрія не повинна перевищувати 0,56, а ексцес 0,14. Як очевидно з таблиці 2.1, всі величини відповідають зазначеним умовам. З урахуванням того, що математичне очікування $t_{нг}$ становить більше 50% від математичного очікування $t_{нх}$, а різниця між математичними очікуваннями $t_{кг}$ і $t_{кх}$ становить менше 20% видається коректним замість класичного розуміння швидкості поширення відпускної хвилі $v_{вх}$ (м/с).

У зв'язку з обмеженою кількістю інформації про гальмівні засоби поїзда, можна вважати характер зниження тиску лінійним і використовувати розрахункову схему, наведену на рисунку 2.4.

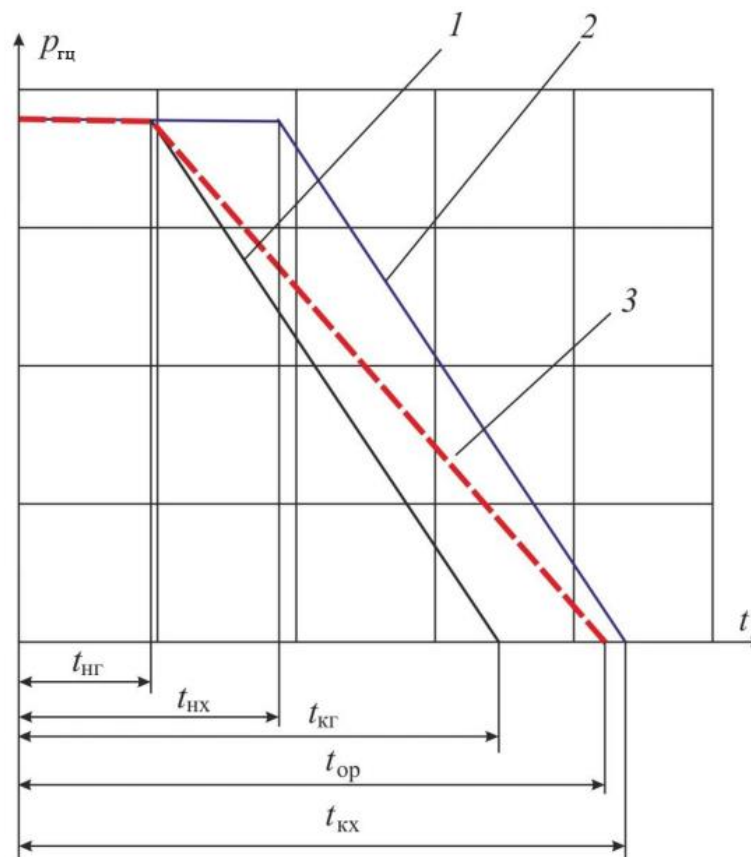


Рисунок 2.4 – Розрахункова діаграма відпуску гальмівних циліндрів:
 $p_{гц}$ – тиск у гальмівному циліндрі; 1 – відпуск гальма першої одиниці рухомого складу; 2 – відпуск гальма останньої одиниці рухомого складу;
 3 – розрахункова діаграма відпустки гальма поїзда

Використовувані в залежності час від моменту постановки органу управління гальмами поїзда у відпусне положення до початку відпустки гальм головного вагона і час від моменту постановки органу управління гальмами поїзда у відпусне положення до закінчення відпустки гальм головного вагона можна вважати не залежать від довжини складу вантажного поїзда і прийняти 3, секунд, відповідно. Подані у таблиці 2.1 результати справедливі для ступеня гальмування 0,6-0,7 кгс/см². Для визначення впливу величини ступеня гальмування на характеристики відпускних процесів на стенді для випробування гальм вантажного вагона була виконана серія експериментів з оцінки впливу ступеня гальмування на час відпустки одиночного повітророзподільника вантажного типу. Принципова схема стенду показано на рисунку 2.5.

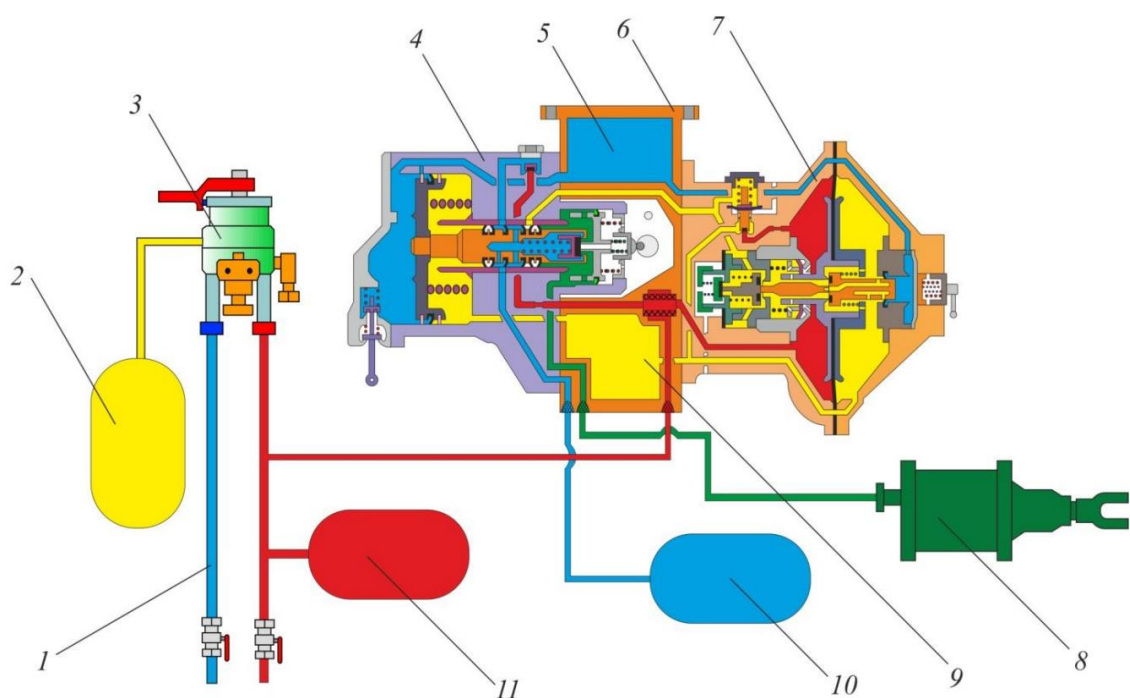


Рисунок 2.5 – Схема стенду для перевірки роботи розподільника повітря вантажного типу:

1 – поживна магістраль; 2 – зрівняльний резервуар; 3 – кран машиніста ум. №394-002;

4 – головна частина розподільника повітря ум. №270-023;

5 – робоча камера розподільника повітря; 6 – двокамерний резервуар розподільника повітря ум. №295-001; 7 – магістральна частина розподільника

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

повітря ум. №483М-010; 8 - гальмівний циліндр ум. №188Б; 9 – золотникова камера розподільника повітря; 10 – запасний резервуар; 11 – об'єм гальмівної магістралі.

Для вимірювання та реєстрації тиску паралельно з манометрами були встановлені датчики тиску в живильній магістралі, зрівняльному резервуарі, гальмівній магістралі, гальмівному циліндрі, запасному резервуарі, золотниковій та робочій камерах розподільника повітря. За допомогою модуля вводу-виводу та спеціальної програми, розробленої автором у середовищі Delphi, значення тиску, контрольовані датчиками, реєструються з частотою 10 Гц і зберігаються у форматі MS Excel. Для отримання статистично значущих результатів було виконано 85 ступенів гальмування та відпусток гальма з величиною ступеня $\Delta p_{\text{гм}}$ від 0,5 кгс/см² до 1,3 кгс/см². При цьому для зменшення впливу характеристик конкретного розподільника повітря на результат експерименту через кожні 20 вимірювань замінювалися головна і магістральна частини розподільника повітря. Всього в експерименті було задіяно чотири головні і чотири магістральні частини розподільників повітря, що еквівалентно випробуванню чотирьох розподільників повітря ум. №483М.

В результаті обробки результатів експерименту встановлена залежність часу відпуску гальма від ступеня регулювального гальмування, представлена на рисунку 2.6 у вигляді залежності коефіцієнта приведення K_p від ступеня регулювального гальмування.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

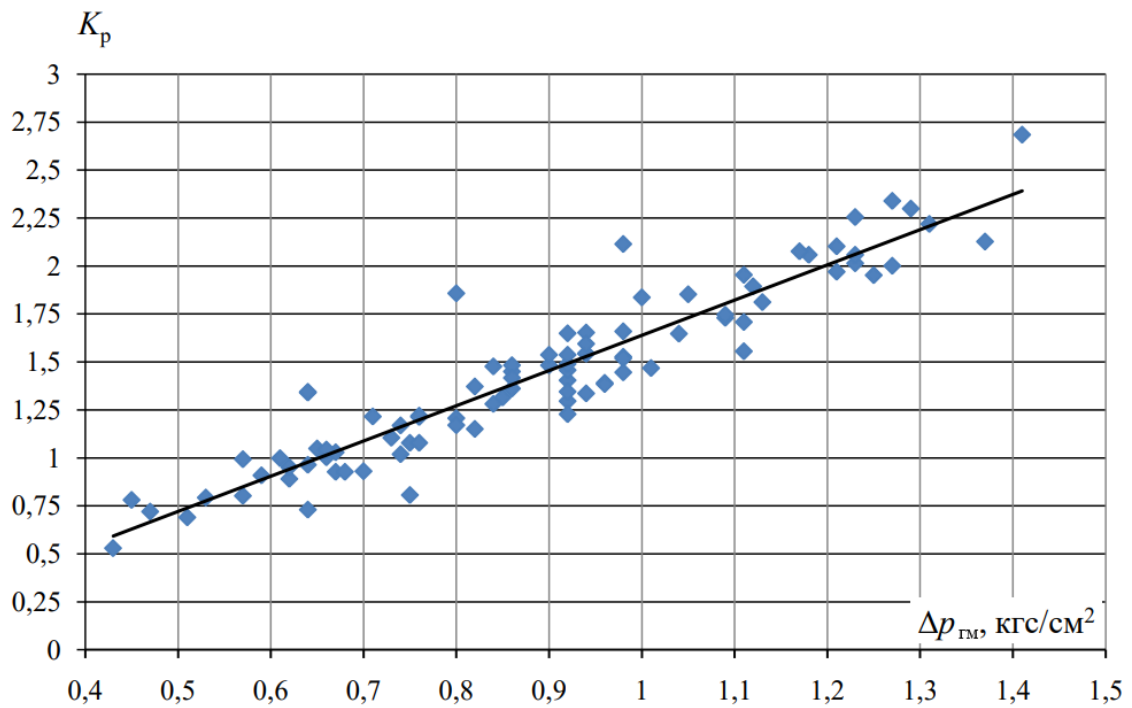


Рисунок 2.6 – Визначення коефіцієнта впливу ступеня гальмування на час відпустки гальмівних циліндрів вантажних вагонів

2.2 Гальмові сили поїзда під час використання електричного гальмування

На відміну від електрорухомого складу на тепловозах електричне гальмування використовується вкрай рідко, при тому, що системами реостатного гальмування обладнуються всі сучасні тепловози. Частково це пов'язано з відсутністю достатньої інформації про гальмівні характеристики, що не дозволяє повноцінно врахувати електричне гальмування під час виконання варіантних тягових розрахунків. Так, у ПТР наводяться лише обмежувальні характеристики реостатного гальмування, що відповідають максимальному гальмівному зусиллю (рисунок 2.7 та 2.8).

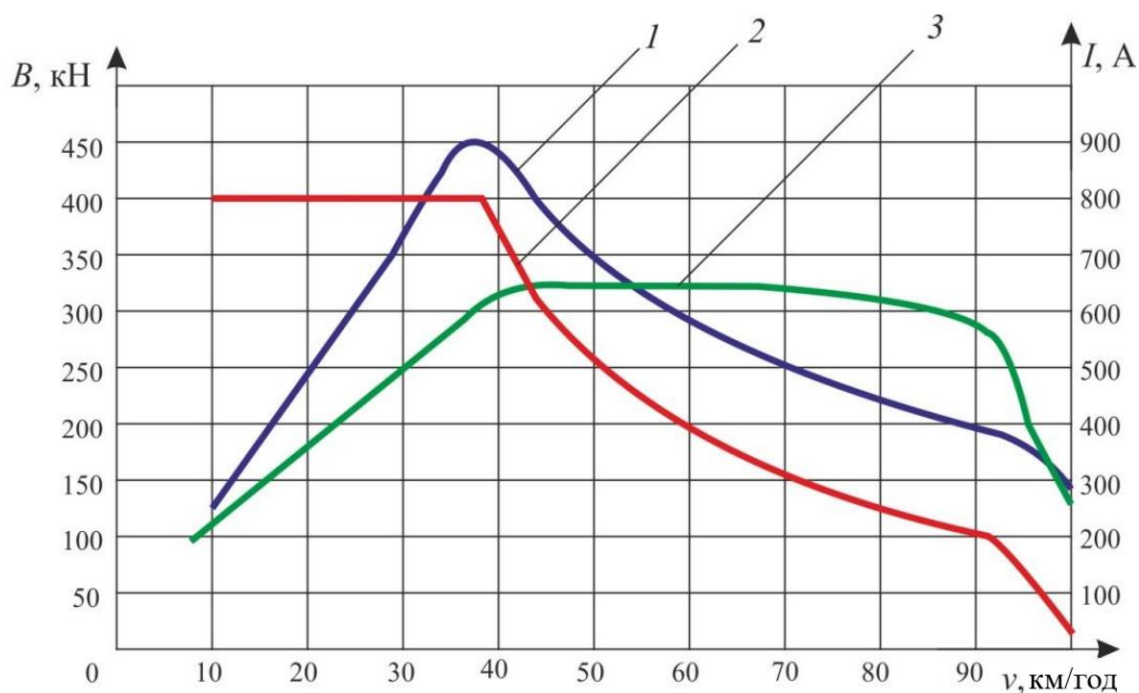


Рисунок 2.7 – Обмежувальна характеристика реостатного гальмування тепловоза 2ТЕ116: 1 – гальмівна сила реостатного гальма B (кН); 2 - струм збудження ТЕД I_b (А); 3 - струм якоря ТЕД I_a (А)

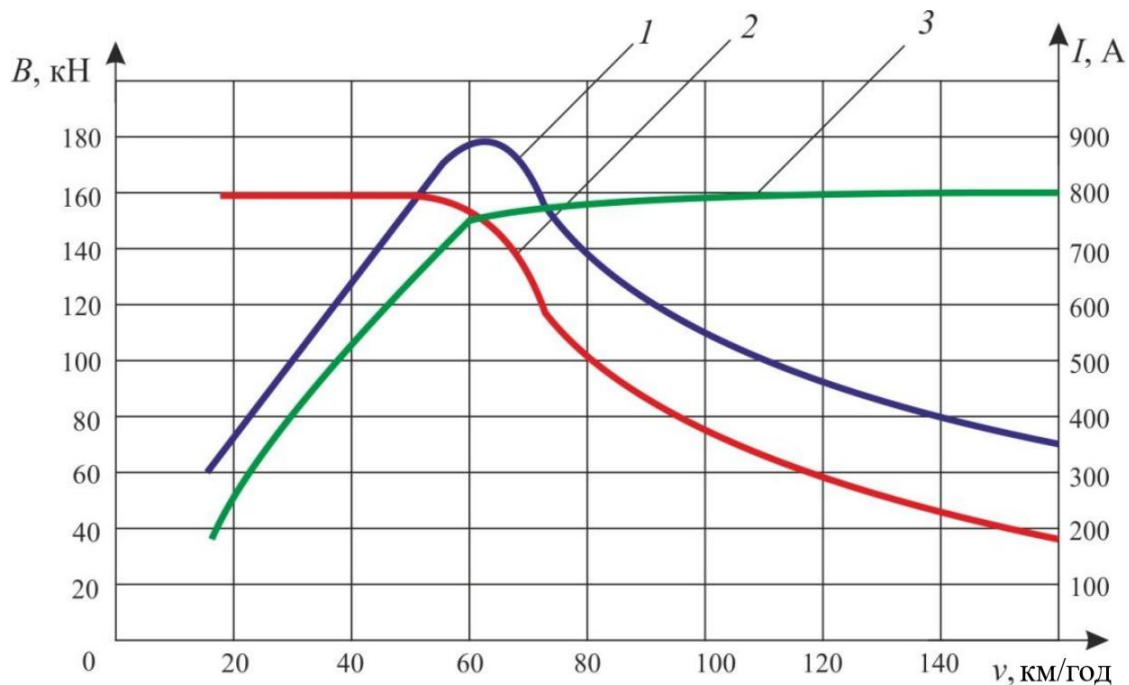


Рисунок 2.8 – Обмежувальна характеристика реостатного гальмування тепловоза ТЕР70БС: 1 – гальмівна сила реостатного гальма B (кН); 2 – Струм збудження ТЕД I_b (А); 3 - струм якоря ТЕД I_a (А)

Створення гальмівних сил при реостатному гальмуванні також здійснюється з деякою затримкою часу від моменту переведення органів управління режим реостатного гальмування до виходу на задану гальмівну характеристику. На рисунку 2.9 показано залежність зміни струму збудження та струму якоря одного з ТЕД 2ТЕ116У при регульовальному реостатному гальмуванні, отримані в результаті аналізу даних системи МСУ-ТП. Висновок про витримку часу при регульовальному гальмуванні відповідає інформації, наведеній у посібнику з експлуатації системи МСУ-ТП, згідно з якою система МСУ-ТП після збирання електричної схеми гальма забезпечує попереднє гальмування протягом 6 секунд із зусиллям приблизно 4 т на секцію тепловоза.

Також з рисунка 2.9 видно, що струм в обмотках ТЕД після завершення реостатного гальмування також знижується протягом певного часу, що становить для випадку, показаного на рисунку 2.9 приблизно 4 сек.

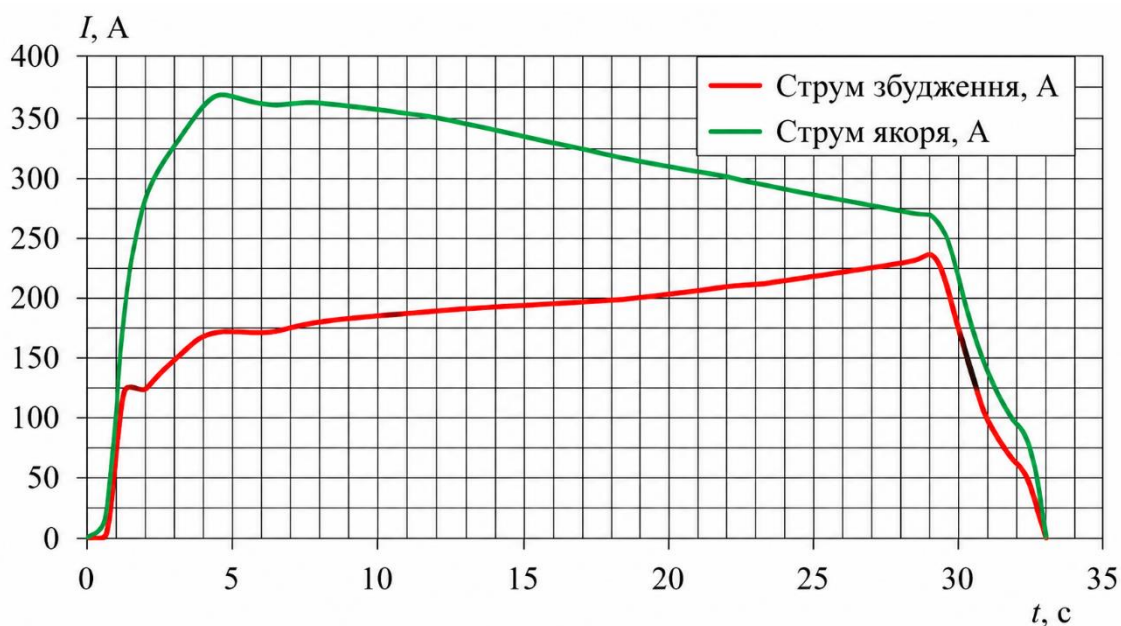


Рисунок 2.9 – Зміна струму в обмотках ТЕД тепловоза 2ТЕ116У при регульовальному гальмуванні

Відповідно до [15], після попереднього гальмування протягом 6 сек. МСУ-ТП забезпечує підтримку постійної швидкості руху, величина якої визначається обраною гальмівною позицією:

					РДБ.3Т-220.02 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

- 1 поз. - 75 км/год;
- 2 поз. - 70 км/год;
- 3 поз. - 60 км/год;
- 4 поз. - 50 км/год;
- 5 поз. - 40 км/год;
- 6 поз. - 30 км/год;
- 7 поз. - 20 км/год;
- 8 поз. – 0 км/год із максимальною ефективністю.

При цьому витримуються обмеження допустимих значень струму збудження та струму якір ТЕД. За швидкості менше 10 км/год відбувається заміщення електричного гальма пневматичним. Приблизний вид гальмівних характеристик, відповідних до опису [15], показаний на рисунку 2.10. Варто зазначити, що регулювальні характеристики 1-7 мають невеликий нахил, що відповідає статичній помилці регулятора швидкості в режимі гальмування реостатного.

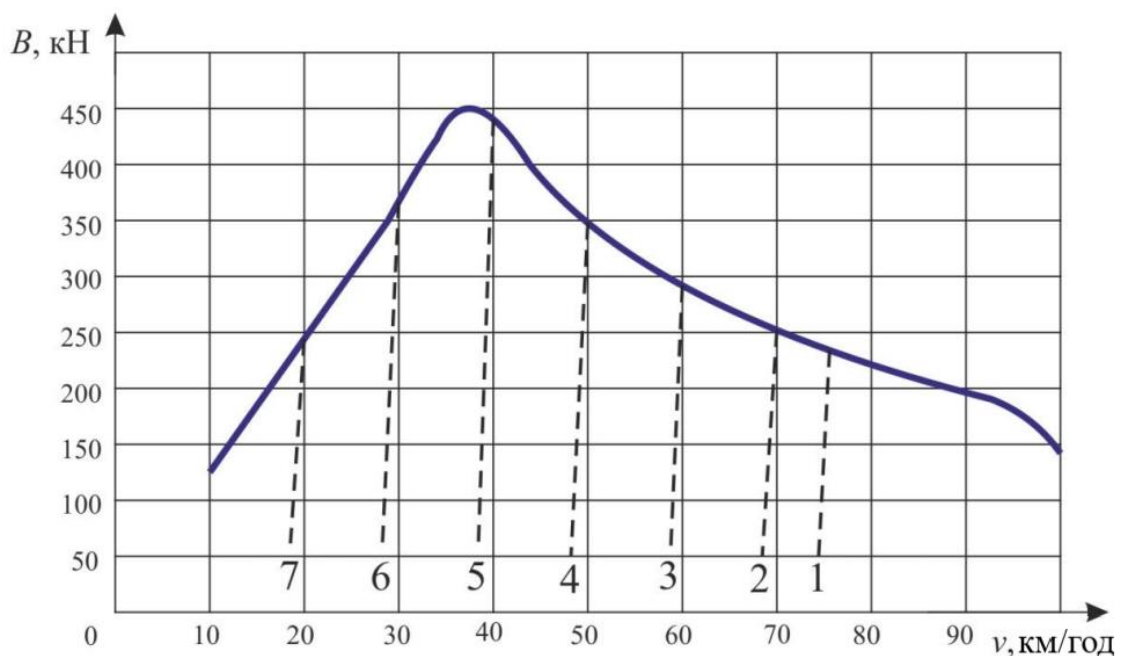


Рисунок 2.10 – Теоретичні регулювальні характеристики при електричному гальмуванні тепловоза 2ТЕ116У

Таким чином, з урахуванням швидкого перебігу процесу збільшення та зниження гальмівної сили при включенні та виключенні позицій реостатного гальмування, питому гальмівну силу реостатного гальма $b_{рт}$ при існуючих алгоритмах управління можна визначати за наступною залежністю:

- при вході в реостатне гальмування:

$$t \leq t_{прт}, \text{ то } b_{рт} = \frac{B_{пр}(u_{рт})}{m_{п}};$$

$$t > t_{прт}, \text{ то } b_{рт} = \frac{B_3(u_{рт}, v)}{m_{п}};$$

- при вимиканні (відпустці) реостатного гальма

$$t \leq t_{врт}, \text{ то } b_{рт} = \frac{B_3(u_{рт}, v)}{m_{п}} \cdot \frac{t}{t_{врт}};$$

$$t > t_{врт}, \text{ то } b_{рт} = 0;$$

де $t_{прт}$ – час попереднього реостатного гальмування із зменшенням зусиллям;

$t_{врт}$ – час зменшення гальмівної сили до нуля при вимиканні реостатного гальма;

$u_{рт}$ – позиція реостатного гальмування;

B_3 – гальмівна сила, яка формується в гальмівній позиції та швидкості руху (рисунок 2.10).

2.3. Порядок практичної реалізації методики пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда

Практична реалізація пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда включає такі етапи (рисунки 2.11):

- збирання, зберігання, обробка та аналіз даних мікропроцесорних систем управління та діагностики про фактичний стан найбільш важливих вузлів та деталей локомотива;
- збір та аналіз інформації про фактичні характеристики складу;
- збір та аналіз інформації про фактичний стан залізничної ділянки колії;
- аналіз інформації про кліматичну обстановку на момент виконання поїздки;
- формування фактичної тягово-енергетичної характеристики автономного локомотива з розбивкою по позиціях;
- формування переліку обмежень на швидкості руху та режими керування поїздом;
- перевірка можливості виконання графіка руху для даного поїзда при обумовлених вище обмеженнях;
- визначення енергооптимальних режимів керування поїздом за заданих умов з використанням методу багатовимірного пошуку енергооптимальних режимів керування.

Без виконання всіх зазначених вище операцій достовірність розрахунків, що виконуються, істотно знижується через відсутність необхідної інформації.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.11 – Структура процесу пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда

2.4 Пошук енергооптимальних режимів ведення поїзда з використанням програми для виконання тягових розрахунків

2.4.1 Загальні відомості про програму для виконання тягових розрахунків у покроковому та автоматичному режимі

Процес вирішення задачі пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда включає три основні етапи:

- формування та оновлення баз даних ділянок експлуатації, параметрів локомотивного та вагонного парку;
- формування та оновлення баз даних поїздів, що формуються;
- виконання тягових розрахунків у ручному та автоматичному режимі вибору режимів управління.

Формування актуальних баз даних локомотивного парку передбачає як розрахунок, побудову та оновлення тягово-енергетичних характеристик локомотивів за даними МСУ, розглянуте у попередньому розділі, так і зберігання відомостей про тягово-енергетичні характеристики локомотивів, отримані з нормативно-довідкової літератури.

У базі даних вагонного парку зберігається інформація про основні характеристики вагонів, що використовуються при тягових розрахунках (тип вагона, кількість осей, маса тари та вантажопідйомність вагона, його довжина

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

по осях автозчіпних пристроїв, перелік та основні параметри гальмівних засобів, потужність підвагонних генераторів). База даних ділянок, що експлуатуються, містить оновлювану інформацію про профіль і поздовжній план шляху (довжина і ухили елементів, довжина і радіус кривих, піднесення зовнішньої рейки); про станції, розташовані на експлуатованих ділянках (розташування вхідних та вихідних стрілок, обмеження за стрілочними переказами); про діючі постійні та тимчасові обмеження швидкості руху.

Поїзд формується у базі даних виходячи з натурного листа форми ДУ-1 і наявної бази локомотивного і вагонного парку. За потреби може бути уточнено інформацію про фактичний стан гальмівних засобів поїзда (відключення частини гальмівного обладнання в порожніх вантажних складах, включення частини розподільників повітря на навантажений режим тощо).

2.4.2 Підготовка до виконання тягових розрахунків

Перед виконанням тягових розрахунків має бути обраний один із варіантів роботи з програмою:

- виконання тягового розрахунку в ручному режимі ведення поїзда;
- автоматичний тяговий розрахунок із розрахунком траєкторії руху поїзда за мінімальний час ходу;
- автоматичний тяговий розрахунок із розрахунком енергооптимальної траєкторії руху поїзда за заданий час ходу.

Після вибору поїзда та ділянки, на якій виконується розрахунок, у програму на підставі даних метеозведення вводиться інформація про погодні умови на шляху прямування, необхідна для розрахунку додаткового опору руху, витрат палива та обмежень швидкості руху для конкретних умов.

Для виконання варіантних розрахунків при вирішенні дослідницьких завдань передбачено низку додаткових можливостей:

- Використання оригінальних формул для розрахунку основного опору руху кожної одиниці рухомого складу, включеної в поїзд;

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

- розрахунок опору руху поїзда від кривих та від ухилів з урахуванням та без урахування розподілу маси поїзда за його довжиною, з урахуванням та без урахування непогашеного прискорення;

- коригування часу та кривої зміни тиску в гальмівних циліндрах при пневматичному гальмуванні;

- коригування мінімального часу, що витримується між перемиканнями позицій контролера тепловоза;

- завдання максимального прискорення/уповільнення при автоматичному виборі режимів керування.

Для врахування зміни сили тяги при перехідних процесах у ДГУ в розрахунку використовується час перехідного процесу $t_{пп}$, що приймається рівним 11,3 сек. при наборі однієї позиції та 1,7 сек. при скиданні однієї позиції контролера.

Також формуються основні параметри, що характеризують процеси спрацьовування та відпуску гальм при пневматичному (електропневматичному) гальмуванні поїзда та одиночного локомотива.

					РДБ.3Т-220.02 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

3 УПРАВЛІННЯ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЕПЛОВОЗІВ

3.1 Аналіз причин, що викликають відхилення потужності дизель-генераторної установки від паспортних значень

Серед безлічі факторів, що визначають енергоефективність та надійність тепловоза в експлуатації, одним із найбільш суттєвих є ефективна потужність, що реалізується дизелем на фланці колінчастого валу. Її величина в кожен момент часу визначається потужністю, що споживається тяговим генератором, і потужністю працюючих допоміжних агрегатів тепловоза. Оптимальний за економічністю та надійністю рівень потужності для кожної позиції контролера машиніста (частоти обертання колінчастого валу дизеля) встановлюється заводом – виробником дизеля та повинен підтримуватись системою автоматичного регулювання напруги тягового генератора (САР ТГ).

Реальна потужність, що реалізується силовими установками тепловозів в експлуатації, суттєво відрізняється від номінальної, що поряд з розкидом потужності, що витрачається на допоміжні навантаження, призводить до суттєвого відхилення фактичних тягових характеристик від їх нормативних значень.

На рисунку 3.1 наведено статистичний групований ряд розподілу потужності на виході випрямної установки (ВП) для 27 секцій тепловозів серії 2ТЕ116У, що експлуатуються на 11-й позиції контролера машиніста (ПКМ).

					РДБ.3Т-228.02 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

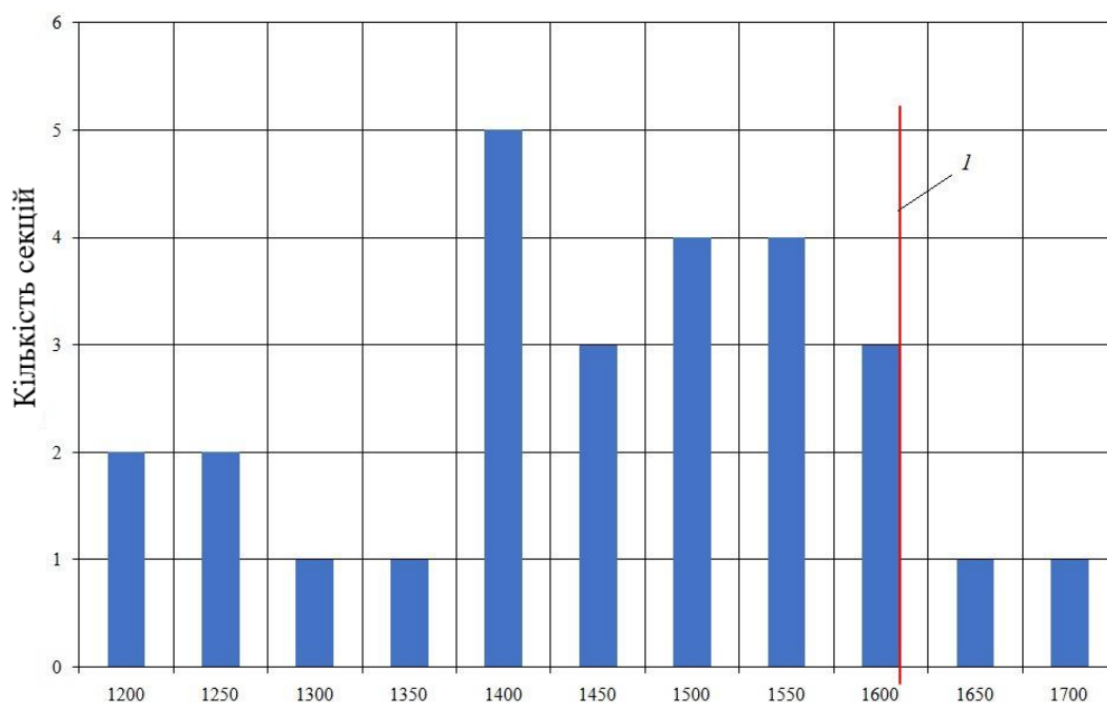


Рисунок 3.1 – Групований статистичний ряд розподілу секцій тепловозів серії 2ТЕ116У на 11-й ПКМ за реалізованою потужністю ДГУ:
1 – рівень потужності, встановлений заводом-виробником

Як випливає з рисунку 3.1, лише три секції з 27-ї (12,5 %) реалізують потужність, близьку до встановленої заводом – виробником, яка, з урахуванням середньостатистичної потужності включених допоміжних агрегатів та атмосферних умов у регіоні експлуатації, для 11-ї позиції контролера становить 1613 кВт. Силкові установки 2-х секцій перевантажені, силкові установки (а, отже, і дизелі) інших 22-х секцій (81%) працюють зі зниженим рівнем потужності. Середнє значення коефіцієнта використання потужності, що реалізується на 11-й позиції контролера для цих 22-х секцій, становило 0,882.

Наслідком перевантаження дизеля є зниження його ресурсу та показників надійності, які багато в чому визначають показники надійності тепловоза загалом. Робота на зниженій потужності супроводжується підвищеною питомою витратою палива.

Наведені результати свідчать про актуальність управління потужністю силових енергетичних установок для підвищення надійності та економічної ефективності використання експлуатованого парку тепловозів.

Для вирішення поставленого завдання, перш за все, необхідно визначити причини, що спричиняють відхилення потужності силових установок тепловозів в експлуатації від паспортних значень. На всіх вітчизняних магістральних тепловозах, що випускаються в даний час, так і раніше, використовуються САР ТГ, що реалізують принцип об'єднаного регулювання дизеля і генератора, суть якого саме полягає в підтримці заданої постійної ефективної потужності дизеля на кожній позиції контролера машиніста. Однак, зважаючи на неможливість прямого вимірювання ефективної потужності дизеля в тепловозній силовій установці, контроль її величини здійснюється непрямо по положенню робочого органу регулятора частоти обертання (РЧО) колінчастого валу (КВ) дизеля, яке визначає величину виходу рейок паливних насосів високого тиску (ПНВТ), у свою чергу.

Таким чином, завдання підтримки заданої постійної ефективної потужності зводиться до підтримки заданого постійного становища робочого органу регулятора частоти обертання колінчастого валу дизеля кожної позиції контролера.

Завданням підсистеми регулювання потужності тягового генератора в системі МСУ-ТП тепловоза 2ТЕ116 є підтримання заданого значення $h_{\text{зад}}$ сигналу h датчика ДЛП положення силового валу виконавчого пристрою (ВП) електронного регулятора дизеля (ЕРД). Величина $h_{\text{зад}}$ обчислюється в керуючій програмі УОІ для поточного значення кутової швидкості обертання ω КВ і, разом з поточним значенням h , одержуваним від електронного регулятора дизеля, використовується для формування завдання потужності тягового генератора.

Непрямий спосіб контролю ефективної потужності дизеля за сигналом датчика положення робочого органу регулятора суттєво збільшує кількість

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

факторів, що впливають на результати її визначення та потужність тягового генератора в процесі експлуатації тепловоза. Крім зміни режимів роботи допоміжного обладнання тепловоза, що відключається, такими є:

- технічний стан дизеля і систем тепловоза (повітроочищення, випуску відпрацьованих газів, водяної, масляної), що забезпечують його роботу;
- температура палива;
- тиск, температура та вологість атмосферного повітря;
- налаштування датчика лінійних переміщень (ДЛП) виконавчого пристрою (ВП) електронного регулятора дизеля (ЕРД);
- налаштування важеля передачі РП, що з'єднує вихідний вал виконавчого пристрою (ВП) електронного регулятора дизеля (ЕРД) з рейками паливних насосів високого тиску (ПНВТ).

Таким чином, причиною підвищення максимальної температури ОГ в окремих циліндрах дизелів восьми секцій при одночасному зниженні потужності силової установки у семи з них є перевантаження окремих циліндрів по цикловій подачі (різниця температури ОГ по циліндрах досягає 300°C) при одночасному зниженні середньої циклової подачі і потужності дизеля внаслідок порушення регулювання важеля.

Обов'язковою умовою для корекції потужності силової установки керуючої програмою є справний стан дизельного термокомплекту, що забезпечує контроль температури відпрацьованих газів дизеля.

На чотирьох тепловозах різниця температури відпрацьованих газів по циліндрах дизеля перевищує граничне значення, встановлене Посібником з експлуатації дизеля (100°C), що свідчить про нерівномірне навантаження циліндрів. Вирівнювання навантажень циліндрів також дозволить підвищити експлуатаційну економічність тепловозів.

Таким чином, основною причиною зниження потужності силових установок тепловозів серій 2ТЕ116У в експлуатації є порушення регулювання РП приводу рейок ПНВТ або налаштувань датчика ДЛП.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо воно не супроводжується перевантаженням окремих циліндрів (57 % секцій тепловозів 2ТЕ116У зі зниженою потужністю ДГУ), до усунення порушень під час виконання технічного обслуговування потужність може бути відновлена системою управління корекцією заданого значення Ізад сигналу датчика ДЛП за умови доопрацювання програмного забезпечення УОІ системи управління. Слід враховувати, що реалізація такої корекції можлива лише при справній роботі системи контролю температури відпрацьованих газів на виході з циліндрів дизеля.

В інших 43% секцій тепловозів 2ТЕ116У зі зниженою потужністю силових установок порушення регулювань РП та датчика ДЛП супроводжується перевантаженням окремих циліндрів дизеля по цикловій подачі, яке призводить до підвищення температури ОГ на виході з циліндрів до граничної (620°C). У цьому випадку єдиним способом відновлення нормального рівня потужності силової установки є виконання контрольних реостатних випробувань з вирівнюванням навантажень циліндрів відповідно до Посібника з експлуатації дизеля та подальшого регулювання РП.

Таким чином, в якості ефективного заходу, що забезпечує зниження витрат пального на тягу поїздів і при цьому не вимагає ніяких додаткових витрат, може бути рекомендовано посилення контролю за виконанням вимог Посібника з експлуатації дизеля щодо вирівнювання навантажень циліндрів при виконанні планових та контрольних реостатних випробувань тепловозів.

3.2 Методика визначення тягово-енергетичних характеристик при коригуванні рівня тепловозної характеристики дизеля

Під керуванням тягово-енергетичними характеристиками тепловозів розуміється налаштування ефективної потужності дизель-генераторної установки на рівень, що дозволяє підвищити енергоефективність використання даного тепловоза або надійність роботи його основних вузлів.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

Фактична коригування потужності може здійснюватися шляхом зміни заданого коду положення силового валу регулятора $h_{\text{зад}}$. Як було показано в попередньому розділі, подібний підхід може бути виправданий у разі, якщо причиною зниження потужності силової установки стало порушення регулювання РП приводу рейок ПНВТ або налаштувань датчика ДЛП, що характерно для 57% тепловозів серії 2ТЕ116У.

При цьому з точки зору підвищення енергоефективності використання тепловозів можливе збільшення ефективної потужності дизеля до рівня тепловозної характеристики, передбаченої Посібником з експлуатації дизеля та тепловоза. Подальше її збільшення, хоча у деяких випадках може дати певну економію палива, але неприпустимо з погляду надійності і довговічності роботи дизеля.

Однак, як показують результати варіантних розрахунків, виконаних з використанням програмного комплексу «Тяга – Прогноз», реалізація номінального рівня тепловозної характеристики дизеля не завжди призводить до зниження витрат палива на переміщення поїзда. Зменшення ваги складу за одночасного збільшення заданого дільничного часу ходу призводить до зменшення коефіцієнта використання потужності тепловоза. В цих умовах зниження рівня тепловозної (генераторної) характеристики дизеля змушує локомотивну бригаду (або систему автоведення) використовувати більш високі позиції контролера, яким відповідають менші значення питомої ефективної витрати палива дизелем і можуть (хоч і не завжди) відповідати менші витрати пального на одиницю роботи тягового.

Результати розрахунків показують, що зі збільшенням часу ходу поїзда на 20% навіть зниження його ваги зниження рівня тепловозної характеристики дизеля на 10% може давати економію палива до 2%.

Проте експлуатаційна ефективність тепловоза визначається як витратою палива. Значна (до 20%) частка витрат у локомотивному господарстві посідає технічне обслуговування, поточні та капітальні ремонти локомотивів.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

З урахуванням цієї обставини раціональне використання ресурсу як локомотивів загалом, так і агрегатів, вузлів і деталей, що лімітують його надійність, є не менш суттєвим резервом підвищення їх ефективності, ніж пряме зниження витрат палива на потяг.

Аналіз технічного стану тепловозів показує, що протягом практично всього часу існування тепловозної тяги найменш надійним агрегатом, що лімітує рівень надійності локомотива в цілому, є дизель. На нього припадає до 50% непланових ремонтів тепловозів та до 70% трудовитрат на ремонт тепловоза загалом. Тривалі простої у ремонті, пов'язані з усуненням відмов дизеля, зменшують доходи від експлуатації тепловоза, зменшуючи ефективність його життєвого циклу.

У свою чергу, аналіз статистики відмов дизеля показує, що найбільша частка його відмов (до 60%) посідає циліндро – поршневу групу (ЦПГ) та систему охолодження. За даними депо основними несправностями ЦПГ є тріщини та прогар поршнів; знос і відшаровування полуди зі спідниці поршня; граничне зношування, злам і пригорання поршневих кілець; тріщини і задир робочої поверхні гільз. У системі охолодження найчастіше спостерігаються тріщини вихлопних колекторів, тріщини кришок циліндрів по міжклапанним перемичкам, текти води гумовими ущільненнями адаптерів і гільз циліндрів, пошкодження трубок секцій радіаторів. При цьому абсолютна та відносна кількість відмов цих систем зростає зі збільшенням рівня форсування дизелів.

Основною причиною більшості зазначених несправностей є збільшення рівня теплової напруженості форсованих дизелів, яка визначається величиною потоку теплової енергії через теплові поверхні ЦПГ (кришка циліндра, гільза циліндра, головка поршня). Збільшення теплового потоку через стінки камери згоряння при незмінній конструкції останньої призводить до збільшення температури та температурних градієнтів, наслідком якого є зростання температурних напруг у стінках, зниження характеристик тривалої міцності та стабільності механічних властивостей металу.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		46

Відповідно, вибір режимів роботи дизеля зі зниженим рівнем його теплової напруженості навіть за відсутності прямої економії палива підвищує експлуатаційну ефективність тепловоза за рахунок зниження витрат на його технічне обслуговування та ремонти.

Для наближеної оцінки можливої зміни рівня теплонапруженості двигуна, обумовленого зміною режиму його роботи, часто користуються методом, що ґрунтується на визначенні середнього питомого теплового потоку через стінку камери згоряння, величина якого може бути оцінена за параметрами робочого процесу дизеля з використанням комплексних критеріїв.

Для визначення тягово-енергетичної характеристики тепловоза при налаштуванні ДГУ на параметри паспортної тепловозної характеристики, рекомендованої заводом-виробником, необхідно перерахувати втрати та потужність, що відбирається на допоміжні навантаження при новому рівні потужності ДДУ. Параметри паспортної тепловозної характеристики секції тепловоза 2ТЕ116У наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри паспортної тепловозної характеристики дизеля ДДУ 18-9ДГ

ПКМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N_e , кВт	120	300	487	700	870	1042	1200	1400	1560	1755	1930	2082	2300	2480	2650
g_e , кг/кВтгод	292,5	274	254	234	224,8	220	217	213,8	211,5	210,3	209,8	208,7	208,5	208,3	208

Ефективна потужність дизеля N_e відповідно до залежності перетворюється на потужність на виході випрямної установки, потужність втрат у синхронному тяговому генераторі і потужність, що витрачається на привід допоміжних навантажень. Значення цих складових енергетичного балансу для поточного рівня тепловозної характеристики дизеля визначаються відповідно до існуючих методик. При відновленні рівня тепловозної характеристики дизеля до номінального визначення реальної тягової

характеристики тепловоза необхідно оцінити значення складових енергетичного балансу за номінальної ефективної потужності дизеля.

3.3 Аналіз ефективності управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів

Для оцінки доцільності управління тягово-енергетичними характеристиками виконано розрахунок питомої витрати палива на одиницю роботи ДГУ (на виході випрямної установки) для 8 секцій тепловозів серії 2ТЕ116У на 11-ПКМ при різних рівнях тепловозної характеристики дизеля, результати якого наведені на рисунку 3.2. Як впливає з рисунку, значне зниження рівня тепловозної характеристики дизеля призводить до збільшення питомої витрати на одиницю роботи ДГУ. У той же час невелике відхилення ефективної потужності дизеля не призводить до істотної зміни питомої витрати палива, що в деяких випадках доцільно налаштовувати ДГУ на знижений рівень потужності з метою збільшення її ресурсу при збереженні близького до оптимального рівня енергоефективності.

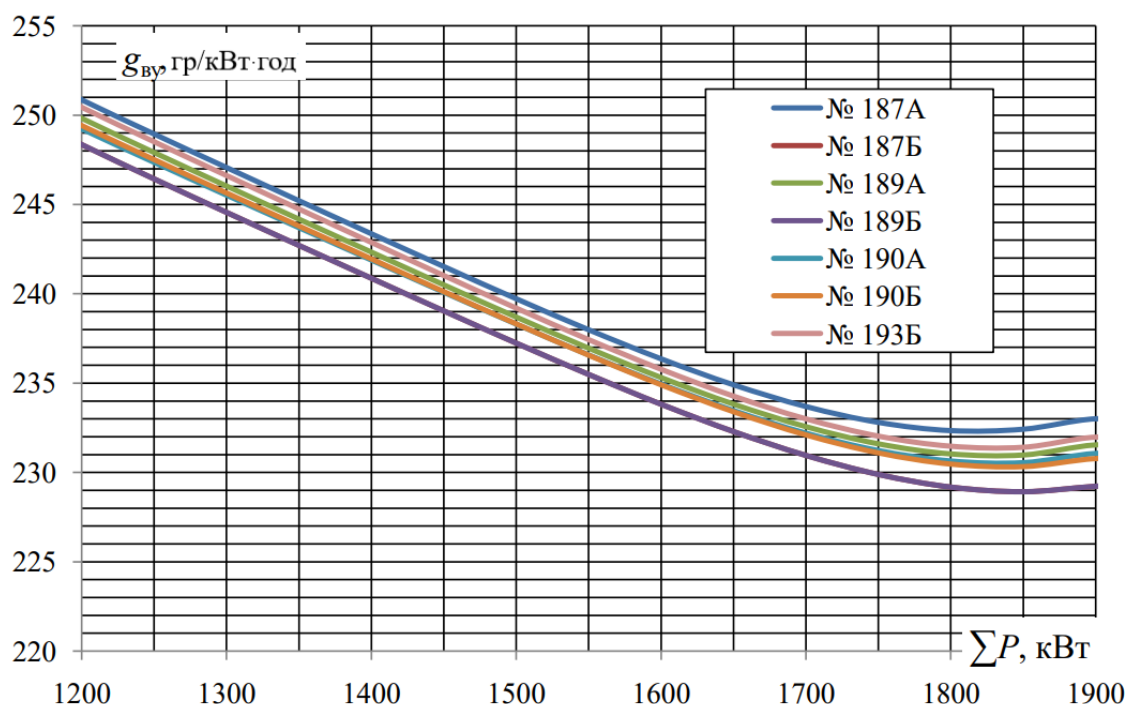


Рисунок 3.2 — Питома витрата палива на одиницю роботи ДГУ (на затискачі ВУ) тепловозів 2ТЕ116У на 11-й ПКМ

Для перевірки справедливості цього висновку було виконано розрахунок тягово-енергетичної характеристики тепловоза 2ТЕ116У при реалізації ефективної потужності дизеля на рівні 90% та 80% ($K_{Ne}=0,9$ та $K_{Ne}=0,8$) від її номінального значення (таблиці 3.1) з використанням методики, викладеної вище.

На рисунку 3.3 показано зміну сумарної потужності на затискачах випрямлювальних установок двох секцій для вихідного налаштування ДГУ, для налаштування потужності ДДУ за паспортною характеристикою та для налаштування, що відповідає $K_{Ne}=0,9$ та $K_{Ne}=0,8$. На рисунку 3.4 показано зміну питомої витрати пального на одиницю роботи ДДУ (на затискачах ВУ), при зазначених налаштуваннях потужності ДДУ.

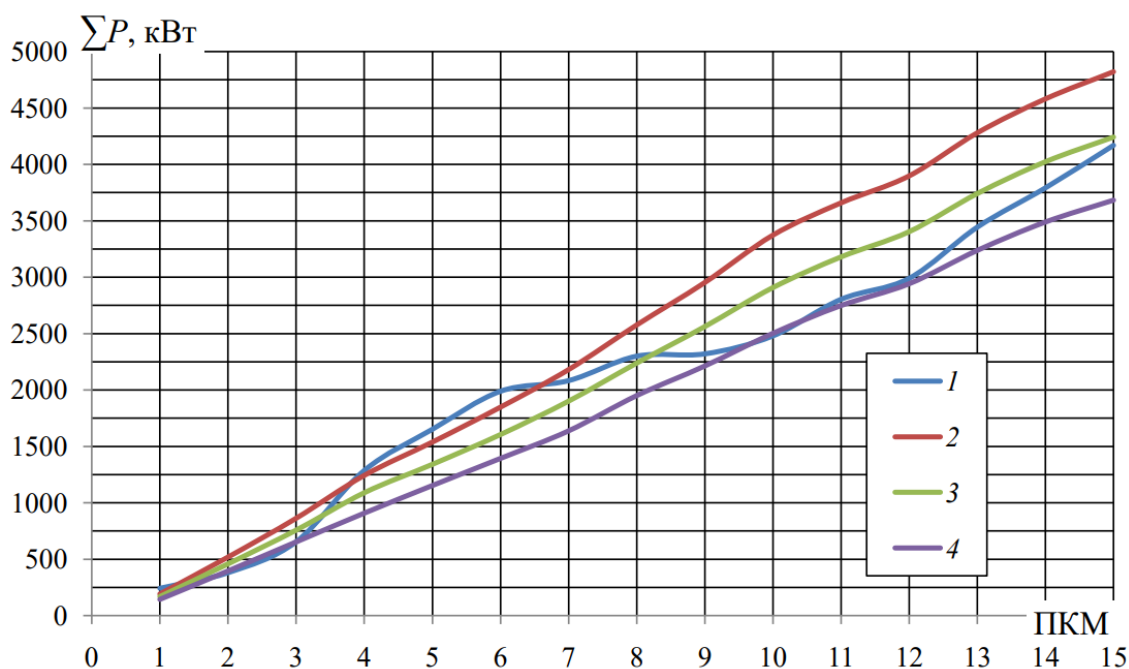


Рисунок 3.3 – Зміна потужності на виході випрямної установки тепловоза 2ТЕ116У за різних умов налаштування:

1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики

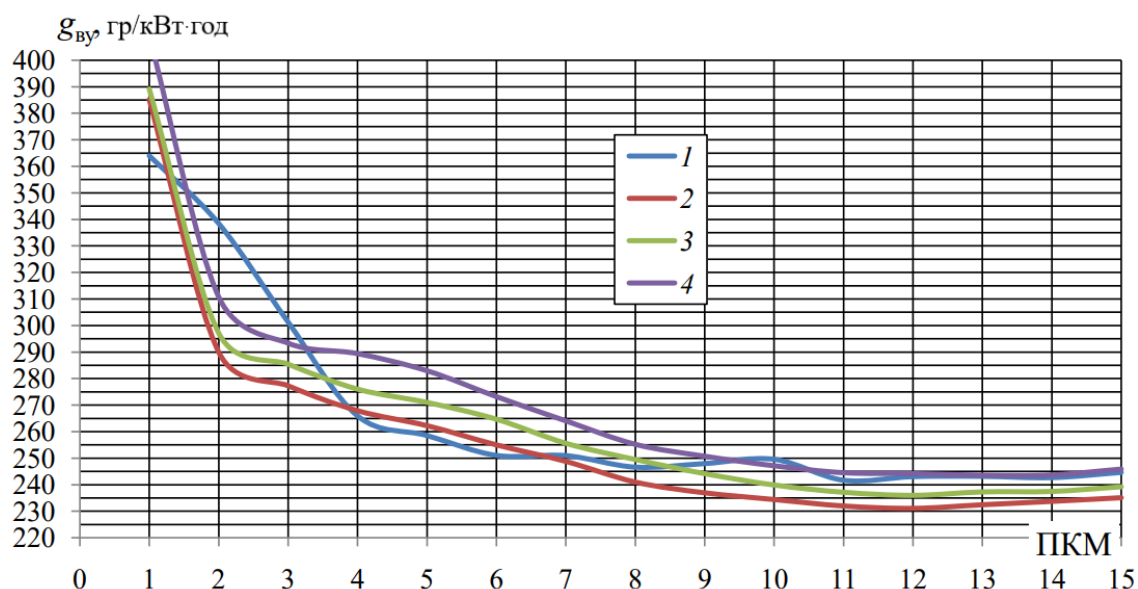


Рисунок 3.4 – Зміна питомої витрати пального на одиницю роботи ДДУ (на затискачах ВУ) тепловоза 2ТЕ116У при різних значеннях K_{Ne} :

1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики

Як впливає з рисунків 3.3 і 3.4, починаючи з 8-ї позиції контролера, фактична сумарна потужність на виході випрямних установок тепловоза 2ТЕ116У значно нижча від рекомендованої заводом-виробником, що призводить до значного збільшення питомої витрати палива на цих позиціях. Тягові характеристики тепловоза 2ТЕ116У, що відповідають різним рівням тепловозної характеристики дизеля, для кількох позицій контролера наведено на рисунках 3.5 - 3.8.

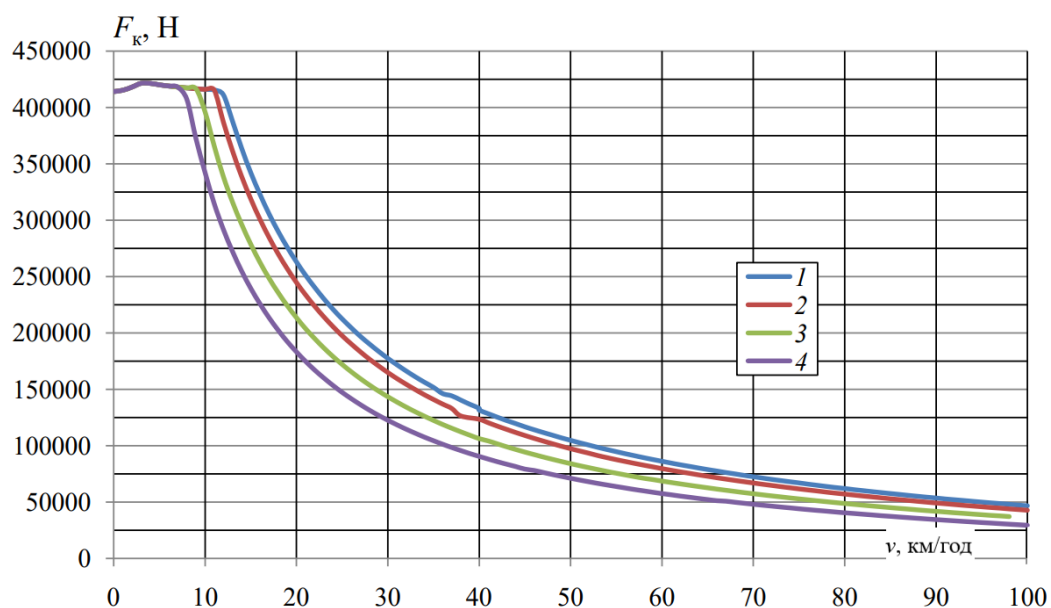


Рисунок 3.5 – Тягові характеристики тепловоза 2ТЕ116У на 5-й ПКМ при різних значеннях K_{Ne} : 1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики

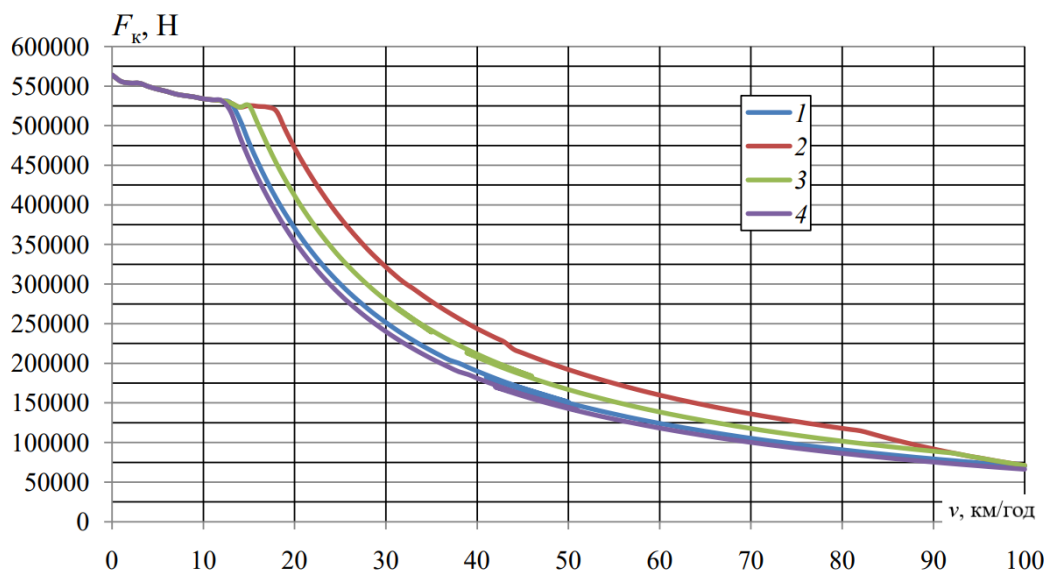


Рисунок 3.6 – Тягові характеристики тепловоза 2ТЕ116У на 9-й ПКМ при різних значеннях K_{Ne} : 1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

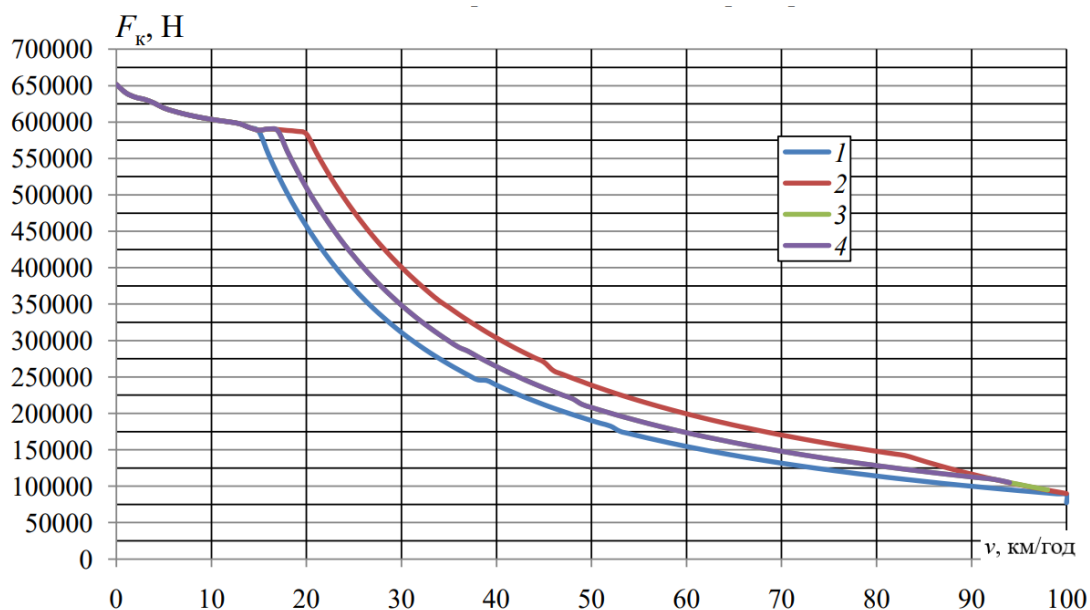


Рисунок 3.7 – Тягові характеристики тепловоза 2ТЕ116У на 11-й ПКМ при різних значеннях K_{Ne} : 1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики

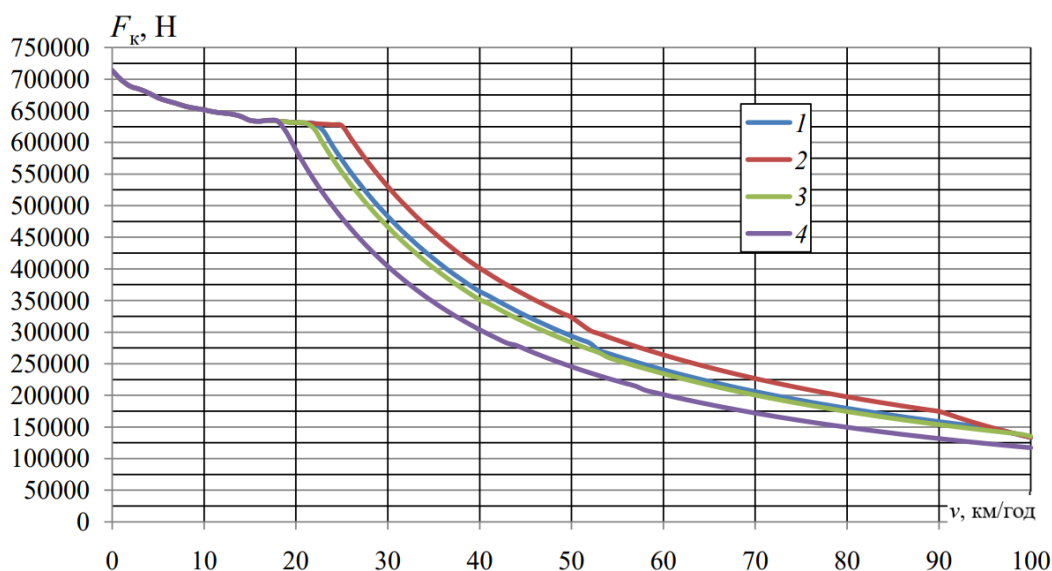


Рисунок 3.8 – Тягові характеристики тепловоза 2ТЕ116У на 15-й ПКМ при різних значеннях K_{Ne} : 1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

РДБ.3Т-220.02 ПЗ

Арк.

52

Для оцінки впливу рівня тепловозної характеристики дизеля на енергоефективність тепловоза були виконані варіантні тягові розрахунки з визначенням оптимального витрати палива режиму ведення поїзда для різних значень часу ходу при різних рівнях тепловозної характеристики дизеля з використанням запропонованого методу багатовимірної пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда. Використовувалися тягові характеристики тепловоза, що відповідають вихідному, номінальному рівню тепловозної характеристики дизеля, а також 90 та 80 % від номінального.

Результати визначення умовної витрати палива на вимірювач роботи для поїздів № 2462 та № 2720 під час руху у прямому напрямку наведено на рисунках 3.9 та 3.10, а у зворотному напрямку на рисунках 3.11 та 3.12 відповідно.

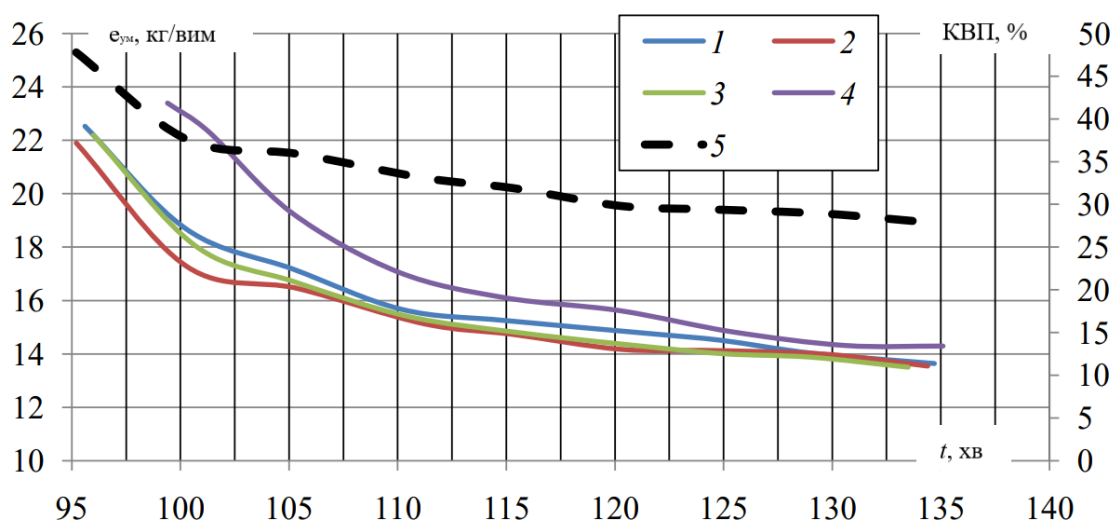


Рисунок 3.9 – Зміна умовної витрати палива на вимірювач роботи тепловоза при прямованні з поїздом 2462 у прямому напрямку, при різному налаштуванні тягово-енергетичної характеристики:

1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики; 5 – коефіцієнт використання потужності

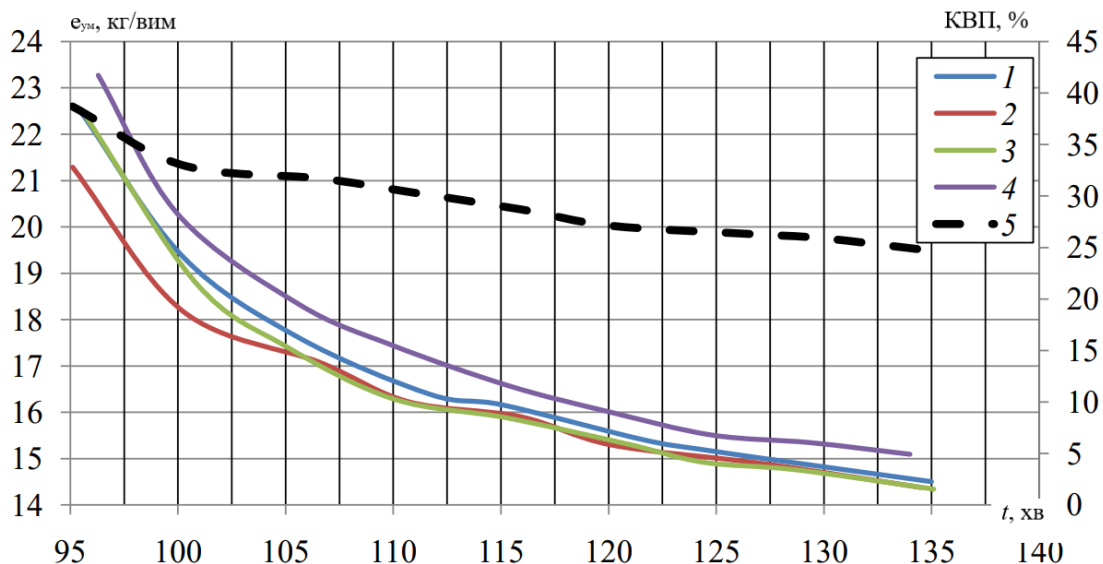


Рисунок 3.10 – Зміна умовної витрати палива на вимірювач роботи тепловоза при прямуванні з поїздом 2720 у прямому напрямку, при різному налаштуванні тягово-енергетичної характеристики: 1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики; 5 – коефіцієнт використання потужності

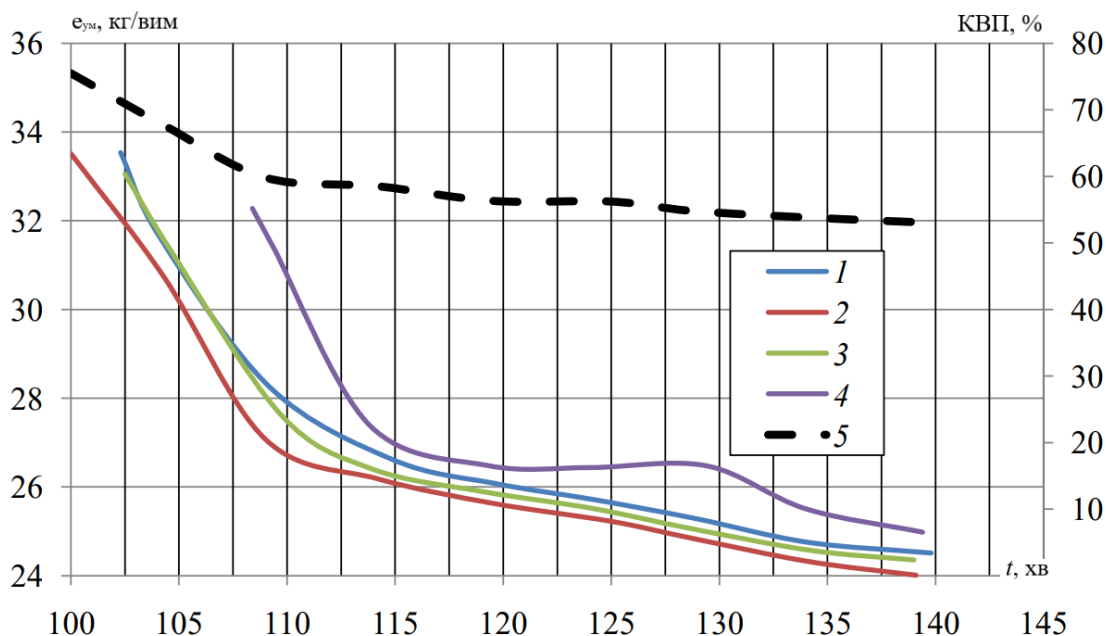


Рисунок 3.11 – Зміна умовної витрати палива на вимірювач роботи тепловоза при прямуванні з поїздом 2462 у зворотному напрямку, при різному налаштуванні тягово-енергетичної характеристики: 1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики; 5 – коефіцієнт використання потужності

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

РДБ.3Т-220.02 ПЗ

Арк.

54

налаштуванні тягово-енергетичної характеристики: 1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики; 5 – коефіцієнт використання потужності

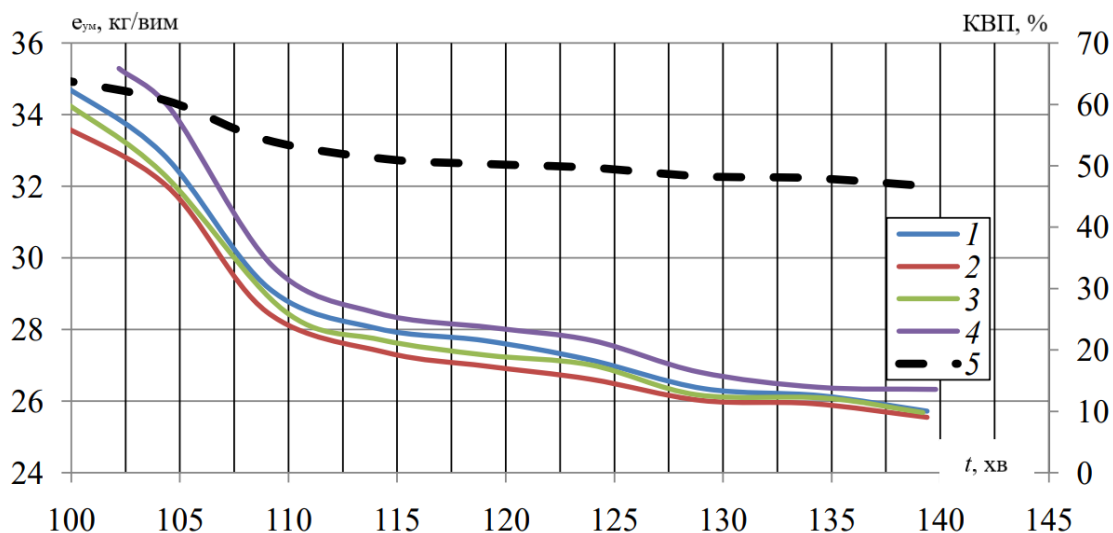


Рисунок 3.12 – Зміна умовної витрати палива на вимірювач роботи тепловоза при прямуванні з поїздом 2720 у зворотному напрямку, при різному налаштуванні тягово-енергетичної характеристики: 1 – вихідне налаштування; 2 – налаштування на паспортну тепловозну характеристику; 3 – налаштування на рівень 90% від паспортної тепловозної характеристики; 4 – налаштування на рівень 80% від паспортної тепловозної характеристики; 5 – коефіцієнт використання потужності

Як впливає з результатів, наведених на рисунках 3.9-3.12, за будь-якого заданого перегонного часу ходу завантаженого поїзда робота дизеля за номінальною тепловозною характеристикою дизеля ($K_{Ne}=1,0$) призводить до економії палива порівняно з вихідним варіантом налаштування та рівнем характеристики 80 % від номінального. Величина економії становить від 1 до 5 %, причому вона зростає зі зменшенням заданого часу ходу та збільшення маси поїзда.

У той же час, для порожніх поїздів із збільшенням заданого часу ходу оптимальний за витратою палива рівень тепловозної характеристики дизеля знижується. Пояснюється це тим, що зниження рівня тепловозної характеристики дизеля змушує машиніста або САУ використовувати для витримування заданого часу ходу підвищені позиції контролера машиніста з меншими, як випливає з рисунка 3.4, значеннями питомої витрати. При русі в легшому прямому напрямі з порожніми поїздами рівень характеристики з $K_{Ne}=0,9$ виявляється більш економічним для всіх значень заданого часу ходу, забезпечуючи зменшення умовної питомої витрати палива на 1,5-2%.

Отримані результати дозволяють припустити наявність зв'язку між ступенем завантаження дизеля тепловоза і оптимальним витратою палива рівнем його тепловозної характеристики. Одним із показників ступеня завантаження дизеля є коефіцієнт використання його потужності (КВП). Він є ставлення дійсної роботи, виконаної дизелем за деякий час, до роботи, яку він міг би зробити, працюючи протягом усього часу в номінальному режимі:

$$КВП = \frac{\sum_{i=1}^{15} (N_{ei} \cdot t_i)}{N_{eном} \cdot t_{заг}} \cdot 100 \%;$$

де N_{ei} – ефективна потужність дизеля на i -й позиції контролера;

t_i – час роботи дизеля на i -й позиції контролера;

$N_{eном}$ – ефективна номінальна потужність дизеля;

$t_{заг}$ – загальний час роботи дизеля.

Значення цього коефіцієнта для різних мас поїздів та режимів їх ведення за номінального рівня тепловозної характеристики дизеля наведено на рисунках 3.9 - 3.12. Як випливає з рисунків, якщо значення КВП в енергооптимальному режимі ведення поїзда за номінального рівня характеристики перевищує 35%, саме такий рівень забезпечує найменші

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

значення питомих витрат умовного палива. При значенні КВП менше 30% найбільшої енергоефективності досягається при налаштуванні ДДУ на рівень 90% паспортної тепловозної характеристики дизеля. При значеннях КВП у межах 30-35% енергоефективність тепловоза при номінальному рівні потужності дизеля та зниженій до 90% від номінальної практично однакова.

Тим не менш, переважним у цьому випадку є зниження рівня тепловозної характеристики дизеля для зменшення теплонапруженості його циліндро-поршневої групи та економії ресурсу як дизеля, так і іншого обладнання тепловоза, що призведе до зниження витрат на його технічне обслуговування та ремонт.

Таким чином, коефіцієнт КВП може бути критерієм вибору рівня тепловозної характеристики дизеля. Якщо в енергооптимальному для номінального рівня характеристики режимі ведення поїзда значення КВП перевищує 35%, рівень вихідної характеристики має коригуватися у бік підвищення до номінального.

За всіх інших значеннях КВП необхідно встановлювати тепловозну характеристику дизеля на рівні 90% від номінального.

Отримані результати добре узгоджуються з даними, наведеними в дослідницьких роботах, де показано можливість економії до 2% палива при налаштуванні ДДУ на знижену потужність.

Таким чином, корекція рівня тепловозної характеристики дизеля в залежності від умов поїздної роботи дозволяє підвищити експлуатаційну ефективність тепловоза як за рахунок прямого зменшення витрат палива на тягу поїздів, так і за рахунок збільшення ресурсу обладнання тепловоза та зменшення витрат на ремонт та технічне обслуговування. У цьому доцільно розглядати можливість встановлення потужності ДГУ не більше 90-100 % від паспортної тепловозної характеристики.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Методика управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів

На підставі виконаного дослідження можна запропонувати таку методику управління тягово-енергетичними характеристиками тепловозів:

- збір та аналіз інформації про склад, профіль шляху, наявність обмежень швидкості руху, прогноз погоди на час поїздки;
- збір та аналіз інформації про фактичний стан енергетичного ланцюга тепловоза;
- розрахунок фактичної тягово-енергетичної характеристики;
- збирання та аналіз інформації про розподіл температури відпрацьованих газів по циліндрах дизеля з прийняттям рішення про можливість коригування рівня потужності ДДУ;
- розрахунок тягово-енергетичної характеристики тепловоза, що відповідає паспортній тепловозній характеристиці дизеля ($K_{Ne}=1,0$);
- пошук енергооптимальної траєкторії руху поїзда під час роботи дизеля за номінальною тепловозною характеристикою ($K_{Ne}=1,0$) та визначення КВП ДДУ;
- при значеннях КВП менше 35% розрахунок тягово-енергетичної характеристики тепловоза, що відповідає зниженій тепловозній характеристиці дизеля ($K_{Ne}=0,9$);
- пошук енергооптимальної траєкторії руху поїзда за умови роботи дизеля із зменшеною потужністю ($K_{Ne}=0,9$);
- корекція тепловозної характеристики дизеля від поточного рівня до рівня, що забезпечує мінімальну питому витрату умовного палива на вимірювач.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		58

ВИСНОВКИ

1. У результаті дослідження поточного стану питання енергооптимального управління рухом поїзда встановлено, що, незважаючи на наявність інформації про реальний технічний стан енергетичної установки сучасних тепловозів, при виконанні варіантних та оптимізаційних тягових розрахунків вона практично не використовується, що знижує точність тягових розрахунків та, як наслідок, рівень енергоефективності тепловозів в експлуатації.

2. Встановлено, що використання фактичних тягових характеристик локомотивів у тягових розрахунках дозволяє зменшити помилку визначення швидкості та перегінного часу ходу з 5 до менш як 2 %.

3. Запропоновано методику уточненого розрахунку режимів зупинного та регульовального гальмування, а також розрахунку гальмівних сил поїзда при пневматичному гальмуванні з урахуванням інерційності роботи гальмівної системи у режимі відпустки.

4. Встановлено, що використання енергооптимального керування локомотивом, визначеного з використанням запропонованого методу багатовимірної пошуку енергооптимальних режимів ведення поїзда, дозволяє скоротити витрату палива на 5-7 % порівняно з режимами керування, які використовуються машиністами у рядовій експлуатації.

5. Результати аналізу даних реєстрації підсистем бортової діагностики показують, що до 80% тепловозів 2ТЕ116У експлуатуються з недовикористанням потужності дизеля на 5...20%, що призводить до 2-5% перевитрати палива на тягову роботу тепловоза за умови рівномірного навантаження циліндрів дизеля.

6. Основною причиною зниження потужності силових установок тепловозів в експлуатації є порушення регулювання важільного передачі приводу рейок паливних насосів високого тиску при нормальному технічному стані паливної апаратури та систем повітропостачання дизелів.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Показано, що керування тягово-енергетичними характеристиками тепловозів шляхом корекції потужності ДДУ за позиціями контролера дозволяє знизити витрату палива на 1-5 % за одночасного збільшення ресурсу обладнання тепловоза за рахунок зменшення інтенсивності його використання.

					РДБ.3Т-220.02 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила тягових розрахунків для поїздної роботи. - М.: Транспорт, 1985. - 287 с.
2. Заріф'ян, А.А. Проблеми розробки енергозберігаючих систем регулювання тягового електроприводу / О.О. Заріф'ян, П.Г. Колпахчан, В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведєв // Технічні науки - 2013 - №3 (140) - С. 176-184.
3. Мугінштейн, Л.А. Розрахунок поздовжньо-динамічних сил у вантажних поїздах із розподіленою тягою / Л.А. Мугінштейн, І.А. Ябло, С.А. Кобзєв // Залізничний транспорт - 2009 - №2 - С. 31-34.
4. Гребенніков, Н.В. Карта енергетичного стану поїзда/Н.В. Гребенніков // Вісник державного університету шляхів сполучення - 2021 - № 3 (83) - С. 64-72.
5. Заріф'ян, А.А. Визначення корисної роботи, що здійснюється локомотивом під час тяги поїзда / О.О. Заріф'ян, Н.В. Гребенніков, Т.З. Талахадзе, В.В. Сироткін // Вісник державного університету шляхів сполучення – 2016 – №2 (62) – С. 40-49.
6. Грачов, В.В. Розподілена модель дизель-генераторної установки тепловоза/В.В. Грачов, Ф.Ю. Базилевський, Д.М. Курилкін, А.В. Грищенко // 2018 – С. 265-271.
7. Грачов, В.В. Прескриптивний контроль енергоефективності силової установки тепловоза із використанням інтелектуальних методів обробки вимірювальної інформації вбудованих засобів діагностики: монографія / В.В. Грачів. 2019 – 106 с.
8. Хоміч, А.З. Паливна ефективність та допоміжні режими тепловозних дизелів / О.З. Хомич - 2-ге вид. перероб. та дод. - М.: Транспорт, 1987 - 271 с.
9. Розробка показників енергоефективності тепловозів та методик їх визначення. Експериментальні дослідження щодо визначення показника енергоефективності локомотивів (ПЕЛ) для оцінки якості ремонту тепловозів

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

(на прикладі тепловозів 2ТЕ116У, ТЕП70БС, ТЕМ18ДМ): техн. звіт №27-2014-19. 2014 – 175 с.

10. Пермінов, В.А. Вплив технічного стану допоміжного обладнання тепловозів на їхню енергоефективність в експлуатації / В.А. Пермінов, В.В. Грачов, Д.М. Курилкін, І.Е. Нестеров// Вісник інституту рухомого складу. - 2015. - №97. - С. 45-58.

11. Клименко, Ю.І. Вплив параметричних відмов обладнання тепловоза на його енергоефективність в експлуатації / Ю.І. Клименка, В.А. Пермінов, В.В. Грачов, Д.М. Курилкін, А.В. Фролов// Локомотив. – 2017. – №4. - С. 40-43.

12. Курилкін, Д.М. Удосконалення роботи системи автоматичного регулювання температури води та олії систем дизеля тепловоза 2ТЕ10М/Д.М. Курилкін, А.В. Осипов, К.У. Мумінов // Вісник. – 2019. – №3. - С. 89-100.

13. Осіпов, А.В. Про розрахунок балансу енергії гідравлічного апарату / О.В. Осипов, В.А. Кручок, Д.М. Курилкін // Шлях та колійне господарство. - 2013 - №8 - С. 29-31.

14. Кулініч, Ю.М. Оптимальне керування асинхронним приводом допоміжних машин електрорухомого складу / Ю.М. Кулініч, С.А. Шухарєв, В.К. Духовніков, Д.А. Стародубцев // Вісник. 2023 - №1 - С. 70-79.

15. Курилкін, Д.М. Про особливості розрахунку гальмівної колії при гальмуванні локомотивом без включення гальм поїзда / Д.М. Курилкін, А.С. Політова. - 2016 - С. 89-93.

					РДБ.3Т-22д.02 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		