

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет “*Транспортна інженерія*”

Кафедра “*Локомотиви*”

“ДО ЗАХИСТУ”

Зав. кафедрою _____ Борис БОДНАР

“ _____ ” _____ 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: “**Комплексна модернізація тепловоза 2ТЭ116**”

за освітньою програмою: “*Локомотиви та локомотивне господарство*”
зі спеціальності 273 “*Залізничний транспорт*”
галузі знань 27 “*Транспорт*”

Виконав: студент групи *ЛГ2221*

_____ Костянтин ВНУКОВ

Керівник _____ Михайло КАПЦА

Нормоконтролер _____ Людмила КОЛОДІЙ

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Дніпро, 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет "Транспортна інженерія"

Кафедра "Локомотиви"

"ДО ЗАХИСТУ"

Зав. кафедрою Б. Боднар Борис БОДНАР

" 11 " 01 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: "Комплексна модернізація тепловоза 2ТЭ116"

за освітньою програмою: "Локомотиви та локомотивне господарство"
зі спеціальності 273 "Залізничний транспорт"
галузі знань 27 "Транспорт"

Виконав: студент групи ЛГ2221

В.М. Костянтин ВНУКОВ

Керівник М.Капіца Михайло КАПІЦА

Нормоконтролер Л.Колодій Людмила КОЛОДІЙ

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент В.М.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Faculty “*Transport engineering*”

Department “*Locomotives*”

EXPLANATORY NOTE

to Master’s Thesis

master

on the topic: “**Comprehensive modernization of the 2TE116 diesel locomotive**”

according to educational curriculum: “*Locomotives and Locomotive Economy*”
in the Speciality 273 “*Railway transport*”
field of knowledge 27 “*Transport*”

Done by the student of the group *LG2221*:

Kostiantyn VNUKOV

Scientific Supervisor: Mihajlo KAPICA

Normative controller: Liudmyla KOLODII

Dnipro, 2024

РЕФЕРАТ

Дипломна магістерська робота на тему «Комплексна модернізація тепловоза 2ТЕ116» складається з 86 аркушів розрахунково-пояснювальної записки, яка містить 3 розділи. Робота містить 21 ілюстрацію, 14 таблиць та список літературних джерел з 16 найменувань.

Об'єктом дослідження в дипломній магістерській роботі виступає тепловоз серії 2ТЕ116, а метою роботи – комплексна його модернізація.

У магістерській дипломній роботі розглянуто основні напрями з модернізації тягового рухомого складу нашої та інших країн.

При огляді різносторонніх варіантів модернізації тягового рухомого складу з урахуванням браку тепловозів наявного парку Укрзалізниці для забезпечення пасажирського руху, в магістерській роботі запропонована модернізація передачі потужності на базі тепловоза серії 2ТЕ116, що забезпечить пасажирські перевезення в експлуатації зі збільшеною технічною швидкості за рахунок підвищення конструкційної швидкості, яка узгоджена з конструкційною швидкістю пасажирських вагонів, обладнаних візками типу КВЗ-5.

Для вказаних даних технічного завдання на тепловоз проведено розрахунки техніко-економічних характеристик тепловоза. Для оцінки тягових властивостей модернізованого тепловоза виконано тягові розрахунки. Для цього побудовано математичну модель і розраховано й побудовано залежності швидкості та часу ходу поїзда на дійсній ділянці з визначенням витрати енергоресурсів на тягу. Порівняння результатів дозволило зробити висновки, що у поїзда з модернізованим тепловозом зменшилась витрата палива та час ходу поїзда. Це свідчить про доцільність модернізації тепловозів для пасажирського руху.

З урахуванням великої ваги локомотива для вказаної швидкості руху, перевірено стійкість локомотива на колії на підставі задачі динамічного вписування під час проходження кривих ділянок.

Ключовими словами в дипломній магістерській роботі виступають: модернізація, передача потужності, швидкість, час ходу, витрата палива, економічна ефективність.

					0032.180144.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ РІШЕНЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЗІВ	7
1.1 Оцінка варіантів модернізації тепловозів	9
1.2 Огляд варіантів модернізації, пов'язаної із заміною силової установки.....	15
1.3 Модернізація тепловозів за рахунок регулювання систем електропередач тепловозів	19
1.4 Модернізація тепловозів за рахунок використання електронних регуляторів дизелів	25
2 МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОВОЗА СЕРІЇ 2ТЕ116 ПРИ УДОСКОНАЛЕННІ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ	30
2.1 Обґрунтування необхідності модернізації передачі потужності	30
2.2 Розрахунок техніко-економічних характеристик тепловоза	31
2.3 Порівняння властивостей базового та модернізованого тепловозів	44
2.4 Аналітичне розв'язання задачі стійкості локомотива в кривих ділянках колії	58
3 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ТЕПЛОВОЗА СЕРІЇ 2ТЕ116	70
3.1 Визначення факторів ефективності	70
3.2 Порівняння витрат енергоресурсів за результатами поїздок	72
ВИСНОВКИ	76
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	78
ДОДАТОК А. Математична модель розрахунку задачі динамічного вписування тепловоза	80

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		<i>Внцков</i>			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		<i>Капіца</i>			Н	5	86
Реценз.					<i>УДУНТ, зр. ЛГ2221</i>		
Н. Контр.		<i>Колодій</i>					
Затверд.		<i>Баднар</i>					

ВСТУП

В умовах, коли виникає необхідність оновлення парку тягового рухомого складу (ТРС) усіх залізниць України, набуває актуальності проблематика модернізації локомотивів. У цьому зв'язку постає ряд завдань, від вирішення яких залежить ефективність функціонування залізничного транспорту в системі економіки країни.

Огляд світового досвіду показує, що питання оновлення парку тягового рухомого складу може бути вирішене за рахунок як поставок нового, так і модернізації наявного парку рухомого складу з продовженням терміну експлуатації. При цьому стримуючим фактором при швидкому оновленні тягового рухомого складу є те, що не всі залізниці та приватні компанії дозволяють собі заміну старих локомотивів новими.

Альтернатив модернізації на сьогоднішній день немає, однак це вимагає проведення глибокого техніко-економічного аналізу при виборі оптимальних варіантів модернізації певної серії ТРС. При застосуванні сучасних технологій під час модернізації локомотивів виникає вимога створення нових підходів до виконання технічного обслуговування й ремонту, постачання необхідними матеріалами і запасними частинами. При цьому модернізація не відрізняється від переходу на нову техніку, і як будь-яке технічне переозброєння чи переоснащення, вимагає значних зусиль від всіх учасників цього процесу – замовників, постачальників, контрагентів.

Реалізація програми зі зниження експлуатаційної витрати палива проводиться спільно з науково-дослідними та практичними роботами. Основні напрямки цих робіт це розробка та впровадження технічних засобів для впливу на середньоексплуатаційну витрату палива при зниженні її питомої витрати; впровадження заходів для забезпечення покращення організації, планування, нормування й обліку витрат енергоресурсів, а також контролю відповідності дійсної витрати палива нормованим.

Технічні засоби, які дозволяють реалізувати перший напрямок – це електронні регулятори частоти обертання колінчатого валу дизеля і потужності тепловозних силових дизель-генераторних установок.

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ РІШЕНЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЗІВ

Зважаючи на постійне недофінансування оновлення рухомого складу українських залізниць, низький технічний рівень і інтенсивне старіння наявного експлуатаційного парку, Укрзалізниця змушена постійно займатися його модернізацією.

Особливостями модернізації всіх типів тепловозів є:

- заміна дизелів на нові з поліпшеними техніко-економічними показниками;
- збільшення об'єму кабін і переобладнання їх з поліпшенням споживчих і ергономічних якостей;
- удосконалення систем охолодження з встановленням системи автоматичного регулювання температури теплоносіїв і нових секцій радіаторів;
- встановлення колісних пар нового формування;
- встановлення мікропроцесорних систем управління та діагностики, комплексних систем безпеки, уніфікованих пультів управління;
- встановлення систем кондиціонування повітря, холодильників і пристроїв для розігріву їжі;
- обладнання санітарно-гігієнічного відсіку.

На основі аналізу фізичного й морального старіння різних базових вузлів й агрегатів тепловозів було висунуто пропозицію продовжити термін служби тепловозів не менше ніж на 15 років та за рахунок цього відстрочити виділення коштів на придбання нових.

У 2010 році УЗ проведена комплексна модернізація 20 секцій тепловозів. Відповідна технічна частина була розроблена у Головному управлінні локомотивного господарства.

Комплексна модернізація включає заміну разом із дизелем допоміжного обладнання, залишається рама тепловоза і ходова частина. За такою схемою були модернізовані маневрові тепловози серії ЧМЕЗ, модулі виробництва Caterpillar для яких постачала фірма Zeppelin (Німеччина), і магістральні тепловози серій 2TE10 і М62, обладнання для яких було виготовлено компанією General Electric

					0032.180144.000.03МР.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(США).

Вартість обладнання для однієї секції магістрального тепловоза 11 млн грн. Якщо брати до уваги вартість встановлення та інші витрати, то загалом це майже 70% вартості нового тепловоза. За цього подовження термін служби локомотива становитиме 20 років.

Для дизеля постачальник гарантує 60 тис мото-годин корисної роботи без капітального ремонту. Це приблизно 12 років. Зараз двигуни на машинах, які експлуатуються, ремонтують кожні чотири-п'ять років. Поза тим очікувана економія дизельного пального склала 20-25%.

Основою модернізації тепловозів за програмою компанії General Electric є заміна дизель-генераторної установки та допоміжних систем на силовий модуль Super Skid з дизелем 7FDL. Дизель гарантує ефективну роботу тепловоза на протязі 1 млн км, збільшення строку його служби, високу надійність, більш тривалі міжремонтні пробіги. В основі технології Superskid лежить повне збирання модуля в США з наступним монтуванням його на тепловоз. В склад модуля входить як власне дизель, так і генератор і все допоміжне обладнання тепловоза. Безперечною перевагою такого підходу є комплексне складання, центрування і ув'язка всіх взаємозв'язаних машин і агрегатів в заводських умовах і мінімальна робота на підприємстві, що здійснює модернізацію. Іншими словами, немає необхідності пристосовувати новий дизель до старого допоміжного обладнання, яке завжди є досить громіздким й ненадійним рішенням. Програма модернізації General Electric – зниження витрат життєвого циклу при одночасному підвищенні експлуатаційних характеристик локомотива.

В ході модернізації маневрових тепловозів за проектом CZ LOKO з встановленням дизеля компанії Caterpillar здійснюється заміна штатних дизельних двигунів на нові, більш потужні і економічні. В результаті модернізації якісно поліпшуються контроль та інформаційне забезпечення експлуатації, обслуговування та ремонту тепловоза за рахунок встановлення нової мікропроцесорної системи діагностики.

Модернізація тепловозів за цією програмою забезпечує повну відповідність модернізованого тепловоза сучасним технічним, силовим та екологічним

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

вимогам, продовжуючи термін його служби на два десятиліття.

У результаті модернізації експлуатаційні витрати, витрати на обслуговування і ремонт тепловоза скорочуються у два рази. Значно підвищується надійність силових установок, допоміжного обладнання та тепловоза в цілому. Перший капітальний ремонт силової установки потрібно виконувати не раніше, ніж через 15 років. Безвідмовна робота дизеля гарантується протягом усього терміну експлуатації.

1.1 Оцінка варіантів модернізації тепловозів

ПАТ «Тепловозоремонтний завод» (м. Полтава) освоїв модернізацію тепловоза серії ЧМЕЗ із заміною штатного дизеля K6S310DR чеського виробництва на дизель CAT фірми Caterpillar.

Тепловоз ЧМЕЗ-1744 був повністю модернізований на заводі ПАТ «ТРЗ» в 2007 р. із застосуванням силової установки CATERPILLAR 3512B, після чого отримав позначення ЧМЕЗП-1744.

Модернізація тепловозів серії ЧМЕЗ за проектом фірми CZ Loko із застосуванням силової установки фірми CATERPILLAR полягає в наступному:

- візки тепловоза проходять капітальний ремонт і залишаються без конструктивних змін, за винятком встановлення шести тахогенераторів протизнозного пристрою і приводу електронного швидкостеміра METRA. Тягові електродвигуни TE006 також залишаються штатні;
- рама тепловоза проходить реконструкцію для встановлення нової ДГУ, нових допоміжних агрегатів, нових кабіни і капотів, а також для укладання нових силових кабелів і гальмівного трубопроводу;
- паливний бак тепловоза проходить капітальний ремонт і допрацьовується встановленням чотирьох пісочних бункерів для пісочної системи третьої і четвертої вісей тепловоза;
- на тепловоз встановлюється нова звукоізолююча кабіна машиніста;
- встановлюється нова ДГУ, яка складається з дизеля CATERPILLAR 3512B і тягового агрегату фірми SIEMENS:

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– дизель CATERPILLAR 3512B – 12-циліндровий, 4-тактний, з турбонаддувом та електроннорегульованою подачею палива, ефективною потужністю 1455 кВт;

– тяговий агрегат фірми SIEMENS складається з тягового синхронного генератора 1FC2 631-6B029T потужністю 1350 кВт і допоміжного генератора 1FC2 631-6B029B потужністю 120 кВт;

– капот, змонтований над ДГУ, утворює дизельне приміщення, що має два з'ємні дахи для вийняття і монтажу агрегатів. У дизельному приміщенні також розташовуються:

– глушник вихлопу, встановлений над тяговим агрегатом;

– випрямляюча установка;

– збуджувач GB112L, встановлений на тяговому агрегаті;

– вентилятор охолодження ТЕД заднього візка, обладнаний електроприводом від асинхронного електродвигуна SIEMENS потужністю 18 кВт;

– впритул до капота дизельного приміщення встановлюється блок допоміжних агрегатів, в якому розташовані лопатковий компресор MONDO продуктивністю 252 м³/хв, асинхронний електродвигун компресора, фільтр повітря компресора, мотор-вентилятор охолодження компресора, водяний розширювальний бак, вентилятор охолодження ТЕД переднього візка з електроприводом від асинхронного електродвигуна потужністю 18 кВт;

– наступним блоком встановлюється блок охолодження, виконаний окремою складальною одиницею. Блок охолодження має окремий з'ємний дах з ґратами і з'ємні бічні стінки з сіткою для захисту радіаторів блоку. Блок охолодження обладнаний двома осьовими вентиляторами охолодження з приводом від асинхронних електродвигунів і вентилятором охолодження електродвигунів вентиляторів охолодження блоку;

– на передньому торці тепловозів встановлюється пневматичний блок, в якому розміщена арматура пневматичного гальма ДАКО. Всього тепловоз обладнаний:

– прямодіючим гальмом ДАКО для гальмування одного локомотива;

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

- автоматичним гальмом ДАКО для гальмування зі складом;
- електродинамічним гальмом з двома режимами гальмування і плавним регулюванням;
- паркувальним гальмом для автоматичного загальмовування локомотива;
- ручним гальмом, яке загальмовує шосту вісь тепловоза;
- на задньому торці тепловоза встановлюється блок електричних апаратів, в якому розміщені контактори силового кола, реверсор, реостати електродинамічного гальма (ЕДГ), вентилятори охолодження реостатів ЕДГ.

При монтажі кабіни і капотів на раму тепловоза кабіна встановлюється на чотири гумових амортизатори, що забезпечує захист локомотивної бригади від вібрації при русі тепловоза, а частини капотів з'єднуються між собою за допомогою гумових сайлентблоків. В цілому конструкція капотів забезпечує їх легкий монтаж і демонтаж при необхідності виймання агрегатів і вузлів. Для огляду та обслуговування локомотива всі капоти, крім блоку охолодження, мають двері з вбудованими замками, що замикаються на ключ.

Таким чином, після модернізації тепловоза серії ЧМЕЗ за проектом CZ Loko отримуємо маневровий тепловоз з підвищеною потужністю (1455 кВт з дизелем CATERPILLAR 3512B після модернізації в порівнянні з 993 кВт з дизелем K6S310DR у штатному виконанні), здатний працювати також і на вивізній роботі.

Модернізований тепловоз серії ЧМЕЗП забезпечує:

- скорочення в два рази поточних експлуатаційних витрат на обслуговування та ремонт;
- зменшення простою локомотива за рахунок збільшення міжсервісних і міжремонтних пробігів;
- зниження витрати палива до 30% та масла до 60%;
- продовження терміну служби тепловоза на 15-20 років;
- обладнання тепловоза і дизеля електронними системами керування, що дозволяє попередити вихід з ладу агрегатів і систем тепловоза і відстежувати їхню роботу під час експлуатації тепловоза;
- поліпшення умов праці локомотивних бригад;

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- поліпшення огляду з кабіни за рахунок зниження висоти капотів;
- наявність електродинамічного гальма.

Зараз тепловоз працює у локомотивному депо П. Донецької залізниці, куди був відправлений для дослідної експлуатації і більш глибокого вивчення тягових властивостей тепловоза.

При експлуатації тепловоз підтвердив заявлені характеристики, а середньодобова витрата палива виявилася на 30% нижче, ніж у тепловозів серії ЧМЕЗ у штатному виконанні.

ПАТ «ГРЗ» у 2007 році була проведена модернізація тепловоза серії ТЕМ7.

Фахівцями було визначено, що модернізація дасть можливість отримати капітально відремонтований локомотив з сучасним економічним двигуном за 30% вартості нового тепловоза. Крім того, проведення таких робіт дасть можливість значно поліпшити технічні, економічні та екологічні характеристики тепловоза, підвищити рівень безпеки.

На тепловозі була виконана заміна штатної силової установки дизелем 11-26ДГ. Необхідність заміни дизеля типу 2-26ДГ, що встановлюється серійно, на дизель типу 11-26ДГ була обумовлена вимогою часу. Дана дизель-генераторна установка добре зарекомендувала себе як штатна силова установка на тепловозах серії ТЕМ7А.

Крім заміни дизель-генераторної установки, був виконаний демонтаж роздаточного редуктора з його заміною на проміжну опору, встановлення валопроводу з брусковими муфтами та перенос допоміжних електричних машин на головний генератор з приводом їх безпосередньо від дизеля.

Порівняльні характеристики дизелів 2-26ДГ та 11-26ДГ представлені в табл. 1.1.

Під час модернізації тепловоза ТЕМ7 №0055 фахівцями Полтавського ПАТ «Тепловозоремонтний завод» були виконані наступні додаткові роботи:

- доопрацювання корпусу статора, генератора ГС-515 для встановлення допоміжних електричних машин (ВС-650 і стартер-генератора 5ПСГ) на головному генераторі (ГГ);

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики дизелів 2-26ДГ та 11-26ДГ

Параметр	Значення по типу	
	2-26ДГ	11-26ДГ
Потужність, кВт	1470	1470
Серія тепловоза	ТЕМ7	ТЕМ7А
Частота обертання, хв ⁻¹ :		
номінальна	1000±10	1000±10
мінімальна постійна на холостому ході	350±20	350±20
Витрата масла відносно витрати палива, %	1,9	1,7
Питома витрата масла на угар при 100% N_e , г/(кВт·год)	1,7	1,22
Суха маса дизель-генератора, кг	20000	22700

- встановлення та центрування ГГ ГС-515 на піддизельній рамі;
- встановлення та центрування допоміжних електричних машин (збуджувача ВС-650 і стартер-генератора 5ПГС) на ГГ ГС-515;
- виготовлення валопровода допоміжних агрегатів (з'єднання електричних машин з приводом розподілу на ГГ);
- виготовлення огорож: муфти компресора та електродвигуна, карданного валу проміжної опори і гідроприводу, верхніх і нижніх кронштейнів для кондуїтів ГГ.

В результаті модернізації та проведення додаткових робіт:

- поліпшуються екологічні показники, які відповідають останнім європейським нормам:
- токсичність відпрацьованих газів знижується на 40-46%;
- димність випуску знижується на 10-13%;
- звуковий тиск (шум) знижується на 5-6%;
- зводиться до мінімуму можливість витоку нафтопродуктів на земляне полотно;
- у 2 рази знижуються експлуатаційні витрати на техобслуговування

протягом наступних 15 років експлуатації локомотивів;

– зменшується відбір потужності від дизель-генераторної установки на 8-10 кВт.

Розпочата експлуатація модернізованого тепловоза показала правильність прийнятого рішення, а висока якість виконаних робіт підтвердила перспективність співпраці.

У 2007 році перед підприємством ХК «Луганськтепловоз» було поставлене завдання в короткі терміни розробити проект модернізації серійного локомотива 2ТЕ116 для того, щоб він відповідав найжорсткішим технічним умовам, побудувати його, випробувати і сертифікувати. У жовтні 2007 року ця машина була виготовлена і представлена замовнику. Згодом, відповідно до програми сертифікації, були проведені великі дослідницькі та дослідно-конструкторські роботи з перевірки 102 параметрів і характеристик тепловоза, у тому числі 69 випробувань, 31 експертного заключення і 2 технічних розрахунків.

Вантажний магістральний двосекційний тепловоз серії 2ТЕ116У є модернізованим варіантом локомотива серії 2ТЕ116, що зарекомендував себе протягом майже чотирьох десятиліть на залізницях СНД як надійна тягова одиниця, яка завжди в повній мірі відповідала вимогам замовників і сьогодні також відповідає всім їх вимогам.

Всього локомотивів цієї серії в Луганську було випущено близько 3500 секцій. Необхідність модернізації викликана зростанням вимог, які висуваються до сучасних локомотивів нового покоління. Серед них:

– збільшення ваги складу до 6000 т;
– введення суворих норм безпеки руху і умов праці локомотивних бригад;
– жорсткість вимог до раціонального використання життєвого циклу локомотива.

Для вирішення поставлених завдань тепловоз оснащений сучасними вузлами і агрегатами, створеними з використанням прогресивних елементів і технологій. Найбільш важливі з них:

– дизель-генератор потужністю 2650 кВт з електронним регулятором

					0032.180144.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

частоти обертів і поліпшеними показниками витрат палива і масла (потужність серійного тепловоза серії 2ТЕ116 – 2206 кВт);

- удосконалені і більш надійні тягові електродвигуни;
- система автоматичного регулювання електропередачі на базі мікропроцесорної системи управління, яка поліпшує економічні показники тепловоза;
- кабіна і пульт машиніста, що відповідають сучасним вимогам, які відрізняються оригінальним дизайном і поліпшеними ергономічними характеристиками;
- комплексний локомотивний пристрій безпеки КЛУБ-У і телемеханічна система контролю за пильністю машиніста.

В результаті модернізації сила тяги тривалого режиму секції тепловоза підвищена до 33 т, покращилися умови праці локомотивних бригад, збільшилися міжремонтні пробіги тепловоза, підвищилася безпека руху; також забезпечена стабільна робота локомотива в різних експлуатаційних і кліматичних режимах, при температурі навколишнього середовища від +40 до -40°C.

В процесі підготовки виробництва тепловоза серії 2ТЕ116У спроектовані і виготовлені сотні елементів оснащення, обладнання та інструменту, організовано випуск і освоєні технології виготовлення близько 20 визначальних складальних одиниць, серед яких головні рами і рами візка, кабіни машиніста, кузова, холодильні камери, колісно-моторні блоки, мотор-вентилятори та інші вузли.

За рішенням приймальної комісії, прийнятому за підсумками обговорення, розпочате серійне виробництво цього локомотива і введення його в експлуатацію.

1.2 Огляд варіантів модернізації, пов'язаної із заміною силової установки

У 1989 р. за завданням міністерства на доробку Д70 були розпочаті роботи по двигуну Д80. Був створений дослідний 16-циліндровий тепловозний дизель з розмірністю 26/27 з проектною потужністю 4500 кВт, в якому були втілені сучасні, апробовані на Д70 конструкторські рішення в основних вузлах дизеля – блоку, кришці циліндрів, колінчастого валу і вкладишам, системі газотурбінного

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

наддуву і вихлопному колектору. На цьому двигуні була досягнута потужність 3700 кВт. (для досягнення 4500 кВт не було необхідного турбокомпресора). Двигун відпрацював 1000 мотогодин на стенді, підтвердив правильність вибору конструктивних рішень і закладених параметрів і показав ефективну питому витрату палива 151 г/(кВт·год).

На цій основі в 1993-1994 рр. за рішенням Укрзалізниці та відповідно до Державної програми розвитку залізничного транспорту України, були розпочаті роботи по уніфікованому потужністному ряду двигунів Д80 (УПР Д80). Їх застосування передбачено як для магістральних і маневрових тепловозів виготовлення ПАТ «Луганськтепловоз», так і для модернізації експлуатованого парку магістральних і маневрових тепловозів Укрзалізниці та промтранспорту України із заміною штатних двигунів, що виробили свій моторесурс, на двигуни УПР Д80. При цьому забезпечується високий ступінь уніфікації по циліндропоршневій групі, кришці циліндра, кривошипно-шатунному механізму, вкладишах, газорозподільному механізму, паливній апаратурі.

Двигуни УПР Д80 використовуються як для створення нового рухомого складу, так і для модернізації існуючого рухомого складу. Вони представляють собою сучасні економічні 4-тактні середньооборотні ($n=12,5-16,67 \text{ c}^{-1}$), 2-, 4-, 6-, 8-, 10-, 12-, 14-, 16-циліндрові двигуни, рядного і V-подібного виконання, потужністю 300-4500 кВт в одному агрегаті.

Техніко-економічні показники двигунів УПР Д80 в результаті тривалого доведення і використання високих технологій знаходяться на рівні кращих зарубіжних зразків по витраті палива, масла, екології та ресурсу.

На базі двигунів УМР Д80 за договором і спільно з Укрзалізницею, а також «ТРЗ» (м. Полтава) проводить модернізацію тепловозів 2ТЕ116.

Протягом 1997-2005 рр. були модернізовані 20 тепловозів 2ТЕ116 в депо О. та Г. Південної залізниці, Ізюмському і Полтавському ТРЗ з заміною двигунів 5Д49 двигунами 1Д80Б.

Тепловози ЧМЕЗ в кількості 22 секцій пройшли модернізацію в депо Харків-Сортувальний та на Дніпропетровському ТРЗ із заміною штатних двигунів К6S310DR двигунами 4Д80Б.

					0032.180144.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Модернізовані тепловози пройшли експлуатаційні випробування як 2-й етап приймальних випробувань, суміщених з рядовою експлуатацією в депо О., Х.-С. Південної залізниці та прийняті міжвідомчою комісією. В даний час тепловози 2ТЕ116 і ЧМЕЗ працюють у депо О. та Г., депо Х.-С. Південної залізниці та депо С. Донецької залізниці.

Експлуатаційні випробування показали, що дизелі 1Д80Б і 4Д80Б повністю адаптовані до тепловозних систем. Модернізація тепловозів дизелями Д80 показала, що це самий економічний варіант модернізації у порівнянні з іншими варіантами, які виконують за кордоном.

Приймальна комісія у своїх документах відзначила ряд наступних позитивних якостей:

– у двигуна 1Д80Б в порівнянні зі штатним дизелем 5Д49 тепловоза 2ТЕ116:

– менша середньоексплуатаційна витрата палива на 4-5%, що обумовлено конструктивним виконанням каналів кришки циліндрів, неохолоджуваним випускним колектором, меншим на 20% тепловідводом в системи охолодження, системою повітропостачання, що забезпечує коефіцієнт надлишку повітря не менше двох на всіх режимах тепловозної характеристики, що сприяє досягненню низьких показників димності і токсичності випускних газів, а також більшої економічності;

– менша витрата масла – 1,4% від витрати палива, у серійного – 4,7%;

– викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище нижче більш ніж в два рази;

– меншу трудомісткість обслуговування і ремонту в експлуатації за рахунок компоувальних і конструктивних рішень, що дозволяють виконувати послідовне розбирання в кузові тепловоза, в тому числі і циліндро-поршневої групи, аналогічно двигунам Д50, 11Д45, 14Д40, GMC-710, MTU, МАН, Зульцер і ін., а не як у Д49 – «комплектами»;

– у двигуна 4Д80Б в порівнянні зі штатним дизелем К6S310DR тепловоза ЧМЕЗ:

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

- середньоексплуатаційна економічність на 8-12% вище;
- витрата масла – 1,4% від витрати палива, у серійного – 2%;
- викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище в 2-2,5 рази нижче, ніж у серійного;
- трудомісткість обслуговування практично однакова.

Для модернізації тепловозів типу ТЕ10 у Казахстані був розроблений, виготовлений, пройшов міжвідомчу комісію і прийнятий приймальною комісією до серійного виробництва дизель-генератор 1Д80Б-01 потужністю 2200 кВт в 16 циліндрах при $n = 14,17 \text{ с}^{-1}$. Дизель-генератор 1Д80Б-01 за результатами порівняльних випробувань зі штатним двигуном 10Д100 має меншу на 8-10% експлуатаційну витрату палива і викиди шкідливих речовин нижче в 2-2,5 рази, тепловідводи – нижче на 30%. Найважливішою особливістю цього двигуна є те, що споживання палива за тепловозною характеристикою має практично постійне значення в інтервалі від 0,3 до $1,0 N_e$, що гарантує високу паливну економічність в експлуатації. Порівняння характеристик 1Д80Б-01 з аналогами 1А-9ДГ, 7FDL-12 показали, що 1Д80Б-01 не поступається цим двигунам за показниками економічності, екологічності та ресурсу.

Розроблено технічні проекти на двигун 8Д80Б для модернізації тепловоза ТГМ6 із заміною штатного двигуна 3А-6Д49, на двигун 4Д80Е для заміни штатного двигуна Д50 на тепловозі ТЕМ2. Розроблено технічну документацію на двигун 4Д80В для модернізації тепловоза ТЕМ7 із заміною штатного двигуна 2-Д49. Для модернізації тепловозів типу ТГМ4 завод створив двигун 11Д80Б, який пройшов 1-й етап приймальних випробувань, встановлений на заводський тепловоз ТГМ4А №2181 та готується до 2-го етапу приймальних (експлуатаційних) випробувань.

Модернізація цього тягового рухомого складу відомчого (промислового) транспорту двигунами УМР Д80 дозволить забезпечити:

- підвищення економічності на 15-20%, моторресурсу – в 1,1-1,5 рази;
- зниження обсягів запасних частин – у чотири-п'ять разів;
- виключити витрати на закупівлю імпортованих двигунів та запчастин у

					<i>0032.180144.000.03МР.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

розмірі 2-2,5 млрд грн в рік.

Експлуатаційні витрати для дизелів Д80 (на ПММ, запчастини, ремонт) у два рази нижче, ніж для імпортних.

Технічний рівень двигунів уніфікованого ряду потужностей Д80 не поступається технічним рівнем двигунам аналогічних потужнісних рядів зарубіжних фірм за показниками економічності, екологічності, моторесурсу і ремонтпридатності.

Застосування одного типорозміру двигуна з коефіцієнтом уніфікації 75-90% між модифікаціями в Укрзалізниці знизить номенклатуру запасних частин у сім разів і дозволить запровадити прогресивний метод ремонту – фірмовий капітальний ремонт на заводі-виробнику.

Модернізація рухомого складу із заміною штатних двигунів двигунами Д80 і постачанням заводом комплектів деталей і складальних одиниць для приєднання до систем тепловозів може проводитися силами підприємств, які експлуатують цей рухомий склад, за участю фахівців тепловозобудівних заводів. Термін окупності – не більше двох років.

Ці заходи дозволять істотно оздоровити і підтримувати в працездатному стані парк тепловозів, забезпечити зазначені вище переваги, так як екіпажні частини транспортних засобів служать 30-40 років.

Таким чином, власне двигунобудування України може забезпечити майже всі потреби галузей народного господарства України в двигунах даного класу і запобігти витрат на закупівлю двигунів за кордоном.

1.3 Модернізація тепловозів за рахунок регулювання систем електропередач тепловозів

Тенденція розвитку швидкостей руху поїздів висуває високі вимоги до технічної досконалості локомотивів і підвищенню їх тягово-зчіпних властивостей, які нерозривно пов'язані з поліпшенням характеристик систем регулювання електричних передач. У цей час іде розробка нових, а також модернізація існуючих тягових приводів шляхом впровадження мікропроцесорних систем

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

керування, що забезпечують високе використання сил зчеплення. Дотепер не вдалося виробити єдиного підходу за структурою цих систем, а також визначити оптимальні значення багатьох параметрів. Зниження припустимих рівнів ковзання призводить до недовикористання тягових можливостей локомотивів. З іншого боку, значне ковзання при буксуванні приводить до підвищеного зношування бандажів колісних пар і рейок, а також до пошкоджень тягових двигунів (ТД) і передач через інтенсифікацію динамічних режимів.

У цей час у США на локомотивах SD50 і SD60 використовуються високоефективні системи регулювання Super Series фірми General Motors. Створенням подібних систем активно займаються провідні фірми Німеччини, Японії, Росії та ін. До останнього часу тяговий рухомий склад країн СНД й інших закордонних країн обладнано у більшості випадків протибуксовочними системами, заснованими на вимірах й порівняннях швидкостей обертання або залежних від них напруг, струмів у тягових двигунах.

Сам принцип дії зазначених систем обумовлює відомі їхні недоліки:

- непрацездатність при синхронному буксуванні колісних пар;
- досить низька чутливість;
- істотна залежність стабільності роботи від відмінностей діаметрів коліс і розкиду характеристик тягових електродвигунів.

Нові протибуксовочні системи, які включають радіолокаційний вимірник абсолютної швидкості руху екіпажа, датчики обертів, датчики безперервного виміру діаметрів коліс локомотива по колу катання кожної колісної пари, дозволяють виключити ряд вище вказаних недоліків протибуксовочних систем і суттєво підвищити їх чутливість.

Результати тривалих експериментальних досліджень процесів буксування тепловозів 2ТЕ116, електровозів постійного струму ВЛ11 і ДЕ1 показали, що наявні системи регулювання не забезпечують припинення й тим більше попередження буксування без обов'язкового скидання позицій контролера машиніста. У свою чергу, збільшення числа й тривалості перехідних режимів роботи локомотива (скидання й набір позицій контролера машиніста) обумовлює

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

реалізацію більш низького ККД тягової передачі, що збільшує витрату паливно-енергетичних ресурсів. Таким чином, очевидні переваги й перспективність мають протибуксовочні й протиюзні системи, засновані на аналізі динамічних процесів у механічній системі тяговий привод – колісна пара – рейкова колія, які поліпшують адаптивні властивості електричних передач тепловозів.

Одним з ефективних способів усунення вищеперерахованих недоліків і підвищення тягових властивостей локомотивів з електричною передачею є індивідуальний розподіл потужності між тяговими двигунами залежно від зчіпних властивостей колісних пар з рейками. Технічні особливості реалізації цього способу на прикладі електричної передачі змінно-постійного струму магістрального тепловоза 2ТЕ116 з мікропроцесорною системою керування наведена на рис. 1.1.

У цій електропередачі за рахунок регулювання тягового генератора застосований груповий захист від буксування однієї або декількох колісних пар, а також вибіркового захист шляхом регулювання напруги на кожному тяговому двигуні.

Такий підхід визначив структуру системи регулювання ковзання, елементи якої входять у контур регулювання потужності дизель-генератора (рис. 1.2) і контур регулювання швидкості обертання кожної колісної пари (рис. 1.3).

Процес руху тепловоза при керуванні від системи УСТА-М визначається запасом потужності дизель-генератора, яку можна реалізувати на тягу. Для цього підсумуються два сигнали, пропорційні положенням контролера машиніста КМ і індуктивного датчика ІД.

По результуючому сигналу ΔP , пропорційному вільній потужності дизеля, встановлюється максимально припустиме прискорення колісних пар ε . Потім у регуляторі потужності цей сигнал інтегрується за часом, у результаті чого визначається задана кутова швидкість обертання колісних пар, тобто швидкість руху локомотива.

При цьому потужність на виході тягового генератора, яка передається тяговим двигунам, обмежується на певному рівні, забезпечуючи захист від

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

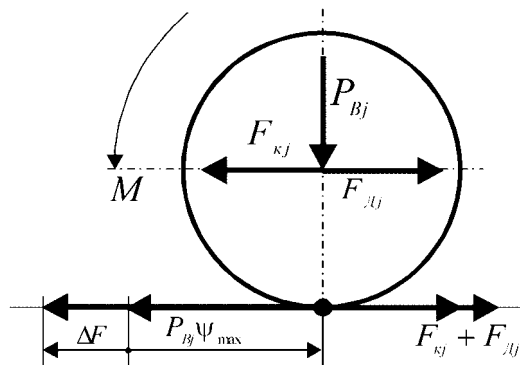


Рисунок 1.4 – Схема дії сил у контакті колеса з рейкою з урахуванням повздовжньо-динамічних зусиль у поїзді: F – динамічна складова сил від взаємодії локомотива й складу, що доводиться на одну привідну вісь; P – вертикальне навантаження; ψ – максимальний коефіцієнт зчеплення; M – момент обертання широкому діапазоні можливих його змін використовуваних у системі УСТА-М встановлено контуру регулювання кутової швидкості (рис. 1.5).

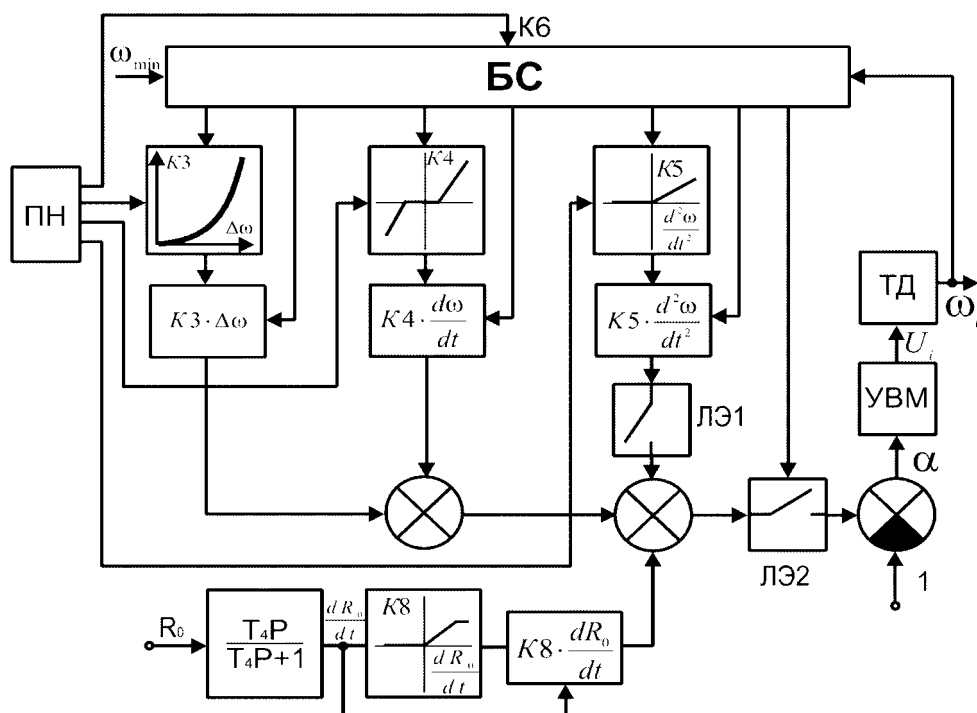


Рисунок 1.5 – Структурна схема контуру регулювання кутової швидкості обертання тягового двигуна з адаптивними властивостями:
 БС – блок порівняння; ПН – програмне налаштування коефіцієнтів підсилення K_3 - K_6 по алгоритму, наведеному на рис. 1.6; T_4 – постійна часу; K_8 – коефіцієнт підсилення

значній мірі визначаються якістю функціонування регуляторів частоти обертання і потужності та їх систем управління, яке в свою чергу залежить від правильності їх обслуговування, регулювання, настроювання та ін.

Експлуатаційні випробування підтвердили, що підвищення плавності регулювання частоти обертання дизель-генератора до визначеного моменту дозволяє покращити якість роботи дизель-генератора на вказаних перехідних режимах практично без погіршення тягових властивостей тепловоза.

Таким чином, завдання раціональних режимів роботи дизель-генераторів з точки зору оптимізації ККД всього енергетичного кола тепловоза, забезпечення економічно вигідних рівнів потужності дизелів на перехідних режимах є найважливішим способом підвищення експлуатаційної економічності тепловозів. Одним із головних напрямків у вирішенні цієї задачі є:

- покращення статичних та динамічних характеристик системи автоматичного регулювання (САР) частоти обертання і потужності тепловозних дизель-генераторів;

- раціональне узгодження характеристик регуляторів частоти обертання і потужності та їх систем управління як з характеристиками дизелів та агрегатів наддуву, так і з характеристиками електричної передачі тепловоза;

- створення оптимальної системи управління всім енергетичним колом тепловоза.

На локомотивах і дизель-поїздах для регулювання частоти обертання валів дизеля використовуються різноманітні САРЧ, що розрізняються по типу регулятора частоти обертання, принципу побудови і т.п. Значна частина вантажних перевезень на залізницях України виконується тепловозами серії 2ТЕ116. Дизелі Д49, що застосовуються на цих тепловозах, обладнані базовими регуляторами частоти обертання колінчатого вала типу 4-7РС-2, який автоматично підтримує заданий режим роботи дизеля.

В останні роки все більше застосовуються пристрої регулювання, побудовані на базі мікропроцесорної техніки. Так система Pegasos, німецької фірми Heinzmann представляє собою комплектну «Систему модернізації» для

					0032.180144.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

локомотивів, яка дозволяє замінити існуючі системи керування (наприклад, гідравлічні регулятори) сучасними цифровими системами керування. Крім керування частотою обертання система керування локомотивами Regasos виконує наступні функції.

– Налагодження стартової подачі палива. При завданні стартової подачі палива, надається вибір між мінімальним і максимальним значеннями подачі палива. Більш того, забезпечується перемінна стартова подача палива, дякуючи чому подача палива при запуску двигуна збільшується автоматично.

– Темп змінення частоти обертання. Якщо частота обертання повинна змінюватися вслід за задаючим пристроєм з деякою затримкою, в регуляторі передбачена функція темпу змінення частоти обертання, яка, в залежності від вимог, може програмуватися як окремо для збільшення і зменшення частоти обертання, так і для визначених діапазонів частоти обертання.

– Фіксоване обмеження палива. Для позицій зупинки і максимальної подачі палива можуть забезпечуватися «електронні пастки». Це забезпечить захист виконавчого органу регулятора від впливу вхідних обмежувачів паливного насосу та ін.

– Обмеження подачі палива у залежності від частоти обертання. Для всережимних регуляторів забезпечується програмування обмежувальних кривих у залежності від частоти обертання. Таким чином, для будь якої частоти обертання обертаючий момент може бути приведений до призначення, допустимому для двигуна.

– Обмеження подачі палива у залежності від тиску надува. Для двигунів з турбонадувом подача палива може бути зменшена, щоб забезпечити бездимну роботу у випадку відсутності тиску надува (наприклад, запуск або змінення навантаження). У відповідності з цим програмуються відповідні обмежувальні криві.

– Дворежимний регулятор. Для керування дизель-електричними локомотивами регулятор може працювати у режимі дворежимного регулятора. З цією метою, можна запрограмувати проміжну фіксовану частоту обертання,

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

наприклад, для стаціонарного режиму роботи (генератор у відборі потужності та ін.). Якщо необхідна робота регулятора з зоною пропорційного регулювання, то можна передбачити вимикач.

– Температурна залежність частоти обертання холостого ходу. При низьких температурах двигун може працювати на збільшеній частоті обертання холостого ходу. Зі збільшенням температури двигуна частота обертання холостого ходу знижується до нормальної величини.

– Контроль тиску масла. Для контролю тиску масла можуть бути запрограмовані дві обмежувальні криві залежності тиску масла від частоти обертання двигуна. При низькому тиску масла видається сигнал тривоги, а при подальшому пониженні тиску масла двигун буде зупинено.

– Система регулювання навантаження. Для дизель-електричних локомотивів може бути використана система регулювання навантаження, за допомогою якої вихідна потужність генератора регулюється у залежності від частоти обертання і навантаження.

– Захист від буксування. Для локомотивів може бути забезпечений захист від буксування, однак для цього потребується сигнал від зовнішнього датчика.

Для перевірки виконання закладених функцій та підтвердження відповідності функціональних характеристик вимогам технічної документації та працездатності ЕР були організовані порівняльні експлуатаційні випробовування. Статистичний аналіз даних про витрату палива на одиницю роботи показав наступні значення:

– для ЕР Regasos – середнє значення $25,9 \text{ кг}/10^4 \text{ ткм}$, середньоквадратичне відхилення 3,36, міра відхилення розподілу до лог-нормального закону 0,2 за критерієм Романовського;

– для ЕР СУДМ – середнє значення $25,87 \text{ кг}/10^4 \text{ ткм}$, середньоквадратичне відхилення 2,19, міра відхилення розподілу до лог-нормального закону 1,4 за критерієм Романовського.

Результати, що виходять з аналізу характеру зміни питомої витрати палива ще раз підтверджують висновки отримані при проведенні стендових випробувань

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

електронних регуляторів. Отримана економія витрати палива не є вичерпаною. Це пояснюється тим, що економія експлуатаційної витрати палива забезпечується при відповідній настройці мікропроцесорного регулятора під відповідний тип дизеля. Це потребує додаткової дослідної роботи по виявленню зон найбільшої економічності в залежності від різних вхідних параметрів та визначення апроксимуючих залежностей, які використовуються в алгоритмах управління. Також слід сказати, що збільшення експлуатаційної витрати палива модернізованими тепловозами в наступних періодах може бути обумовлено рядом чинників, в т.ч. погіршенням технічного стану локомотиву в цілому, що не дозволяє реалізувати повною мірою переваги ЕР.

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2 МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОВОЗА СЕРІЇ 2ТЕ116 ПРИ УДОСКОНАЛЕННІ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ

2.1 Обґрунтування необхідності модернізації передачі потужності

Укрзалізниця проводить оптимізацію парку тягового рухомого складу. З метою його технічного переоснащення визначені основні серії тепловозів та електровозів, яким впродовж найближчих років буде здійснюватись модернізація та закупівля. Основні серії локомотивів затверджені концепцією функціонування та розвитку локомотивного господарства Укрзалізниці, яка була прийнята на технічній раді під головуванням генерального директора Укрзалізниці Володимира Козака наприкінці квітня поточного року.

Основними серіями тепловозного парку залізниць України визначені М62, 2М62 та 2ТЕ116. Основними серіями вантажних електровозів постійного струму на Донецькій залізниці визначені електровози 2ЕЛ4, на Придніпровській залізниці – електровози ВЛ11М6.

Локомотивне господарство є одним із ключових елементів у роботі залізничної галузі. На сьогодні його технічний стан – завищена енергоємність перевізного процесу, високий ступінь зношеності рухомого складу – вимагає пошуку ефективних рішень оновлення тягової техніки в умовах обмежених фінансових ресурсів, які має Укрзалізниця. Визначення основних серій тягового рухомого складу дозволить поступово замінити неперспективні в сучасних умовах моделі, оптимізувати бази ремонту та технічного обслуговування існуючих локомотивів, а також сформулювати чіткі вимоги для виробників нової техніки.

Парк локомотивів залізниць України формувався переважно за рахунок їх постачання до 1993 року. Найбільші партії, по 300-400 локомотивів на рік, закуповувалися у 1987 та 1970-1975 роках. Інвентарний парк тягового рухомого складу складають 2488 магістральних та маневрових тепловозів і 1862 електровози, із них експлуатуються 1343 тепловози та 1271 електровоз. 74% інвентарного парку тепловозів та 74,3% інвентарного парку електровозів вже

					0032.180144.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

відпрацювали встановлений заводами-виробниками нормативний термін служби.

Більшість локомотивів, які експлуатуються, потребують на 40-60% більше витрат на технічне обслуговування і ремонти, порівняно із сучасними моделями, а також не можуть забезпечити рух поїздів зі швидкістю до 120 км/год (для вантажних) та 160 км/год (для пасажирських).

З огляду варіантів модернізації тепловозів та з урахуванням браку тепловозів для забезпечення пасажирського руху пропонуємо модернізувати передачу потужності тепловоза серії 2TE116 для забезпечення пасажирських перевезень зі збільшенням конструкційної швидкості.

Пропонуємо збільшити швидкість тепловоза до значення 140 км/год. Це пояснюється узгодженням з конструкційною швидкістю пасажирських вагонів з візками типу КВЗ-5 (до 140 км/год).

Зміна конструкційної швидкості призведе до перерахунку як механічних, так і електричних показників тягової передачі потужності. Для пасажирського руху необхідно збільшити швидкість розрахункового режиму з 24,2 км/год базового тепловоза до 33,9 км/год проектного. Відповідно й розрахункову силу тяги з 496 кН до 353,3 кН.

2.2 Розрахунок техніко-економічних характеристик тепловоза

2.2.1 Визначення основних параметрів тепловоза

Дотична потужність тепловоза N_{∂} , кВт

$$N_{\partial} = \frac{F_{\partial} \cdot V_p}{3,6}, \quad (2.1)$$

де F_{∂} – розрахункова дотична сила тяги, $F_{\partial} = 353,3$ кН;

V_p – розрахункова швидкість, $V_p = 34$ км/год.

$$N_{\partial} = \frac{353,3 \cdot 34}{3,6} = 3337 \text{ кВт.}$$

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Потрібна ефективна потужність дизеля N'_e , кВт

$$N'_e = \frac{N_\partial}{\eta_n \cdot \beta_{\partial on} \cdot n_c}, \quad (2.2)$$

де η_n – ККД передачі;

$\beta_{\partial on}$ – коефіцієнт, який враховує витрату енергії на привід допоміжних агрегатів тепловоза;

n_c – кількість секцій у складі тепловоза.

ККД електричної передачі змінного струму

$$\eta_n = \eta_\zeta \cdot \eta_{\text{вУ}} \cdot \eta_{\partial \text{в}} \cdot \eta_M, \quad (2.3)$$

де $\eta_\zeta, \eta_{\text{вУ}}, \eta_{\partial \text{в}}, \eta_M$ – ККД відповідно тягового генератора, випрямної установки,

ТЕД, тягового осьового редуктора. Приймаємо

$$\eta_\zeta = 0,96, \eta_{\text{вУ}} = 0,99, \eta_{\partial \text{в}} = 0,86, \eta_M = 0,99.$$

$$\eta_n = 0,96 \cdot 0,99 \cdot 0,86 \cdot 0,99 = 0,81.$$

Коефіцієнт $\beta_{\partial on}$ визначається з виразу

$$\beta_{\partial on} = \frac{N'_e - \sum N_{\partial on}}{N'_e}, \quad (2.4)$$

де $\sum N_{\partial on}$ – сумарні витрати потужності на привід допоміжних агрегатів, який приймається по базовому тепловозу, $\sum N_{\partial on} = 225$ кВт.

Для визначення N'_e та $\beta_{\partial on}$ складаємо та розв'язуємо систему рівнянь з виразів (2.2) та (2.4). Розв'язавши систему рівнянь отримаємо $N'_e = 2285$ кВт; $\beta_{\partial on} = 0,901$.

Мінімальна зчіпна маса $P_{зч}$, кН, у одній секції тепловоза визначається за

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

умови його руху по розрахунковому підйому зі сталою швидкістю без буксування

$$P_{зч} = \frac{3,6 \cdot N_{\partial}}{\eta_{\epsilon} \cdot \psi_p \cdot V_p \cdot n_c}, \quad (2.6)$$

де ψ_p – коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою при розрахунковій швидкості;

η_{ϵ} – коефіцієнт використання зчпної маси, значення якого залежить від конструкції екіпажної частини тепловоза та розташування ТЕД (для тепловоза 2ТЕ116 $\eta_{\epsilon} = 0,88$).

Коефіцієнт зчеплення

$$\psi_p = 0,118 + \frac{5}{27,5 + V_p}; \quad (2.7)$$

$$\psi_p = 0,118 + \frac{5}{27,5 + 34} = 0,199;$$

$$P_{зч} = \frac{3,6 \cdot 3337}{0,88 \cdot 0,199 \cdot 34 \cdot 2} = 1008 \text{ кН.}$$

Отримане значення $P_{зч}$ перевіряємо на виконання умови:

$$\frac{P_{зч}}{k} \leq q, \quad (2.8)$$

де q – осьове навантаження тепловоза, кН.

$$\frac{1008}{6} = 168 \leq 222 \text{ кН.}$$

Умова (2.8) виконується.

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

2.2.2 Визначення параметрів тягового осьового редуктора

Основним параметром тягового осьового редуктора є передаточне число

$$\mu = \frac{z_2}{z_1}, \quad (2.9)$$

де z_1 – число зубців веденої шестерні (зубчастого колеса);

z_2 – число зубців ведучої шестерні.

Передаточне число за умови забезпечення заданої швидкості V_p на розрахунковому підйомі

$$\mu_1 = \frac{F_{\partial\infty} \cdot D_k}{2 \cdot M_{\partial\infty}}, \quad (2.10)$$

де $F_{\partial\infty}$ – тривала сила тяги одного КМБ, $F_{\partial\infty} = 31$ кН;

D_k – діаметр рушійних коліс тепловоза по колу кочення, $D_k = 1,05$ м;

$M_{\partial\infty}$ – момент обертання на валу якоря ТЕД у тривалому режимі, кН·м.

Тривалий момент $M_{\partial\infty}$, кН·м, на валу ТЕД визначається виходячи з потужності P_{∂} і частоти обертання якоря у тривалому режимі роботи ТЕД

$$M_{\partial\infty} = 9,5 \cdot \frac{P_{\partial\infty}}{n_{\partial\infty}}; \quad (2.11)$$

$$M_{\partial\infty} = 9,5 \cdot \frac{307}{580} = 5,03 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

$$\mu_1 = \frac{31 \cdot 1,05}{2 \cdot 5,03} = 3,24.$$

Отримане значення передаточного числа μ_1 перевіряємо по найбільшій частоті обертання якоря ТЕД під час руху тепловоза з конструкційною

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкістю V_K .

Максимальна частота обертання коліс тепловоза n_K , хв^{-1}

$$n_K = \frac{1000 \cdot V_K}{60 \cdot \pi \cdot D_K} \text{ хв}^{-1}. \quad (2.12)$$

$$n_K = \frac{1000 \cdot 140}{60 \cdot 3,14 \cdot 1,05} = 707,7 \text{ хв}^{-1}.$$

Передаточне число за умови, що при конструкційній швидкості руху тепловоза частота обертання якоря ТЕД не перевищує частоту обертання, що припускається заводом-виготовником

$$\mu_2 = \frac{n_{\text{дв max}}}{n_K}; \quad (2.13)$$

$$\mu_2 = \frac{2290}{707,7} = 3,24.$$

З двох отриманих значень μ_1 і μ_2 приймаємо менше, $\mu = 3,24$.

Остаточне передаточне число приймаємо таким, щоб довжина централі А (відстань між осями ТЕД і колісною парою) у порівнянні з аналогічним параметром базового тепловоза залишалася незмінною. Відстань $A = 468,8$ мм.

Для прийнятих значень довжини централі А і модуля зчеплення m необхідно визначити сумарне число зубців тягового редуктора. А потім число зубців ведучої z_1 і веденої z_2 шестерень.

Ці параметри тягового редуктора зв'язані між собою рівнянням

$$A = \frac{(z_1 + z_2) \cdot m}{2}, \quad (2.14)$$

де m – модуль зчеплення, значення якого приймаємо $m = 10$.

За формулами (2.9) і (2.14) складаємо систему рівнянь і розв'язуємо її відносно двох невідомих z_1 і z_2 . Отримані значення округлюються до цілого

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

числа, а потім встановлюється остаточне розрахункове значення передаточного числа. Бажано, щоб z_1 і z_2 мали парну і непарну кількість зубців. Після проведених розрахунків отримуємо $z_1 = 22$, $z_2 = 71$, $\mu_p = 3,23$.

Найбільша частота обертання якоря ТЕД при конструкційній швидкості руху проектного тепловоза

$$n_{\partial\infty}^p = n_k \cdot \mu_p. \quad (2.15)$$

Отримане значення не повинно перевищувати частоту обертання, що допускається заводом-виготовником $n_{\partial\max} = 2290 \text{ хв}^{-1}$, тобто:

$$n_{\partial\infty}^p = 707,7 \cdot 3,23 = 2286 \text{ хв}^{-1}. \quad (2.16)$$

Умова виконується.

Розрахункова сила тяги тепловоза F_{∂} , що відповідає тривалому струму ТЕД, уточнюється по остаточному прийнятому значенню μ_p :

$$F_{\partial} = \frac{2 \cdot M_{\partial\infty} \cdot \mu_p \cdot \kappa}{D_k}; \quad (2.17)$$

$$F_{\partial} = \frac{2 \cdot 5,03 \cdot 3,23 \cdot 12}{1,05} = 371,3 \text{ кН}.$$

2.2.3 Розрахунок електротягових характеристик КМБ базового тепловоза

Електротяговими характеристиками називаються залежності дотичної сили тяги $F_{\partial\partial}$ одного колісно-моторного блоку та швидкості руху тепловоза від струму навантаження ТЕД $I_{\partial\partial}$.

Ці характеристики будуються для сформованого колісно-моторного блоку, який включає тяговий електродвигун, колісну пару та тяговий редуктор.

Електротягові характеристики колісно-моторного блока тепловоза розраховуються у такій послідовності:

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

– за відсутності електромеханічних характеристик ТЕД ЕД-118, ЕД-118А потужністю 307 кВт перерахунок виконуємо на підставі електротягових характеристик КМБ з ТЕД ЕД-118, ЕД-118А потужністю 307 кВт та передаточним відношенням $\mu=4,53$ (рис. 2.1);

– задаємося значеннями струму $I_{\partialв}$ для всіх трьох режимів роботи ТЕД (табл. 2.1) (ПП – повне поле, ОП1 – ослаблене поле першого ступеня, ОП2 – ослаблене поле другого ступеня);

– перераховуємо з електротягових характеристик електромеханічні (табл. 2.2, рис. 2.2) за формулами:

$$M_{\partialв} = \frac{F_{\partialв} \cdot D_K}{2 \cdot \mu_p \cdot \eta_m}; \quad (2.18)$$

$$n_{\partialв} = \frac{1000 \cdot \mu_p}{60 \cdot \pi \cdot D_K \cdot V_{\partialв}}. \quad (2.19)$$

– для обраних (не менш п'яти) значень струму $I_{\partialв}$ по електромеханічним характеристикам знаходимо відповідні їм значення;

Таблиця 2.1 – Дискретні значення електротягових характеристик КМБ з ТЕД ЕД-118, ЕД-118А потужністю 307 кВт та передаточним відношенням $\mu=4,53$

I, А	Значення швидкості V по ступені ослаблення поля			Значення сили тяги F по ступені ослаблення поля		
	ПП	ОП1	ОП2	ПП	ОП1	ОП2
450	450	56	74,14	100	24,5	13,4
600	600	35	48,4	64	33,0	22,3
800	800	17	27,72	38,4	49,1	35,7
1000	1000	6	13,2	24,7	68,7	49,9
1050	1050	4	11	22	73,6	53,5

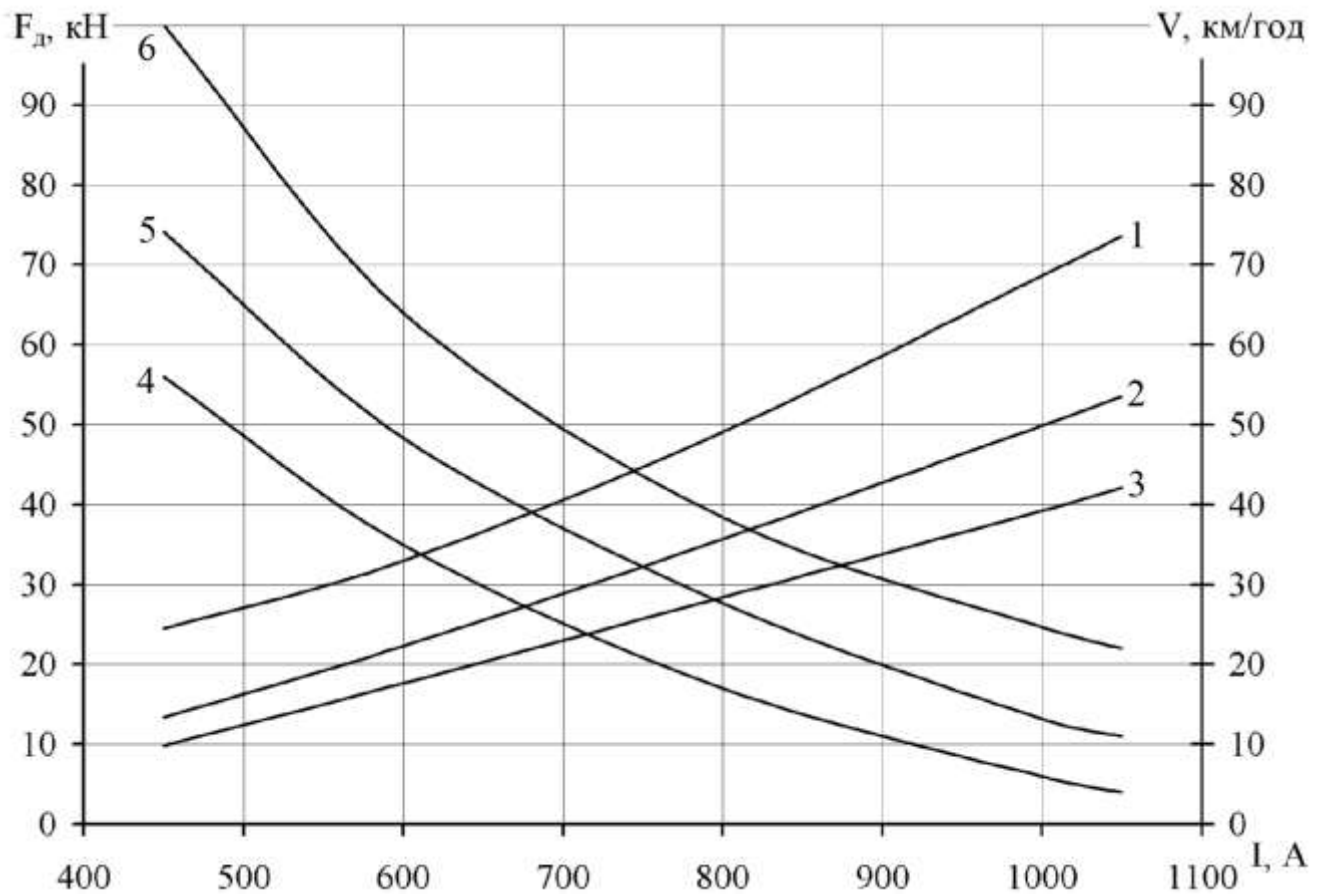


Рисунок 2.1 – Електротягові характеристики КМБ з ТЕД ЕД-118, ЕД-118А потужністю 307 кВт та передаточним відношенням $\mu=4,53$:

1 – F(ПП), 2 – F(ОП1), 3 – F(ОП2), 4 – V(ПП), 5 – V(ОП1), 6 – V(ОП2)

Таблиця 2.2 – Дискретні значення електромеханічних характеристик ТЕД ЕД-118, ЕД-118А потужністю 307 кВт

I, А	Значення частоти обертання n по ступені ослаблення поля			Значення обертового моменту M по ступені ослаблення поля		
	ПП	ОП1	ОП2	ПП	ОП1	ОП2
450	1282	1543	2290	2,87	1,72	1,15
600	801	1008	1466	3,86	2,87	2,07
800	389	577	879	5,74	4,59	3,33
1000	137	275	566	8,04	6,43	4,59
1050	92	229	504	8,61	6,89	4,94

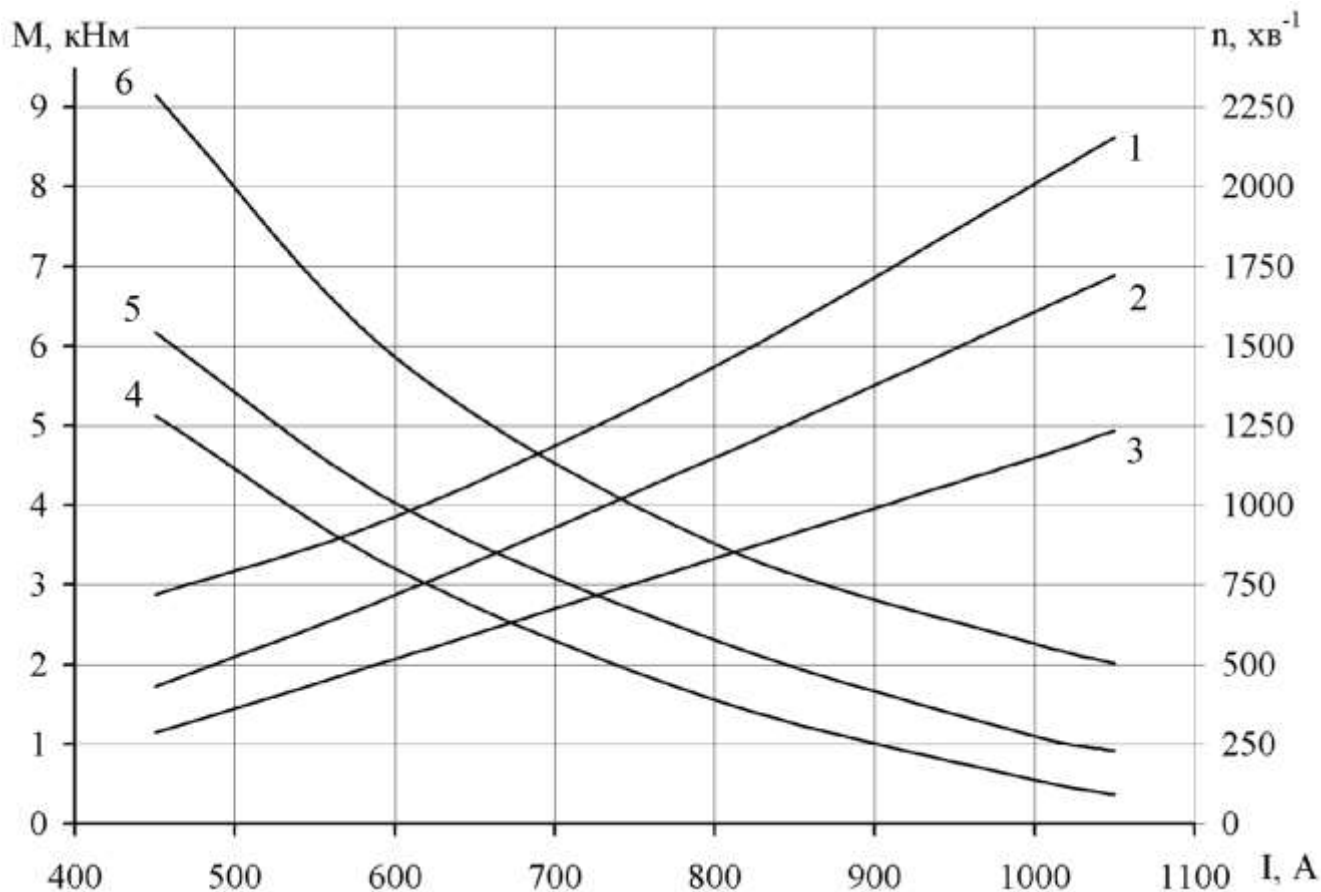


Рисунок 2.2 – Електромеханічні характеристики ТЕД ЕД-118, ЕД-118А
потужністю 307 кВт:

1 – М(ПП), 2 – М(ОП1), 3 – М(ОП2), 4 – n(ПП), 5 – n(ОП1), 6 – n(ОП2)

– визначаємо значення $F_{\text{двн}}$ і $V_{\text{двн}}$, використовуючи при цьому залежності:

$$F_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot \mu_p \cdot M_{\text{дв}}}{D_k} \cdot \eta_m; \quad (2.20)$$

$$V_{\text{дв}} = \frac{60 \cdot \pi \cdot D_k \cdot n_{\text{дв}}}{1000 \cdot \mu_p}. \quad (2.21)$$

Розрахунки проводимо у вигляді табл. 2.3. Результати наводимо на рис. 2.3.

2.2.4 Розрахунок тягової характеристики тепловоза

Тяговою характеристикою тепловоза називається графічна залежність

дотичної сили тяги тепловоза F_k від швидкості його руху V при заданій (фіксованій) потужності силової установки $F_{\partial}=f(V)$. Вона розраховується та будується шляхом використання побудованих електротягових характеристик.

По кривий швидкості $V=f(I_{\partial})$ для кожного значення швидкості тепловоза визначається струм I_{∂} , а по кривий $F_{\partial\delta}=f(I_{\partial})$ - відповідну цьому струму сила тяги одного колісно-моторного блока F_{∂} .

Сила тяги секції тепловоза

$$F_{\partial} = \frac{F_{\partial\delta} \cdot k}{n_c} \quad (2.22)$$

Для визначення швидкості переходу з одного режиму роботи ТЕД на наступний використовується співвідношення

$$V_n = V_{\delta} \cdot \frac{\mu_{\delta}}{\mu_p} \quad (2.23)$$

де V_n, V_{δ} – швидкості переходів з одного режиму на наступний відповідно проектного та базового тепловозів, км/год;
 μ_p, μ_{δ} – передаточні числа тягового редуктора.

Швидкості переходів базового тепловоза визначаємо з [11] та заносимо у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Швидкості переходів тепловоза

Ступінь ослаблення поля	ПП-ОП1	ОП1-ОП2	ОП2-ОП1	ОП1-ПП
V_{δ} , км/год	43,5	58,5	46	32
V_n , км/год	60,9	81,9	64,4	44,8

Тягову характеристику однієї секції тепловоза будемо для номінальної потужності при трьох режимах роботи ТЕД. Результати розрахунку оформляємо у

табл. 2.5. На тягову характеристику (рис. 2.6) наносимо обмеження сили тяги по зчепленню коліс локомотива з рейками.

Таблиця 2.5 – Результати розрахунку тягової характеристики тепловоза

Значення швидкості V по ступені ослаблення поля			Значення сили тяги F по ступені ослаблення поля		
ПП	ОП1	ОП2	ПП	ОП1	ОП2
60,9	81,9	140,2	235,0	152,0	83,9
49,1	70	115	282,0	186,0	104,0
23,8	61,7	89,8	419,7	209,8	151,1
8,4	50,0	75,0	587,6	260,0	190,0
2,0	44,8	64,4	708,0	288,0	224,0

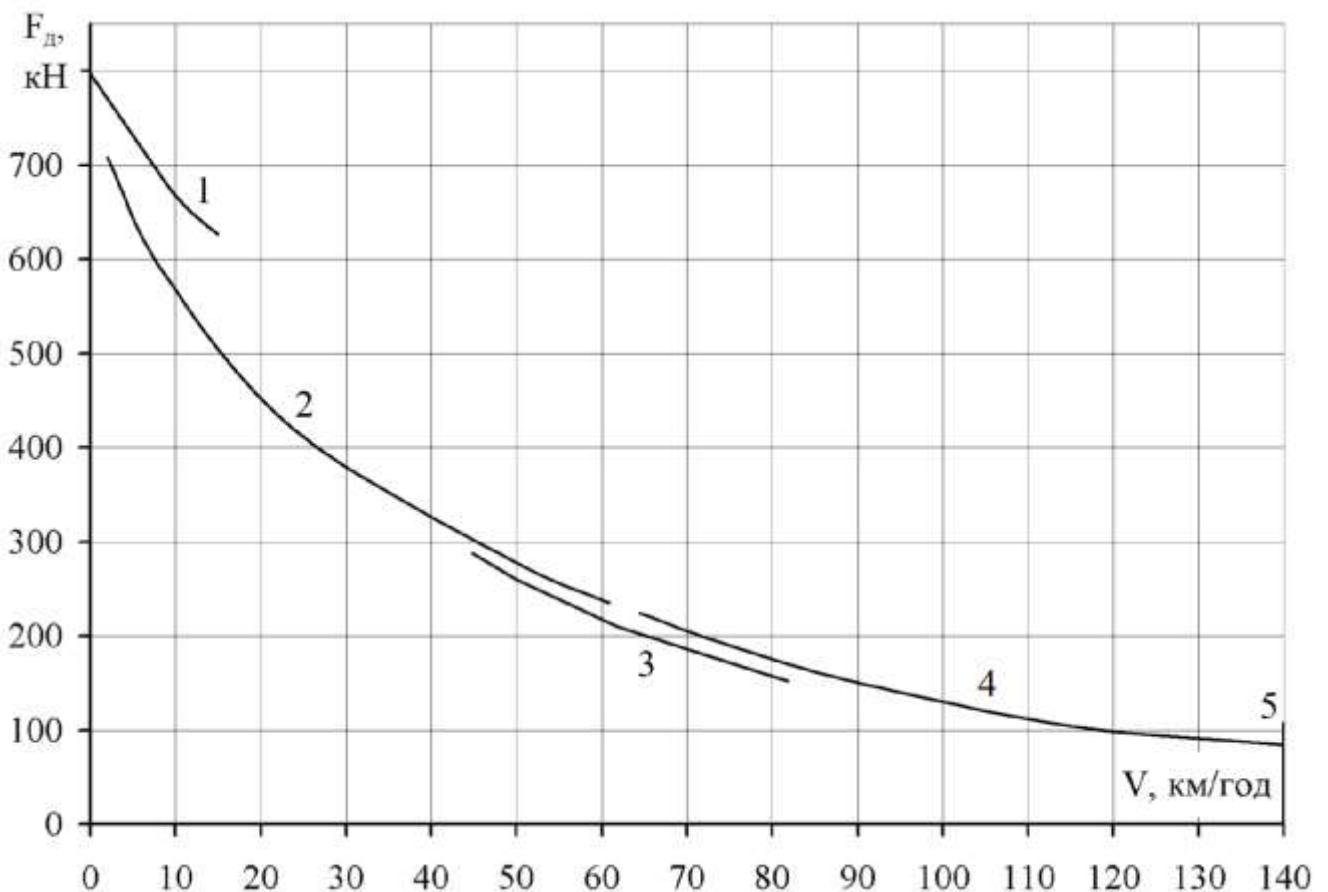


Рисунок 2.6 – Тягова характеристика модернізованого тепловоза:

1 – $F_{зч} = f(V)$; 2 – ПП; 3 – ОП1; 4 – ОП2; 5 – V_k

2.2.5 Розрахунок техніко-економічних показників модернізованого тепловоза

Одним із основних техніко-економічних показників тепловоза, що проектується є його ККД

$$\eta_m = \frac{3600 \cdot N_{\partial}}{B_2 \cdot Q_p^H}, \quad (2.24)$$

де N_{∂} – дотична потужність тепловоза, кВт;

B_2 – годинна витрата палива, кг/год;

Q_p^H – питома теплота згоряння палива, $Q_p^H = 42500$ кДж/кг.

Розраховуємо та будуємо залежність ККД тепловоза від швидкості його руху для всіх трьох режимів магнітного поля ТЕД

$$\eta_T = f(V). \quad (2.25)$$

Попередньо необхідно розрахувати та побудувати залежності

$$N_{\partial} = f(V), \quad B_2 = f(V), \quad \eta_m = f(V).$$

Дотична потужність секції тепловоза залежить від швидкості його руху, визначається із співвідношення

$$N_{\partial} = \frac{F_{\partial} \cdot V}{3,6}. \quad (2.26)$$

Значення сили тяги визначаємо по тяговій характеристиці секції проектного тепловоза для всіх трьох режимів стану магнітного поля ТЕД в інтервалі швидкості руху тепловоза від $V = 0$ до $V = V_K$.

Годинна витрата палива, кг/год, визначається з виразу

$$B_2 = b_e \cdot N_e, \quad (2.27)$$

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

де b_e – питома ефективна витрата палива, $b_e = 0,204$ г/(кВт·год).

$$B_{\Gamma} = 0,204 \cdot 2208 \cdot 2 = 900 \text{ кг/год.}$$

Для економічної оцінки передачі потужності тепловоза побудуємо залежність ККД передачі від швидкості руху тепловоза $\eta_n = f(V)$.

ККД передачі визначається за формулою

$$\eta_n = \frac{N_{\kappa}}{N_e - \sum N_{\partial\partial\partial}}. \quad (2.28)$$

Результати розрахунку параметрів $N_{\partial}, \eta_n, \eta_m$, а також значення N_{κ}, B_2 зводимо в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку техніко-економічних показників модернізованого тепловоза

ПП				ОП1				ОП2			
V, км/ГОД	N_{∂} , кВт	η_n	η_m	V, км/ГОД	N_{∂} , кВт	η_n	η_m	V, км/ГОД	N_{∂} , кВт	η_n	
60,9	3975	0,982	0,374	81,9	3458	0,854	0,325	140,2	3270	0,808	0,308
49,1	3846	0,950	0,362	70	3617	0,894	0,340	115	3450	0,852	0,325
23,8	2780	0,687	0,262	61,7	3597	0,889	0,339	89,8	3767	0,931	0,355
8,4	1373	0,339	0,129	50,0	3611	0,892	0,340	75,0	3958	0,978	0,373
2,0	393	0,097	0,037	44,8	3584	0,886	0,337	64,4	4007	0,990	0,377

За результатами розрахунків будують техніко-економічні характеристики модернізованого тепловоза (рис. 2.7).

2.3 Порівняння властивостей базового та модернізованого тепловозів

Порівняння властивостей базового та модернізованого тепловозів пропонуємо виконати на підставі тягових розрахунків. Обираємо параметри пасажирського складу – 20 вагонів типу 61- 4194 масою 64,5 т брутто.

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Таблиця 2.7 – Профіль ділянки НД-В. – Ч.

Довжина, м	Ухил, ‰	Пікет	Довжина, м	Ухил, ‰	Пікет	Довжина, м	Ухил, ‰	Пікет
250	1,1	197,3	790	6,5	231,6	400	-5,9	259,7
200	1	197,5	1190	2,5	232,8	600	-1	260,3
200	0	197,7	2220	5,9	235,1	300	4,1	260,6
200	-2,1	197,9	400	5,8	235,5	3400	8,8	264,0
270	-1	198,1	300	3,1	235,8	900	3,9	264,9
330	0,1	198,5	200	0	236,0	800	8,4	265,7
200	2,8	198,7	200	-0,6	236,2	200	3,9	265,9
300	0	199,0	320	0,5	236,5	900	5,4	266,8
500	1,3	199,5	560	3,2	237,0	1600	7,8	268,4
300	4,8	199,8	510	5,6	237,5	300	3,2	268,7
800	2,7	200,6	200	0,4	237,7	500	8,5	269,2
330	2,9	200,9	210	-4,8	238,0	1100	4,6	270,3
200	-3,9	201,1	200	1,2	238,2	200	8,5	270,5
240	-16,5	201,3	1200	-6,9	239,4	300	0,1	270,8
310	0	201,6	400	-2,2	239,8	200	-1,6	271,0
220	5,4	201,9	1200	-7,1	241,0	600	-0,7	271,6
2200	8,6	204,1	300	1,1	241,3	400	0	272,0
210	6,3	204,3	2000	-6,9	243,3	200	-7,1	272,2
200	4,2	204,5	700	-2,9	244,0	200	-4,6	272,4
590	0	205,1	2200	-7,4	246,2	800	-2	273,2
200	3,8	205,3	200	-6,2	246,4	200	0,4	273,4
200	6,7	205,5	300	-7,4	246,7	5000	-5,6	278,4
260	10,5	205,7	200	0,4	246,9	700	-2,7	279,1
240	5,4	206,0	200	-0,5	247,1	6600	-5,7	285,7
2600	8,8	208,6	200	-2,3	247,3	1200	-0,5	286,9
300	1,6	208,9	200	-6,6	247,5	1300	1	288,2
2100	8,6	211,0	200	-4,2	247,7	800	-0,7	289,0
400	0,9	211,4	2600	-6,5	250,3	400	3,3	289,4
2900	8,1	214,3	200	-2,6	250,5	1800	8,2	291,2
400	1,6	214,7	500	1	251,0	400	7,2	291,6
800	4,9	215,5	400	5,4	251,4	300	1,2	291,9
1180	-1,4	216,6	300	0,6	251,7	500	1,7	292,4
420	-4,2	217,1	200	6,4	251,9	200	6,8	292,6
300	0	217,4	272	9,9	252,1	6500	6,5	299,1
620	5	218,0	282	0,9	252,4	200	4,3	299,3
580	0,4	218,6	346	-8,8	252,8	1400	6,8	300,7
1000	2,3	219,6	600	7,7	253,4	800	2,2	301,5
570	5,7	220,1	200	4,8	253,6	4200	6	305,7
280	0,3	220,4	200	4,5	253,8	500	0,8	306,2
950	-5,4	221,4	200	1,2	254,0	1200	-2,1	307,4
610	-1,9	222,0	200	0,4	254,2	400	1,2	307,8
590	-6,1	222,6	400	1,2	254,6	300	5,3	308,1
2200	-1,6	224,8	200	3,3	254,8	200	3,1	308,3
490	5	225,2	200	6,8	255,0	300	2,6	308,6
2810	-0,5	228,1	200	3,9	255,2	200	2,5	308,8
1100	2,2	229,2	200	5,6	255,4	600	0	309,4
550	5,4	229,7	400	2,5	255,8	1000	1,5	310,4
950	0	230,7	2900	-5,1	258,7	500	4,6	310,9
200	1,3	230,9	600	-2,9	259,3			

де i_1, i_2, \dots, i_n – крутизна елементів дільниці, що спрямляється.

Щоб розрахунки швидкості і часу руху поїзда по дільниці були достатньо точними, необхідно виконати перевірку можливості спрямлення групи елементів профілю за формулою

$$S_i \leq \frac{2000}{\Delta i}, \quad (2.31)$$

де S_i – довжина елемента, що спрямляється, м;

Δi – абсолютна величина різниці між ухилом спрямленої дільниці і ухилом елемента, що перевіряється, ‰, тобто $|i_c' - i_i|$.

Криві на спрямленій дільниці замінюються фіктивним підйомом, крутизна якого визначається за формулою

$$i_c'' = \frac{700}{S_c} \sum_{i=1}^n \frac{S_{крі}}{R_i}, \quad (2.32)$$

де $S_{крі}$ і R_i – довжина і радіус кривих в метрах спрямленої дільниці, м.

Крутизна спрямленої дільниці з урахуванням фіктивного підйому від кривої

$$i_c = i_c' + i_c''. \quad (2.33)$$

Елементи профілю, на яких розташовані станції, елементи з розрахунковим і швидкісним підйомами, а також елементи з найкрутішими спусками не спрямляються.

Результати спрямлення профілю колії наводимо в табл. 2.8. та рис. 2.8.

2.3.2 Розрахунок опору руху локомотива та складу

Величини опору руху локомотива ω_0' та складу ω_0'' визначаємо для всіх

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Таблиця 2.8 – Результати спрямлення профілю колії ділянки НД-В. – Ч.

Довжин а, м	Ухил, ‰	Пікет	Довжин а, м	Ухил, ‰	Пікет	Довжин а, м	Ухил, ‰	Пікет
1,04	450	0,45	1,9	1700	1,7	8,4	800	0,8
-1,03	670	0,67	6,5	790	0,79	5,13	1100	1,1
0,7	830	0,83	2,5	1190	1,19	7,8	1600	1,6
2,7	1930	1,93	5,9	2220	2,22	6,51	800	0,8
-10,77	440	0,44	4,64	700	0,7	4,6	1100	1,1
2,24	530	0,53	-0,3	400	0,4	3,46	500	0,5
8,6	2200	2,2	2,22	880	0,88	-0,93	800	0,8
2,16	1000	1	4,14	710	0,71	-2,46	1600	1,6
6,81	900	0,9	-3,1	610	0,61	2,33	600	0,6
8,8	2600	2,6	1,14	500	0,5	-5,6	5000	5
1,35	1100	1,1	-6,95	4400	4,4	-2,7	700	0,7
8,6	2100	2,1	-2,9	700	0,7	-5,7	6600	6,6
8,1	2900	2,9	-7,31	2700	2,7	-0,5	1200	1,2
4,9	800	0,8	-3,4	800	0,8	1	1300	1,3
-1,4	1180	1,18	-6,51	3146	3,146	-0,7	800	0,8
-2,45	720	0,72	3,32	1872	1,872	8,2	1800	1,8
2,78	1200	1,2	7,7	600	0,6	3,89	1400	1,4
2,3	1000	1	2,22	1200	1,2	6,5	8100	8,1
3,92	850	0,85	4,1	1200	1,2	2,2	800	0,8
-5,4	950	0,95	-5,1	2900	2,9	5,45	4700	4,7
-3,97	1200	1,2	-4,1	1000	1	-2,1	1200	1,2
-1,6	2200	2,2	-1	600	0,6	2	2000	2
5	490	0,49	8,42	3700	3,7	2,5	1500	1,5
-0,5	2810	2,81	3,9	900	0,9			

швидкостей дозволеного діапазону. Питомі сили відносять до 1 кН ваги поїзда, складу, вагона, локомотива.

Основний питомий опір локомотива в Н/кН підраховуємо за формулою

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot V + 0,0003 \cdot V^2, \quad (2.34)$$

Для розрахункової швидкості $V=24,2$ км/год

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot 24,2 + 0,0003 \cdot 24,2^2 = 2,32 \text{ Н/кН.}$$

Для розрахункової швидкості $V=33,9$ км/год

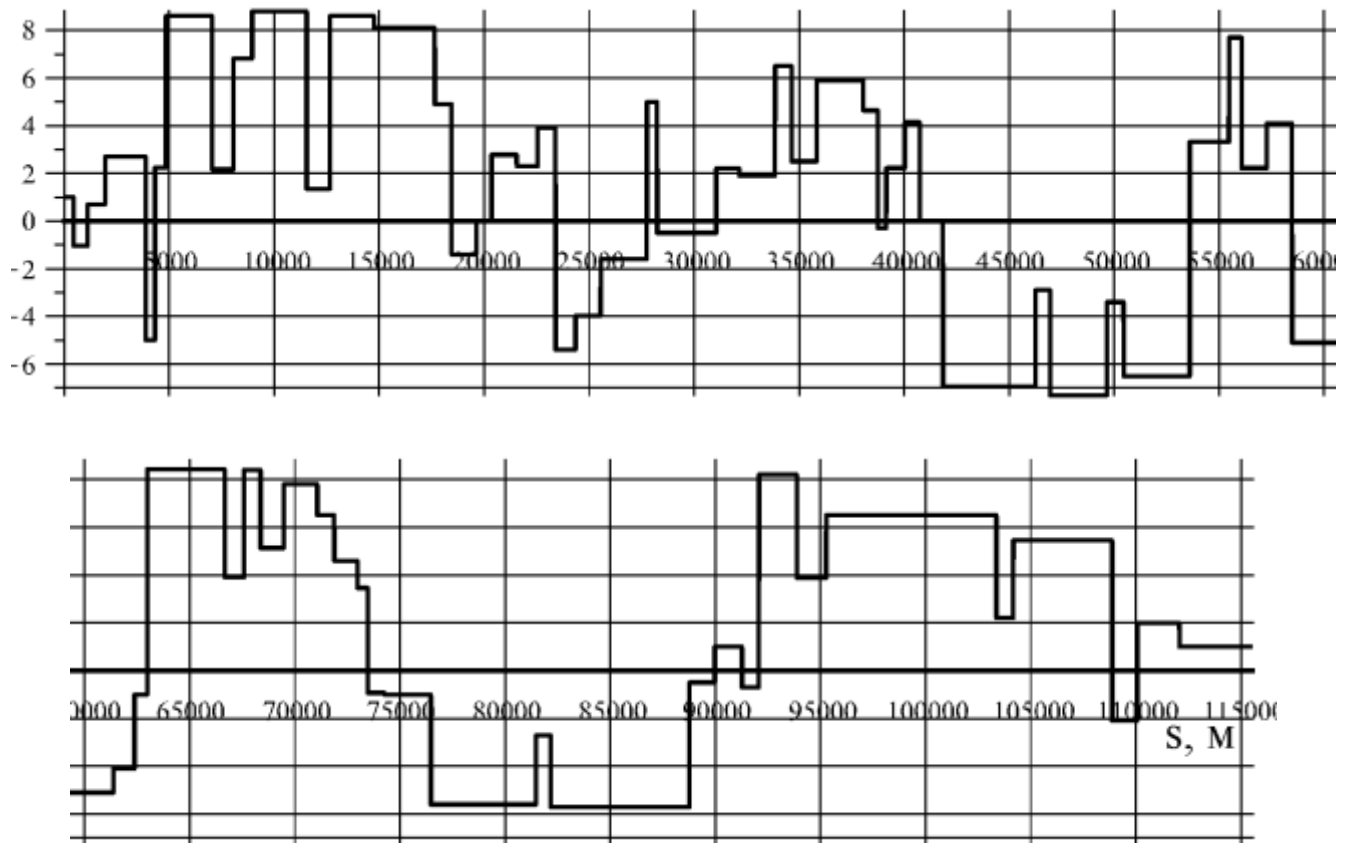


Рисунок 2.8 – Профіль колії ділянки НД-В. – Ч.

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot 33,9 + 0,0003 \cdot 33,9^2 = 2,58 \text{ Н/кН.}$$

Основний питомий опір складу в Н/кН з пасажирських вагонів визначаємо за формулою

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{8 + 0,18 \cdot V + 0,003 \cdot V^2}{q_{04}}, \quad (2.35)$$

де q_{04} – маса, яка приходить на одну колісну пару 4-вісного вагона, т/вісь,

$$q_{04} = \frac{64,5}{4} = 16,125 \text{ т/вісь.}$$

Для швидкості $V=24,2$ км/год

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{8 + 0,18 \cdot 24,2 + 0,003 \cdot 24,2^2}{16,125} = 1,58 \text{ Н/кН.}$$

Для швидкості $V=33,9$ км/год

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{8 + 0,18 \cdot 33,9 + 0,003 \cdot 33,9^2}{16,125} = 1,79 \text{ Н/кН.}$$

2.3.3 Побудова діаграм питомих рівнодіючих сил

Для побудови діаграми питомих рівнодіючих сил попередньо складаємо таблицю для трьох режимів ведення поїзда по прямій горизонтальній ділянці:

- для режиму тяги $f_g - \omega_0 = f_1(V)$;
- для режиму холостого ходу $\omega_{0x} = f_2(V)$;
- для режиму гальмування: при службовому регульовальному гальмуванні $\omega_{0x} + 0,5b_2 = f_3(V)$, при екстреному гальмуванні $\omega_{0x} + b_2 = f_4(V)$.

Таблиця заповнюється для швидкостей від 0 до конструкційної V_k через 10 км/год (1-й стовпчик); крім цього, в цей стовпчик заносяться також величини швидкостей, що відповідають характерним точкам тягової характеристики заданого локомотива.

У 2-й стовпчик заносяться значення сили тяги локомотива F_g для вказаних в 1-му стовпчику швидкостей. Значення сили тяги визначаються за розрахунковою тяговою характеристикою локомотива. Швидкості $V = 0$ км/год (момент зрушення поїзда з місця) відповідає значення сили тяги $F_{\text{дзруш}}$.

Основний питомий опір локомотива на холостому ході (при русі без струму) розраховуємо за формулою:

$$\omega_x = 2,4 + 0,011V + 0,00035V^2. \quad (2.36)$$

Основний питомий опір всього поїзда (при слідуванні його по прямій горизонтальній колії) при русі локомотива на холостому ході (без струму)

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

підраховують за формулою

$$\omega_{0x} = \frac{P\omega_x + Q\omega_0''}{P + Q}, \quad (2.37)$$

де P – розрахункова маса локомотива, m ;

Q – маса складу, m .

Питомі гальмівні сили поїзда в H/kH вираховують за формулою

$$b_z = 1000\varphi_{кр}g_p, \quad (2.38)$$

де $\varphi_{кр}$ – розрахунковий коефіцієнт тертя колодок в колесо при композиційних колодках:

$$\varphi_{кр} = 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2V + 150}, \quad (2.39)$$

– розрахунковий гальмівний коефіцієнт складу,

$$g_p = \frac{\sigma \sum k_p}{Q \cdot g} = \frac{\sigma \cdot k_{p4} n_4}{Q \cdot g}, \quad (2.40)$$

де n_4 – число осей в групах 4-вісних вагонів складу;

$$n_4 = 4 \cdot m_4; \quad (2.41)$$

k_{p4} – розрахункові сили натиснення гальмівних колодок на вісь 4-вісного вагона (при композиційних колодках $k_{p4} = 41,5 \text{ кН/вісь}$);

σ – доля гальмівних осей в складі, $\sigma = 1$.

Визначаємо розрахунковий гальмівний коефіцієнт складу:

$$g_p = \frac{1 \cdot 41,5 \cdot 20 \cdot 4}{20 \cdot 64,5 \cdot 9,81} = 0,262.$$

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Питома сповільнююча сила, яка діє на поїзд в режимі гальмування, $H/кН$:

- при службовому регульовальному гальмуванні $\omega_{0x} + 0,5b_2$;
- при екстреному гальмуванні $\omega_{0x} + b_2$.

Результати обчислень заносимо в розрахункову табл. 2.9. За даними цієї таблиці будуємо діаграму питомих рівнодіючих сил для режиму тяги $f_g - \omega_0 = f_1(V)$, режиму холостого ходу $\omega_{0x} = f_2(V)$ і режиму службового гальмування $\omega_{0x} + 0,5b_2 = f_3(V)$ (рис. 2.9, 2.10).

Таблиця 2.9 – Результати обчислень питомих рівнодіючих сил

V, км/ГОД	Модернізований тепловоз			Базовий тепловоз		
	$f_\partial - \omega_0$, Н/кН	ω_{0x} , Н/кН	$\omega_{0x} + 0,5b_2$, Н/кН	$f_\partial - \omega_0$, Н/кН	ω_{0x} , Н/кН	$\omega_{0x} + 0,5b_2$, Н/кН
0	46,07	-1,40	-48,63	52,12	-1,40	-48,63
10	37,26	-1,52	-45,97	43,60	-1,52	-45,97
20	30,13	-1,68	-43,93	38,28	-1,68	-43,93
30	24,34	-1,87	-42,35	26,71	-1,87	-42,35
40	19,37	-2,09	-41,10	20,51	-2,09	-41,10
50	16,84	-2,36	-40,13	16,46	-2,36	-40,13
60	14,88	-2,65	-39,38	13,84	-2,65	-39,38
70	12,02	-2,99	-38,81	11,76	-2,99	-38,81
80	10,27	-3,36	-38,39	10,32	-3,36	-38,39
90	9,85	-3,76	-38,10	9,19	-3,76	-38,10
100	8,73	-4,20	-37,93	8,27	-4,20	-37,93
110	7,62	-4,68	-37,86			
120	6,74	-5,19	-37,88			
130	6,11	-5,74	-37,99			
140	5,48	-6,32	-38,17			

2.3.4 Побудова кривих швидкості, часу ходу поїзда

У відповідності з ПТР при виконанні тягових розрахунків поїзд розглядається як матеріальна точка, в якій зосереджена вся маса поїзда і до якої прикладені зовнішні сили, діючи на реальний об'єкт (поїзд). Умовно приймають, що ця матеріальна точка розташована в середині поїзда.

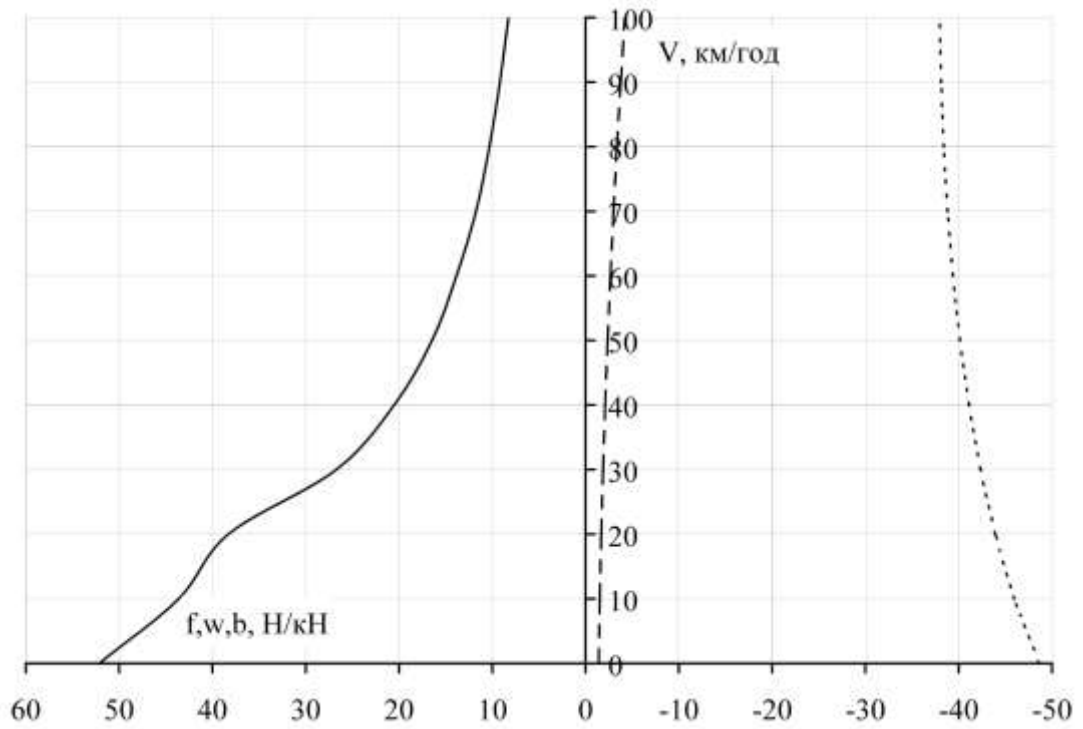


Рисунок 2.9 – Діаграма питомих рівнодіючих сил базового тепловоза

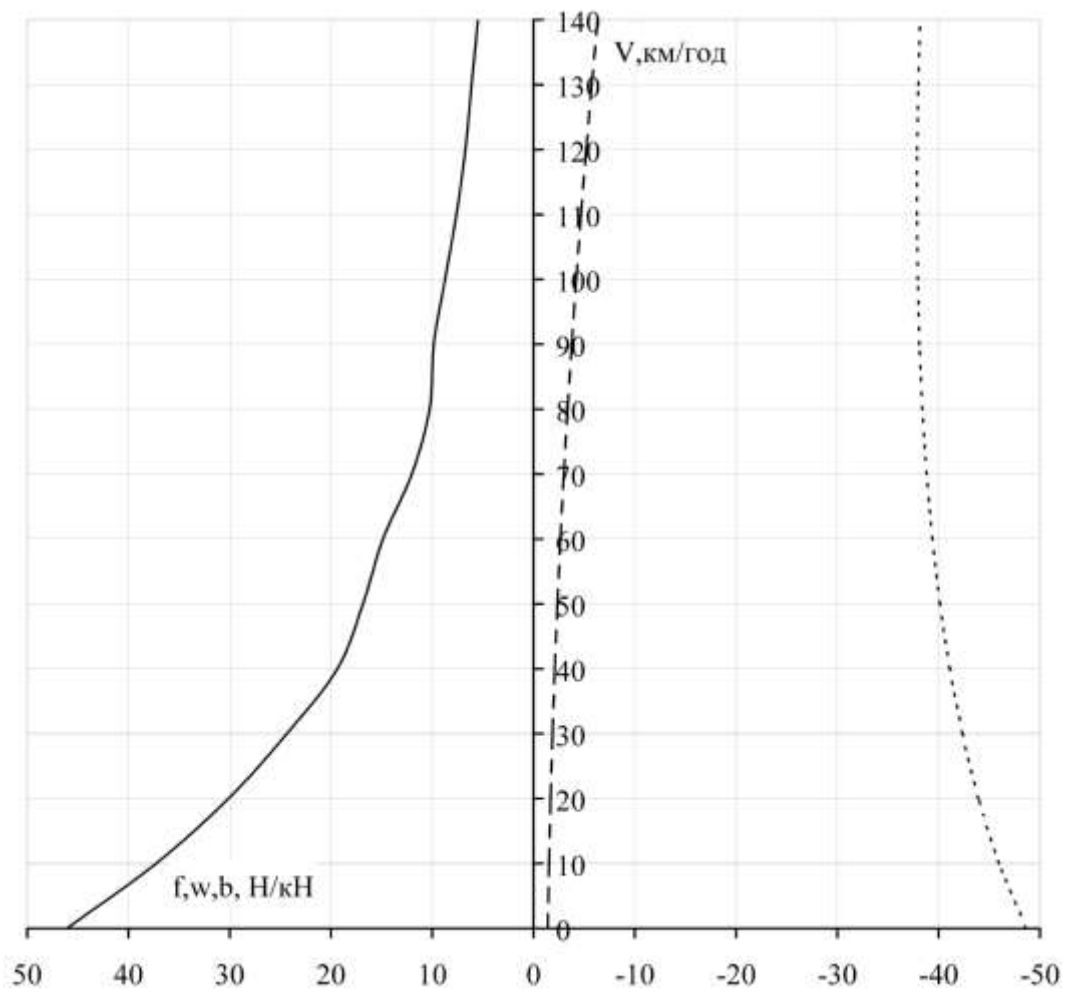


Рисунок 2.10 – Діаграма питомих рівнодіючих сил модернізованого тепловоза

Крива швидкості будуємо для руху поїзда в одному напрямку, виходячи з того, що поїзд відправляється зі ст. НД-В., проходить із зупинкою три станції і робить зупинку на ст. Ч.

При побудові кривої $V = f(S)$ необхідно врахувати обмеження найбільшої допустимої швидкості руху поїзда; варто приймати наступні обмеження:

- конструктивна швидкість пасажирських вагонів 140 км/год;
- найбільша допустима швидкість поїзда за міцністю колії 140 км/год;
- конструктивна швидкість локомотива 100 км/год для базового і 140 км/год для модернізованого;

Максимально допустима швидкість руху поїзда при побудові кривої $V = f(S)$ повинна прийматися як найменша з чотирьох перерахованих вище обмежуючих швидкостей, тобто 100 км/год та 140 км/год.

Якщо при побудові кривої швидкості поїзда на спусках швидкість намагається перевищити допустиму, то необхідно застосовувати службове регулювальне гальмування. В таких випадках рекомендується керуватися ПТР, у відповідності з яким дозволяється будувати криву швидкості $V = f(S)$ на таких спусках у вигляді горизонтальної лінії, яка проводиться нижче рівня допустимої швидкості на величину поправки ΔV .

При графічних побудовах вважаємо, що центр маси поїзда розташовується приблизно посередині поїзда по його довжині, осі станцій – в середині елементів, на яких вони розташовані, вхідні стрілки – відповідно на відстані 625 м від осі станції $l_{неі\delta} / 2$.

При побудові кривої часу $t = f(S)$ варто мати на увазі, що ця крива зростаюча. Тому, щоб не мати справи з дуже великим графіком, при досягненні ординати, яка рівна 10 хв, криву часу варто обірвати, точку обриву знести по вертикалі вниз на вісь абсцис і продовжувати побудову кривої часу знову від нуля. Таким чином, крива часу через кожні 10 хв обривається.

Після точок перетину кривої $t = f(S)$ з осями роздільних пунктів записуються часи ходу поїзда між двома сусідніми роздільними пунктами (з

					0032.180144.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

точністю до 0,1 хв), а також загальний час ходу поїзда по дільниці. Побудовані графічні залежності повинні бути позначені ($V = f(S), t = f(S)$).

Графіки побудови кривих швидкості, часу руху поїзда і струму зображені на рис. 2.11 та 2.12.

2.3.5 Визначення часу ходу поїзда по перегонах

Після побудови кривої часу визначається час ходу по перегонах і технічна швидкість поїзда V_T на дільниці. Всі дані зводяться в табл. 2.10, причому розрахункові дані беруться по кривій $t = f(S)$ з точністю до 0,1 хв, а прийняті для графіка руху поїздів часи ходу по перегонах округлюються з точністю до 1 хв.

Таблиця 2.10 – Розрахунок часу ходу поїзда по перегонах

Перегон	Довжина, м	Час ходу, хв	
		під базовим тепловозом	під модернізованим тепловозом
1	18420	16,2	15,7
2	20963	14,7	13,6
3	32501	23,4	19,1
4	40401	28,5	25,5
По ділянці	112285	82,8	73,9

Технічна швидкість руху поїзда по дільниці (км/год)

$$V_T = \frac{L \cdot 60}{\sum t_i}, \quad (2.42)$$

де t_i – відповідно часи ходу поїзда по перегонах заданої ділянки, год;

L – довжина ділянки, км (відстань між осями граничних станцій ділянки)

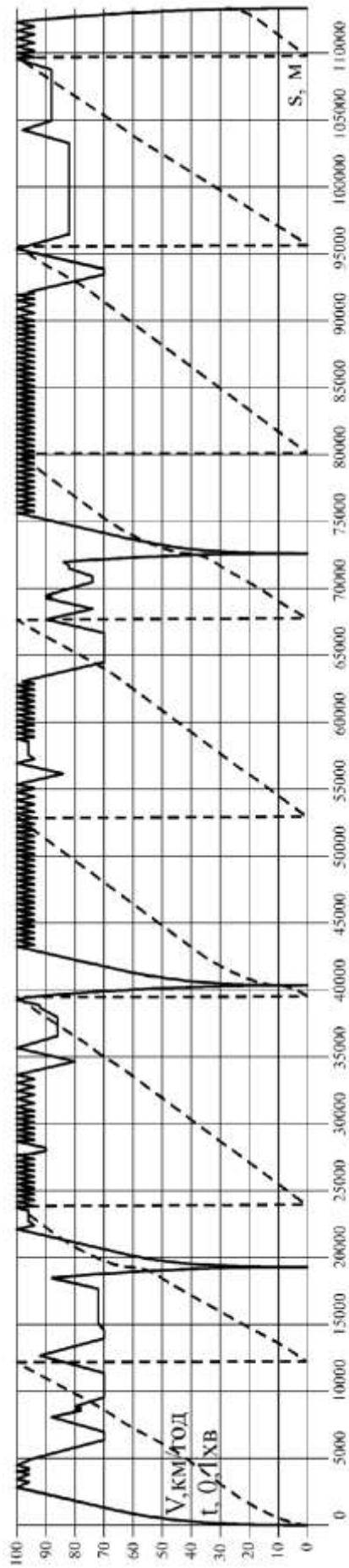


Рисунок 2.10 – Криві швидкості та часу поїзда під базовим тепловозом

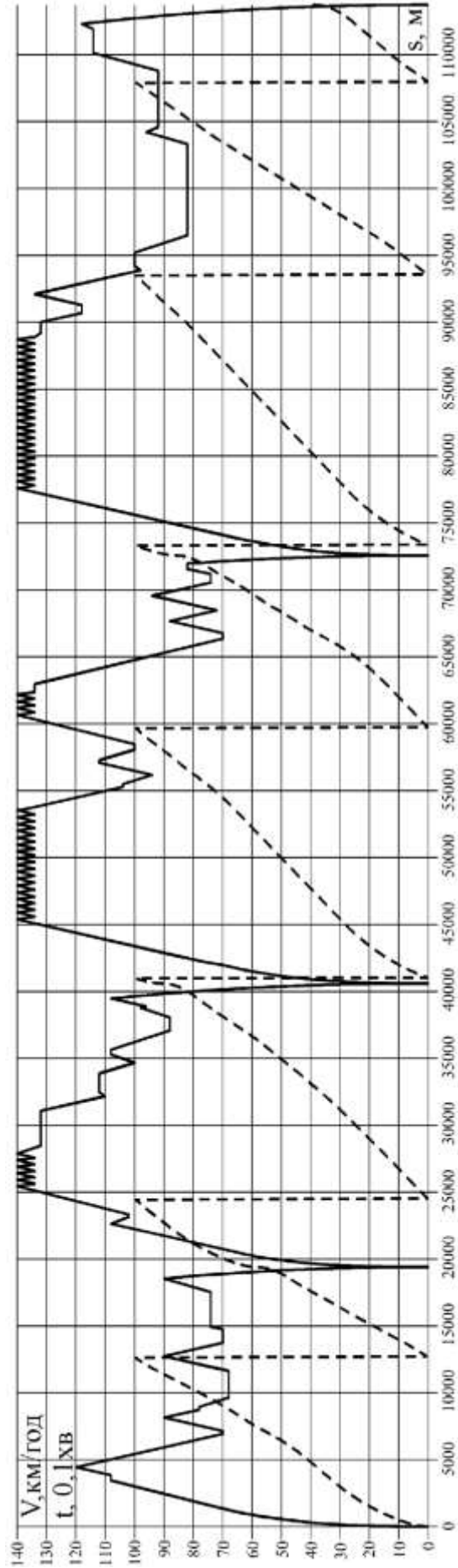


Рисунок 2.11 – Криві швидкості та часу поїзда під модернізованим тепловозом

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032.180144.000.03MP.ПЗ

$$V_m^{\bar{\delta}} = \frac{112,285 \cdot 60}{82,8} = 81,4 \text{ км/Год};$$

$$V_m^M = \frac{112,285 \cdot 60}{73,9} = 91,2 \text{ км/Год.}$$

Визначимо різницю

$$\delta = \left| \frac{V_m^{\bar{\delta}} - V_m^M}{V_m^{\bar{\delta}}} \right| \cdot 100; \quad (2.43)$$

$$\delta = \left| \frac{81,4 - 91,2}{81,4} \right| \cdot 100 = 12 \%$$

2.3.6 Визначення витрат енергоресурсів локомотивом

Витрати дизельного пального тепловозом на заданій дільниці, кг, визначають за формулою:

$$E = G \cdot t_m + g_x \cdot t_x, \quad (2.44)$$

де G – витрата дизельного пального тепловозом на режимі тяги, що відповідає 15-му положенню ручки контролера, $G = 11,2$ кг/хв;

t_T – сумарний час роботи тепловоза на режимі тяги, хв;

g_x – витрата пального тепловозом при вимкненому струмі (режимі холостого ходу і гальмування), $g_x = 0,25$ кг/хв;

t_x – сумарний час руху тепловоза на режимі холостого ходу і гальмування, хв.

Час роботи тепловоза t_T і t_x визначається по кривій часу $t = f(S)$ і відмітках про зміну режиму роботи тепловоза на кривій швидкості $V = f(S)$. Для базового тепловоза $t_T = 66,7$ хв, $t_x = 11,8$ хв; модернізованого – $t_T = 64,7$ хв, $t_x = 4,5$ хв;

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

$$E^{\bar{\sigma}} = (11,2 \cdot 66,7 + 0,25 \cdot 11,8) \cdot 2 = 1500 \text{ кг};$$

$$E^M = (11,2 \cdot 64,7 + 0,25 \cdot 4,5) \cdot 2 = 1451 \text{ кг}.$$

Питома витрата пального на вимірювач, кг/10⁴ ткм

$$e = \frac{E}{Q \cdot L} \cdot 10^4, \quad (2.45)$$

де Q – маса складу, t ;

L – довжина дільниці, для якої виконані тягові розрахунки, $км$ (відстань між осями граничних станцій заданої дільниці).

$$e^{\bar{\sigma}} = \frac{1500}{1290 \cdot 112,285} \cdot 10^4 = 103,6 \text{ кг/10}^4 \text{ ткм};$$

$$e^M = \frac{1451}{1290 \cdot 112,285} \cdot 10^4 = 100,2 \text{ кг/10}^4 \text{ ткм};$$

Визначимо різницю

$$\delta = \left| \frac{e^{\bar{\sigma}} - e^M}{e^{\bar{\sigma}}} \right| \cdot 100; \quad (2.46)$$

$$\delta = \left| \frac{103,6 - 100,2}{103,6} \right| \cdot 100 = 3,3 \text{ \%}.$$

2.4 Аналітичне розв'язання задачі стійкості локомотива в кривих ділянках колії

Розв'язування задач динамічного вписування передбачає визначення максимальної швидкості руху локомотива в кривій, при якій забезпечуються безпека руху й комфортабельність для обслуговуючого персоналу і пасажирів. Безпека руху оцінюється критеріями безпеки, які характеризують величини бічних зусиль на рейки та пружне відтискання рейок під дією цих зусиль.

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Надмірна величина бічного зусилля може призвести до сповзання колеса на рейку та сходу з колії, а велика величина відтискання – до розшивання колії.

При динамічному вписуванні визначаються горизонтальні зусилля, що передаються колесами локомотивного екіпажа на головки рейок. На рухомий локомотив у кривій діє множина сил, весь комплекс яких врахувати не завжди вдається. Тому динамічне вписування виконують з деякими припущеннями, оскільки враховуються тільки такі сили:

- горизонтальні складові сили тертя бандажів об рейки $F_1 - F_6$;
- відцентрова сила локомотива C ;
- горизонтальна складова ваги локомотива, що виникає від підвищення зовнішньої рейки в кривій C_1 ;
- бічні реакції з боку рейок від дії коліс, що в них упираються (напрямні зусилля) $Y_1 - Y_6$;
- бічні тиски коліс на головки рейок $Y'_1 - Y'_6$, що являють собою різницю між напрямними зусиллями й силами тертя бандажів об рейки;
- повертаючі сили та моменти за наявності в екіпажі повертаючих пристроїв, а також моменти тертя в опорах.

Реакції з боку головок рейок є зовнішніми силами, що направляють рух екіпажа в кривій. Цей рух може бути подано у вигляді безперервної суми двох рухів – поступального уздовж подовжньої осі екіпажа та обертального навколо точки, так званого центру повороту або полюса візка Ω . Відстань від осей колісних пар до центру повороту візка називають полюсною відстанню.

Залежно від швидкості руху тепловоза в кривій візок може займати або положення найбільшого перекосу, коли перша колісна пара притиснена до зовнішньої рейки, а задня – до внутрішньої (рис. 2.12, лінія НП), або положення вільної установки, коли задня колісна пара не передає зусилля на рейки (рис. 2.12, лінія ВУ), або положення високих швидкостей (установка по хорді), коли обидві колісні пари притиснуті до зовнішньої рейки (рис. 2.12, лінія ВШ). Перпендикуляри, опущені з центру кривої на лінії баз візків, дають положення центрів повороту останніх.

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

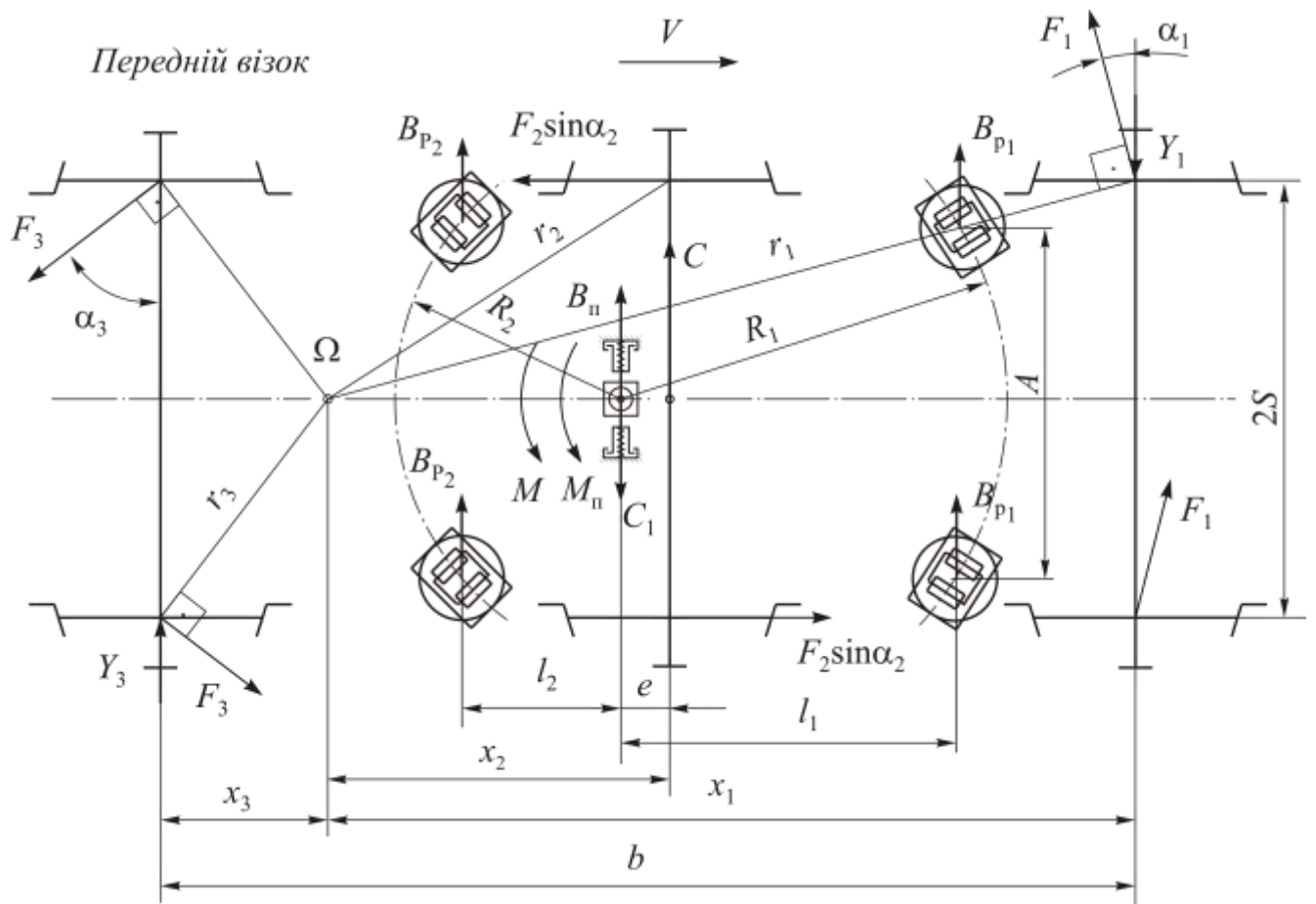


Рисунок 2.13 – Схема візка тепловоза 2ТЕ116

Ширину колії зазорів $2\sigma + \Delta$ при динамічному вписуванні приймаємо мінімальною з урахуванням припустимих відхилень від номінальних розмірів на прямих ділянках колії і на кривих радіусом 350 м і більше при швидкості від 120 до 140 км/год

$$2\sigma = 1520_{-4}^{+6} - \left(1440_{-1}^{+3} + 2 \cdot 33_{-5}^0 \right).$$

Рівняння рівноваги для схеми з пружним зв'язком між кузовом і візками тепловозів 2ТЕ116 для переднього візка мають вигляд

$$\begin{cases} -Y_1 + C - C_1 + 2F_1 \cos \alpha_1 - 2F_3 \cos \alpha_3 + Y_3 = 0, \\ Y_1 x_1 - C x_{II} + C_1 x_{II} - 2F_1 \eta - 2F_2 \sin \alpha_2 S - 2F_3 r_3 - M_{II} - M + Y_3 x_3 = 0; \end{cases} \quad (2.48)$$

$$x_1 = \frac{3,7}{2} + \frac{1000}{3,7} \cdot 0,007 = 3,36 \text{ м.}$$

Провівши деякі перетворення отримаємо

$$x_3 = B - x_1; \quad (2.49)$$

$$x_3 = 3,7 - 3,36 = 0,33 \text{ м};$$

$$x_2 = \frac{B}{2} - x_3; \quad (2.50)$$

$$x_2 = \frac{3,7}{2} - 0,33 = 1,51 \text{ м};$$

$$x_{\text{ц}} = x_2 - 0,185; \quad (2.51)$$

$$x_{\text{ц}} = 1,33 \text{ м}.$$

Значення $\cos\alpha_i$, r_i визначаємо за допоміжними кривими $\cos\alpha_i = f(X_i)$, $r_i = f(X_i)$, наведені на рис. 2.14.

З рис. 2.14 знаходимо значення $r_1=3,45$ мм, $r_2=1,73$ мм, $r_3=0,936$ мм, $\cos\alpha_1=0,977$, $\cos\alpha_2=0,911$, $\cos\alpha_3=0,311$.

Визначення сил, які входять до рівняння рівноваги. Середнє значення сили тертя в опорних точках коліс рахуємо рівним для всіх колісних пар тепловоза. Приблизно воно може бути обчислено за формулою

$$2 \cdot F_i = 2 \cdot \Pi \cdot f_{\text{тр}}, \quad (2.52)$$

де 2Π – статичний тиск від колісної пари на рейки, $2 \cdot \Pi = 221$ кН;

$f_{\text{тр}}$ – коефіцієнт тертя між рейками та бандажами, $f_{\text{тр}} = 0,25$.

$$2F_1 = 2F_2 = 2F_3; \quad (2.52)$$

$$2F_1 = 2F_2 = 2F_3 = 221 \cdot 0,25 = 55,4 \text{ кН}.$$

Відцентрова сила, яка приходить на візок С, кН

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

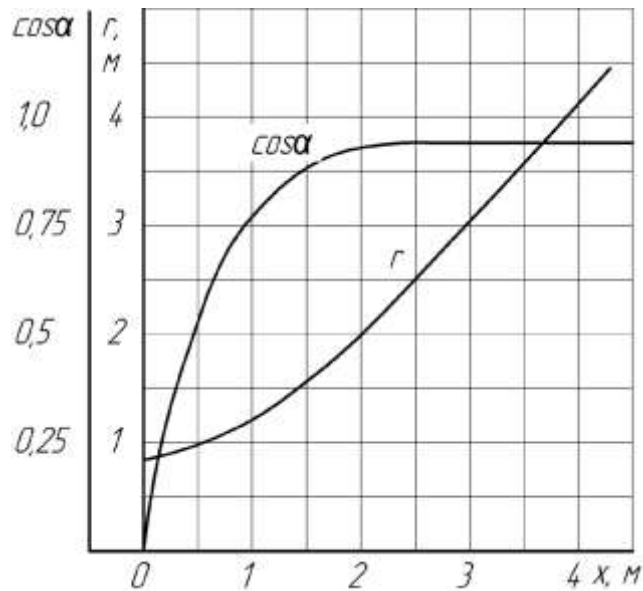


Рисунок 2.14 – Графік залежностей $r_i = f(X_i)$ і $\cos\alpha_i = f(X_i)$

$$C = \frac{G \cdot V^2}{3,6^2 \cdot g \cdot R}, \quad (2.53)$$

де G – частина ваги тепловоза, яка приходить на візок, кН;

g – прискорення вільного падіння, м/с², $g = 9,81$ м/с²;

R – радіус кривої для динамічного вписування, м.

$$G = 221 \cdot 3 = 663 \text{ кН}, \quad (2.54)$$

Сила від підвищення зовнішньої рейки, кН

$$C_1 = \frac{G \cdot h}{2 \cdot S}, \quad (2.55)$$

де h – підвищення зовнішньої рейки, мм, $h = 100$ мм;

S – половина відстані між колами кочення бандажів коліс, м, $S = 0,8$ м.

$$C_1 = \frac{663 \cdot 0,1}{2 \cdot 0,8} = 41,5 \text{ кН}.$$

Визначення сумарних моментів сил тертя і повертаючих моментів.

Обертний момент M_n , що з'являється внаслідок різниці сил, створюваних

передніми і задніми опорами, визначається за формулою

$$M_n = B_{p1} \cdot l_1 - B_{p2} \cdot l_2. \quad (2.56)$$

Так як опори розташовуються на різній відстані від поперечної осі візка ($l_1 = 1230$ мм, $l_2 = 615$ мм), то при повороті останньої відхилення обох пар опор будуть різними.

Для визначення повертають сил B_{p1} та B_{p2} необхідно знати відхилення передніх d_1 і задніх d_2 опор візків. Вони визначаються за формулами:

$$d_1 = d + \alpha_{\Pi} \cdot l_1; \quad (2.57)$$

$$d_2 = d - \alpha_{\Pi} \cdot l_2. \quad (2.58)$$

Задаючись величиною віднесення кузова (що дорівнює величині вільного ходу шкворневого пристрою) $d = 20$ мм, визначаємо відхилення передніх і задніх опор:

$$d_1 = 20 + 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1230 = 24,5 \text{ мм};$$

$$d_2 = 20 + 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot 615 = 17,7 \text{ мм}.$$

За графіком рис. 2.15 визначаємо повертаючі сили $2B_{p1} = 35$ кН, $2B_{p2} = 14$ кН. Повертаючий момент

$$M_B = B_{p1} \cdot l_1 + B_{p2} \cdot l_2 = 35 \cdot 1,23 - 14 \cdot 0,615 = 34,4 \text{ кН}.$$

Кут повороту візка

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\frac{L}{2} - X_2}{R_{\partial}}, \quad (2.59)$$

де L – база тепловоза.

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

двох і система розв'язується.

При рішенні системи рівнянь отримуємо $Y_1 = 123$ кН, $C = 128$ кН.

При такій відцентровій силі швидкість переходу з установки найбільшого перекосу на вільну установку буде рівна

$$V = \sqrt{\frac{3,6^2 \cdot 9,81 \cdot R_{\partial} \cdot C}{G}}; \quad (2.61)$$

$$V = \sqrt{\frac{3,6^2 \cdot 9,81 \cdot 800 \cdot 126}{663}} = 141 \text{ км/год.}$$

Дана швидкість є більша конструкційної, тому розрахунок в зоні вільної і хордової установок дадуть ще більші значення швидкостей. Отже, подальші розрахунки не ведемо.

Оцінка динамічних якостей тепловоза. Найбільшу (допускається) швидкість руху локомотива в кривій визначаємо з умови комфортабельності за найбільшою величиною непогашеного прискорення

$$V_{\partial on} = \sqrt{R_{\partial} (0,08h + 13\alpha_n)}, \quad (2.62)$$

де h – підвищення зовнішньої рейки;

α_n – непогашене прискорення.

Критерій α_n розглядається як критерій комфортабельності. Дослідженнями встановлено, що незгашене прискорення в межах $0,4-0,8$ м/с² переноситься людиною задовільно, а 1 м/с² – вже задовільно лише при небагаторазовому та нетривалому впливі.

Для розрахунків приймаємо значення $\alpha_n = 0,95$ м/с².

$$V_{\partial on} = \sqrt{800(0,08 \cdot 150 + 13 \cdot 0,95)} = 140 \text{ км/год.}$$

Для положення найбільшого перекосу, коли задня колісна пара притиснута

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

до внутрішньої рейки, $Y_3 \neq 0$. Задано швидкостями від 0 до 140 км/год – конструкційної швидкості з кроком 5 км/год. В такому діапазоні будемо вести розрахунки. Знайдемо значення сил Y_1, Y_3, C .

Задаючись значеннями відцентрової сили C в залежності від швидкості руху локомотива, ми отримаємо значення бокової реакції зі сторони внутрішньої рейки. Дані записую в табл. 2.11.

Таблиця 2.11 – Розрахунок параметрів динамічного вписування

V , км/год	C , кН	Y_1 , кН	Y_3 , кН	Y'_1 , кН	Y_p , кН	K_{zd}	Y'_{10} , кН
1	2	3	4	5	6	7	8
0	65,64	70,29	0,00	37,94	10,24	1,00	37,94
5	65,72	70,20	0,16	38,02	10,32	1,01	38,40
10	65,94	69,93	0,65	38,24	10,54	1,02	39,00
15	66,31	69,48	1,47	38,61	10,91	1,03	39,76
20	66,82	68,85	2,61	39,12	11,42	1,04	40,68
25	67,48	68,05	4,08	39,78	12,08	1,05	41,77
30	68,29	67,06	5,88	40,59	12,89	1,06	43,03
35	69,25	65,89	8,00	41,55	13,85	1,07	44,45
40	70,35	64,54	10,45	42,65	14,95	1,08	46,06
45	71,60	63,01	13,23	43,90	16,20	1,09	47,85
50	72,99	61,31	16,34	45,29	17,59	1,10	49,82
55	74,54	59,42	19,77	46,84	19,14	1,11	51,99
60	76,23	57,35	23,52	48,53	20,83	1,12	54,35
65	78,07	55,11	27,61	50,37	22,67	1,13	56,91
70	80,05	52,68	32,02	52,35	24,65	1,14	59,68
75	82,18	50,08	36,76	54,48	26,78	1,15	62,66
80	84,46	47,29	41,82	56,76	29,06	1,16	65,84
85	86,89	44,33	47,21	59,19	31,49	1,17	69,25
90	89,46	41,18	52,93	61,76	34,06	1,18	72,88
95	92,18	37,86	58,97	64,48	36,78	1,19	76,73

Продовження табл. 2.11

1	2	3	4	5	6	7	8
100	95,05	34,35	65,34	67,35	39,65	1,20	80,82
105	98,06	30,67	72,04	70,36	42,66	1,21	85,14
110	101,22	26,81	79,06	73,52	45,82	1,22	89,70
115	104,53	22,76	86,42	76,83	49,13	1,23	94,50
120	107,99	18,54	94,09	80,29	52,59	1,24	99,55
125	111,59	14,14	102,10	83,89	56,19	1,25	104,86
130	115,34	9,56	110,43	87,64	59,94	1,26	110,42
135	119,23	4,79	119,09	91,53	63,83	1,27	116,25
140	123,28	-0,15	128,07	95,58	67,88	1,28	122,34

Коефіцієнт горизонтальної динамічності знаходимо за формулою:

$$K_{20} = 1 + 0,002 \cdot V. \quad (2.63)$$

Боковий тиск колеса на рейки Y'_{10} , кН, визначаємо за формулою:

$$Y'_{10} = (Y_1 - F_1) \cdot K_{20}. \quad (2.64)$$

За отриманими даними з рівнянь будемо залежності $Y_1=f(V)$, $Y_3=f(V)$, $Y'_{10}=f(V)$ зображені на рис. 2.16.

Всі розрахунки виконано за складеною математичною моделлю, наведеною в дод. А.

Отже, було зроблено оцінку динамічних якостей тепловоза і зроблено висновок, сила бічного тиску не перевищує значення 100 кН, а величина рамного тиску значення $0,6 \cdot Y_1$, тобто $Y_p = 67 < [123,3 \cdot 0,6 = 74]$. Виходячи з цього робимо висновок, що в експлуатації тепловоз може рухатись по кривих, радіус яких не менше 800 м з конструкційною швидкістю.

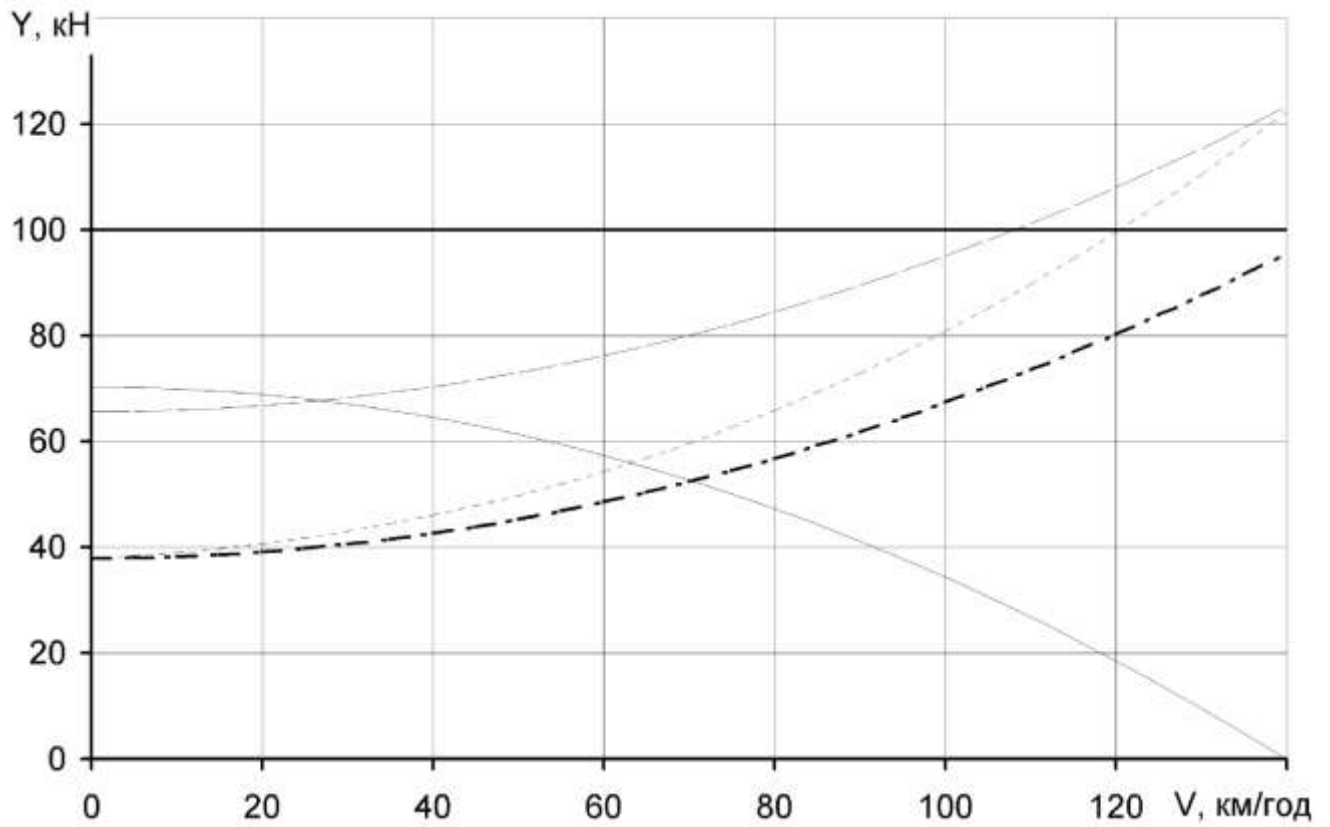


Рисунок 2.16 – Динамічний паспорт локомотива в горизонтальній площині:

----- $Y_1' = f(V)$; - - - - $Y_1 = f(V)$; ······ $Y_{1\delta} = f(V)$; ——— $Y_3 = f(V)$

3 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ТЕПЛОВОЗА СЕРІЇ 2ТЕ116

3.1 Визначення факторів ефективності

Ефективність виробництва – це складне і багатогранне явище. В процесі виробництва здійснюється виробниче споживання вказаних ресурсів з метою отримання певних споживних вартостей, спроможних задовольнити відповідні потреби людей. Отже, будь-яке виробництво передбачає витрати ресурсів і одержання певних результатів. Але на однакову кількість витрачених ресурсів підприємства можуть одержувати далеко не однакові за величиною результати. В такому випадку кажуть, що підприємства ведуть виробництво з різною ефективністю (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Формування ефективності виробництва

Ефективність – це економічна категорія, що відображає співвідношення між одержаними результатами і витраченими на їх досягнення ресурсами, причому при вимірюванні ефективності ресурси можуть бути представлені або в певному обсязі за їх первісною (переоціненою) вартістю (застосовувані ресурси), або частиною їх вартості у формі виробничих витрат (виробничо спожиті ресурси). Якщо при цьому врахувати, що результати виробництва не лише є різноманітними, але й можуть бути представлені в різних формах: вартісній, натуральній, соціальній, то стає очевидною необхідність в ідентифікації категорії ефективності відповідно до тих аспектів діяльності підприємства, які важливо проаналізувати й оцінити. Враховуючи специфіку сільськогосподарського виробництва, доцільно розрізняти такі види ефективності: технологічну,

економічну і соціальну.

Технологічна ефективність – це результат взаємодії факторів виробництва, що характеризує досягнуту продуктивність.

Досягнутий рівень технологічної ефективності виробництва істотно впливає на економічну ефективність, насамперед через існування постійних витрат, на які, як відомо, виробники в короткостроковому періоді впливати не можуть. Важливо й те, що показники технологічної ефективності відображають специфіку й особливості господарства, пов'язані з функціонуванням у відповідній галузі основного засобу виробництва – локомотивів та залізниць як засобів виробництва.

Економічна ефективність – це таке співвідношення між ресурсами і результатами виробництва, за якого отримують вартісні показники ефективності виробництва. При цьому можливі три варіанти вказаного співвідношення:

- ресурси і результати виражені у вартісній формі;
- ресурси – у вартісній, а результати – у натуральній формі;
- ресурси – у натуральній, а результати – у вартісній формі.

Вимірювальну систему економічної ефективності виробництва доцільно будувати таким чином, щоб вона була здатна повністю розкривати дві взаємопов'язані і взаємодоповнюючі результативні сторони діяльності підприємств – раціональність використання ними залізниць через показники загального ефекту, й економічність виробництва, показники якої розкривали б, якою ціною одержано цей ефект.

З огляду на сказане для оцінки ефективності діяльності підприємств слід широко використовувати показники ефективності використання авансованого капіталу, показники собівартості продукції і продуктивності праці, фондівіддачі виробничих фондів.

Проте для всебічної оцінки ефективності виробництва та її поглибленого аналізу необхідно також широко використовувати традиційні показники рентабельності. В них акумулюється вплив усіх факторів – природних, економічних і організаційно-господарських. Водночас на них істотно відбивається дія зовнішнього середовища, насамперед тих його ланок, на які

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

аграрні підприємства не мають будь-якого впливу.

Соціальна ефективність – поняття, що відображає поліпшення соціальних умов життя людей. Соціальна ефективність є, по суті, похідною від економічної ефективності. Вона, за однакових інших умов, буде тим вищою, чим вищого рівня економічної ефективності досягнуто. Соціальна ефективність не завжди може бути кількісно визначена. Проте досить ґрунтовно про досягнуту соціальну ефективність можна судити за такими показниками, визначеними у динаміці, як питома вага прибутку, направлено на соціальні заходи, в загальній масі чистого прибутку; величина цього прибутку в розрахунку на одного середньооблікового працівника підприємства.

3.2 Порівняння витрат енергоресурсів за результатами поїздки

В магістерській дипломній роботі проведено розрахунок поїздки по ділянці НД-В.–Ч. Розрахунок проводився на математичній моделі.

Витрата дизельного палива при поїдці з базовим тепловозом серії 2ТЕ116 склала 1500 кг; при поїдці з модернізованим тепловозом – 1451 кг.

Для визначення економічного ефекту необхідно враховувати наступні складові, що являються прямими витратами:

- матеріальні витрати, B_m ;
- витрати на оплату праці, $B_{з/п}$;
- відрахування до соціальних фондів $B_{сс}$;
- витрати електроенергії, $B_{ел.е.}$.

Визначаємо витрати на впровадження запропонованої модернізації, а саме встановлення тягового осьового редуктора з передаточним відношенням $i = 3,24$:

$$B_m = C \cdot m, \quad (3.1)$$

де C – ціна редуктора та вартість його встановлення, $C = 7,5$ тис грн;

m – кількість впроваджуваних одиниць, $m = 12$ кг.

$$B_m = 7,5 \cdot 12 = 90000,00 \text{ грн.}$$

					0032.180144.000.03МР.ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Витрати на оплату праці по встановленню системи:

$$B_{з/н} = ГТС \cdot t, \quad (3.2)$$

де $ГТС$ – годинна тарифна ставка слюсаря 5-го розряду, $ГТС = 22,64$ грн;

t – фактичний час роботи по встановленню системи, $t = 40$ год.

$$B_{з/н} = 22,64 \cdot 40 = 905,60 \text{ грн.}$$

Відрахування до соціальних фондів:

$$B_c = B_{з/н} \cdot 0,3761 ; \quad (3.3)$$

$$B_c = 905,60 \cdot 0,3761 = 340,60 \text{ грн.}$$

Витрати електроенергії при встановленні:

$$B_{ел.е.} = Ц_{ел.е.} \cdot \kappa \cdot t , \quad (3.4)$$

де $Ц_{ел.е.}$ – ціна 1 кВт·год електроенергії, $Ц_{ел.е.} = 1,34$ грн;

κ – електрична потужність обладнання, $\kappa = 13,760$ кВт;

t – час встановлення, $t = 20$ год.

$$B_{ел.е.} = 1,34 \cdot 13,760 \cdot 20 = 368,77 \text{ грн.}$$

Прямі витати:

$$B_{нр} = B_{з/н} + B_c + B_{ел.е.}$$

$$B_{нр} = 905,60 + 340,60 + 368,77 = 1614,97 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання загально виробничого $B_{з.в.}$ та адміністративного $B_{а.п.}$ персоналу:

$$B_{з.в.} = B_{нр} \cdot 0,45, \quad (3.5)$$

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

$$B_{з.в.} = 1614,97 \cdot 0,45 = 726,73 \text{ грн};$$

$$B_{a.n.} = B_{np} \cdot 0,55; \quad (3.6)$$

$$B_{a.n.} = 1614,97 \cdot 0,55 = 888,23 \text{ грн.}$$

Вартість встановлення системи:

$$K = B_{np} + B_{з.в.} + B_{a.n.} + B_m; \quad (3.7)$$

$$K = 1614,97 + 726,73 + 888,23 + 90000,00 = 93256,93 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність за одну поїздку:

$$E = C_1 - C_2, \quad (3.8)$$

де C_1 – вартість витрат на дизельне паливо за поїздку з базовим тепловозом;

C_2 – вартість витрат на дизельне паливо за поїздку з модернізованим тепловозом.

$$C_1 = 26,50 \cdot 1500 = 39750,00 \text{ грн.}$$

$$C_2 = 26,50 \cdot 1451 = 38451,50 \text{ грн.}$$

$$E = 39750,00 - 38451,00 = 1298,50 \text{ грн.}$$

Окупність установки в кількості поїздок можна оцінити за формулою:

$$n = \frac{K}{E}; \quad (3.9)$$

$$n = \frac{93256,93}{1298,50} = 71,8,$$

приймаємо $n=72$ поїздки.

З врахуванням довжини ділянки 112,285 км, можна визначити пробіг, при

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

якому система окупиться.

$$L = 72 \cdot 112,285 = 8085 \text{ км.}$$

Висновки до розділу. Розрахунок економічного ефекту від модернізації передачі потужності тепловоза серії 2TE116 показав, що у результаті її впровадження економічний ефект буде становити 1298,50 грн при довжині ділянки близько 110 км. Оскільки строк окупності даної системи в роках точно оцінити складно, проведено оцінку строку окупності в пробігу. Він складає 8085 км. Впровадження даної модернізації є доцільним економічно обґрунтованим рішенням.

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

ВИСНОВКИ

Станом на сьогодні одним з основних питань залізниць України та приватних компаній країни залишається високий рівень зношеності парку тягового рухомого складу. Його оновлення шляхом заміни локомотивів, які вичерпали свій нормативний термін експлуатації, сучасними або більш досконалими тепловозами нового покоління має підвищити конкурентоспроможність і рентабельність залізничних перевезень. Але слід зауважити, що водночас практична реалізація цього способу оновлення основних перевізних фондів залізниць пов'язана з великими капіталовкладеннями при розвитку виробничих потужностей з придбанням новітнього рухомого складу та з тривалими часовими термінами на організацію серійного виробництва нових локомотивів, відповідних сучасним стандартам. З метою покращення технічного стану парку локомотивів з одночасним освоєнням виробництва нових, проводиться глибока модернізація парку рухомого складу з продовженням терміну корисного використання при дотриманні сучасних вимог на економію паливно-мастильних матеріалів, екологічності й надійності.

З урахуванням вищевказаного, у першому розділі магістерської дипломної роботи розглянуто основні напрями з модернізації тягового рухомого складу нашої та інших країн. На основі проведеного аналізу розглянутих матеріалів ми зробили висновки, що першочерговими задачами з модернізації тепловозів є:

- економія та зниження витрати паливно-мастильних матеріалів, в т.ч. на експлуатаційну роботу;
- зменшення трудомісткості планових технічних обслуговувань та поточних ремонтів;
- зростання міжремонтних пробігів при переобладнанні виробництва поточних і капітальних ремонтів зі зменшенням кількості непланових ремонтів;
- забезпечення санітарно-гігієнічних та ергономічних вимог з поліпшенням умов роботи локомотивних і ремонтних бригад;
- виконання перспективних вимог з вмісту шкідливих речовин і рівня димності відпрацьованих газів та ін.

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

При огляді різносторонніх варіантів модернізації тягового рухомого складу з урахуванням браку тепловозів наявного парку Укрзалізниці для забезпечення пасажирського руху, в магістерській роботі запропонована модернізація передачі потужності на базі тепловоза серії 2TE116, що забезпечить пасажирські перевезення в експлуатації зі збільшеною технічною швидкості за рахунок підвищення конструкційної швидкості, яка узгоджена з конструкційною швидкістю пасажирських вагонів, обладнаних візками типу КВЗ-5.

Для вказаних даних технічного завдання на тепловоз проведено розрахунки техніко-економічних характеристик: параметрів тягового осьового редуктора, електротягових характеристик КМБ базового тепловоза з урахуванням зміни передаточного відношення, тягової та економічних характеристик.

Для оцінки тягових властивостей модернізованого тепловоза виконано тягові розрахунки. Для цього побудовано математичну модель і розраховано й побудовано залежності швидкості та часу ходу поїзда на дійсній ділянці з визначенням витрати енергоресурсів на тягу. Порівняння результатів дозволило зробити висновки, що у поїзда з модернізованим тепловозом зменшилась витрата палива та час ходу поїзда. Це свідчить про доцільність модернізації тепловозів для пасажирського руху.

З урахуванням великої ваги локомотива для вказаної швидкості руху, перевірено стійкість локомотива на колії на підставі задачі динамічного вписування під час проходження кривих ділянок. За результатами розрахунків побудовано динамічний паспорт локомотива в горизонтальній площині.

Економічну оцінку перевірено при порівнянні витрат дизельного палива за результатами розрахованих поїздок базового з модернізованим тепловозом у голові поїзда й визначено строк окупності запропонованих рішень.

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мовчан А. Опыт проведения модернизации тепловозов серии М62, 2М62 и 2М62У на UAB VILNIAUS LOKOMOTIVU REMONTO DARAS /А. Мовчан, Ф. Винклер //Локомотив-информ. – 2007. – №11. – С. 36-38.
2. Винклер Ф. Спрос на модернизацию тепловозов растёт /Ф. Винклер //Локомотив-информ. – 2008. – №4 – С. 20-22.
3. Бондаренко Л.М. Основные направления модернизации /Л.М. Бондаренко, Е.И. Нестеров, И.В. Сазонов //Тяжёлое машиностроение. – 2006. – №8. – С. 18-22.
4. Боднар Б. Є., Нечаев Є. Г., Бобир Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина: Підручник для ВНЗ залізнич. трансп. / Під ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. – Д.: ПП «Ліра ЛТД», 2008. – 287 с.
5. Боднар Б. Є., Нечаев Є. Г., Бобир Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування: Підручник для ВНЗ залізнич. трансп. / Під ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. – Д.: ПП «Ліра ЛТД», 2010. – 360 с.
6. Експлуатація локомотивів та локомотивне господарство. Організація ремонтного та екіпірувального господарства: підручник /Б.Є. Боднар, М.І. Капіца, Є.Б. Боднар, О.Б. Очкасов; за ред. д-ра техн. наук, проф. Б.Є. Боднара. – Електрон. вид. – Дніпро: Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2022. – 220 с.
7. Колесников М.А. Модернизации быть! //Локомотив-информ. – 2008. – №5. – С. 18-20.
8. Петрович Ю.М. Модернизация тепловозов: оптимальное решение /Ю. М. Петрович //Локомотив-информ. – 2007. – №10. – С. 24-26.
9. Малах О. М. Тепловоз 2ТЕ116У соответствует всем требованиям заказчика /О. М. Малах //Локомотив-информ. – 2008. – №4. – С. 25-26.
10. Двигатели унифицированного мощностного ряда Д80 /В.Н. Зайончковский, А.М. Момот, В.Ю. Ковалев, В.Г. Журавель //Локомотив-информ. – 2007. – №10. – С. 42-44.

					0032.180144.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

11. Правила технічного обслуговування та поточних ремонтів тепловозів 2ТЭ116, які затверджені наказом Укрзалізниці від 20.03.2013 №075-Ц/од. – К.: вид-во Укрзалізниці, 2013. – 47 с.
12. Теорія та конструкція локомотивів: Методичні вказівки до виконання курсового проекту, розділ «Розрахунок техніко-економічних характеристик» /Дніпропетр. націон. універ. залізнич. трансп. ім. ак. В. Лазаряна; Уклад.: Д. В. Бобирь, Л. С. Казаріна, М. І. Мартишевській, Є. Г. Нечаєв. – Дніпропетровськ, 2006. – 30 с.
13. Бобирь, Д. В. Теорія та конструкція локомотивів: методичні вказівки до курсового проектування: у 3 ч. – Ч. 3. Динамічне вписування тепловоза в криву /Д. В. Бобирь, Я. В. Болжеларський, Є. Г. Нечаєв; Дніпропетр. нац. ун-т. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – 22 с.
14. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги: підручник. Дніпро: Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2022. – 385 с.
15. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги: монография: в 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д.: Изд-во Днепрпетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. – Т. 1. – 450 с.
16. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги: Монография: в 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д.: Изд-во Днепрпетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. – Т. 2. – 361 с.

					<i>0032.180144.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

ДОДАТОК А

Математична модель розрахунку задачі динамічного вписування тепловоза

$$\begin{aligned} > R := 800; & R := 800 & (2) \\ > f := 0.25; & f := 0.25 & (3) \\ > h := 0.1; & h := 0.1 & (4) \\ > S := 0.8; & S := 0.8 & (5) \\ > B := 3.700; & B := 3.700 & (6) \\ > sigma := 3.5; & \sigma := 3.5 & (7) \\ > delta := 0; & \delta := 0 & (8) \\ > G := 664.6; & G := 664.6 & (9) \\ > L := 10.250; & & \\ > C := \frac{G \cdot v^2}{3.6^2 \cdot 9.81 \cdot R} & C := 0.006534258944 v^2 & (10) \\ > eq := \{ -Y1 + C - C1 + 2 \cdot F1 \cdot \cos \alpha 1 - 2 \cdot F3 \cdot \cos \alpha 3 + Y3 = 0, & & \\ & Y1 \cdot x1 - C \cdot xc + C1 \cdot xc - 2 \cdot F1 \cdot r1 - 2 \cdot F2 & & \\ & \cdot \sin(\arccos(\cos \alpha 2)) \cdot S - 2 \cdot F3 \cdot r3 - M + Y3 \cdot x3 = 0 \} & & \\ eq := \{ -Y1 + 0.006534258944 v^2 - C1 + 2 F1 \cos \alpha 1 & & (11) \\ - 2 F3 \cos \alpha 3 + Y3 = 0, Y1 x1 - 0.006534258944 v^2 xc & & \\ + C1 xc - 2 F1 r1 - 1.6 F2 \sqrt{1 - \cos \alpha 2^2} - 2 F3 r3 - M & & \\ + Y3 x3 = 0 \} & & \\ > x1 := \frac{B}{2} + \frac{R}{B} \cdot \frac{(2 \cdot \sigma + \delta)}{1000}; & & \end{aligned}$$

$$F3 := 27.69166667 \quad (17)$$

$$> C1 := \frac{G \cdot h}{2 \cdot S}; C := C;$$

$$C1 := 41.53750000$$

$$C := 0.006534258944 v^2 \quad (18)$$

$$> \text{alphap} := \arctan\left(\frac{\frac{L}{2} - x2}{R}\right); M := 38;$$

$$\text{alphap} := 0.004514327442$$

$$M := 38 \quad (19)$$

$$> e := \text{solve}(eq, \{Y1, Y3\});$$

$$e := \{Y1 = 0.002940416525 v^2 + 65.64384350, Y3 = 70.29189542 - 0.003593842419 v^2\} \quad (20)$$

$$> v := 0 : R; f;$$

while v < 141 **do**

 print(v, e, C); v := v + 1 **od**:

800

0.25

0, {Y1 = 65.64384350, Y3 = 70.29189542}, 0.

1, {Y1 = 65.64678392, Y3 = 70.28830158}, 0.006534258944

2, {Y1 = 65.65560517, Y3 = 70.27752005}, 0.02613703578

3, {Y1 = 65.67030725, Y3 = 70.25955084}, 0.05880833050

4, {Y1 = 65.69089016, Y3 = 70.23439394}, 0.1045481431

5, {Y1 = 65.71735391, Y3 = 70.20204936}, 0.1633564736

6, {Y1 = 65.74969849, Y3 = 70.16251709}, 0.2352333220

7, {Y1 = 65.78792391, Y3 = 70.11579714}, 0.3201786883

8, {Y1 = 65.83203016, Y3 = 70.06188951}, 0.4181925724

9, {Y1 = 65.88201724, Y3 = 70.00079418}, 0.5292749745

10, {Y1 = 65.93788515, Y3 = 69.93251118}, 0.6534258944

11, {Y1 = 65.99963390, Y3 = 69.85704049}, 0.7906453322

12, {Y1 = 66.06726348, Y3 = 69.77438211}, 0.9409332879

13, {Y1 = 66.14077389, Y3 = 69.68453605}, 1.104289762

14, {Y1 = 66.22016514, Y3 = 69.58750231}, 1.280714753

- 15, {Y1 = 66.30543722, Y3 = 69.48328088}, 1.470208262
- 16, {Y1 = 66.39659013, Y3 = 69.37187176}, 1.672770290
- 17, {Y1 = 66.49362388, Y3 = 69.25327496}, 1.888400835
- 18, {Y1 = 66.59653845, Y3 = 69.12749048}, 2.117099898
- 19, {Y1 = 66.70533387, Y3 = 68.99451831}, 2.358867479
- 20, {Y1 = 66.82001011, Y3 = 68.85435845}, 2.613703578
- 21, {Y1 = 66.94056719, Y3 = 68.70701091}, 2.881608194
- 22, {Y1 = 67.06700510, Y3 = 68.55247569}, 3.162581329
- 23, {Y1 = 67.19932384, Y3 = 68.39075278}, 3.456622981
- 24, {Y1 = 67.33752342, Y3 = 68.22184219}, 3.763733152
- 25, {Y1 = 67.48160383, Y3 = 68.04574391}, 4.083911840
- 26, {Y1 = 67.63156507, Y3 = 67.86245794}, 4.417159046
- 27, {Y1 = 67.78740715, Y3 = 67.67198430}, 4.763474770
- 28, {Y1 = 67.94913006, Y3 = 67.47432296}, 5.122859012
- 29, {Y1 = 68.11673380, Y3 = 67.26947395}, 5.495311772
- 30, {Y1 = 68.29021837, Y3 = 67.05743724}, 5.880833050
- 31, {Y1 = 68.46958378, Y3 = 66.83821286}, 6.279422845
- 32, {Y1 = 68.65483002, Y3 = 66.61180078}, 6.691081159
- 33, {Y1 = 68.84595710, Y3 = 66.37820103}, 7.115807990
- 34, {Y1 = 69.04296500, Y3 = 66.13741358}, 7.553603339
- 35, {Y1 = 69.24585374, Y3 = 65.88943846}, 8.004467206
- 36, {Y1 = 69.45462332, Y3 = 65.63427564}, 8.468399591
- 37, {Y1 = 69.66927372, Y3 = 65.37192515}, 8.945400494
- 38, {Y1 = 69.88980496, Y3 = 65.10238697}, 9.435469915
- 39, {Y1 = 70.11621704, Y3 = 64.82566110}, 9.938607854
- 40, {Y1 = 70.34850994, Y3 = 64.54174755}, 10.45481431
- 41, {Y1 = 70.58668368, Y3 = 64.25064631}, 10.98408928
- 42, {Y1 = 70.83073825, Y3 = 63.95235739}, 11.52643278
- 43, {Y1 = 71.08067366, Y3 = 63.64688079}, 12.08184479
- 44, {Y1 = 71.33648989, Y3 = 63.33421650}, 12.65032532
- 45, {Y1 = 71.59818696, Y3 = 63.01436452}, 13.23187436
- 46, {Y1 = 71.86576487, Y3 = 62.68732486}, 13.82649193
- 47, {Y1 = 72.13922360, Y3 = 62.35309752}, 14.43417801
- 48, {Y1 = 72.41856317, Y3 = 62.01168249}, 15.05493261

- 49, {Y1 = 72.70378358, Y3 = 61.66307977}, 15.68875572
 50, {Y1 = 72.99488481, Y3 = 61.30728937}, 16.33564736
 51, {Y1 = 73.29186688, Y3 = 60.94431129}, 16.99560751
 52, {Y1 = 73.59472978, Y3 = 60.57414552}, 17.66863618
 53, {Y1 = 73.90347352, Y3 = 60.19679207}, 18.35473337
 54, {Y1 = 74.21809809, Y3 = 59.81225093}, 19.05389908
 55, {Y1 = 74.53860349, Y3 = 59.42052210}, 19.76613331
 56, {Y1 = 74.86498972, Y3 = 59.02160559}, 20.49143605
 57, {Y1 = 75.19725679, Y3 = 58.61550140}, 21.22980731
 58, {Y1 = 75.53540469, Y3 = 58.20220952}, 21.98124709
 59, {Y1 = 75.87943342, Y3 = 57.78172996}, 22.74575538
 60, {Y1 = 76.22934299, Y3 = 57.35406271}, 23.52333220
 61, {Y1 = 76.58513339, Y3 = 56.91920778}, 24.31397753
 62, {Y1 = 76.94680462, Y3 = 56.47716516}, 25.11769138
 63, {Y1 = 77.31435669, Y3 = 56.02793486}, 25.93447375
 64, {Y1 = 77.68778959, Y3 = 55.57151687}, 26.76432463
 65, {Y1 = 78.06710332, Y3 = 55.10791120}, 27.60724404
 66, {Y1 = 78.45229788, Y3 = 54.63711784}, 28.46323196
 67, {Y1 = 78.84337328, Y3 = 54.15913680}, 29.33228840
 68, {Y1 = 79.24032951, Y3 = 53.67396807}, 30.21441336
 69, {Y1 = 79.64316658, Y3 = 53.18161166}, 31.10960683
 70, {Y1 = 80.05188447, Y3 = 52.68206757}, 32.01786883
 71, {Y1 = 80.46648320, Y3 = 52.17533579}, 32.93919934
 72, {Y1 = 80.88696277, Y3 = 51.66141632}, 33.87359837
 73, {Y1 = 81.31332316, Y3 = 51.14030917}, 34.82106591
 74, {Y1 = 81.74556439, Y3 = 50.61201433}, 35.78160198
 75, {Y1 = 82.18368645, Y3 = 50.07653181}, 36.75520656
 76, {Y1 = 82.62768935, Y3 = 49.53386161}, 37.74187966
 77, {Y1 = 83.07757308, Y3 = 48.98400372}, 38.74162128
 78, {Y1 = 83.53333764, Y3 = 48.42695814}, 39.75443142
 79, {Y1 = 83.99498303, Y3 = 47.86272488}, 40.78031007
 80, {Y1 = 84.46250926, Y3 = 47.29130394}, 41.81925724
 81, {Y1 = 84.93591632, Y3 = 46.71269531}, 42.87127293
 82, {Y1 = 85.41520421, Y3 = 46.12689899}, 43.93635714

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Эмч.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

83, {YI = 85.90037294, Y3 = 45.53391500}, 45.01450987
 84, {YI = 86.39142250, Y3 = 44.93374331}, 46.10573111
 85, {YI = 86.88835289, Y3 = 44.32638394}, 47.21002087
 86, {YI = 87.39116412, Y3 = 43.71183689}, 48.32737915
 87, {YI = 87.89985618, Y3 = 43.09010215}, 49.45780595
 88, {YI = 88.41442907, Y3 = 42.46117973}, 50.60130126
 89, {YI = 88.93488279, Y3 = 41.82506962}, 51.75786510
 90, {YI = 89.46121735, Y3 = 41.18177183}, 52.92749745
 91, {YI = 89.99343274, Y3 = 40.53128635}, 54.11019832
 92, {YI = 90.53152897, Y3 = 39.87361319}, 55.30596770
 93, {YI = 91.07550602, Y3 = 39.20875234}, 56.51480561
 94, {YI = 91.62536391, Y3 = 38.53670381}, 57.73671203
 95, {YI = 92.18110264, Y3 = 37.85746759}, 58.97168697
 96, {YI = 92.74272219, Y3 = 37.17104369}, 60.21973043
 97, {YI = 93.31022258, Y3 = 36.47743210}, 61.48084240
 98, {YI = 93.88360381, Y3 = 35.77663283}, 62.75502290
 99, {YI = 94.46286586, Y3 = 35.06864587}, 64.04227191
 100, {YI = 95.04800875, Y3 = 34.35347123}, 65.34258944
 101, {YI = 95.63903247, Y3 = 33.63110890}, 66.65597549
 102, {YI = 96.23593703, Y3 = 32.90155889}, 67.98243005
 103, {YI = 96.83872241, Y3 = 32.16482120}, 69.32195314
 104, {YI = 97.44738863, Y3 = 31.42089582}, 70.67454474
 105, {YI = 98.06193569, Y3 = 30.66978275}, 72.04020486
 106, {YI = 98.68236357, Y3 = 29.91148200}, 73.41893349
 107, {YI = 99.30867229, Y3 = 29.14599356}, 74.81073065
 108, {YI = 99.94086185, Y3 = 28.37331744}, 76.21559632
 109, {YI = 100.5789322, Y3 = 27.59345364}, 77.63353051
 110, {YI = 101.2228834, Y3 = 26.80640215}, 79.06453322
 111, {YI = 101.8727155, Y3 = 26.01216298}, 80.50860445
 112, {YI = 102.5284284, Y3 = 25.21073612}, 81.96574419
 113, {YI = 103.1900221, Y3 = 24.40212157}, 83.43595246
 114, {YI = 103.8574967, Y3 = 23.58631934}, 84.91922924
 115, {YI = 104.5308520, Y3 = 22.76332943}, 86.41557453
 116, {YI = 105.2100883, Y3 = 21.93315183}, 87.92498835

					0032.180144.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

- 117, { $YI = 105.8952053$, $Y3 = 21.09578655$ }, 89.44747068
 118, { $YI = 106.5862032$, $Y3 = 20.25123358$ }, 90.98302154
 119, { $YI = 107.2830819$, $Y3 = 19.39949292$ }, 92.53164091
 120, { $YI = 107.9858415$, $Y3 = 18.54056459$ }, 94.09332879
 121, { $YI = 108.6944818$, $Y3 = 17.67444856$ }, 95.66808520
 122, { $YI = 109.4090031$, $Y3 = 16.80114486$ }, 97.25591012
 123, { $YI = 110.1294051$, $Y3 = 15.92065346$ }, 98.85680356
 124, { $YI = 110.8556880$, $Y3 = 15.03297439$ }, 100.4707655
 125, { $YI = 111.5878517$, $Y3 = 14.13810762$ }, 102.0977960
 126, { $YI = 112.3258962$, $Y3 = 13.23605318$ }, 103.7378950
 127, { $YI = 113.0698216$, $Y3 = 12.32681104$ }, 105.3910625
 128, { $YI = 113.8196278$, $Y3 = 11.41038123$ }, 107.0572985
 129, { $YI = 114.5753149$, $Y3 = 10.48676373$ }, 108.7366031
 130, { $YI = 115.3368828$, $Y3 = 9.55595854$ }, 110.4289762
 131, { $YI = 116.1043315$, $Y3 = 8.61796567$ }, 112.1344177
 132, { $YI = 116.8776610$, $Y3 = 7.67278511$ }, 113.8529278
 133, { $YI = 117.6568714$, $Y3 = 6.72041687$ }, 115.5845065
 134, { $YI = 118.4419626$, $Y3 = 5.76086094$ }, 117.3291536
 135, { $YI = 119.2329347$, $Y3 = 4.79411733$ }, 119.0868693
 136, { $YI = 120.0297876$, $Y3 = 3.82018604$ }, 120.8576534
 137, { $YI = 120.8325213$, $Y3 = 2.83906706$ }, 122.6415061
 138, { $YI = 121.6411358$, $Y3 = 1.85076039$ }, 124.4384273
 139, { $YI = 122.4556312$, $Y3 = 0.85526604$ }, 126.2484171
 140, { $YI = 123.2760074$, $Y3 = -0.14741599$ }, 128.0714753