

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра «Локомотиви»

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. зав. кафедрою  Б.Є.Боднар

« 14 » _____ 12 _____ 2021 р.

ДИПЛОМНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на здобуття ОС «магістр»

Галузь знань 27 *Транспорт*

Спеціальність 273 *Залізничний транспорт*

Освітньо-професійна програма *Локомотиви та локомотивне господарство*

Тема **ПРОЕКТ ТЕПЛОВОЗА З ГІБРИДНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ**

Theme **HYBRID POWER DRIVE PROJECT**

Керівник магістерської роботи

 Д.В. Бобирь

Нормоконтролер

 Л.В. Колодій

Виконавець: студент групи ЛГ2021

 В.С. Кравченко

Student

Kravchenko

Vadym

Дніпро, 2021

РЕФЕРАТ

Дипломна магістерська робота на тему «Проект тепловоза з гібридною силовою установкою» у загальному обсязі 5 креслень і 123 аркушів розрахунково-пояснювальної записки та складається з 4 частин.

Робота містить 11 ілюстрацій, 30 таблиць, список літературних джерел з 23 найменувань та 1 додатка.

Об'єктом дослідження в дипломній магістерській роботі виступає тепловоз, а метою – його проект.

Проаналізовані потреба в оновленні парку локомотивів та основні напрями його модернізації.

Розглянутий світовий досвід модернізації маневрового локомотивного парку, застосування альтернативних джерел енергії та гібридної силової установки на тепловозах.

Проаналізовані характеристики різних накопичувачів енергії та можливість їх застосування на локомотивах.

Запропонована схема гібридного приводу для маневрового тепловоза.

Визначені основні параметри експлуатації та режими роботи маневрових тепловозів в різних видах роботи в умовах Криворізького регіону.

Розглянуті методики розрахунку витрати палива та середньоексплуатаційного ККД маневрового тепловоза та тепловоза з гібридною силовою установкою.

Ключовими словами в дипломній магістерській роботі являються: ТЕПЛОВОЗ, ПРОЕКТ, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ГІБРИДНА СИЛОВА УСТАНОВКА, НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ЕЛЕКТРОТЯГОВА ХАРАКТЕРИСТИКА, ТЯГОВА ХАРАКТЕРИСТИКА, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА, РОЗВАЖУВАННЯ ТЕПЛОВОЗА, ВИТРАТА ПАЛИВА, СЕРЕДНЬОЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ ККД.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАРКУ МАНЕВРОВИХ ЛОКОМОТИВІВ	8
1.1 Аналіз потреби оновлення парку локомотивів	8
1.2 Аналіз режимів роботи маневрового локомотива	11
1.3 Аналіз закордонного досвіду застосування локомотивів з гібридним приводом	15
1.4 Аналіз характеристик накопичувачів енергії та можливості їх застосування на гібридному рухомому складі	25
2 РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ РОБОТИ МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗІВ	36
2.1 Постановка задачі	36
2.2 Методика виконання тягових розрахунків	36
2.3 Результати розрахунку	51
3 ПРОЕКТ ТЕПЛОВОЗА З ГІБРИДНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ	53
3.1 Аналіз методів визначення параметрів гібридного приводу локомотива	53
3.2 Розробка принципової схеми гібридного локомотива	54
3.3 Визначення необхідної потужності силової установки тепловоза	58
3.4 Визначення основних параметрів тягових електродвигунів	66
3.5 Визначення параметрів тягового осьового редуктора	67
3.6 Розрахунок і побудова електромеханічних характеристик ТЕД	72
3.7 Розрахунок і побудова електротягових характеристик колісно- моторного блоку	74
3.8 Розрахунок і побудова тягової характеристики тепловоза	76
3.9 Розрахунок і побудова техніко-економічних характеристик тепловоза	79

					<i>0032.160159.000.04MP.ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Проект тепловоза з гібридною силовою установкою	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Каавченко</i>					4	123
<i>Перевір.</i>		<i>Бабирь</i>				ДНУЗТ, гр. ЛГ2021		
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>		<i>Колодій</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Капіца</i>						

3.10 Розміщення обладнання тепловоза та його розважування	81
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВОЗА ГІБРИДНОЮ УСТАНОВКОЮ	99
4.1 Розрахунок витрати палива 99	
4.2 Визначення середньоексплуатаційного ККД роботи силової установки тепловоза	106
4.3 Визначення середньоексплуатаційного ККД тепловоза з гібридною установкою	108
4.4 Порівняльний розрахунок тепловоза ТЭМ2 та тепловоза з гібридною силовою установкою	109
ВИСНОВОК	112
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	114
ДОДАТОК А	117

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Базовою галуззю економіки України є залізничний транспорт, провідною роллю якого є забезпечення вантажних та пасажирських перевезень в межах країни та з країнами Центральної Європи, також, залізничний транспорт відіграє важливу роль в транспортному забезпеченні перевезень рудно-металургічної сировини в межах гірничозбагачувальних комбінатів групи «МЕНТІНВЕСТ», які розташовані в Криворізькому залізничному басейні.

Маневрова робота на станціях Криворізької дирекції залізничних перевезень (ДН-2) до яких примикають залізничні підприємства здійснюється локомотивами серії ЧМЭЗ середній вік яких складає 35,5 роки. Маневрові локомотиви виконують роботу по підготовці складів порожніх вагонів для передачі їх під завантаження рудно-металургійною сировиною та підготовки передач завантажених вагонів на вантажні fronti підприємств. Для передачі складів порожніх вагонів виконується робота по відчепленню тимчасово технічно несправних вагонів на механізовані пункти ремонту вагонів. Середньомісячна продуктивність вагоно ремонтних пунктів Криворізької дирекції складає 3377 вагонів. Середньодобове завантаження вагонів сировиною та готовою продукцією на станціях (ДН-2) складає 2631 вагон. Також, локомотивами зазначеної серії виконується обслуговування станції Кривий Ріг-Сортувальний, а саме подача розбіркових поїздів на сортувальну гірку. Формування поїздів підгірковому парку здійснюється з протилежного боку станції. Загальна кількість розформованих складів ставить 20 – 22 поїзди на добу. Локомотиви, які задіяні на станціях (ДН-2) мають надлишкову потужність та понаднормовий термін експлуатації, що призводить до додаткових витрат на їх утримання та ремонт.

Зокрема, на Центрально гірничо-збагачувальному комбінаті (ЦГЗК) маневровими локомотивами, здійснюється робота по вивезенню сформованих маршрутів залізо-рудної сировини на станцію примикання регіональної філії Придніпровська залізниця в кількості 3 – 6 маршрутів на добу та забирання складів

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порожнього рухомого складу під завантаження. На Північному гірничо-збагачувальному комбінаті (ПівнГЗК) здійснюються завантаження 6 – 7 маршрутів. Завантаження вагонів на вантажних фронтах комбінату здійснюється локомотивами зазначеної серії. Вага завантажених та сформованих маршрутів складає від 4000 до 5000 тон. Даними локомотивами здійснюється також маневрова та господарча робота на залізничних станціях залізничного комбінату.

Середній термін експлуатації локомотивів серії ТЭМ2, ТЭМ2У, ТЭМ2УМ, складає 43,4 роки, при нормативному терміні служби 32 роки, дані локомотивів були збудовані на Брянському тепловозобудівному заводі в 70 – 80 роках ХХ сторіччя. Зношення локомотивного парку на підприємствах групи «МЕНТІНВЕСТ» складає близько 95%.

Понаднормовий термін експлуатації локомотивного парку призводить до підвищеного рівня витрат паливно-мастильних матеріалів та зростання витрат на їх утримання та ремонт, зростання кількості позапланових ремонтів викликає перебої в експлуатаційній роботі комбінату, що в свою чергу викликає додаткові економічні витрати, та є причиною негативного впливу на оточуюче середовище. Зважаючи також на світову тенденцію подорожчання паливно-енергетичних ресурсів, можливим вирішенням даних проблем є впровадження в експлуатацію маневрово-вивізного локомотива з гібридним приводом.

Саме тому, темою магістерської роботи і було обрано «Проект тепловоза з гібридною силовою установкою».

					0032.160159.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАРКУ МАНЕВРОВИХ ЛОКОМОТИВІВ

1.1 Аналіз потреби оновлення парку локомотивів

Залізничний транспорт займає провідну роль в транспортній системі України, займаючи перше місце в перевезенні вантажу, а також відіграє стратегічне соціальне значення, виконуючи перевезення пасажирів в різних кутах України. В таблицях 1.1 і 1.2 приведений обсяг пасажирських та вантажних перевезень за січень-березень 2021 року за даними Державної служби статистики України [1].

Таблиця 1.1 – Пасажирські перевезення за видами транспорту за січень-березень 2021 року

Вид транспорту	Пасажирообіг, 10 ⁶ пас·км	Перевезено пасажирів, 10 ⁶ пас
Залізничний	2934,3	17,0
Автомобільний	4267,7	258,7
Водний	0,1	0,0
Авіаційний	2854,1	1,1
Трамвайний	546,8	92,4
Тролейбусний	829,8	142,0
Метрополітенівський	859,1	112,8
Всього	12291,9	624,0

Таблиця 1.2 – Вантажні перевезення за видами транспорту за січень-березень 2021 року

Вид транспорту	Вантажообіг, 10 ⁶ т/км	Перевезено вантажів, 10 ⁶ т
Залізничний	40437,9	69,7
Автомобільний	9608,1	43,2
Водний	592,9	0,7
Авіаційний	73,7	115,6
Трубопровідний	13734,7	21,7
Всього	64447,3	135

Перевага залізничного транспорту в цьому плані явна. Так, енергоспоживання рейкових видів транспорту в пасажиро-кілометрах у 3÷5 разів нижче порівняно з авіаційним, а вантажного залізничного транспорту в тонно-кілометрах – у 4÷6 разів нижче, ніж автомобільного. Залізничний та інші види громадського рейкового транспорту є більш економічними, оптимальними щодо використання простору і мають більшу ефективність при перевезенні пасажирів та вантажів без зайвого використання наявних, залучення додаткових ресурсів [2].

Однак розуміючи стратегічну роль залізниці в транспортній системі України, вона має ряд недоліків, які недалекому майбутньому можуть призвести до зупинки залізниці, та повлікти за собою тяжкі наслідки для економічної безпеки України. Основні фонди залізниць значно зношені, якісні та кількісні показники пасажирообігу та вантажобігу не відповідають нормативним вимогам.

Станом на теперішній час парк пасажирських та вантажних магістральних локомотивів ПАТ «Укрзалізниця» складається з тепловозів серії 2ТЭ10М, 2ТЭ116, ТЭП70, ТЭП150 та маневрових локомотивів серії ЧМЭЗ та ТЭМ2. Більшість з яких були виготовлені в 70 – 80 роках минулого сторіччя. При нормативному терміні служби магістральних тепловозів 20 років, а маневрових 25 – 30 років. Фактичний термін експлуатації вантажних тепловозів складає 31 рік, а пасажирських 28 років. Парк маневрових локомотивів представляє собою тепловоз серії ЧМЭЗ, знос яких досягає 90%. Такий стан парку пояснюється тим що локомотиви цієї серії будувалися з 1963 по 1991 рр. Критичний віковий та технічний стан парку локомотивів є причиною низької ефективності роботи галузі. Наслідком цього є ріст експлуатаційних витрат, збільшення витрат поливо-мастильних матеріалів, що веде до здороження собівартості перевезення вантажів. Утримання зношеного локомотивного парку призводить до збільшення витрат на планові та позапланові види ремонту, що в свою чергу не дозволяє вивільнити кошти на інші статті витрат залізниць.

Виходячи з вище зазначеного, темпи старіння локомотивного парку України перевищують темпи оновлення сучасним рухомим складом, який відповідає всім

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

серії EffiShunter 1600, але не зважаючи на все вище сказане, подібна тенденція старіння тепловозів на промислових підприємствах випереджають темпи оновлення ТРС.

Старіння та зношеність тягового рухомого складу залізниць ПАТ «Укрзалізниця» та промислових підприємств гірничо-металургійного комплексу України є найбільш гострою проблемою в економіці країни, вирішення даної проблеми є впровадження тягового гібридного рухомого складу, який дає можливість вирішити найбільш гострі проблеми транспортної галузі, що потребує значних капітальних вкладень.

1.2 Аналіз режимів роботи маневрового локомотива

Пошуки шляхів і оцінка ефективності експлуатації маневрових тепловозів, режимів роботи і паливної економічності можлива тільки при ретельному вивченні, аналізі їх експлуатації, параметрів режимів навантаження дизель-генераторних установок, системи технічного обслуговування і поточного ремонту. Умови експлуатації та режими роботи маневрових локомотивів істотно відрізняються від режимів роботи магістральних тепловоз. Це пояснюється безліччю додаткових специфічних факторів, властивих тільки маневровій роботі. До таких факторів відносяться: стан шляху, вид виконуваної роботи, низькі швидкості руху, часта зміна маси поїздів, велике число перемикаць позицій контролера і реверсування локомотива, Малі радіуси кривих, безліч стрілочних переводів; обмежена видимість сигналів і ряд інших факторів, що впливають безпосередньо на режими навантаження ДГУ і паливну економічність в процесі їх експлуатації.

Узагальнення та аналіз результатів досліджень показують, що режими роботи ДГУ тепловозів в експлуатації досить повно оцінюються наступними основними показниками: потужністю N_e , коефіцієнтами реалізованої потужності, що враховують роботу дизель-генератора (ДГ) в режимі навантаження і на холостому ході, числом перемикаць позицій контролера (ПКМ), числом пусків

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дизеля, часом роботи ДГУ в режимі повного навантаження і на холостому ходу, витратою палива в режимі холостого ходу, числом включень ДГ в режимі навантаження, частотою обертання колінчастого вала дизеля, температурою охолоджуючої води і дизельного масла на виході з дизеля.

Маневрова робота є важливою складовою залізничного транспорту. Близько 45% експлуатаційного парку локомотивів зайнято виконанням маневрової роботи, з них 92% маневрової роботи виконується безпосередньо тепловозами.

Узагальнюючі значення та діапазони змінювання параметрів режимів роботи маневрових тепловозів в системі ОАО «РЖД» та ППЗТ працюючих в маневровому русі режим холостого ходу складає від 52 до 67%. При цьому від 15 до 26% часу ДГУ тепловозів працює в режимі вибігу. У режимі навантаження ДГУ тепловозів ВАТ «РЖД» (16%) працюють на 1-4-й позиціях контролера, відповідних потужності від 25 до 230 кВт на тепловозах ТЭМ2 [24].

Тепловози, використовувані на господарських і допоміжних роботах, основний час (більше 96%) експлуатуються в режимі холостого ходу і малих навантажень. Час роботи ДГУ в режимі холостого ходу становить від 70 до 82%, при цьому непродуктивна витрата палива досягає 25% від загальних його витрат на допоміжну роботу тепловоз. Режим номінальної потужності використовується до 1% сумарного часу експлуатації тепловоза [24].

За результатами дослідів експлуатації тепловозів на промислових підприємствах залізничного транспорту ППЗТ було визначено, що час роботи тепловозів на холостому ходу змінюється від 65 до 84% від сумарного часу їх експлуатації [24]. В загальних же випадках робота виконується на 1 – 4 позиції контролера машиніста, при цьому час знаходження контролера на позиції приблизно однаковий і варіюється від 17 – 34% [25].

Швидкості руху тепловозів знаходилися в діапазоні 0,5 – 13 км/год (швидкість вище понад 10 км/год зафіксована лише в 2 % випадків, 0 – 5 км/год – в 66% і 5 – 10 км/год – в 32 %). Отже, можна зробити висновок, що технології роботи промислового залізничного транспорту властива не тільки циклічність, але і низькі

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкості руху. Робота дизеля супроводжується значним числом змін частот обертання колінчастого вала. На одну годину роботи під навантаженням доводиться в середньому 154 перемикання рукоятки контролера з однієї позиції на іншу.

Також з огляду на все вище перераховане варто зазначити результати дослідів Уральського відділення ЦНІ МПС, де були виконані випробування тепловозів в різних умовах експлуатації, які оцінили зміну параметрів їх енергетичного ланцюга при виконанні маневрових пересувань, режими роботи, інтенсивність використання. Отримані дані дозволили зробити наступні висновки: для всіх умов експлуатації маневрових тепловозів характерна тривала робота силової установки при невеликому навантаженні і на холостому ході. Кількість і тривалість напіврейсів при виконанні маневрів зумовлюють роботу дизелів на невстановлених режимах і холостому ході, що становить 45-75% всього часу роботи. Середньоексплуатаційна питома витрата палива визначає питому витрату палива на проміжних (в діапазоні від 30 до 75% номінальної потужності тепловоза) і невстановлених режимах роботи. Приблизно 67% маневрових тепловозів працюють на холостому ході і до 30% часу - на перехідних і часткових режимах. Це пояснюється особливістю режимів роботи: транспортні операції проводяться на невеликих ділянках шляху, насичених стрілочними переводами і кривими, в умовах часткої зміни напрямку, при різних швидкостях руху і великому числі зупинок [26].

У роботі [26] наводяться наступні дані: основний час роботи дизеля становить режим холостого ходу, частка його становить приблизно 75%, Час роботи дизеля під навантаженням знаходиться в межах 25-36%. У деяких випадках при виконанні час роботи дизеля на холостому ході становить 96 % від загального часу роботи (рисунок 1.1), частка витрати палива при цьому до 84% (рисунок 1.2).

Аналізуючи все вищесказане, можливо зробити висновок, що локомотиви які експлуатуються на залізницях України та промислових підприємствах, основний час роботи маневрових тепловозів приходить на режим холостого ходу, частка

					0032.160159.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якого становить приблизно 75%, час роботи двигуна під навантаженням складає 25 – 36%, та експлуатуються в загальному випадку на 1 – 4 позиції контролера машиніста, що не перевищує 45% паспортної номінальної потужності, а отже локомотиви мають надлишкову потужність, яка недовикористовується.

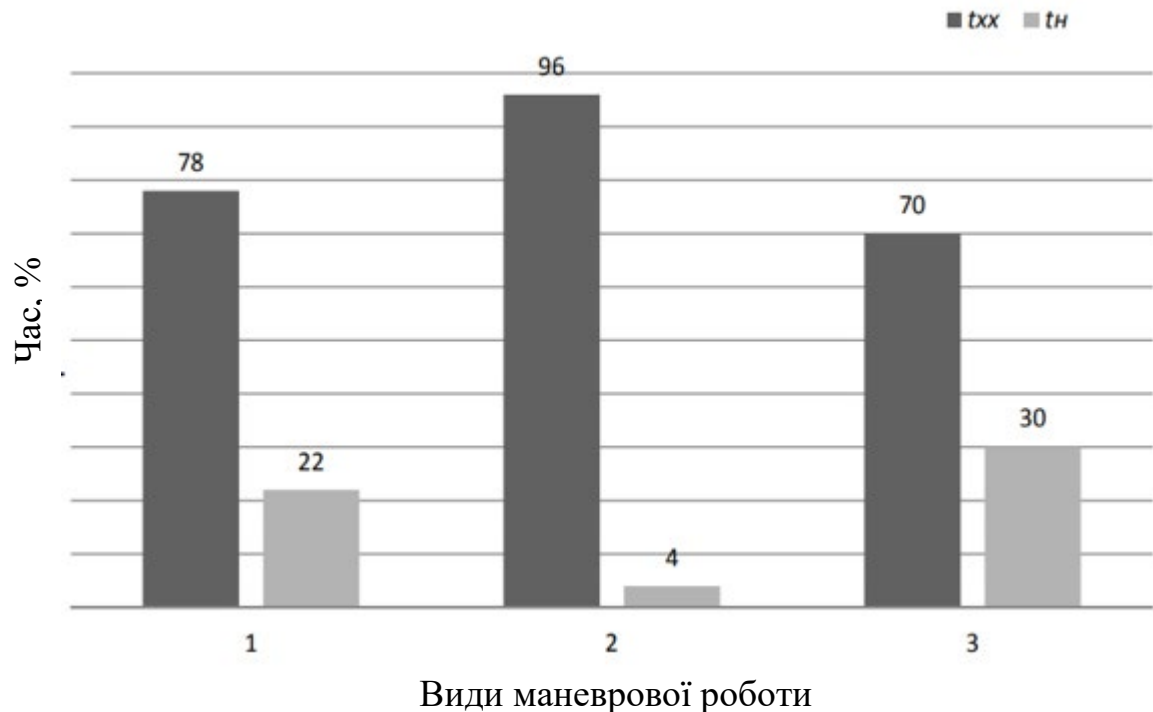


Рисунок 1.1 – Час роботи дизельного двигуна в режимі холостого ходу t_{xx} і під навантаженням t_n за видами маневрової роботи:

1 – вивізна (з вантажними складами); 2 – господарська; 3 – маневрова (витяжка)

Наслідком цього є надмірне споживання палива, та підвищений рівень викидів шкідливих речовин до атмосфери, недоцільна витрата моторесурсу двигуна, а отже і економічна недоцільність експлуатації, в порівнянні з сучасними гібридними маневровими локомотивами.

Найбільш доцільним рішенням даної проблеми буде впровадження гібридного рухомого складу, з комбінованої силовою установкою, де дизельний двигун повинен працювати в близьких до номінальних режимах роботи для згладжування потреби потужності під час пікових навантажень та заряджання накопичувача, що в свою чергу буде забезпечувати найбільш оптимальний режим

споживання дизельного пального, а весь інший час потреби забезпечення енергії буде покладене на накопичувач, що в свою чергу дає можливість практично відмовитися від такого шкідливого явища, як холостий хід.

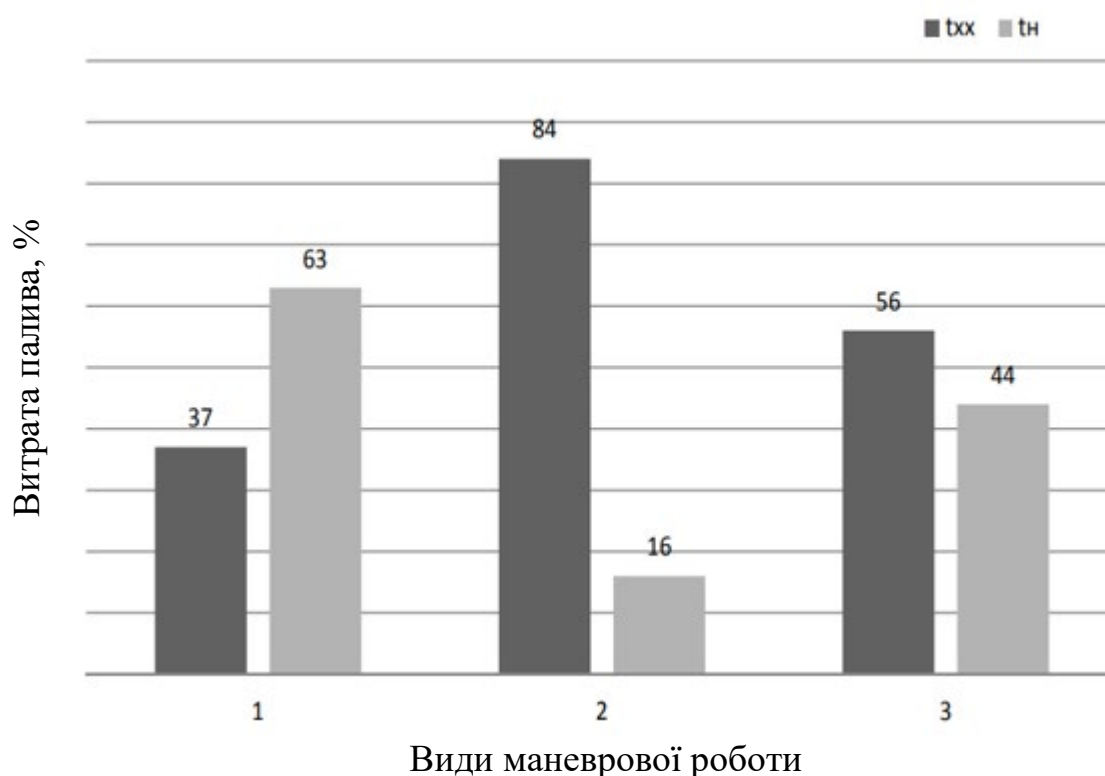


Рисунок 1.2 – Витрати палива дизельного двигуна в режимі холостого ходу t_{xx} і під навантаженням t_n за видами маневрової роботи:

1 – вивізна (з вантажними складами); 2 – господарська; 3 – маневрова (витяжка)

1.3 Аналіз закордонного досвіду застосування локомотивів з гібридним приводом

Світовий досвід локомотивобудування показує, що гібридний привід є найбільш актуальною темою обговорення та досліджень провідних виробників націлених на зниження споживання енергоресурсів та скорочення викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище. До складу гібридної установки входить дизель-генератор та накопичувачі енергії різних конструкцій, а саме акумуляторні батареї та блоки суперконденсаторів.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160159.000.04MP.ПЗ					

Рухомий склад з гібридною силовою установкою розробляють в різних країнах світу. Так, на виставці InnoTrans-2018 провідні компанії виробники представили моделі гібридних локомотивів орієнтованих на Європейські країни.

Одним з таких виробників є компанія «Toshiba», яка представила гібридний локомотив моделі HD300, основні технічні характеристики приведені в таблиці 1.3 [3].

Таблиця 1.3 –Технічні характеристики гібридного локомотива HD300 (2017)

Параметри	Величина параметру
Енергія накопичувача, кВт·год	40
Конструкційна швидкість, км\год	45
Тип тягових двигунів	Синхронні, с постійними магнітами
Потужність, кВт	500
Тип гібридної схеми	Послідовна

Локомотиви HD300 експлуатуються на залізницях Японії, а DB CARGO HELMS знаходяться в стадії проектування на замовлення компанії DB Cargo. Перший з них - гібридний тепловоз з електропередачею, другий-модернізований тепловоз обладнаний механічною передачею. Відповідно до прийнятої класифікації гібридні схеми локомотивів відносяться до четвертого роду (дизельні локомотиви з накопичувачем енергії іншого роду в порівнянні з основним двигуном). В основі приводу локомотива DB CARGO HELMS лежить послідовно-паралельна гібридна схема, в якій пристроєм, що узгоджує передачу потужності від дизельної установки до генератора, колісних пар і до акумуляторної батареї SClB, служить планетарний редуктор. Розглянуті Локомотиви отримані в результаті переобладнання типових німецьких тепловозів BR294 (V90). Конструкція останніх включала збільшену зчипну масу баласт, тому вдалося розмістити акумуляторну батарею і гібридний привід без збільшення маси і осьового навантаження. В ході модернізації гідропередача замінюється механічним проводом з планетарними редукторами, блоком батарей, тяговими двигунами і генератором. Блок акумуляторів аналогічний встановленому на випускався раніше гібридному

тепловозі японських залізниць ND300, однак має велику енергоємність: до 150 кВт·год. Електрична схема гібридного локомотива DB CARGO HELMS передбачає установку накопичувача в ланку постійного струму. Таким чином, гібридний привід може працювати і як послідовний, і як паралельний. При рушанні з місця сила тяги становить 300 кН. Перехід на гіперболічну частину (розрахунковий режим) характеристики відбувається при швидкості близько 10 км/год, що вважається нормальним для маневрової машини. Асинхронний привід забезпечує сталість потужності 750 кВт у всьому діапазоні значень швидкості [3].

Наступним провідним виробником представленим на ринку локомотив є фірма «Alstom». Компанія займається випуском гібридних локомотивів з накопичувачами на основі акумуляторних батареї, а саме локомотив моделі PRIMA H3. Даний локомотив обладнаний асинхронними тяговими двигунами які отримую живлення від індивідуальних інвентарів, конструкція також передбачає зарядний пристрій, що дає можливість працювати без використання дизеля. На виставці InnoTrans-2018 був представлений більш потужний локомотив PRIMA H4. Основні технічні характеристики приведені в таблиці 1.4 [3]. В залежності від потреб замовника, комплектації може бути забезпечений приводом з накопичувачем енергії. У першому випадку це або дизель-акумуляторний локомотив, або контактний акумуляторний електровоз. Великий вибір модифікацій дозволяє враховувати специфіку експлуатації на конкретних ділянках [3].

Таблиця 1.4 –Технічні характеристики гібридного локомотива PRIMA H4

Параметри	Величина параметру
Осьова формула	8 ₀ -9 ₀ в залежності від конфігурації
Службова вага, т	120
Конструкційна швидкість, км/ год	300
Сила тяги при рушанні з місця, кН	300
Потужність, кВт	До 2000
Можливість працювати в СБО(СМЕ) од.	До 4

Серед Європейських виробників представлених на виставці також можливо

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виділити Gmeinder Lokomotiven GmbH, виробник який останні роки займається розробкою гібридного рухомого складу.

Так на виставці InnoTrans-2016 був представлений локомотив DE60C Hybrid. А вже на через декілька років на виставці InnoTrans-2018 дана компанія представила нову модель гібридного локомотива DE75BB. Основні технічні характеристики локомотивів DE60C Hybrid та DE75BB приведені в таблиці 1.5 [3].

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики гібридних локомотивів DE60C та DE75BB

Характеристика	DE60C Hybrid	DE75BB
Службова вага, т	67	80
Конструкційна швидкість, км/год	60	100
Сила тяги при рушанні з місця, кН	200	260
Силова установка	Дизель генератор Caterpillar C13 та літєво-іонна батарея	Два дизель-генератора або дизель генератор та літєво-іонна батарея. Додаткове живлення від третього рельса 750 В або контактної мережі
Потужність, кВт	Від дизель-генератора: 354; Від накопичувача: 350; На ободі колеса: 435	Від дизель-генератора: 354 або 2x354;; На ободі колеса: 600

Слід зазначити, що локомотиви, як і в прикладі з Alstom, представляють собою багатоваріантні конструкції, створені відповідно до останніх світовими тенденціями: накопичувач на основі літій-іонних батарей, силова установка з двома дизельними двигунами, можливість живлення від третьої рейки з напругою 750 В (тільки варіант DE75BB). Модель DE60C (результат модернізації DE500C) являє собою тривісний локомотив з індивідуальним приводом осей від тягових електродвигунів, варіант DE75BB-чотиривісний [3].

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики гібридного локомотива
DE18 Hybrid

Параметри	Величина параметру
Службова вага, т	64
Конструкційна швидкість, км/ год	120
Сила тяги при рушанні з місця, кН	100
Потужність на ободі колеса, кВт	400
Температура оточуючого середовища, °С	від -30 до +40

Серед країн Близького Сходу також останні роки проявляються тенденція до розробки локомотивів з гібридною силовою установкою. Прикладом цього є сумісний проект корпорації TCCD (державні залізниці Туреччини), компанія TULOMSAS (локомотивобудівельна компанія) і ASELSAN (виробник електронного обладнання у сфері озброєнь) глибокої модернізації маневрового тепловоза DE 11000. Модернізований локомотив обладнаний блоком накопичувача високої напруги на основі літієво-титанових акумуляторів.

Даний локомотив принципово відрізняється від раніше запропонованих, а саме тягова акумуляторна батарея пов'язана проміжною ланкою за допомогою підвищувального перетворювача постійно-постійного струму (DC-DC converter), що забезпечує заряд батареї і зворотне живлення. Це дає можливість поліпшити режим роботи батареї і стабілізувати напругу. Тягові двигуни живляться від інверторів на основі кремній-оксидних IGBT, тривала потужність (загальна) становить 400 кВт з короткочасним підвищенням до 700 кВт. Перетворювач розрахований на вхідну напругу 600-1000 В і струм до 700 А. для заряду батареї від зовнішнього джерела використовується випрямляч, який може забезпечити режим роботи з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Допоміжний перетворювач (ПСН) живиться від проміжної ланки і має вихідні канали з трифазним і однофазним змінною напругою потужністю 5, 125 і 10 кВт. Є зарядний пристрій для допоміжної батареї з напругою 24 В. Перетворювач має модульну конструкцію і систему рідинного охолодження. Тягову батарею складають осередки, в кожній з них знаходяться чотири включених паралельно

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

літій-титанатних акумуляторів. Основні технічні характеристики локомотива приведені в таблиці 1.8 [4].

Таблиця 1.8 – Технічні характеристики гібридного локомотива DE 11000

Параметри	Величина параметру
Службова вага, т	64
Конструкційна швидкість, км/ год	120
Максимальна сила тяги, кН	100
Потужність на ободі колеса, кВт:	700
При живленні від дизель-генератора	300
При живленні від накопичувача	400
Температура оточуючого середовища, °С	від -30 до +40

Розглядаючи ринок гібридних локомотивів, потрібно також відмітити контактено-акумуляторні електровози, деякі моделі локомотиви були представлені на InnoTrans-2016. Серед яких представлена фірма виробник TecSol. Данну модель локомотива серед всіх запропонованих на ринку гібридного рухомого складу відрізняє – використання енергоємних накопичувачів разом з іоністорами. Потужність накопичувача складає 111,7 кВт-год, маса складає 1850 кг, температурні режими за яких батарея може працювати в межах -30 до +50, додатковим джерелом енергії може також слугувати рекуперация при гальмуванні на спусках.

Данна схема реалізації джерела живлення має ряд переваг: іоністорний накопичувач витримує швидкий розряд та заряд, акумулятор служить основним накопичувачем. За допомогою контактної мережі (15 кВ, 162/3 Гц) можна швидко зарядити батарею іоністорів, щоб пізніше передати енергію акумуляторної батареї в режимі заряду невеликим струм. Зазначена технологія дозволяє продовжити термін служби батареї, підвищити ККД локомотива і забезпечити його роботу в режимі короткочасних заходів під контактну мережу [4].

Серед ринку гібридного рухомого складу також важливо відмітити досягнення Японської залізничної компанії-оператор JR East, яка експлуатує

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рейкові автобуси моделі Kiha E200 з гібридним накопичувачем енергії, починаючи з липня 2007 року. Рухомий склад обладнаний дизельним двигуном, потужність якого складає 331 кВт, головним генератором змінного струму потужність якого складає 270 кВт, та двома електричними тяговим двигунами потужністю 95 кВт. Літій-іонна батарея потужністю 15,2 кВт·год при напрузі 680 В, розташована на даху. Рейковий автобус працює на лінії Koumi, яка характеризується затяжними ділянками з значними ухилами. Конструкція рухомого складу передбачає можливість роботи в режимі «рух під ухил» з використанням рекуперативного гальмування. За результатами дослідної експлуатації було встановлено, що завдяки використанню рекуперації та акумуляуванню енергії вдалося знизити витрати палива на 10%, а вміст шкідливих речовин і твердих частинок у вихлопних газах дизеля – на 60%. Конструкція автобуса передбачає, що під час стоянок двигун вимкнений, що суттєво знижує рівень шуму на 30 дБ. Також слід відзначити, що після 6 років експлуатації погіршення характеристик літій-іонного акумулятора виявилось менш помітним, ніж передбачалося, і тепер очікується, що термін його служби перевищить передбачені спочатку 8 років [23].

Наступної моделлю розробленою на базі Kiha E200 став NB-E300, головною особливістю є відсутність режиму роботи «рух під ухил», даний рейковий автобус використовується як туристичний потяг, та експлуатуються на лінії Tsugaru, Ohminato, Gonoh и Sinonoi, які частково електрифіковані.

Рейковий-автобус на паливних елементах New Energy Train, компанії-оператора JR East, експлуатуються на електрифікованих маршрутах та не електрифікованих ділянках. Рухомий склад обладнаний двома тяговими двигунами потужністю 95 кВт. В кузові встановлена літій-іонна акумуляторна батарея напругою 605 В ємністю 30 А·год., що складається з 164 елементів з вихідною напругою 3,6 В [23].

Аналізуючи ринок локомотивів СНГ можливо відзначити, що питання гібридного приводу також є актуальним та в цьому напрямку ведуться роботи. Так в 2009 році був представлений локомотив ЛГМ1, розроблений НПП «Полет».

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Локомотив призначений для виконання легкої маневрової та господарської роботи на промислових підприємствах, з метою заміни застарілих локомотивів ТГМ1, ТГМ23, ТГМ40 та ТГК2. Накопичувач змонтований на стелажі в одному з відсіків капота, та представляє собою кислотні тягові акумулятори фірми «ТАВ» потужністю (146÷220 кВт). В якості джерела живлення тягових двигунів та акумуляторів дизель-генераторну установку потужністю до 60 кВт, але за потреби конструкція припускає використання закордонних дизель-генераторних установок.

Перевагою нового локомотива є зниження витрат на перевезення на 30 – 40% в порівнянні з застарілими ТГМ23 та ТГК2; зниження рівня споживання палива; скорочення витрат на технічне обслуговування та ремонт; суттєве скорочення рівня шуму при роботі з вимкненим дизелем; підвищена екологічність; при роботі двигуну на газі можливе скорочення кількості шкідливих речовин до атмосфери на 80 – 90%. За результатами дослідів порівняння з ТГМ23 дозволяє знизити витрати на дизельне паливо на 297 тис гривень на рік, дизельне мастило на 107,4 тис. грн на рік.; знизити витрати на технічне обслуговування та ремонт більш ніж в 2 рази (з 24,8 до 109,9 тис на рік). Термін окупності інвестицій на придбання локомотива – 5,8 року (без урахування фактору часу) [22].

Наступним локомотивом представленим є російський маневровий тепловоз з гібридною силовою установкою ТЭМ9Н SinaraHybrid, розробку якого почали в грудні 2010 року. Гібридний привод локомотива представляє собою дизель генераторну установку та змонтовані в капоті літій-залізо-фосфатні акумулятори «Ліотех» на 300 А·год та суперконденсатори. Встановлений асинхронний привід регулюється за допомогою векторного способу керування. Перевагою такої силової установки є можливість запасання енергії при рекуперативному гальмуванні, спроможність віддавати енергію з накопичувачів під час номінальних навантажень, виконання маневрових переміщення з вимкненим дизелем до 60 хвилин. Приблизна сумарна потужність дизель генератора дорівнює 630 кВт, а накопичувача 252 кВт. Встановлення сучасної дизель-генераторної установки ДГ-630ЛН дозволило знизити витрати палива на 30% в порівнянні з тепловозом ТЭМ9,

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

скорочення витрат на життєвий цикл локомотива на 18%, та зниження кількості шкідливих викидів до навколишнього середовища в межах 55%. Сила тяги при рушанні з місця дорівнює 291 кН. При швидкості тривалого режиму 10.1 км/год, дорівнює 253 кН [20].

У 2013 році Брянський машинобудівний завод, який входить в об'єднання «Трансмашхолдинг», представив комбінований гібридний тепловоз ТЭМ35, призначений для виконання середньоважких маневрових робіт. Під час 300 годинних випробувань проведених в локомотивному депо Брянськ-2 локомотив встановив рекорд в веденні вантажного потяга вагою 7000 т. на сортувальній гірці.

В якості силової установки був обраний дизель Caterpillar C-18 ACERT потужністю 571 кВт, перевагою даного двигуна є покращені експлуатаційні та екологічні показники. Номінальна енергоємність накопичувача (суперконденсатора) «ЕЛТОН» дорівнює 22,7 МДж. Даний тип накопичувача забезпечує велику кількість циклів заряду-розряду, широкий температурний діапазон (від -50 до +40 °С). тяговий привід представляє собою асинхронні тягові двигуни. Сила тяги при рушанні з місця 373 кН, тривалого режиму при швидкості 7,8 км/год 206 кН [21].

З огляду на все вище перераховане ТЭМ35 володіє наступними перевагами в порівнянні з однаковими по потужності серійними локомотивами, а саме зменшення витрат палива на 20%, зниження кількості шкідливих викидів у навколишнє середовище за рахунок встановлення двигуна меншої потужності, зменшення експлуатаційних витрат. Робота даного локомотива найбільш ефективна в маневровому режимі, який передбачає часті гальмування, зупинки, зрушення з місця і розгін тепловоза [21].

Найбільш сучасною розробкою Російської компанії «Трансмашхолдинг» є ТЭМ5Х це двухвісний гібридний тепловоз призначений для маневрово-вивізної роботи та вокзальних комплексах [5]. Особливістю даного локомотива є модульна конструкція, яка суттєво скорочує час простою локомотива в ремонті, оперативно замінюючи несправний модуль, конструкція дозволяє змінювати конфігурацію

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обладнання в залежності від потреб замовника. Перевагою даної конструкції локомотива є можливість роботи, як акумуляторного електровоза або двох дизельного тепловоза. Розробники використали дизель-генераторну установку потужність 200 кВт, але без гібридної схеми дана силова установка виконувати покладені на неї тягові зусилля. Однак за рахунок використання літєво-іонних батарей розроблених АО «Роснано» потужністю 240 кВт, дозволяє в певний момент доповнити потужність дизеля та отримати необхідні тягові характеристики при більш високому рівні екологічності та економії пального до 30% [5].

Розглянувши світовий досвід проектування гібридного рухомого складу, можливо відзначити наступні вимоги до тягового рухомого складу, а саме: дизель-генераторна установка повинна мати потужність від 200 до 500 кВт, накопичувач енергії представляє собою блоки суперконденсаторів або ж в більшості випадків літій-іонні акумулятори потужність яких коливається від 100-300 кВт, та обов'язкова модульна конструкція. До головних переваг гібридного привода можливо віднести такі переваги в порівнянні з використовуваними в даний час тепловозами: скорочення витрат на пальне, підвищення рівня екологічності, скорочення витрат на обслуговування та ремонтне обладнання, скорочення рівня шуму від вимкненого двигуна. Отже наведені приклади показують, що використання накопичувачів енергії для тяги поїздів є досить ефективним енергозберігаючим заходом.

1.4 Аналіз характеристик накопичувачів енергії та можливості їх застосування на гібридному рухомому складі

Аналіз у виборі того чи іншого використання накопичувача виконується на основі параметрів акумуляторної батареї:

- енергоємність на одиницю маси;
- ефективність зарядно-розрядного циклу;
- питома вартість;

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– надійність та безпеку в експлуатації.

Данні показники головним чином характеризують характеристики накопичувачів, в свою же чергу ці показники визначають можливість застосування даних елементів гібридному рухомому складі. За типом накопичування енергії розрізняють: механічні, електромеханічні, електрохімічні і електродинамічні.

Маховичний накопичувач енергії працює за рахунок розгону ротора (махового колеса) до високої швидкості й накопичує енергію у якості енергії обертання. Для використання накопиченої енергії обертання система із маховиком переводиться в електрогенераторний режим. Для розгону або гальмування маховика в більшості МНЕ-систем застосовується електрика, але розробляються також пристрої, що прямо використовують механічну енергію. У передових МНЕ-системах ротори виготовлені з високоміцних вуглецевоволокняних композиційних матеріалів. У порівнянні з іншими способами накопичення енергії МНЕ-системи характеризуються довговічністю, високими показниками щільності енергії (~ 130 Вт·год/кг або ~ 500 КДЖ/кг) і великою максимально генеруємою потужністю. ККД енергії (відношення кількості переданої енергії до кількості отриманої енергії) у маховичних накопичувачах може досягати 90%. Швидка зарядка системи здійснюється менш ніж за 15 хвилин [6]. Перевагою даної системи є екологічна чистота, безшумний хід, маховики мають властивість швидко віддавати енергію на 100%, на відміну від АКБ не обмежені навантаженням, відсутність забруднення навколишнього середовища як при експлуатації та утилізації, тривалий термін служби, відсутність витрат на ТО [7].

В межах огляду також варто звернути розробки останніх років, які дозволили створити супермаховики – складні високотехнологічні пристрої, головним призначенням яких є запасання енергії. Супермаховик запасує енергію у вигляді кінетичної енергії обертання. Кількість енергії пропорційна інерції обертового тіла і квадрату кутової швидкості обертання. До недавнього часу певне коло технічних проблем не дозволяло супермаховикам конкурувати з іншими способами запасання енергії. Перш за все, це було пов'язано з недостатньою енергоефективністю,

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

питомою енергоємністю і максимальним часом зберігання енергії. Все вище перелічене було причиною для невиправданого збільшення масо габаритних показників, вартості виготовлення та експлуатації, обмеження областей застосовності. Впровадження сучасних композитних матеріалів для виготовлення маховиків, дозволило значно збільшити швидкості обертання і енергоємність системи. Комерційні моделі інверторів в даний час підтримують частоти до 500 Гц, що дозволяє забезпечувати роботу двополюсних машин на швидкостях до 30000 об/хв, а також мають досить високу швидкодію для компенсації пульсацій і стрибків напруги. Це властивість становить важливу особливість супермаховика і є одним з головних переваг в порівнянні з акумуляторами. ККД перетворення інвертора, що використовується для живлення супермаховика, може досягати 95-98% [8]. При створенні спеціалізованих моделей інверторів частота живлення може бути збільшена, а ККД доведений до верхньої межі зазначеного діапазону. Загальний ККД, з урахуванням втрат при зберіганні енергії та ефективності перетворення, перевершує 85% і в деяких випадках може досягати максимальних значень в 97% [9]. Гранична енергоємність сучасних супермаховиків досягає 300 Вт·год/кг [10].

В межах огляду слід зазначити індуктивні накопичувачі (ІН) енергії, які працюють за рахунок створення магнітного поля під час протікання струму через індуктивні котушки. Даний вид накопичувача працює в режимі $t_p < t_3$ (де, t_p – час розряду; t_3 – час заряду), така особливість роботи дає можливість короткочасно жити потужні споживачі енергії. Нюансом роботи є протікання значних струмів які потребують правильної організації процесів охолодження котушок. До переваг ІН можливо віднести високу надійність, можливість живлення від низьковольтних джерел живлення, масогабаритні показники. До недоліків ІН можливо віднести потребу в примусовому охолодженні, великі електродинамічні зусилля, потреба в використанні швидкодіючих комутаторів, відносно невеликий КПД зарядно-розрядного циклу.

Надпровідникові ІН є найбільш енергоємними завдяки високим значення

						0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

щільності струму, відсутності омічних втрат, і високого ККД. Накопичувачі даного типу знайшли обмежене використання на автономному рухомому складі, що дозволяє знизити витрати палива, підвищити рівень екологічності за рахунок організації роботи дизель-генератора в найбільш економічному режимі роботи. Так використання надпровідникових НІ дозволило отримати річну економію палива 30-35% для маневрового локомотива та 8-12 % для магістральних локомотивів. Окрім обмеженого використання накопичувача на рухомому складі він також використовується для стабілізації напруги на навантаженні(в контактній мережі); стабілізації потужності (струму), споживаної з системи зовнішнього електропостачання; забезпечення рекуперації електроенергії від електрорухомого складу через контактну мережу. Перевагами надпровідникових НІ є відсутність полів розсіювання, транспортабельність в залізничних габаритах, секціонування обмотки, непрямий спосіб охолодження обмотки, можливість аварійного скидання енергії без використання баластних опорів. [14].

Електромеханічні накопичувачі енергії можливо віднести до розряду найбільш потужних джерелами живлення. Перевагою електромеханічних накопичувачів є довговічність, екологічна безпечність, простота в технічному обслуговуванні. Вони володіють більшою ефективністю передачі збереженої енергії в навантаження. Механічний накопичувач на базі маховика з'єднаний з електричною машиною, який працює як двигун та генератор [8]. Дані акумулятори знайшли обмежене застосування на рухомому складі, а саме малої та середньої потужності.

На сьогоднішній день найбільш широкого розповсюдження набули електрохімічні накопичувачі, а саме свинцеві та нікель-залізні, нікель кадмієві.

Свинцево-кислотні накопичувачі набули найбільшого розповсюдження в зв'язку з низькою вартістю, налагоджену технологію виробництва. В якості електроліта використовується розчин сірчаної кислоти, в якості активної речовини використовується позитивні пластини – двоокис свинцю PbO_2 , до негативних пластин відноситься губчастий свинець Pb . Але даний тип накопичувача також має

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

недоліки виражені в значному часі зарядки, мала енергоємність, використання токсичного свинця, незадовільно переносять розряд більш ніж на 50%, що знижує їх термін служби, велика вага.

Суттєвий час заряджання акумулятора спричинений особливостями кінетики електромеханічного процесу, тому до такого виду накопичувача не можливо використати форсований режим зарядки. Виявлено що для досягнення 100% ступеня зарядженості потрібно витратити в середньому від 12-15 годин, при цьому найбільший час заряджання, приблизно 7-10 годин потрібно для досягнення ступеня заряду в 80-100% [9].

Нікель-кадмієві накопичувачі широко використовуються протягом багатьох років та здобули широкого застосування в транспорті, побутовій техніці, та зарекомендували себе як одні з найкращих хімічних джерел живлення. Принцип дії полягає в формуванні гідроксиду кадмію на аноді і гідроксиду нікелю – на катоді.

Перевагами даного виду накопичувача є можливість працювати при низьких температурах, більша енергоємність ніж у свинцево-кислотних, більший струм розряду та заряду, можливість тривалого зберігання в розрядженому стані, неможливість самозаймання на відміну від літєвих батарей, більша кількість циклів розряджання та заряджання. Зважаючи на всі переваги даного виду акумулятора, він також має суттєві недоліки, які полягають в складності технічної експлуатації, високий рівень саморозряджання, наявність ефекту пам'яті. Суть даного ефекту полягає у різкому падінні енергоємності при неповному розряджанні або заряді [10].

Натрій-сірчані акумулятори. Активний розвиток даного виду накопичувача прийшовся на другу половину ХХ сторіччя, через різке зростання необхідності в хімічних джерелах енергії. Особливу увагу дана система отримала через особливі переваги порівняно з іншими моделями хімічних накопичувачів, а саме високу теоретичну питому енергію, вихідні матеріали мають малу вартість та доступність, герметичний та придатний для роботи в будь-яких кліматичних умовах. Головним недоліком є температура експлуатації 320-340 °С, це пов'язано з температурою

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

плавлення утворюються полісульфідів і недостатньо високою провідністю в-глинозему при більш низьких температурах. Інші недоліки обумовлені робочою температурой: вихідні компоненти, натрій і сірка, в рідкому стані вибухонебезпечні при прямому контакті, виникають також труднощі у підборі корозійностійких матеріалів [11].

Перші прототипи літій-іонних акумуляторів з'явилися в 1970 року, в даних моделях анод складався з літію, а катод з окисів титана або молібдена.

Принцип роботи заснований на наступному, однозарядні катіони літію-це практично єдиний іон, що переносить струм в органічному неводному електроліті. Протиіоном є громіздка і малорухлива молекулярна "конструкція", що володіє негативним зарядом. Іон Li^+ при зарядці акумулятора розряджається на поверхні графітового анода, перетворюючись в нейтральний атом літію. Цей атом негайно вступає поглинається графітом, проникаючи між шарами його кристалічної решітки. Утворюється графітид літію - так званий інтеркалят або з'єднання. За своїми хімічними властивостями це сильний і активний відновник. Одночасно з цим, кобальтит літію на катоді поставляє в розчин іони літію, а сам при цьому, втрачаючи літій, все більше за складом наближається до двоокису кобальту, в результаті чого стаючи сильним і активним окислювачем. Різниця електрохімічних потенціалів між цими окислювачем і відновником дорівнює ЕРС літій-іонного акумулятора. При розряді відбуваються зворотні процеси. Літій, залишаючи міжшаровий простір на аноді, віддає в зовнішній ланцюг електрон і набуває заряд, стаючи катіоном, а графітид літію – просто графітом. На катоді ці катіони повертається в вакансії кристалічної решітки кобальтиту літію, який втрачає свої окислювальні властивості, приймаючи електрон в зовнішній ланцюг [12].

Перевагами даного виду накопичувача є висока енергоємність, глибокі циклу заряду/розряду, великий струм під час роботи, відсутність ефекта пам'яті, можливість створювати акумулятори будь-яких форм, широкий діапазон робочих температур. Кожна з перелічених переваг обумовлює використання літій-іонних накопичувачів в тій чи іншій сфері.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Суттєвим недоліком першого покоління накопичувачів є необхідність жорсткого дотримання правил експлуатації, тому що є ризик утворення на літєвому аноді металевих «голок», які під час подальшої експлуатації пробивали шар електроліту. Наслідком цього є коротке замикання, що супроводжується вибухом.

Наступним кроком розвитку літєвих акумуляторів є заміна матеріалу анода на вуглець та графіта. Завдяки застосуванню графіта вдалося уникнути ефекта «голок» з літію, але дана модель також вимагає суворого дотримання виконання правил експлуатації. Це пов'язано з тим що під час повної розрядки катод починає розкладатися, що спричиняє коротке замикання та вибух.

Третім поколінням літій-іонних акумуляторів стало використання наповнювачем катоду ферро-фосфат літію (LiFePO_4). Перевагою даного наповнювача є його не токсичність, здатність розряджати практично весь свій потенціал до 90%. Цей матеріал дозволяє одночасно забезпечувати високу щільність енергії, безпека, тривалий ресурс, широкий температурний діапазон експлуатації і екологічність акумуляторів. При порівнянні вартості літій-іонних акумуляторів з традиційними слід враховувати, що літій-іонні мають істотно більший ресурс, вони дешевше в експлуатації, не вимагають спеціальних приміщень і займають мінімум площі. Стабільна напруга протягом розряду дозволяє використовувати літій-іонні акумулятори меншої ємності, ніж традиційний [13].

Конденсатори великої ємності також починають застосовуватися для конденсаторних систем пуску (КСП) дизелів локомотивів, особливо при зношених акумуляторних батареях і знижених температурах навколишнього середовища. КСП з молекулярними наповнювачами енергії (МНЕ), використовуваними в складі системи пуску дизелів локомотивів, дозволяють подолати механічний опір на стартове розкручування колінчастого вала (1,5 – 2 с), і КСП практично на порядок знижують струмове навантаження батареї у момент запуску дизеля. КСП призначені для підвищення надійності, збільшення ресурсу систем запуску дизелів,

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поліпшення умов експлуатації і обслуговування локомотивів і володіють наступними перевагами: запуск дизеля проводиться навіть при зниженні напруги батареї до 40-30 вольт; стартова потужність КСП в 10 разів перевищує потужність штатних акумуляторних батарей; гарантований швидкий запуск дизеля, в т. ч. в умовах низьких температур, дозволяє домагатися значної економії палива, особливо на підприємствах промислового транспорту з циклічним характером технологічних перевезень; дозволяє значно скоротити потрібну ємність акумуляторних батарей і замінити їх на більш дешеві; термін служби КСП - до 15 років; кількість зарядно-розрядних циклів - 2 млн; КСП виключно надійна і не вимагає спеціального догляду. Конденсатори великої ємності для тягових мереж виключається через обмеженої питомої енергоємності конденсаторів [18].

З огляду на сучасний ринок накопичувачів важливо відмітити стрімкий розвиток суперконденсаторів (іоністор) – конденсатор з електролітом з органічного або неорганічного матеріала, роль обкладинок виконують подвійний шар на кордоні розподілу електрода та електроліта. При виготовленні електродів використовують пористі матеріали, наприклад, спінені матеріали, а також активоване вугілля. Варто відзначити, що добірка даних металів відбувається згідно з типом електроліту. Однак перші моделі суперконденсаторів володіли на порядок меншою щільністю енергії, ніж акумулятори. Варто також відзначити, що на щільність потужності суперконденсатора безпосередньо впливає його внутрішній опір.

В сучасних моделях суперконденсаторів значно зменшився внутрішній опір, що дозволило підвищити їх потужність. До переваг іоністорів відносять великі максимальні струми зарядки і розрядки, а також просту конструкцію зарядного пристрою. До одних з найбільш важливих переваг іоністорів варто віднести надзвичайно малу деградацію після численних циклів заряду і розряду. Також іоністори можуть похвалитися досить малою масою щодо інших конденсаторів. Можливість працювати в широкому температурному інтервалі (від - 40 до +70 °С) та високий ККД [15].

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Не зважаючи на те, що даний тип накопичувача має явні переваги, йому також присущі ряд недоліків, їх виробництво має досить високу собівартість, суперконденсатори на 5000 Ф на початку 2019 доходять до \$100, що при ємності 5 Вт·год дає питому вартість \$20 Вт·год. Питома вартість ємності літію вже опустилася до рівня трохи нижче \$200 кВт·год або \$0,2/Вт·год [17]. Суперконденсатори не підходять для тривалого зберігання енергії. Швидкість розряду суперконденсаторів значно вище, ніж у літій-іонних акумуляторів; вони можуть втратити до 10-20% свого заряду в день через саморозряд [16].

Порівняльні характеристики продуктивності пристроїв накопичення енергії приведені на діаграмі (рисунок 1.3) [18].

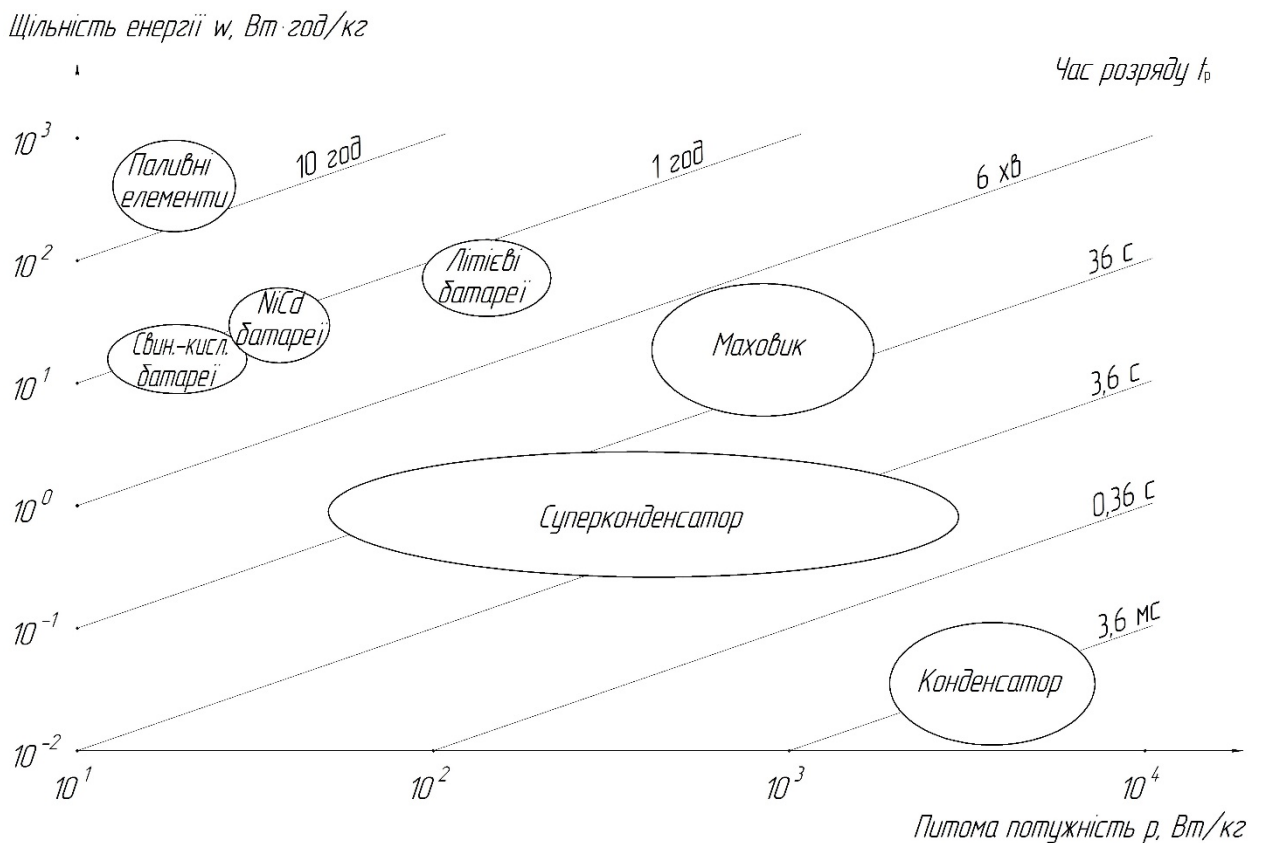


Рисунок 1.3 – Діаграма порівняльної характеристики пристроїв накопичення енергії

Виходячи з аналізу діаграми можливо прийти до висновку що електрохімічні накопичувачі мають низьку питому потужність, порівнюючи з

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переваги серед інших електрохімічних акумуляторів, а саме більш висока щільність енергії, менший час заряду, мають менші геометричні розміри. Порівнюючи літєвий накопичувач та суперконденсатори, літєві накопичувачі мають більший час заряду, меншу кількість циклів заряду-розряду, але не зважаючи на все переваги останнього. Іоністор не здатний повністю забезпечити потреби локомотиви на номінальних навантаженнях, через швидкий час розряду, але найбільш суттєвим недоліком є собівартість одного елемента. Зважаючи на все вище перераховане більш перспективним є застосування літєвих накопичувачів на гібридному рухомому складі.

Висновки до розділу. Зважаючи на світову тенденцію подорожчання паливно-енергетичних ресурсів, можливим вирішенням даних проблем є впровадження в експлуатацію маневрово-вивізного локомотива з гібридним приводом. Перевагою даної системи є зниження витрат паливно-мастильних матеріалів на одиницю виконаної роботи за рахунок впровадження більш економного малопотужного дизельного двигуна в порівнянні з базовим, який буде працювати на найбільш оптимальних режимах роботи. Впровадження гібридного приводу дозволить збільшити періоди циклів технічного обслуговування (ТО) та знизити витрати на обслуговування та ремонти. Впровадження модульної конструкції гібридного локомотива дозволяє провести оптимізацію витрат на утримання обладнання та технічного персоналу, забезпечує можливість створення страхового фонду деталей та вузлів, в межах ремонтних депо комбінатів, що в свою чергу призведе до зменшення часу знаходження локомотива в планових та позапланових ремонтах, та підвищить коефіцієнт готовності локомотивного парку підприємств. Впровадження сучасних накопичувальних акумуляторів дозволяє суттєво знизити рівень шуму локомотива, за рахунок його роботи з вимкненим дизельним двигуном, а саме роботи на низьких режимах, під час маневрових переміщень та виконанні господарчих переміщень в межах комбінату. Застосування сучасного економічного дизеля дозволить суттєво знизити рівень викидів токсичних речовин в навколишнє середовище при їзді в приміських

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

районах населених пунктів.

Виходячи з вищезазначеного, можливо зробити висновок, що створення й впровадження локомотива з гібридним приводом в системі підприємств групи «МЕНТІНВЕСТ» та АТ «Укрзалізниця», є доцільним та обґрунтованим рішенням.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ РОБОТИ МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗІВ

2.1 Постановка задачі

Визначимо необхідну потужність силової установки нового тепловоза на основі завантаження локомотива при роботі на конкретних ділянках (дизель обираємо за середньою потужністю, а накопичувач за дефіцитом енергії).

Для Криворізького регіону тепловози ТЭМ2 використовуються для вивізної, маневрової та сортувальної роботи на ділянках з різним профілем (таблиці 2.1 – 2.3).

Таблиця 2.1 – Спрямлений профіль колії для вивізної роботи

№ ділянки	Спрямлений профіль, ‰	Довжина, м	Радіус кривої, м	Довжина кривої, м	Станція/колія
1	-2,9	1100	-	-	ЦГОК
2	2,7	1250	-	-	К

Приймаємо масу складу для вивізної роботи с завантаженим складом 5000 т, а з порожніми – 1290 т. В горочній роботі – 2000 т, а на початку маневрової роботи – 690 т.

2.2 Методика виконання тягових розрахунків

Методика використовує терміни і позначення, що застосовуються в ПТР, правилах тягових розрахунків для промтранспорту і довідниках по тяговим розрахункам.

Найбільш ефективним є використання для розрахунків спеціального програмного забезпечення, наприклад Microsoft® Office Excel, яке враховує особливості роботи промислового транспорту.

Основний опір руху діє на поїзд постійно.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160159.000.04МР.ПЗ					

Таблиця 2.2 – Спрямлений профіль колії для горочної роботи

№ ділянки	Спрямлений профіль, ‰	Довжина, м	Радіус кривої, м	Довжина кривої, м	Станція/колія
1	0,4	75			К
2	-0,3	100	150	50	
3	-0,9	100			
4	0,6	100			
5	0,5	100			
6	0,7	100	200	75	
7	0,6	100			
8	-0,3	100			
9	-0,4	100			
10	-0,1	93	175	60	
11	0,3	28			
12	0	13,73			
13	0,3	28,15			
14	1,1	71,1	250	40	
15	0	14,3			
16	-0,3	28,1			
17	-1,7	11,8			
18	-2,1	28,28			
19	0,8	62,3	300	35	
20	1,3	75			
21	-0,4	100			
22	0,6	100			
23	1,1	100	175	45	
24	12	40			
25	9	20			
26	10	20			
27	14,4	9,79			
28	12,6	10,21			
29	15	10			
30	12	6			
31	6	5			
32	5	14			
33	0	8			С

Таблиця 2.3 – Спрямлений профіль колії для маневрової роботи

№ ділянки	Спрямлений профіль, ‰	Довжина, м	Радіус кривої, м	Довжина кривої, м	Станція/колія
1	2	3	4	5	6
1	-1,90	15			5
2	-1,5	4,16			
3	0	25			
4	-0,9	25	150	38	
5	-1,1	50			
6	-1,6	50			
7	-2,7	22			
8	-3,8	100			
9	-0,1	100			
10	7	100	175	60	
11	7,6	35			
12	2,8	35			
13	-0,2	100			
14	-0,8	100			
15	0,8	100			6
16	0,8	100			
17	0,2	75			
18	1	100			
19	0,2	100			
20	-0,5	100			
21	-2	36			
22	-0,9	25			
23	0	25			
24	-0,5	25			13
25	0	25	200	56	
26	-1,6	56			
27	-2,7	22			
28	-3,8	125			
29	-0,1	100			
30	7	100	175	60	
31	7,6	35			
32	2,8	35			
33	-0,2	100			
34	-0,8	100			
35	0,8	100			
36	0,2	50			MP
37	0,7	100			
38	1	100			

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5	6
39	0,2	100			
40	-0,5	75	125	25	
41	-2,8	32			
42	-0,9	25			
43	-0,5	0			
44	0	25			4
45	-1,6	56			
46	-2,7	22			
47	-3,8	100			
48	-0,1	98	150	50	
49	7	75			
50	7,6	35			
51	1,6	113			
52	-0,4	78			
53	-0,5	100			
54	0,6	100			5

Основний питомий опір руху локомотивів визначається за формулами:

– для тягового режиму

$$\omega'_0 = 3,9 + 0,013 \cdot V + 0,00026 \cdot V^2, \quad (2.1)$$

– для режиму холостого ходу

$$\omega'_{0X} = 4,55 + 0,013 \cdot V + 0,00026 \cdot V^2, \quad (2.2)$$

де V – швидкість руху поїзда, км/год.

Основний питомий опір руху вагонів в залежності від швидкості приймається у вигляді:

– для вагонів в завантаженому стані

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_0'' = 0,7 + \frac{3,0 + 0,1 \cdot V + 0,0025 \cdot V^2}{q_0}, \quad (2.3)$$

– для порожніх вагонів

$$\omega_{0X}'' = 1,0 + 0,044 \cdot V + 0,00024 \cdot V^2. \quad (2.4)$$

До додаткового опору відносяться непостійно діючі фактори.

Додаткове питомий опір руху від ухилу чисельно дорівнює самому ухилу, який визначений в тисячних (‰).

$$\omega_i = i, \quad (2.5)$$

Якщо поїзд рухається на підйом, то ухил береться зі знаком «+», а при спусках зі знаком «-».

Додаткове питомий опір, яке виникає під час руху поїзда в кривій, визначається в залежності від радіуса кривої

– при $R \geq 300$ м

$$\omega_R = \frac{700}{R}, \quad (2.6)$$

– при менших значеннях радіуса

$$\omega_R = \frac{900}{100 + R}, \quad (2.7)$$

де R – радіус кругової кривої в плані, м.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формули (2.6, 2.7) застосовуються, якщо довжина кривою більше довжини поїзда. При довжині кривої менше довжини поїзда додаткове питомий опір від кривої зменшується пропорційно відношенню довжини кривої до довжини поїзда.

Повний опір руху поїзда в тяговому режимі визначається як сума основного та додаткових опорів і залежить від швидкості поїзда і місця його розташування.

$$W = \omega'_0 \cdot P + \omega''_0 \cdot Q + (P + Q) \cdot (\omega_i + \omega_R), \quad (2.8)$$

де P – розрахункова маса локомотива, т;

Q – маса складу (вагонів) поїзда, т.

При русі в режимі холостого ходу замість ω'_0 і ω''_0 в формулу підставляється ω'_{0X} і ω''_{0X} .

Для гальмування використовується пневматичне гальмівне колодкове обладнання локомотива і вагонів.

Повна гальмівна сила при колодковому гальмуванні визначається за формулою:

$$B_2 = \sum \varphi \cdot K, \quad (2.9)$$

де φ - розрахунковий коефіцієнт тертим колодок про колесо.

Сума береться для локомотива і всіх вагонів.

Питома гальмівна сила при колодковому гальмуванні визначається за формулою:

$$b_2 = \frac{B_2}{P + Q}, \quad (2.10)$$

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт тертя в залежності від типу колодок може визначатися за формулами:

- для локомотива при стандартних чавунних колодках

$$\varphi = 0,6 \cdot \frac{0,016K + 100}{0,080K + 100} \cdot \frac{V + 100}{5V + 100}, \quad (2.11)$$

- для вагонів при композиційних колодках

$$\varphi = 0,44 \cdot \frac{0,001K + 20}{0,004K + 20} \cdot \frac{V + 150}{2V + 150}, \quad (2.12)$$

де K – дійсна сила натискання гальмівної колодки на вісь, кН.

У процесі гальмування повне значення гальмівної сили не може бути реалізовано миттєво. Поступовість процесу наповнення гальмівних циліндрів спрощено може враховуватися через час підготовки гальм до дії t_n , яке обчислюється при загальній кількості осей 200 і менше

$$t_n = 7 - \frac{10 \cdot i}{b_2}, \quad (2.13)$$

Для коротких поїздів з декількох вагонів час підготовки гальм до дії визначається за формулою:

$$t_n = 3 - \frac{5 \cdot i}{b_2}, \quad (2.14)$$

Залежність сили тяги локомотива від швидкості має досить складний характер і визначається позицією контролера і коефіцієнтом зчеплення колеса і

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рейки. Для тягових розрахунків під час проектування дозволяється використовувати розрахункові тягові і паливні характеристики.

На початкових ділянках тягових характеристик, максимальне значення сили тяги, обмежується як правило зчепленням рейки і колеса. Значення коефіцієнта зчеплення для різних типів локомотивів і різних умов експлуатації визначається за такими формулами:

- для тепловозів промислового транспорту

$$\psi = 0,25 + \frac{8}{100 + 20V}, \quad (2.15)$$

При русі локомотива в кривих ділянках колії відбувається зниження коефіцієнта зчеплення ψ до значення ψ_R , яке визначається за формулою:

$$\psi_R = \psi \frac{250 + 1,55R}{500 + 1,1R}, \quad (2.16)$$

У ПТР формула (17) рекомендується для електричної тяги при радіусах менше 500 м, а для тяги тепловоза при радіусах менше 800 м використовується формула:

$$\psi_R = \psi \frac{3,5R}{400 + 3R}, \quad (2.17)$$

При радіусах, які більше зазначених, $\psi_R = \psi$.

Сила тяги локомотива на ділянках обмеження по зчепленню визначається:

— для прямих

$$F_D = 1000 \cdot P \cdot \psi, \quad (2.18)$$

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– для кривих

$$F_D = 1000 \cdot P \cdot \psi_R, \quad (2.19)$$

Маса складу поїзда Q визначається з умови руху поїзда з постійною розрахунково-мінімальною швидкістю V_p на керівному підйомі i_p :

$$Q = \frac{F - (\omega'_0 + i_p) \cdot P}{(\omega''_0 + i_p)}, \quad (2.20)$$

Для тепловозів промислового транспорту масу складу поїзда слід визначати за формулою:

$$Q = \frac{367 \cdot \eta \cdot N}{V_p \cdot (\omega''_0 + i_p)} - P, \quad (2.21)$$

де η – коефіцієнт наближення реальної тягової характеристики тепловоза до ідеальної;

N – відповідна потужність для тепловозів, які застосовуються на промисловому транспорті в середніх умовах, кВт.

Оскільки під час руху поїзда в кривих ділянках колії виникає додатковий опір і знижується сила тяги, при проектуванні поздовжнього профілю слід зменшувати керівний ухил на значення додаткового опору від кривої. Вплив зменшення коефіцієнта зчеплення від кривої може враховуватися додатковим зменшенням ухилу на величину, яка приведена в таблиці 2.4.

Отриману масу складу поїзда слід перевірити на зрушення з місця, на не перевищення довжини приймально-відправних колії.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Вплив зменшення коефіцієнта зчеплення від кривої на керівному ухилі

Радіус кривої R , м	Тепловози			Електровози		
	Керівний ухил i_p , ‰					
	60	40	20	60	40	20
400	8	5,5	3	5	3,5	2
300	12,5	8,5	5	9,5	6,5	3,5
200	19,5	13,5	7,5	15	10	5,5
100	32	22,5	12,5	22	15,5	9
60	41	28,5	16	26	18	10

Перевірка маси складу поїзда на зрушення з місця згідно ПТР виконується наступним чином

$$Q \leq \frac{F_{зп}}{\omega_{зп} + i_{зп}} - P, \quad (2.22)$$

де $\omega_{зп}$ – питомий основний опір руху складу поїзда при русанні з місця, Н/кН;

$i_{зп}$ – ухил, на якому відбувається зрушення поїзда, ‰.

Для магістрального транспорту і підшипників кочення:

$$\omega_{зп} = \frac{28}{q_0 + 7}, \quad (2.23)$$

Значення для промислового транспорту приймаються:

– для підшипників ковзання

$$\omega_{зп} = \frac{80}{q_0}, \quad (2.24)$$

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– для підшипників кочення

$$\omega_{zp} = \frac{20}{q_0}, \quad (2.25)$$

де q_0 – маса вагона брутто, що припадає на одну вісь, кН/вісь.

Для промислового транспорту необхідно забезпечити зрушення поїзда з місця на керівному ухилі.

Для локомотивів промислового транспорту слід виконувати перевірку за такою формулою

$$Q \leq \frac{F_{zp}}{110 \cdot a + \omega_0 + \omega_{zp} + i_{zp}} - P, \quad (2.26)$$

де a – прискорення поїзда при рушанні з місця, приймається $0,05 \text{ м/с}^2$ при вивізній роботі, $0,1 \text{ м/с}^2$ - при маневровій.

Перед побудовою залежності швидкості поїзда від пройденого шляху необхідно визначити обмеження швидкості на різних ділянках. При виконанні тягових розрахунків слід враховувати обмеження швидкості руху, які визначаються конструкцією одиниць рухомого складу і локомотивів, типами стрілочних переводів, вимогами безпеки руху. Основні обмеження, які визначаються безпекою руху, пов'язані з необхідністю забезпечити екстрене гальмування поїзда на відстані, яка не перевищує нормативне. Для промислового транспорту швидкість поїзда і його гальмівне обладнання повинні забезпечити зупинку поїзда на відстані, яка не перевищує 300 метрів.

Визначення максимально допустимої швидкості за умовами гальмування краще виконувати чисельної інтеграцією за допомогою Microsoft® Office Excel або

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналогічних програм.

Якщо прийняти, що на інтервалі часу $\Delta t = 1\text{с}$ рівнодіюча сила не змінюється, то зменшення швидкості ΔV в км/год при гальмуванні можна визначити за такою формулою:

$$\Delta V = \frac{r}{30}, \quad (2.27)$$

де r – загальна питома сила, що діє на поїзд, Н/кН.

Значення r приймається для початкової швидкості V . Після визначення ΔV обчислюється шлях ΔS

$$\Delta S = \frac{\left(V - \frac{\Delta V}{2} \right)}{3,6}, \quad (2.28)$$

Розрахунки повторюють до моменту, коли $V - \Delta V \leq 0$. Таким чином обчислюється шлях, який пройде поїзд від початку гальмування. Змінюючи початкову швидкість, знаходять її значення, при якому повний шлях гальмування складе 300 метрів. Виконавши розрахунки при декількох значеннях ухилів, отримують залежність максимальної швидкості за умовами гальмування від ухилу, яка необхідна для подальших розрахунків.

При використанні спеціалізованого програмного забезпечення всі розрахунки виконуються автоматично з урахуванням всіх особливостей, які перераховані вище.

При графічному виконанні розрахунків методом МПС для обліку зниження коефіцієнта зчеплення в кривих малих радіусів графіки $f_\phi - w_\phi$ слід будувати окремо для прямої і кривих малих радіусів. Також ці графіки будуються окремо для постійних і пересувних шляхів. Якщо рух відбувається вагонами вперед або в

						0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

умовах вітрового навантаження, додаткове питомий опір від цих чинників включається до складу основного питомого опору w_0 . Опір від кривих включається в випрямлення ухил i_c .

Розрахунки можна виконати за допомогою Microsoft® Office Excel.

В цьому випадку потрібно виконати розрахунки в тяговому режимі в прямому напрямку і в режимі службового гальмування в зворотному.

Для комп'ютерних розрахунків використовується чисельна інтеграція з кроком інтеграції шляхом ΔS , м. У цьому випадку в тяговому режимі:

$$\Delta V = \sqrt{V_n^2 + 0,24 \cdot (f_\partial - \omega_0 - i_c) \cdot \Delta S} - V_n, \quad (2.29)$$

$$V_\kappa = V_n + \Delta V, \quad (30)$$

$$\Delta t = \frac{60 \cdot \Delta S}{500 \cdot (V_n + V_\kappa)}, \quad (2.31)$$

де ΔV – зміна швидкості, км/год;

V_n – швидкість поїзда на початку кроку інтегрування, км/год;

V_κ – швидкість поїзда в кінці кроку інтегрування, км/год;

Δt – зміна часу, хв.

У режимі службового гальмування (розрахунок в зворотному напрямку)

$$\Delta V = \sqrt{V_n^2 + 0,24 \cdot (k_{ce} \cdot b_z + \omega_{0X} + i_c) \cdot \Delta S} - V_n, \quad (2.32)$$

$$\Delta t = \frac{60 \cdot \Delta S}{1000 \cdot \left(V_n + \frac{\Delta V}{2} \right)}, \quad (2.33)$$

де k_{ce} – коефіцієнт використання гальмівної сили під час службового гальмування, приймається 0,5.

									0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Якщо швидкість обмежується, то слід визначити потрібну для її забезпечення обмежену силу тяги:

$$F = (P + Q) \cdot (\omega_0 + i_c), \quad (2.34)$$

При негативних значеннях приймається нульове значення.

Механічна робота локомотива визначається підсумовуванням множення сили тяги локомотива на інтервали шляху, пройдені в тяговому режимі

$$R_m = \sum F \cdot \Delta S. \quad (2.35)$$

Інтервал інтегрування ΔS приймається не менше 50 м. Всі значення розраховуються при швидкості на початку інтервалу інтеграції. Для підвищення точності можна додати колонки з однією або декількома ітераціями з визначенням значень по середній швидкості інтервалу.

Визначення механічної роботи і витрат палива робиться шляхом їх підрахунків на кожному інтервалі. Погодинні витрати палива g_m (кг/год) при фіксованій потужності двигуна є практично постійними і визначаються з довідкових даних. При обмеженому використанні сили тяги погодинні витрати палива визначаються за потужністю, яка відповідає встановленим положенням контролера.

Витрати палива G , кг в тяговому режимі визначаються додаванням цих витрат на кожному інтервалі інтегрування:

$$G = \frac{\sum g_m \cdot \Delta t}{60}, \quad (2.36)$$

З достатньою точністю можна визначати витрати палива через механічну роботу локомотива:

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G = (0,8 \div 0,85) \cdot R_m, \quad (2.37)$$

Питома витрати пального на вимірювач:

$$g = \frac{G}{Q \cdot S} 10^4. \quad (2.38)$$

де S – шлях, який проїхав поїзд, км.

Безпосередньо тяговий розрахунок починається з 17-ї лінії. У 16-ій лінії у клітинах C16, T16, U16, AG16, AJ16 встановлюються початкові значення "0" (додаток).

В клітинку Q16 необхідно ввести формулу "= D2", а в клітинці AH16 - початковий проектну відмітку, м. У стовпці В, починаючи з клітинки B17 та далі, задаємо крок інтегрування.

Оскільки при розгоні поїзда швидкість руху змінюється дуже швидко, на початку задається крок інтегрування 5, 5, 10, 15, 15 метрів, а потім для всіх інших клітин – 50.

У клітині C17 задається формула "= C16 + B17" для обчислення пройденого шляху.

Після цього ця клітина копіюється у стовпчик С, починаючи з 18-го ряду та далі. Якщо довжина якийсь профільний елемент не кратний по 50 м, то у відповідній клітинці записується крок інтегрування менше 50 м. Кількість рядків у стовпцях В та С, які повинені бути заповнений, визначається за довжиною ділянки. Значення інтеграційного кроку до закінченню ділянки має бути "0".

У колонці А, починаючи з клітинки A17, записується значення радіуса "1000", що не призводить до зменшення зчеплення.

Після цього, згідно з планом ділянки, у відповідних стовпцях стовпчика записується значення радіусів кривих в метрів.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У колонці D, починаючи з рядка 17, записується спрямлені ухили поздовжнього профілю в тисячних.

Проаналізувавши останні рядки в колонках Q і AB, визначаємо момент переходу до службового гальмування. Для цього моменту беремо час ходу (хв) в тяговому режимі в стовпці T і в режимі службового гальмування в стовпці AD. Для цього ж моменту в стовпці U визначаємо механічну роботу локомотива (тисячі кгс·км) і витрату палива (кг) в стовпці AG. Витрати енергії і палива на власні потреби визначаються окремо через час ходу і погодинні витрати на власні потреби.

2.3 Результати розрахунку

Результати тягових розрахунків роботи тепловоза ТЭМ2 в різних видах роботи представлено в таблиці 2.5.

Висновки до розділу. В ході проведених тягових розрахунків були визначені основні параметри експлуатації та режими роботи маневрових тепловозів в різних видах роботи в умовах Криворізького регіону.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.5 – Результати тягових розрахунків роботи тепловоза ТЭМ2 по різних видах роботи

Показник	Вид роботи			
	маневрова	горочна	вивізна	
Відстань, пройдена локомотивом при виконанні роботи, км	23,9	3,76	4,7	
Час, затрачений локомотивом на виконання роботи, хв	200	54	126	
Час, затрачений локомотивом на очікування роботи, хв	40	17	54	
Енергія, яка витрачена локомотивом на виконання роботи, МДж	306	209	602	
Потужність дизеля, яка необхідна для роботи накопичувача, кВт	27,8	64,0	72,9	
Витрата палива на виконання роботи, кг	43,9	24,4	62,2	
Час роботи тепловоза по позиціям контролера, хв	0	48	15	90
	I	110	-	3
	II	35	12	4
	III	7	22	3
	IV	-	-	8
	V	-	2	-
	VI	-	1	-
	VII	-	2	18
VIII	-	-	-	-

3 ПРОЕКТ ТЕПЛОВОЗА З ГІБРИДНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ

3.1 Аналіз методів визначення параметрів гібридного приводу локомотива

Основним цільовим станом силової установки будь-якого транспортного засобу (ТЗ) є стан, що відповідає режиму тяги з потужністю, близькою до номінальної. Проте у більшості випадків спостерігаються дещо інші режими. Так, аналіз розшифрувань БІС-Р для тепловозів показав, що фактична витрата палива звичайно перевищує витрату, зазначену у техпаспорті локомотива. Це пов'язано насамперед із тривалим простоем локомотива, частою зміною позиції контролера машиніста, роботою на низьких позиціях і т.п. При виконанні маневрів локомотив по більшій частині працює на перехідних режимах, при цьому 50 – 60% часу він працює в режимі холостого ходу, 45 – 70% на низьких навантаженнях і лише 2 – 5% на номінальних навантаженнях.

Одним із способів підвищення ефективності експлуатації ТЗ є заміна існуючої дизель-генераторної установки на ДГУ меншої потужності з накопичувачем енергії (НЕ). У якості можливих НЕ можуть бути використані акумуляторні батареї, конденсатори високої ємності, гіроскопічні апарати.

При модернізації ТЗ гібридною передачею потужності його робота на середніх навантаженнях буде забезпечуватися роботою двигуна малої потужності; при роботі на холостому ході та низьких навантаженнях двигун малої потужності буде поповнювати запас енергії у НЕ і здійснювати роботу засобу; на високих навантаженнях робота ТЗ буде здійснюватися за рахунок енергії НЕ і за рахунок роботи двигуна малої потужності. Окрім економічної сторони, скорочення витрати палива, дана модернізація дозволить значно поліпшити екологічні показники ТЗ.

В усьому світі впроваджують гібридну передачу потужності на залізничному і морському транспорті. Проте, усі судна і локомотиви, що експлуатуються в Україні, мають передачу без НЕ.

Визначенню та обґрунтуванню основних показників ТЗ присвячено багато

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наукових досліджень. Вони в багатьох випадках є спільними для всіх видів ТЗ. Основні методи вибору параметрів силової установки і НЕ наведено на рисунку 3.1.

В результаті аналізу праць вчених методи вибору параметрів силової установки і НЕ було розбито на п'ять категорій: методи на основі середніх показників роботи локомотивів; методи на основі порівняльної оцінки різних варіантів із сумарною потужністю, обраною за прототипом; вибір в залежності від заданого режиму роботи локомотива (з урахуванням рекуперації і без урахування рекуперації); методи на основі завантаження силових установок, при їх роботі на конкретних ділянках (СУ обирається за середньою потужністю, НЕ – за дефіцитом енергії); методи, в яких вибір НЕ проводиться на основі показників ефективності його використання.

З огляду методів та моделей виходить, що різні вчені із різних країн протягом багатьох років проводили дослідження, спрямовані на визначення техніко-економічних параметрів ТЗ. Деякі з яких підходять і до гібридних, але вони мають ряд недоліків. В цих методах не враховано або вартісні показники, або реальні умови експлуатації, або габарити і масові показники накопичувача енергії і силової установки, або комплексних параметрів. Тому виникає наукова проблема удосконалення методів та моделей визначення параметрів гібридної передачі ТЗ для роботи його на транспортних шляхах України з урахуванням цих недоліків.

Для вирішення задачі визначення техніко-економічних показників гібридних ТЗ необхідно використовувати комплексний підхід, який повинен пов'язувати між собою технічні параметри ТЗ, показники експлуатації і вартісні показники.

3.2 Розробка принципової схеми гібридного локомотива

Як показує проведений розрахунок (розділ 2), близько 30% роботи тепловоза приходить на простій з двигуном, що працює, в очікуванні роботи. І лише 10-15% часу приходить на роботу на позиціях контролера вище ніж IV.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

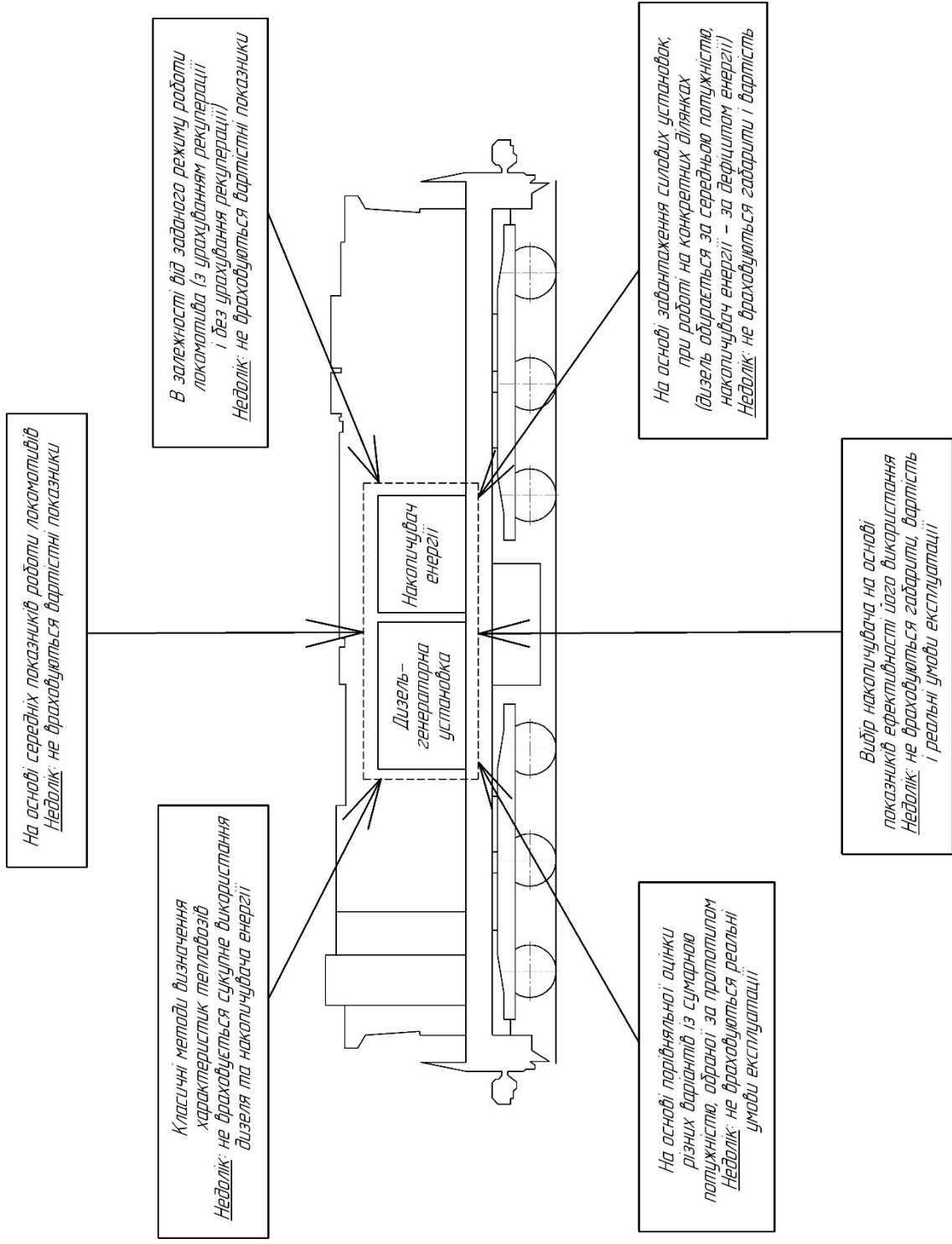
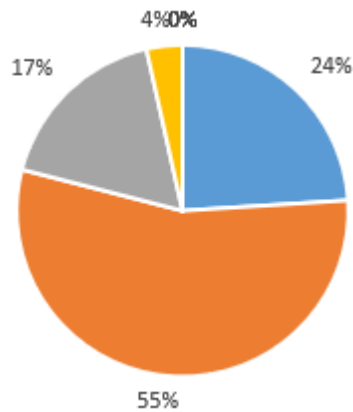


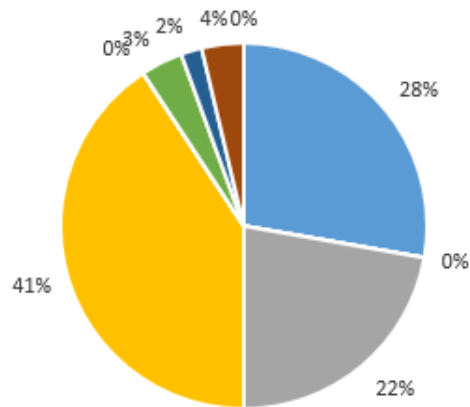
Рисунок 3.1 – Методи вибору параметрів силової установки і накопичувача енергії для локомотива

Розподіл режимів роботи маневрового локомотива показано на рисунку 3.2.

- в маневровій роботі



- в горочній роботі



- в вивізній роботі

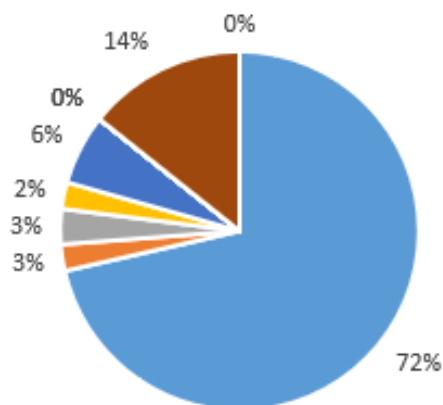


Рисунок 3.2 – Розподіл роботи маневрового тепловоза по позиціям контролера машиніста за видами роботи

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як показує досвід локомотивобудування тепловозів з гібридними установками та проведений аналіз існуючих накопичувачів енергії, на даний час немає такого накопичувача енергії, який би за своїми масогабаритними та вартісними характеристикам відповідав би можливості його застосування на локомотиві та міг би забезпечувати необхідною потужністю тепловоз увесь час його роботи. Тому обираємо схему гібридного тепловоза при якому на низьких позиціях тепловоз працює від дизеля, а накопичувач енергії підключається тільки тоді, коли необхідна велика потужність локомотива на короткий час.

Принципова схема такого тепловоза показана на рисунку 3.2.

У модернізованому варіанті тепловоза ТЭМ2 пропонується встановлення дизель-генераторної установки із синхронним генератором меншої потужності, яка працює на живлення тягових двигунів та на зарядку накопичувача енергії.

При необхідності від накопичувача енергії живляться тягові електродвигуни постійного струму двигуни.

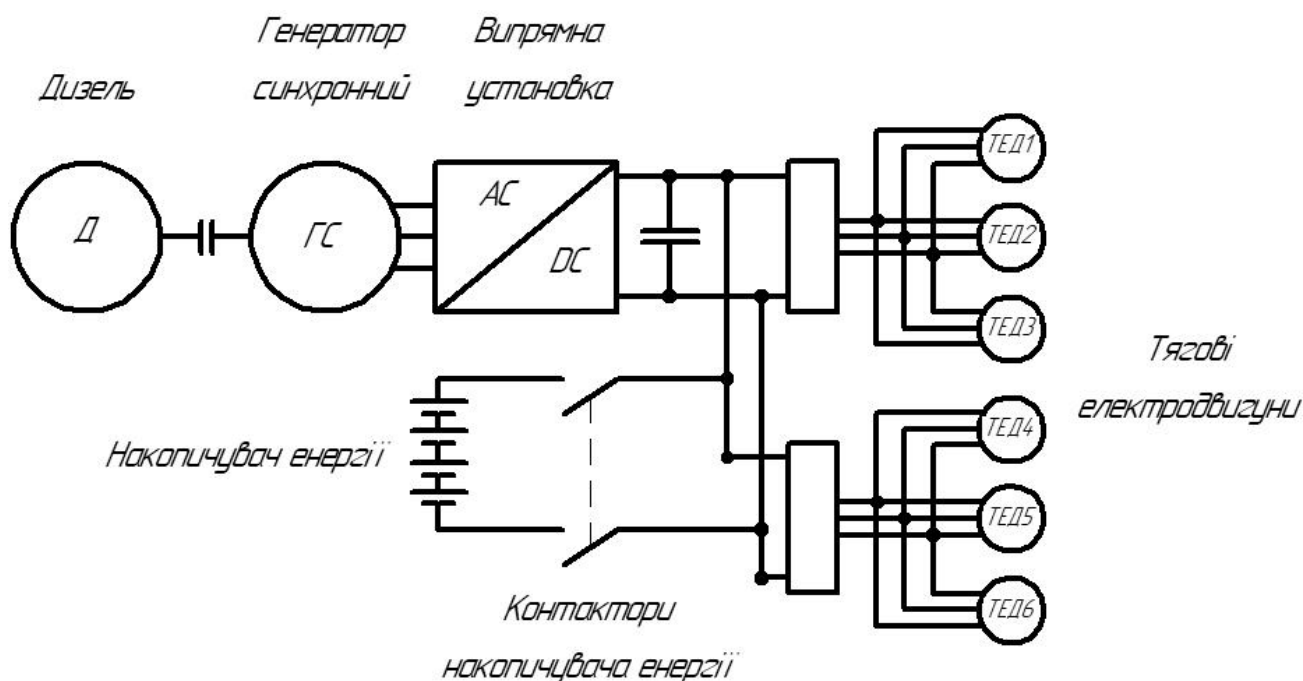


Рисунок 3.2 – Принципова схема гібридного маневрового тепловоза

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Визначення необхідної потужності силової установки тепловоза

Аналізуючи проведені тягові розрахунки (розділ 2), видно, що основну частину часу маневровий локомотив працює на позиціях контролера, які не перевищують IV, і лише на невеликий час працює на VII позиції, при цьому не розвиваючи максимальної потужності. Для зменшення витрат палива та поліпшення техніко-економічних характеристик тепловоза ТЭМ2 пропонується модернізувати його шляхом заміни існуючої ДГУ на силову установку, яка складається з ДГУ меншої потужності та НЕ. За основними критеріями вибору нової силової установки приймаємо наступне:

- її потужність буде відповідати експлуатаційним режимам роботи Криворізького вузла, тобто проведенням тяговим розрахункам;
- вага нової силової установки не буде перевищувати вагу існуючої ДГУ.

Як вже було зазначено вище, максимальна позиція контролера, на якій працює тепловоз ТЭМ2 в умовах Криворізького вузла, це VII. Відповідно до правил капітального ремонту тепловоза ТЭМ2 на VII позиції існуюча ДГУ розвиває 600 кВт потужності.

Виконаємо розрахунок гібридної силової установки. В якості накопичувача енергії пропонується встановити літій-іонну акумуляторну батарею ЛИАБ 70 ТРВ-БК. Технічні характеристики батареї наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики батареї ЛИАБ 70 ТРВ-БК

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Номінальна ємність	А-год	540
Номінальна напруга	В	130
Вид вибухозахисту		Ex d I Mb X
Габарити	мм	3300x1325x795
Вага	кг	4040
Робоча температура	°С	-20 ... +40
Максимальний струм заряду	А	270
Максимальний тривалий струм розряду	А	1080

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо максимальну потужність батареї за формулою:

$$P_{AB} = U \cdot I, \quad (3.1)$$

де U – номінальна напруга батареї, В;

I – максимальний тривалий струм розряду, В.

$$P_{AB} = 130 \cdot 1080 = 140400 \text{ Вт.}$$

Приймаємо $P_{AB} = 140$ кВт.

Визначимо, на який час роботи вистачить ємності батареї при її роботі на максимальній потужності, за формулою

$$t_{AB} = \frac{Q_{AB} \cdot U \cdot k_{AB}}{P_{AB}}, \quad (3.2)$$

де Q_{AB} – номінальна ємність батареї, А-год;

k_{AB} – коефіцієнт, який враховує глибину розряду батареї, приймаємо $k_{AB} = 0,75$.

$$t_{AB} = \frac{540 \cdot 130 \cdot 0,75}{140000} = 0,37 \text{ год.}$$

З аналізу проведених тягових розрахунків (таблиця 2.6), видно, що максимальний час роботи необхідного накопичувача енергії становить 18 хв, або 0,3 год, що менше ніж можливий час роботи обраної акумуляторної батареї. Відповідно акумуляторна батарея ЛИАБ 70 ТРВ-БК може бути встановлена в гібридну силову установку та забезпечити необхідний час роботи тепловоза на максимальній потужності.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо потужність ДГУ, яка буде необхідна для заряду акумуляторної батареї за формулою:

$$P_{AB}^{зар} = U \cdot I^{зар}, \quad (3.3)$$

де I – максимальний струм заряду, В.

$$P_{AB}^{зар} = 130 \cdot 270 = 35100 \text{ Вт.}$$

Приймаємо $P_{AB}^{зар} = 35 \text{ кВт.}$

Визначимо час, необхідний для заряду акумуляторної батареї за формулою:

$$t_{AB}^{зар} = 1,1 \cdot \frac{Q_{AB} \cdot k_{AB}}{I^{зар}}, \quad (3.4)$$
$$t_{AB}^{зар} = 1,1 \cdot \frac{540 \cdot 0,75}{270} = 1,65 \text{ год.}$$

Як видно з таблиці 2.6, час, затрачений тепловозом на виконання вивізної роботи складає близько 2 год, що більше ніж час заряду акумуляторної батареї. З чого можна зробити висновок, що накопичувач енергії буде встигати підзарядитися до свого наступного використання.

Як видно з аналізу тягових розрахунків (рисунок 3.2), видно, що основна робота маневрового тепловоза виконується на I – IV позиціях контролера машиніста. Раціональним буде запропонувати умову, що на цих позиціях тепловоз буде працювати від ДВС, а при включенні більш високої позиції контролера буде підключатися накопичувач енергії.

Визначимо необхідну потужність дизель-генераторної установки гібридного тепловозу та кількість акумуляторних батарей, які будуть входити до складу

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

накопичувача енергії.

Згідно правил капітального ремонту тепловоза ТЭМ2 на IV позиції існуюча ДГУ розвиває 190 кВт потужності. Відповідно до цього, необхідний запас потужності накопичувача енергії буде складати:

$$P_{HE} = P_{ДГУ}^{VII} - P_{ДГУ}^{IV}, \quad (3.5)$$

де $P_{ДГУ}^{VII}$ – потужність існуючої ДГУ на VII позиції контролера машиніста, приймаємо $P_{ДГУ}^{VII} = 600$ кВт;

$P_{ДГУ}^{IV}$ – потужність існуючої ДГУ на IV позиції контролера машиніста, приймаємо $P_{ДГУ}^{IV} = 190$ кВт.

$$P_{HE} = 600 - 190 = 410 \text{ кВт.}$$

Кількість акумуляторних батарей, з яких буде складатися накопичувач енергії, визначимо за формулою:

$$n_{AB} = \frac{P_{HE}}{P_{AB}}, \quad (3.6)$$

$$n_{AB} = \frac{410}{140} = 2,9.$$

Приймаємо $n_{AB} = 3$.

При роботі ДГУ, частина її потужності буде йти на зарядку накопичувача. Відповідно необхідна потужність гібридної ДГУ буде складатися з потужності необхідної для роботи тепловоза та потужності, яка буде заряджати накопичувач енергії, і визначається за формулою:

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{ГДУ} = P_{ГДУ}^{IV} + n \cdot P_{АБ}, \quad (3.7)$$

$$P_{ГДУ} = 190 + 3 \cdot 35 = 295 \text{ кВт.}$$

Як бачимо, для забезпечення роботи тепловоза на IV позиції контролера машиніста та підзарядження накопичувача енергії, який складається з 3 акумуляторних батарей типу ЛИАБ 70 ТРВ-БК, необхідна потужність ДГУ в 295 кВт. Виходить, що при роботі тепловоза на VII позиції контролера машиніста потужність ДГУ буде використовуватися не повністю, а зайва потужність буде необхідна лише для підзарядження накопичувача енергії. Тому зменшимо кількість акумуляторних батарей в накопичувачі з 3 до 2 та визначимо необхідну потужність ДГУ для нових умов за формулою:

$$P_{ГДУ} = P_{ГДУ}^{VII} - 2 \cdot P_{АБ}, \quad (3.8)$$

$$P_{ГДУ} = 600 - 2 \cdot 140 = 320 \text{ кВт.}$$

Отже отримуємо, що для виконання всіх видів робіт на Криворізькому вузлі нам потрібен буде гібридний тепловоз, силова установка якого буде складатися з ДГУ потужністю 320 кВт та накопичувача енергії потужністю 280 кВт.

Відповідно до цих параметрів обираємо тяговий генератор фірми Marelli Motori тип MJB315M4A (таблиця 3.2)

Таблиця 3.2 – Параметри генератора гібридного тепловоза

Параметр	Значення
Модель генератора	MJB315M4A
Основна потужність, кВт	328
Резервна потужність, кВт	347
Номінальний струм, А	590
ККД	0,94
Частота обертання якоря n_T , хв^{-1}	1500
Маса, кг	1225

Визначимо, яка потужність дизеля P_D необхідна для роботи тягового генератора:

$$P_D = \frac{P_{ГДГУ}}{\eta_G \cdot \eta_{BV}}, \quad (3.9)$$

де $\eta_G = 0,94$ – ККД генератора;

$\eta_{BV} = 0,98$ – ККД випрямної установки.

$$P_p = \frac{328}{0,94 \cdot 0,98} = 356 \text{ кВт.}$$

На тепловозах частина потужності дизеля витрачається на привід допоміжних агрегатів тепловоза. Якщо врахувати величину відбору потужності, то отримаємо ефективну потужність дизеля P_e :

$$P'_e = \frac{P_D}{1 - K_p}, \quad (3.10)$$

де K_p – доля відбору потужності на привід допоміжних агрегатів тепловоза; приймаємо 0,12.

$$P'_e = \frac{356}{1 - 0,12} = 404 \text{ кВт.}$$

Виходячи з проведених розрахунків для гібридного тепловозу обираємо дизель фірми Cummins тип QSX15-G8 (таблиця 3.3). швидкісна характеристика дизеля представлена на рисунку 3.3.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 – Параметри дизеля гібридного тепловоза

Параметр	Значення
Модель дизеля	QSX15-G8
Основна потужність, кВт	414
Резервна потужність, кВт	440
Число циліндрів	6
Розташування циліндрів	Рядне
Діаметр циліндра, мм	137
Хід поршня, мм	169
Робочий об'єм, л	15
Номінальна частота обертання колінвала, хв ⁻¹	1500
Маса, кг	2500

Визначимо масу гібридної силової установки тепловоза за формулою

$$m_{ГСУ} = m_{Д} + m_{Г} + n \cdot m_{АБ}, \quad (3.11)$$

де $m_{Д}$ – маса дизеля, кг, приймаємо $m_{Д} = 2500$ кг;

$m_{Г}$ – маса генератора, кг, приймаємо $m_{Г} = 1225$ кг;

$m_{АБ}$ – маса акумуляторних батарей накопичувача енергії, кг, приймаємо $m_{АБ} = 4040$ кг.

$$m_{ГСУ} = 2500 + 1225 + 2 \cdot 4040 = 11805 \text{ кг.}$$

Маса дизеля та тягового генератора базового тепловоза ТЭМ2 близько 22500 кг. Отримана маса гібридної установки значно менша, тому для отримання необхідної зчіпної ваги на гібридному тепловозі необхідно буде використовувати додаткову вагу, або, в разі необхідності, можна буде додати додаткові акумуляторні батареї в накопичувач енергії.

											Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160159.000.04MP.ПЗ						

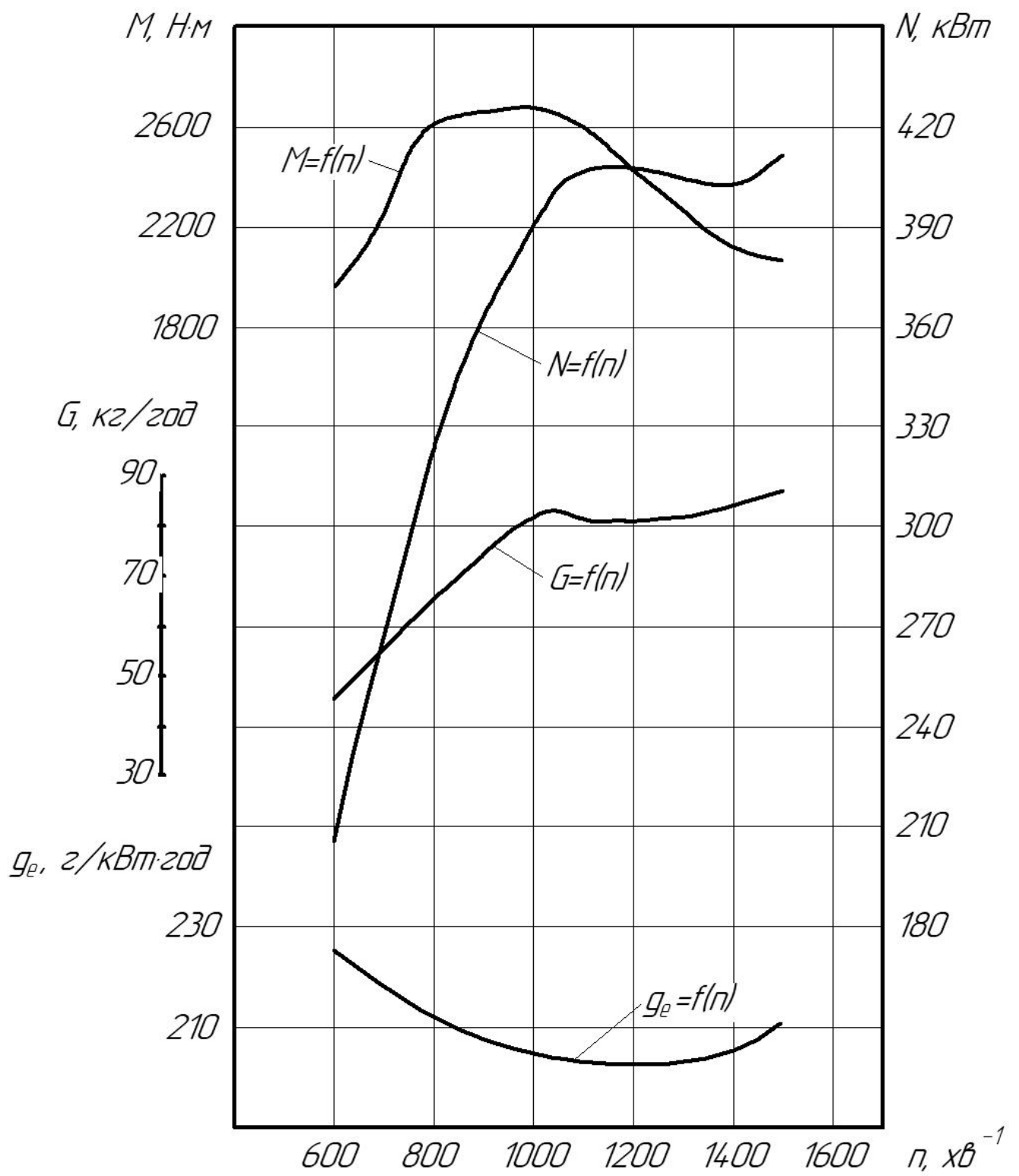


Рисунок 3.3 – Щвидкісна характеристика дизеля Cummins тип QSX15-G8

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Визначення основних параметрів тягових електродвигунів

Розрахункову дотичну потужність тепловоза визначимо за формулою

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{ГСУ}} \cdot \eta_{\text{П}}, \quad (3.12)$$

де $P_{\text{ГСУ}}$ – потужність гібридної силової установки тепловоза, приймаємо

$$P_{\text{ГСУ}} = 600 \text{ кВт};$$

$\eta_{\text{П}}$ – ККД передачі.

ККД передачі визначається за формулою:

$$\eta_{\text{П}} = \eta_{\text{ТД}} \cdot \eta_{\text{ЗП}}, \quad (3.13)$$

де $\eta_{\text{ТД}} = 0,91$ – ККД тягових двигунів;

$\eta_{\text{ЗП}} = 0,985$ – ККД зубчатої передачі від тягового двигуна до рушійних осей;

$$\eta_{\text{П}} = 0,915 \cdot 0,985 = 0,9,$$

$$P_{\text{оп}} = 600 \cdot 0,9 = 540 \text{ кВт}.$$

Розрахункова дотична сила тяги тепловоза визначається за формулою:

$$F_{\text{оп}} = \frac{P_{\text{оп}} \cdot 3,6}{V_{\text{р}}}, \quad (3.14)$$

де $V_{\text{р}}$ – розрахункова швидкість, приймаємо згідно вихідних даних $V_{\text{р}} = 11 \text{ км/год}$.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{op} = \frac{540 \cdot 3,6}{11} = 176,7 \text{ кН.}$$

Потрібну потужність тягового електродвигуна проектного тепловоза $P_{ТЕД}'$, кВт визначаємо за формулою:

$$P_{ТЕД}' = \frac{P_{op}}{\eta_{зп} \cdot \kappa}, \quad (3.15)$$

де κ – кількість ТЕД на тепловозі; приймаємо $\kappa=6$;

$$P_{ТЕД}' = \frac{540}{0,985 \cdot 6} = 91,4 \text{ кВт.}$$

По потужності ТЕД, що розрахована за формулою (3.15) обираємо тип електродвигуна, потужність якого $P_{ТЕД}$ близька до потрібної $P_{ТЕД}'$. Дані заносимо до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри ТЕД проектного тепловоза

Параметр	Значення
Марка ТЕД	ЭДУ-133П
Потужність ТЕД $P_{ТЕД}$, кВт	91,4
Частота максимального режиму $n_{\partial \max}$, хв ⁻¹	2290
ККД η_{∂} , %	91
Маса, кг	3100

3.5 Визначення параметрів тягового осьового редуктора

Основним параметром тягового осьового редуктора є передаточне число:

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\mu = \frac{z_2}{z_1}, \quad (3.16)$$

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

z_2 – число зубців ведучої шестерні.

Передаточне число є відношення обертального моменту на ободі колеса до моменту на валу тягового електродвигуна, що визначене для тривалого режиму роботи колісно-моторного блоку

$$\mu_1 = \frac{F_{\partial\infty} \cdot D_k}{2M_{\partial\infty}}, \quad (3.17)$$

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

D_k – діаметр рушійних коліс тепловоза по колу кочення, м;

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

Тривала сила тяги одного КМБ, кН

$$F_{\partial\infty} = \frac{F_{\partial p}}{k}, \quad (3.18)$$

$$F_{\partial\infty} = \frac{176,7}{6} = 29,5 \text{ кН.}$$

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

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\partial\infty} = 9,5 \frac{P_{\partial}}{n_{\partial\infty}}, \quad (3.19)$$

де $n_{\partial\infty}$ – частота обертання якоря ТЕД у тривалому режимі, хв^{-1} .

$$n_{\partial\infty} = n_{\partial\max} \frac{V_p}{V_k}, \quad (3.20)$$

$$n_{\partial\infty} = 2290 \cdot \frac{11}{100} = 252 \text{ хв}^{-1},$$

$$M_{\partial\infty} = 9,5 \cdot \frac{91,4}{252} = 3,44 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$\mu_1 = \frac{29,5 \cdot 1,05}{2 \cdot 3,44} = 4,5.$$

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

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

$$n_k = \frac{1000 \cdot V_k}{60 \cdot \pi \cdot D_k}, \quad (3.21)$$

$$n_k = \frac{1000 \cdot 100}{60 \cdot 3,14 \cdot 1,05} = 505 \text{ хв}^{-1}.$$

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

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\mu_2 = \frac{n_{\partial \max}}{n_K}, \quad (3.22)$$

$$\mu_2 = \frac{2290}{505} = 4,53.$$

З двох отриманих значень μ_1 і μ_2 приймаємо менше, тобто: $\mu_2 = 4,53$.

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 А = 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

$$A = \frac{(z_1 + z_2) \cdot m}{2}, \quad (3.23)$$

де m – модуль зчеплення, значення якого приймається по базовому тепловозу,
 $m = 10$.

Складаємо систему рівнянь і розв'язуємо її відносно двох невідомих z_1 і z_2 . Отримані значення округлюються до цілого 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:

$$z_1 = 17, z_2 = 77, \mu_p = 4,53.$$

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільша частота обертання якоря ТЕД при конструкційній швидкості руху проектного тепловоза

$$n_{\partial\infty}^p = n_{\kappa} \cdot \mu_p. \quad (3.24)$$

Отримане значення не повинно перевищувати частоту обертання, що допускається заводом-виробником, тобто:

$$n_{\partial\max}^p \leq n_{\partial\max}, \quad (3.25)$$

$$n_{\partial\max}^p = 505 \cdot 4,53 = 2288 \leq n_{\partial\max} = 2290.$$

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

$$F_{\partial} = \frac{2 \cdot M_{\partial\infty} \cdot \mu_p \cdot \kappa}{D_{\kappa}}, \quad (3.26)$$

$$F_{\partial} = \frac{2 \cdot 3,44 \cdot 4,53 \cdot 6}{1,05} = 178 \text{ кН.}$$

Відстань від нижньої частини кожуха до головки рейки при нових бандажах колісних пар визначається за формулою:

$$\Delta = \frac{D_{\kappa} - (m \cdot z_2 + 2c)}{2} \geq 120-130 \text{ мм}, \quad (3.27)$$

де $c = 18 - 25$ мм – відстань від торця зубців веденої шестерні (зубчастого колеса) до нижньої поверхні кожуха.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta = \frac{1050 - (10 \cdot 77 + 2 \cdot 18)}{2} = 122 \geq 120 \text{ мм.}$$

3.6 Розрахунок і побудова електромеханічних характеристик ТЕД

Розрахунок і побудова електромеханічних характеристик ТЕД, це побудова залежностей:

$$M_{\text{дв}} = f(I_{\text{дв}}), \quad n_{\text{дв}} = f(I_{\text{дв}}). \quad (3.28)$$

Побудову електромеханічних характеристик ТЕД необхідно починати з вибору заводських характеристик двигуна, що близький по потужності до потрібної $P'_{\text{дв}}$.

В основі метода перерахування лежить положення, відповідно якому при реалізації тривалої потужності ККД різноманітних по потужності двигунів практично однакові та становлять 0,91-0,92. Характер залежностей залишається колишнім, а змінюється тільки чисельне значення величини обертового моменту та частоти обертання.

Для побудови електромеханічних характеристик ТЕД використовують співвідношення:

$$\frac{M_{\text{двп}}}{M_{\text{двб}}}, \quad \frac{n_{\text{двп}}}{n_{\text{двб}}}, \quad \frac{P_{\text{двп}}}{P_{\text{двб}}}, \quad (3.29)$$

де індекси «п» і «б» – позначають належність параметра відповідно до проектного та базового тепловоза.

Беручи до уваги залежності параметрів:

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок електромеханічних характеристик ТЕД будемо виконувати для двох режимів роботи силової установки тепловоза:

1) силова установка працює на повну потужність, тобто працює дизель-генератор та накопичувач енергії. Тоді:

$$\overline{M}_{\text{дв}} = \frac{91,4}{113} \cdot \frac{100}{100} \cdot \frac{4,53}{4,53} \cdot \frac{1050}{1050} = 0,81,$$

$$n_{\text{дв}} = \frac{100}{100} \cdot \frac{4,53}{4,53} \cdot \frac{1050}{1050} = 1,0.$$

2) силова установка працює тільки від дизеля, тобто на 53% від повної потужності, тобто працює тільки дизель-генератор. Тоді:

$$\overline{M}_{\text{дв}} = 0,53 \cdot \frac{91,4}{113} \cdot \frac{100}{100} \cdot \frac{4,53}{4,53} \cdot \frac{1050}{1050} = 0,43,$$

$$n_{\text{дв}} = \frac{100}{95} \cdot \frac{4,53}{4,77} \cdot \frac{1050}{1050} = 1,0.$$

Результати розрахунку електромеханічних характеристик тягового електродвигуна зводимо в таблиці 3.5 – 3.6. За результатами розрахунку будемо електромеханічні характеристики ТЕД проектного тепловоза (рисунок 3.4).

3.7 Розрахунок і побудова електротягових характеристик колісно-моторного блоку

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

Ці характеристики будуються для сформованого колісно-моторного блоку,

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

який включає тяговий електродвигун, колісну пару та тяговий редуктор.

Електротягові характеристики колісно-моторного блоку проектного тепловоза розраховуються у такій послідовності.

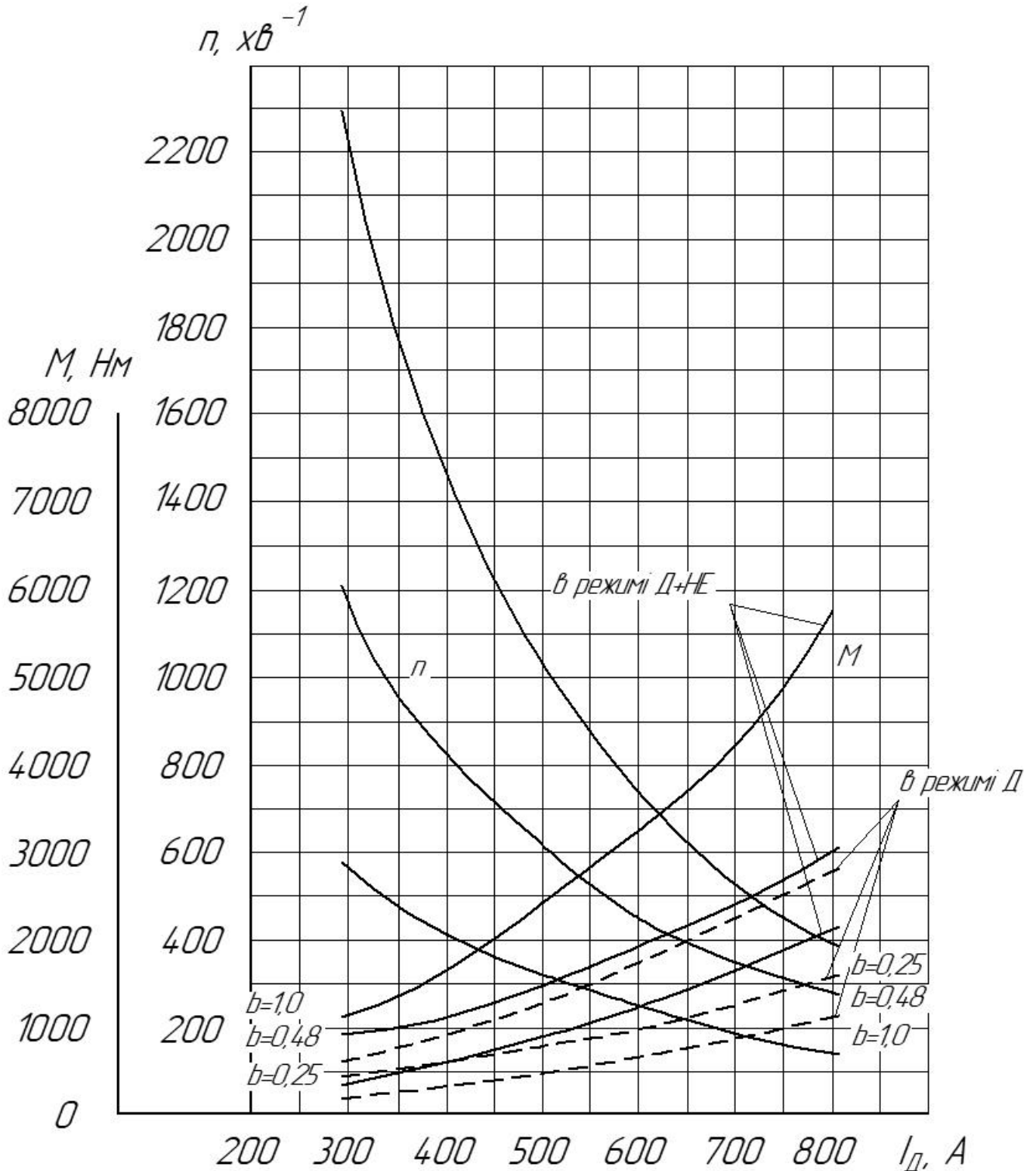


Рисунок 3.4 – Електромеханічні характеристики ТЕД гібридного тепловоза

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1) необхідно задатися значеннями струму $I_{\text{дв}}$ для всіх трьох режимів роботи ТЕД (ПП - повне поле, ОП1 - послаблене поле першої ступені, ОП2 - послаблене поле другої ступені);

2) для обраних (не менш п'яти) значень струму $I_{\text{дв}}$ по електромеханічним характеристикам, що розраховані та побудовані раніше, необхідно знайти відповідні їм значення;

Визначити значення $F_{\text{двп}}$ і $V_{\text{двп}}$, використовуючи при цьому залежності:

$$F_{\text{двп}} = \frac{2 \cdot \mu_p \cdot M_{\text{двп}}}{D_k} \cdot \eta_M, \quad (3.33)$$

$$V_{\text{двп}} = \frac{60 \cdot \pi \cdot D_k \cdot n_{\text{двп}}}{1000 \cdot \mu_p} \quad (3.34)$$

На першому етапі розрахунку електротягових характеристик необхідно прийняти $\alpha_n = \alpha_\sigma$. Якщо в ході розрахунку швидкість не досягає заданого значення V_k , то потрібно змінити α_n для ОП2.

Результати розрахунку електротягових характеристик оформляємо у вигляді таблиць 3.7-3.8. За результатами розрахунку будуємо електротягові характеристики колісно-моторного блоку проектного тепловоза (рисунок 3.5).

3.8 Розрахунок і побудова 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.

Тягова характеристика розраховується та будується шляхом використання побудованих раніше електротягових характеристик.

По кривій швидкості $V = f(I_\sigma)$ для кожного значення швидкості тепловоза

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначається струм I_o , а по кривий $F_{обс} = f(I_o)$ - відповідну цьому струму сила тяги одного колісно-моторного блока F_o .

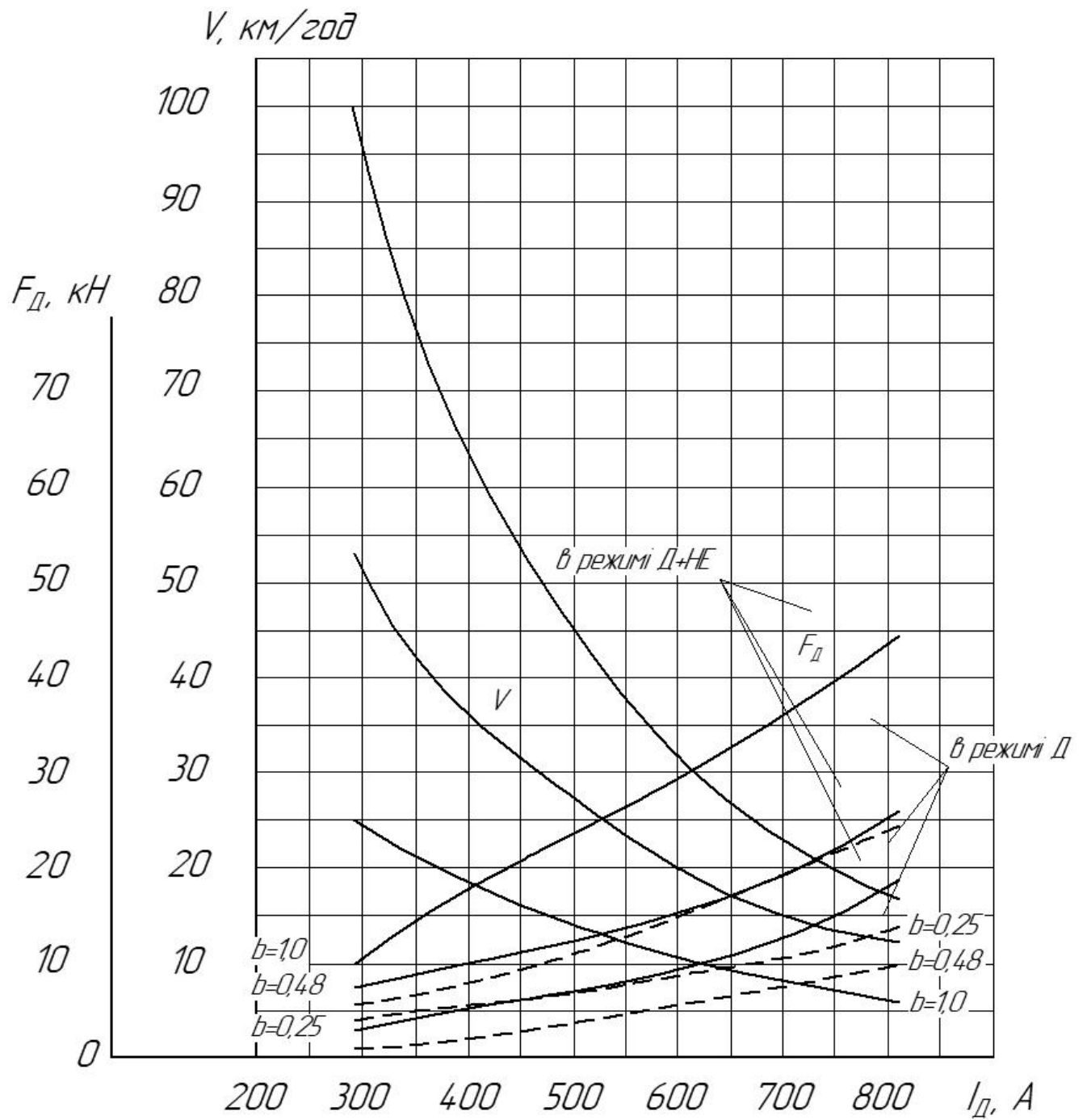


Рисунок 3.5 – Електротягові характеристики КМБ гібридного тепловоза

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сила тяги секції тепловоза:

$$F_{\sigma} = \frac{F_{\sigma a} \cdot k}{n_c}. \quad (3.35)$$

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

$$V_n = V_{\sigma} \cdot \frac{\mu_{\sigma}}{\mu_p}, \quad (3.36)$$

де V_n, V_{σ} - швидкості переходів з одного режиму на наступний відповідно проектного та базового тепловозів, км/год.

- Для ПП з'єднання ТЕД

$$V_n = 13 \cdot \frac{4,53}{4,53} = 13 \text{ км/год};$$

- Для ОП1 з'єднання ТЕД

$$V_n = 20 \cdot \frac{4,53}{4,53} = 20 \text{ км/год};$$

- Для ОП2 з'єднання ТЕД

$$V_n = 22 \cdot \frac{4,53}{4,53} = 22 \text{ км/год};$$

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

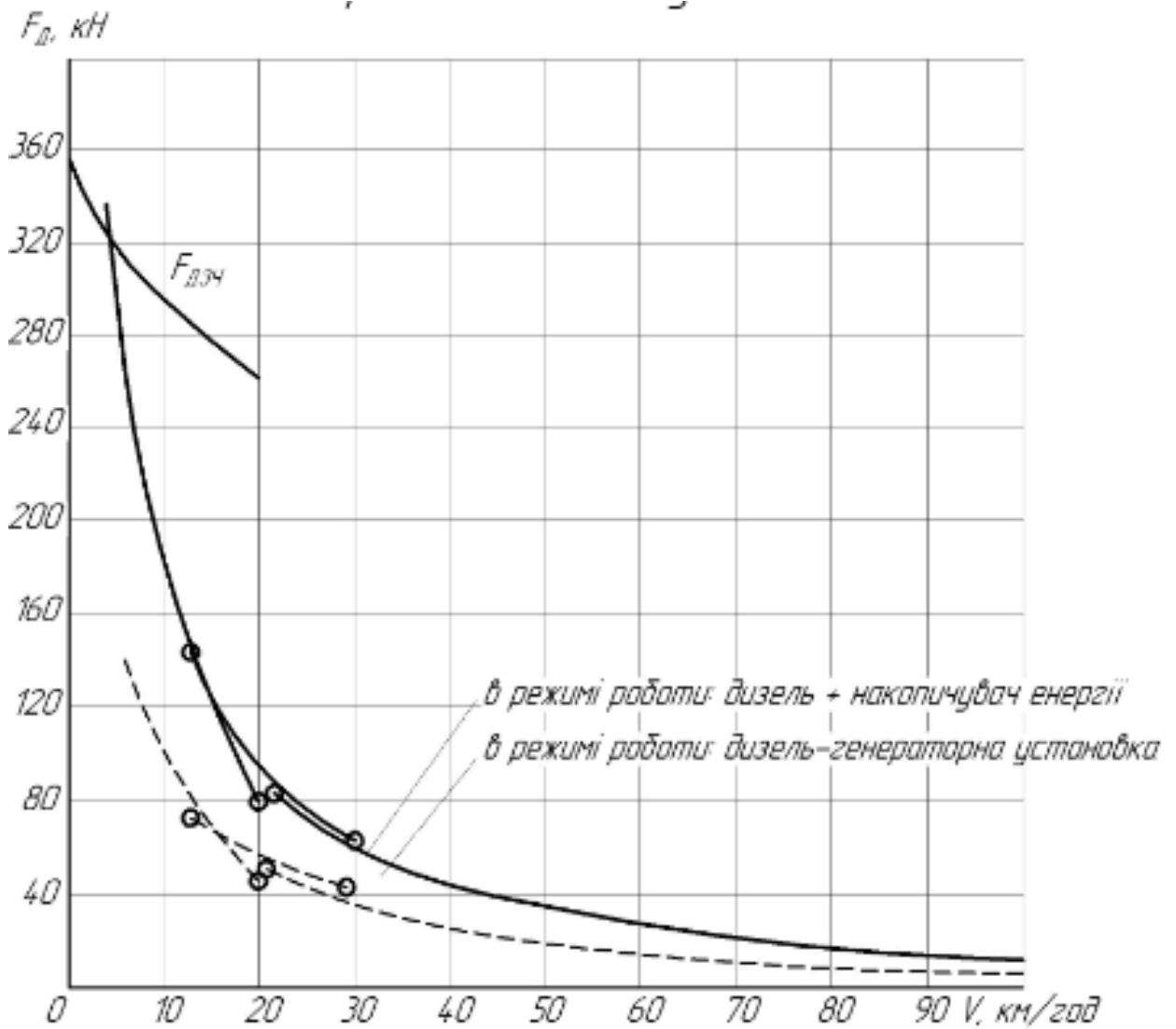


Рисунок 3.6 – Тягова характеристики гібридного тепловоза

$$\eta_m = \frac{3600 \cdot N_k}{B_2 \cdot H_u}, \quad (3.38)$$

де N_k – дотична потужність тепловоза, кВт;

B_2 – годинна витрата палива, кг/год;

H_u – питома теплота згорання палива, $H_u = 42500$ кДж/кг.

Дотична потужність секції тепловоза N_k , кВт, залежно від швидкості його руху визначається зі співвідношення:

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N_{\kappa} = \frac{F_{\kappa} \cdot V}{3,6}. \quad (3.39)$$

Величина сили тяги визначається по тяговій характеристиці секції проектного тепловоза для всіх трьох ступенів ослаблення поля ТЕД в інтервалі швидкості руху тепловоза від 0 до V_{κ} .

Годинна витрата палива, кг/год, визначається з виразу:

$$B_2 = b_e \cdot N_e, \quad (3.40)$$

де b_e – питома ефективна витрата палива, кг/(кВт·год), приймається залежно від типу вибраного дизеля.

ККД передачі η_n визначається за формулою:

$$\eta_n = \frac{N_{\kappa}}{N_e - \sum N_{\text{дон}}}. \quad (3.41)$$

Результати розрахунку параметрів N_{κ} , η_n , η_m , а також значення N_e і B_2 зводимо в таблиці 3.12 та 3.13. За результатами розрахунку будуємо техніко-економічні характеристики тепловоза (рисунок 3.7-3.8).

3.10 Розміщення обладнання тепловоза та його розважування

При компонованні обладнання необхідно забезпечити наступне:

- рівномірність розподілу навантаження на рейки від рушійних колісних пар;
- мінімальну довжину екіпажної частини, малогабаритність і компактність складальних одиниць;

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ККД N_k , кВт

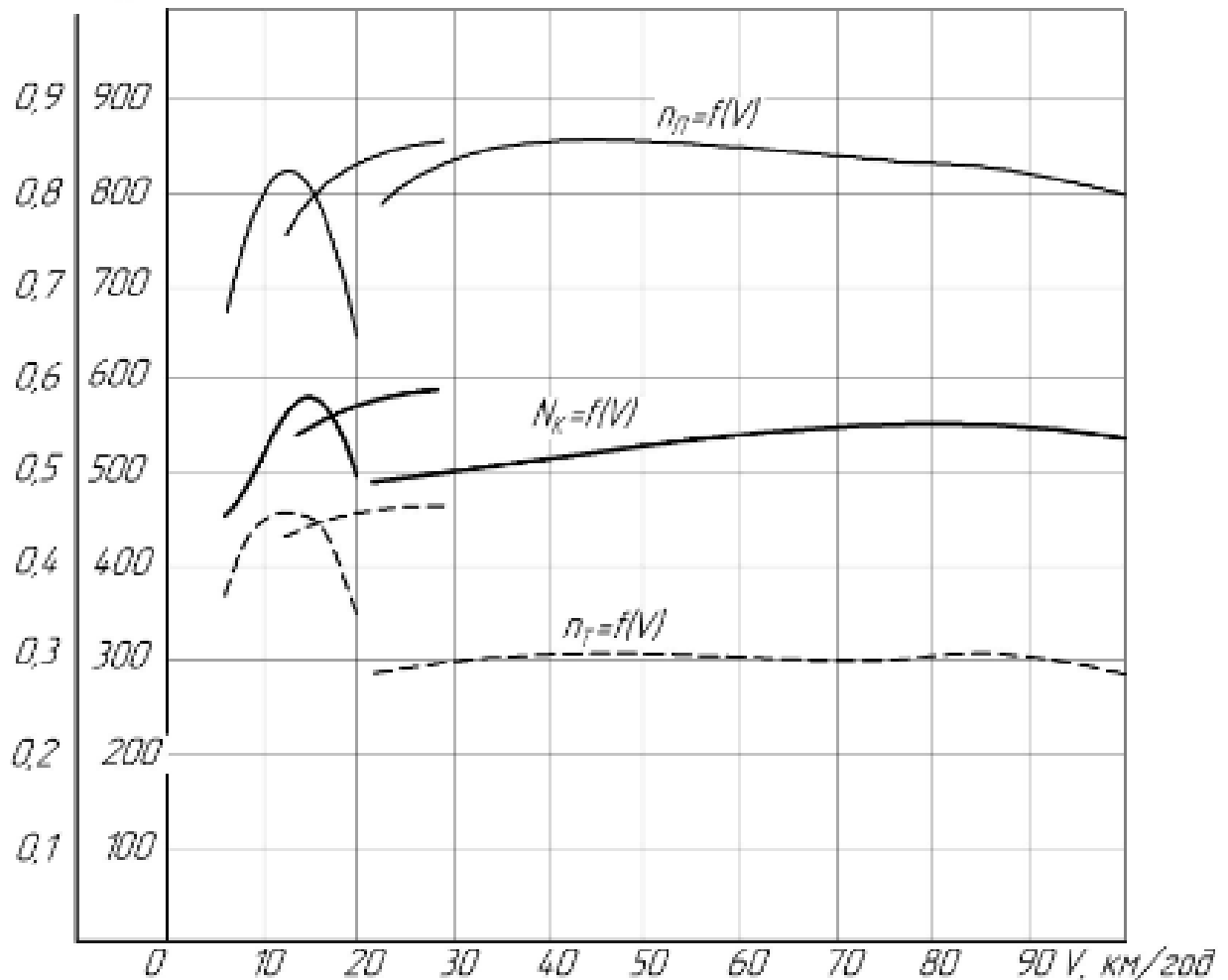


Рисунок 3.7 – Техніко-економічні характеристики гібридного тепловозу в режимі роботи дизель + накопичувач енергії

- зручність монтажу і доступність обслуговування обладнання;
- простоту конструкцій елементів робочих зв'язків силового і допоміжного обладнання;
- високу технологічність конструкції;
- оптимальні умови роботи локомотивних бригад і ремонтного персоналу.

Крім того, на компоновку локомотива впливають його призначення, умови експлуатації, габаритні обмеження, рівень технічної і технологічної досконалості виробництва, сучасні тенденції розвитку вітчизняного і зарубіжного локомотивобудування.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

колісні пари, ця вага співпадає із зчіпною вагою;

P_{cp} – середнє навантаження від колісної пари на рейки, кН;

P_n та $P_з$ – повне навантаження на рейки від колісної пари передньої і задньої візків, кН;

P_{mn} та P_{nz} – підресорене навантаження, що доводиться на одну колісну пару передньої і задньої візків, кН;

P_{nn} та P_{nz} – без пружинне навантаження, що доводиться на рейки від колісної пари передньої і задньої візків, кН.

Основа для розрахунку подовжнього розважування являється схема екіпажної частини з необхідними розмірами і вагова відомість тепловоза. У ваговій відомості наводяться ваги вузлів (груп деталей), розташованих в кузові і на рамі, включаючи ваги самих кузовів і рами, ваги обох візків, без пружинна вага секції тепловоза, а також плечі моментів, тобто відстань від центрів тяжіння вузлів (груп деталей) по деякій системі вертикальних сил. Положення цієї осі може вибиратися довільно, у будь-якому перерізі системи вертикальних сил, проте прийнято її проводити через вісь переднього автозчеплення тепловоза.

Сумарна вага кузова і рами з устаткуванням визначається як сума вагів (груп деталей) по усій над візковою будові:

$$G_k = \sum_{i=1}^n G_i. \quad (3.42)$$

$$G_k = \sum_{i=1}^n G_i = 688,387 \text{ кН.}$$

Службова вага секції тепловоза знаходиться як сума ваги надвізкової будови і обох візків

$$P_{зч} = G_k + 2G_m, \quad (3.43)$$

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.12 – Вагова відомість проектного тепловоза

Найменування вузла (групи деталей)	Вага, кН	Плече, м	Момент, кН·м
Дизель-генераторна група та накопичувач енергії з балластом	248	8,695	2156,36
Рама тепловоза з приладдям і балластом	194,28	6,760	1313,33
Трубопроводи всіх систем та їх обладнання	59,24	7,830	463,84
Обладнання шахти холодильника	54,83	3,180	174,35
Високовольтна камера з обладнанням і акумуляторна батарея	38,00	12,900	490,2
Кабіна машиніста з обладнанням	51,27	12,800	656,25
Кузов з приладдям	60,10	10,200	613,02
Обслуговуюча вага (бригада, пальне, масло, вода, пісок)	55,00	8,700	478,5
Всього:	760,72	-	6345,877
Візки (два)	231,640×2	-	
Непідресорена вага секції тепловоза	251,30	-	
Службова вага секції тепловоза		-	

Сумарна вага кузова і рами з устаткуванням визначається як сума ваг (груп деталей) по усій надвізковій будові.

Службова вага секції тепловоза знаходиться як сума ваги над візкової будови і обох візків:

$$P_{зч} = G_K + 2G_{\text{в}}. \quad (3.44)$$

Оскільки уся підресорена вага тепловоза зосереджена у вазі візків:

$$G_{\text{на}} = G_{\text{в}} - \frac{G_n}{2}, \quad (3.45)$$

$$G_{\text{на}} = 231,64 - \frac{251,3}{2} = 106 \text{ кН},$$

$$G_n = 760,72 + 2 \cdot 106 = 972,72 \text{ кН},$$

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160159.000.04MP.ПЗ					

$$P_{зч} = 760,72 + 2 \cdot 231,61 = 1224 \text{ кН.}$$

Середнє навантаження від колісної пари на рейку визначається як частку від ділення службової ваги тепловоза на число його колісних пар m :

$$P_{cp} = \frac{P_{зч}}{m}, \quad (3.46)$$

$$P_{cp} = \frac{1224}{6} = 204 \text{ кН.}$$

Відповідно до вагової відомості записуємо в таблицю 2.11 статичні моменти, що створюються вагами вузлів (груп деталей) відносно умовної осі моментів:

$$M_i = G_i \cdot l_i, \quad (3.47)$$

а потім визначаємо координату центру тяжіння над візкової будови тепловоза відносно умовної осі моментів:

$$X_{цв} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{G_{\kappa}} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n G_i}, \quad (3.48)$$

$$X_{цв} = \frac{6345,877}{760,72} = 8,34 \text{ м.}$$

Навантаження від кузова і рами з устаткуванням на передню і задню візки визначаються обернено пропорційної до відстаней від центру тяжіння над візкової будови до умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки:

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G_{кп} = G_{к} \frac{a_3}{L_n}, \quad (3.49)$$

$$G_{кз} = G_{к} \frac{a_n}{L_n}, \quad (3.50)$$

де a_n та a_3 – відстані від центру тяжіння над візкової будови до умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки, м;

L_n – відстань між умовними точками передачі вертикальних навантажень на візки, м.

$$a_n = X_{цв} - (C + D), \quad (3.51)$$

де C та D – розміри елементів візка, м.

Згідно [12] приймаємо $L_n = 8,34$ м, $C = 2,1$ м та $D = 2,085$ м.

$$a_n = 8,34 - (2,1 + 2,085) = 4,16 \text{ м},$$

$$a_3 = L_n - a_n, \quad (3.52)$$

$$a_3 = 8,6 - 4,16 = 4,44 \text{ м},$$

$$G_{кз} = 760,72 \cdot \frac{4,44}{8,6} = 383 \text{ кН},$$

$$G_{кп} = 760,72 \cdot \frac{4,16}{8,6} = 365 \text{ кН}.$$

Усі види навантажень від колісної пари на рейки визначаються окремо для передньої і задньої візків, без урахування подовжнього розважування візків. Оскільки розважування візків не робилося і було прийнято, що їх підресорені і не підресорена вага розподіляється по колісних парах рівномірно, то підресорені

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження, що приходять на одну колісну пару, можна вважати рівними:

- для переднього візка (при числі колісних пар):

$$P_{mn} = \frac{G_{kn}}{m_m} + \frac{G_{nm}}{m_m}, \quad (3.53)$$

$$P_{mn} = \frac{383}{3} + \frac{106}{3} = 163 \text{ кН.}$$

- для заднього візка (при числі колісних пар):

$$P_{nz} = \frac{G_{kz}}{m_m} + \frac{G_{nm}}{m_m}, \quad (3.54)$$

$$P_{nz} = \frac{365}{3} + \frac{106}{3} = 157 \text{ кН.}$$

Без пружинне навантаження від колісної пари на рейку для переднього і заднього візка вважається однаковою і визначається як частка від ділення без пружинної ваги тепловоза на число його колісних пар:

$$P_{nn} = P_{nz} = \frac{G_n}{m}, \quad (3.55)$$

$$P_{nn} = P_{nz} = \frac{251,30}{6} = 41,88 \text{ кН.}$$

Повне навантаження від колісної пари на рейку для переднього і заднього візка визначається як сума підресореного і без пружинного навантаження:

$$P_n = P_{mn} + P_{nn}, \quad (3.56)$$

$$P_n = 163 + 41,88 = 204,88 \text{ кН.}$$

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_3 = P_{пз} + P_{нз}, \quad (3.57)$$

$$P_3 = 157 + 41,88 = 198,88 \text{ кН.}$$

$$\Delta = \frac{P_3 - P_n}{P_n} \cdot 100, \quad (3.58)$$

$$\Delta = \frac{204,88 - 198,88}{204,88} \cdot 100 = 2,9\% \leq 3\%.$$

Різниця навантажень від колісних пар на рейку передньої і задньої візків не перевищує 3%.

Висновки до розділу. В якості проекту тепловоза з гібридною силовою установкою була запропонована можлива модернізація тепловоза ТЭМ2, була обрана передача змінно-постійного струму з накопичувачем енергії, який складеться з літій-іонних акумуляторних батарей. Ефективна потужність гібридної силової установки тепловоза становить 600 кВт, з яких 320 кВт розвиває дизель Cummins тип QSX15-G8, а решту 280 кВт – накопичувач енергії. Визначені основні параметри та тип тягового генератора та тягового електродвигуна. Розраховані та побудовані електромеханічні характеристики ТЕД, електротягові характеристики КМБ, тягова та техніко-економічні характеристики тепловоза при роботі силової установки в різних режимах. Виконаний розрахунок поздовжнього розважування тепловоза.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.5 - Результати розрахунку електромеханічних характеристик ТЕД в режимі, коли працює дизель та накопичувач енергії

$I_{дв}, А$	\overline{M}	\overline{n}	Повне поле (ПП)				Перший ступінь послаблення (ОП1)				Другий ступінь послаблення (ОП2)			
			$\alpha_{\bar{o}}=100\%$		$\alpha_n=100\%$		$\alpha_{\bar{o}}=48\%$		$\alpha_n=48\%$		$\alpha_{\bar{o}}=25\%$		$\alpha_n=25\%$	
			$M_{дв \bar{o}},$ Н·М	$n_{дв \bar{o}},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв n},$ Н·М	$n_{дв n},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв \bar{o}},$ Н·М	$n_{дв \bar{o}},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв n},$ Н·М	$n_{дв n},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв \bar{o}},$ Н·М	$n_{дв \bar{o}},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв n},$ Н·М	$n_{дв n},$ ХВ ⁻¹
290	0,81	1,0	1460	572	1183	572	1120	1214	907	1214	470	2290	381	2290
400	0,81	1,0	2070	412	1677	412	1410	824	1142	824	760	1466	616	1466
500	0,81	1,0	3000	321	2430	321	1820	618	1474	618	1060	1030	859	1030
600	0,81	1,0	4060	252	3289	252	2290	458	1855	458	1490	733	1207	733
700	0,81	1,0	5180	183	4196	183	2910	343	2357	343	2000	527	1620	527
810	0,81	1,0	6470	137	5241	137	3770	275	3054	275	2650	389	2147	389

Таблиця 3.6 - Результати розрахунку електромеханічних характеристик ТЕД в режимі, коли працює тільки дизель-генераторна установка

$I_{дв}, А$	\bar{M}	\bar{n}	Повне поле (ПП)				Перший ступінь послаблення (ОП1)				Другий ступінь послаблення (ОП2)			
			$\alpha_{\bar{\sigma}}=100\%$		$\alpha_n=100\%$		$\alpha_{\bar{\sigma}}=48\%$		$\alpha_n=48\%$		$\alpha_{\bar{\sigma}}=25\%$		$\alpha_n=25\%$	
			$M_{дв \bar{\sigma}},$ Н·М	$n_{дв \bar{\sigma}},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв n},$ Н·М	$n_{дв n},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв \bar{\sigma}},$ Н·М	$n_{дв \bar{\sigma}},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв n},$ Н·М	$n_{дв n},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв \bar{\sigma}},$ Н·М	$n_{дв \bar{\sigma}},$ ХВ ⁻¹	$M_{дв n},$ Н·М	$n_{дв n},$ ХВ ⁻¹
290	0,43	1,0	1460	572	628	572	1120	1214	482	1214	470	2290	202	2290
400	0,43	1,0	2070	412	890	412	1410	824	606	824	760	1466	327	1466
500	0,43	1,0	3000	321	1290	321	1820	618	783	618	1060	1030	456	1030
600	0,43	1,0	4060	252	1746	252	2290	458	985	458	1490	733	641	733
700	0,43	1,0	5180	183	2227	183	2910	343	1251	343	2000	527	860	527
810	0,43	1,0	6470	137	2782	137	3770	275	1621	275	2650	389	1140	389

Таблиця 3.7 - Результати розрахунку електротягових характеристик ТЕД в режимі, коли працює дизель та накопичувач енергії

Режим роботи ТЕД												
ПП ($\alpha = 100\%$)					ОП1 ($\alpha = 48\%$)				ОП2 ($\alpha = 25\%$)			
I_{∂} , А	$M_{\partial n}$, кН·м	$F_{\partial n}$, кН	$n_{\partial n}$, хв ⁻¹	$V_{\partial n}$, км/ГОД	$M_{\partial n}$, кН·м	$F_{\partial n}$, кН	$n_{\partial n}$, хв ⁻¹	$V_{\partial n}$, км/ГОД	$M_{\partial n}$, кН·м	$F_{\partial n}$, кН	$n_{\partial n}$, хв ⁻¹	$V_{\partial n}$, км/ГОД
290	1,18	10,05	572	25	0,91	7,71	1214	53	0,38	3,24	2290	100
400	1,68	14,25	412	18	1,14	9,71	824	36	0,62	5,24	1466	64
500	2,43	20,65	321	14	1,47	12,53	618	27	0,86	7,3	1030	45
600	3,29	27,95	252	11	1,86	15,77	458	20	1,21	10,26	733	32
700	4,2	35,66	183	8	2,36	20,03	343	15	1,62	13,77	527	23
810	5,24	44,54	137	6	3,05	25,96	275	12	2,15	18,25	389	17

Таблиця 3.8 - Результати розрахунку електротягових характеристик ТЕД в режимі, коли працює тільки дизель-генераторна установка

Режим роботи ТЕД												
ПП ($\alpha = 100\%$)					ОП1 ($\alpha = 48\%$)				ОП2 ($\alpha = 25\%$)			
I_{∂} , А	$M_{\partial n}$, кН·м	$F_{\partial n}$, кН	$n_{\partial n}$, хв ⁻¹	$V_{\partial n}$, км/ГОД	$M_{\partial n}$, кН·м	$F_{\partial n}$, кН	$n_{\partial n}$, хв ⁻¹	$V_{\partial n}$, км/ГОД	$M_{\partial n}$, кН·м	$F_{\partial n}$, кН	$n_{\partial n}$, хв ⁻¹	$V_{\partial n}$, км/ГОД
290	0,63	5,34	572	25	0,48	4,1	1214	53	0,2	1,72	2290	100
400	0,89	7,56	412	18	0,61	5,15	824	36	0,33	2,78	1466	64
500	1,29	10,96	321	14	0,78	6,66	618	27	0,46	3,88	1030	45
600	1,75	14,84	252	11	0,99	8,37	458	20	0,64	5,45	733	32
700	2,23	18,93	183	8	1,25	10,63	343	15	0,86	7,31	527	23
810	2,78	23,65	137	6	1,62	13,78	275	12	1,14	9,69	389	17

Таблиця 3.9 – Результати розрахунку тягової характеристики тепловоза в режимі, коли працює дизель та накопичувач енергії

V, км/год	Режим роботи ТЕД								
	ПП ($\alpha = 100\%$)			ОП1 ($\alpha = 48\%$)			ОП2 ($\alpha = 25\%$)		
	I_{∂} , А	$F_{\partial n}$, кН	F_{κ} , кН	I_{∂} , А	$F_{\partial n}$, кН	F_{κ} , кН	I_{∂} , А	$F_{\partial n}$, кН	F_{κ} , кН
6	810	55	330						
10	625	37	222						
11	575	32,5	195						
13	550	30	180	760	28,5	171			
20	360	15,5	93	600	19	114			
22				575	18	108	720	17,5	105
29				475	14,5	87	625	13,5	81
30							610	13	78
40							520	10	60
50							450	7,5	45
60							400	6,5	39
70							370	5,5	33
80							330	4,7	28,2
90							310	4,3	25,8
100							290	4	24

Таблиця 3.10 – Результати розрахунку тягової характеристики тепловоза в режимі, коли працює тільки дизель-генераторна установка

V , км/ГОД	Режим роботи ТЕД								
	ПП ($\alpha = 100\%$)			ОП1 ($\alpha = 48\%$)			ОП2 ($\alpha = 25\%$)		
	I_{∂} , А	$F_{\partial n}$, кН	F_{κ} , кН	I_{∂} , А	$F_{\partial n}$, кН	F_{κ} , кН	I_{∂} , А	$F_{\partial n}$, кН	F_{κ} , кН
6	810	37,5	225						
10	625	25	150						
11	575	21,5	129						
13	550	20,5	123	760	20	120			
20	360	10,5	63	600	13,3	79,8			
22				575	12	72	720	7,5	45
29				475	9	54	625	9,5	57
30							610	8,5	51
40							520	6,5	39
50							450	4,5	27
60							400	3,7	22,2
70							370	3,5	21
80							330	2	12
90							310	2,7	16,2
100							290	2,5	15

Таблиця 3.12 – Результати розрахунку техніко-економічної характеристики тепловоза в режимі, коли працює дизель та накопичувач енергії

V, км/ч	Режим роботи ТЕД																	
	ПП ($\alpha = 100\%$)						ОП1 ($\alpha = 48\%$)						ОП2 ($\alpha = 25\%$)					
	F_k , кН	N_k , кВт	N_e , кВт	$B_{\text{ч}}$, кг/год	η_n	η_m	F_k , кН	N_k , кВт	N_e , кВт	$B_{\text{ч}}$, кг/год	η_n	η_m	F_k , кН	N_k , кВт	N_e , кВт	$B_{\text{ч}}$, кг/год	η_n	η_m
5,7	330	523	880	118	0,675	0,375												
10	222	617	880	118	0,796	0,443												
11,4	195	618	880	118	0,797	0,443												
12,5	180	625	880	118	0,806	0,448	171	594	880	118	0,766	0,426						
19	93	491	880	118	0,634	0,352	114	602	880	118	0,777	0,432						
21							108	630	880	118	0,813	0,452	105	613	880	180	0,791	0,288
27,5							87	665	880	118	0,858	0,477	81	619	880	180	0,799	0,291
30													78	650	880	180	0,839	0,305
40													60	667	880	180	0,861	0,313
50													45	625	880	180	0,806	0,293
60													39	650	880	180	0,839	0,305
70													33	642	880	180	0,828	0,301
80													28,2	627	880	180	0,809	0,294
90													25,8	645	880	180	0,832	0,303
100													24	633	880	180	0,817	0,297

Таблиця 3.13 – Результати розрахунку техніко-економічної характеристики тепловоза в режимі, коли працює тільки дизель-генераторна установка

V, км/ч	Режим роботи ТЕД																	
	ПП ($\alpha = 100\%$)						ОП1 ($\alpha = 48\%$)						ОП2 ($\alpha = 25\%$)					
	F_k , кН	N_k , кВт	N_e , кВт	B_q , кг/год	η_n	η_m	F_k , кН	N_k , кВт	N_e , кВт	B_q , кг/год	η_n	η_m	F_k , кН	N_k , кВт	N_e , кВт	B_q , кг/год	η_n	η_m
5,7	225	356	576	118	0,756	0,255												
10	150	417	576	118	0,885	0,299												
11,4	129	409	576	118	0,868	0,293												
12,5	123	427	576	118	0,907	0,306	120	417	576	118	0,885	0,299						
19	63	333	576	118	0,707	0,239	79,8	421	576	118	0,894	0,302						
21							72	420	576	118	0,892	0,301	45	263	576	118	0,558	0,189
27,5							54	413	576	118	0,877	0,296	57	435	576	118	0,924	0,312
30													51	425	576	118	0,902	0,305
40													39	433	576	118	0,919	0,311
50													27	375	576	118	0,796	0,269
60													22,2	370	576	118	0,786	0,265
70													21	408	576	118	0,866	0,293
80													12	267	576	118	0,567	0,192
90													16,2	405	576	118	0,86	0,291
100													15	396	576	118	0,841	0,284

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВОЗА ГІБРИДНОЮ УСТАНОВКОЮ

4.1 Розрахунок витрати палива

При вирішенні завдань вибору раціонального режиму роботи маневрових тепловозів та їх необхідної потужності виникає необхідність визначення витрат, пов'язаних з їх експлуатацією. Однією з таких витрат є витрати дизельного палива маневровими тепловозами.

В даний час витрата палива (кг/год) на виконання тепловозом маневрової роботи встановлюється залежно від кількості вагонів, перероблених цим локомотивом за годину [1]. Зазначена методика не враховує характеристики маневрового тепловоза, параметри складу та маршруту пересування, тип напіврейсу та спосіб виконання маневрів та, як наслідок, не може бути використана для вибору оптимального режиму роботи сортувального комплексу.

Для вирішення зазначеної задачі у роботі [2] запропоновано комплексну імітаційну модель процесу насуву та розпуску складів. Дана модель на основі тягових розрахунків, адаптованих до умов маневрової роботи, детально імітує режим роботи гіркового тепловоза і процес руху складу, що розформується. В результаті моделювання може бути визначено витрату палива виконання цієї маневрової операції. При цьому виникає завдання вибору такої методики визначення витрати палива маневровим локомотивом, яка б враховувала режим його руху при насуві та розпуск складів на гірці.

Величина витрати палива відповідно до ПТР [4] визначається за такою формулою:

$$E = \sum_{i=1}^n G_i \Delta t_i + g_x t_x, \quad (4.1)$$

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де n – кількість кроків, пройдених в режимі тяги;

G – витрата палива, що відповідає середній постійній швидкості руху при позиції контролера машиніста на кроці Δt , кг/хв;

Δt – час роботи дизеля, в межах якого швидкість руху є постійною, хв;

g_x – витрата палива силовою установкою на холостому ході, кг/хв;

t_x – час руху на холостому ході, хв.

Величина G повинна визначатися за витратними характеристиками залежно від позиції контролера машиніста, що використовується (ПКМ) n_k та швидкості руху v на кроці. При цьому [4] вказані характеристики маневрових тепловозів представлені тільки для 8-ї ПКМ. У той же час, як показав аналіз [3], маневрові тепловози працюють під навантаженням у здебільшого на 1-4-й ПКМ. У зв'язку з цим вираз (1) не може бути використаний для визначення витрати палива маневровими тепловозами при виконанні маневрової роботи.

В результаті аналізу публікацій встановлено наявність декількох альтернативних методик визначення витрати палива E маневровими локомотивами.

Згідно методики 1 [5] розмір витрати палива E може бути визначена як

$$E = \sum_{j=1}^n g_{ej} \frac{N_{ej}}{\eta_{Пj}} \Delta t_j + \sum_{i=1}^m g_{xi} \Delta t_i, \quad (4.2)$$

де j , n – відповідно, номер кроку, пройденого в режимі тяги, та загальна кількість таких кроків;

i , m – відповідно, номер кроку, пройденого в режимі холостого ходу, та загальна кількість таких кроків;

g_{ej} – питома витрата палива, віднесена до ефективної потужності дизеля N_{ej} , кг/кВт·хв;

N_{ej} – ефективна потужність дизеля, кВт;

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\eta_{\Pi j}$ – ККД передачі;

g_{xi} – витрата палива в одиницю часу при роботі дизеля у режимі холостого ходу, кг/хв.

У виразі (2) величина питомої витрати палива g_{ej} на j -му кроці, пройденому в режимі тяги, являє собою функцію $g_{ej} = f(N_{ej})$ від реалізованої на даному етапі ефективної потужності N_{ej} . Відомо, що залежність питомої витрати палива від ефективної потужності дизеля N_e при постійній частоті обертання його валу n_d описується навантажувальними характеристиками локомотива [6]; при цьому зазначені характеристики існують для кожної частоти n_d . Постійна частота оборотів n_d підтримується регуляторами тепловозів кожної ПКМ [7]; величина n_d за позиціями контролера локомотивів ТЭМ2 прийнято згідно [8, 9] і наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Частота обертання колінчастого валу дизеля по позиціям контролера машиніста тепловоза ТЭМ2

Позиція контролера машиніста	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота обертання колінчастого валу дизеля, хв ⁻¹	300	300	330	400	480	570	650	750

Таким чином, питома витрата g_{ej} має визначатися за відповідним навантажувальним характеристиками тепловоза $g_{ej} = f(N_{ej}, n_{kj})$ залежно від ефективної потужності N_{ej} і використовуваної на j -му кроці ПКМ n_{kj} .

Величина ефективної потужності N_{ej} на кожному j -му кроці, визначається за формулою [7]:

$$N_{ej} = \frac{N_{kj}}{\eta_{\Pi j} (1 - \beta_j)}, \quad (4.3)$$

					0032.160159.000.04MP.ПЗ			Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				

де N_{kj} – дотична потужність локомотива, кВт, що визначається як [7]

$$N_{kj} = \frac{F_{kj} \cdot V_j}{3,6}, \quad (4.4)$$

де F_{kj} – дотична сила тяги, кН;

V_j – середня швидкість руху, км/год;

β_j – частка потужності дизеля, що витрачається на привод допоміжного обладнання локомотива.

Відомо, що ККД передачі локомотива η_{II} безперервно змінюється в широкому діапазоні, а величина β_j залежить від задіяного в даний момент допоміжного обладнання [11]. У той же час у [4] відсутня методика визначення зазначених параметрів у процесі тягових розрахунків. У зв'язку з цим величини β_j та η_{IIj} при моделюванні прийняті постійними в відповідно до [7] і становлять $\beta_j = 0,12$ та $\eta_{IIj} = 0,8$.

Витрата палива g_{xi} на кожному i -му кроці, пройдену в режимі вибігу або гальмування, також є постійною величиною, яка для тепловоза ТЭМ2 становить 0,10 кг/хв [4].

При моделюванні насуву та розпуску складів на кожному кроці моделювання Δt вибирається ПКМ [2]. Якщо за умовами руху встановлений режим тяги ($n_k > 0$), то відповідно до обраної позиції n_{kj} та швидкості руху V_j за тяговими характеристиками визначається величина сили F_{kj} . При відомому значенні сили тяги F_{kj} за допомогою виразів (3), (4) розраховується величина ефективної потужності дизеля N_{kj} , відповідно до якої, використовуючи отримані вище залежності $g_{ej} = f(N_{ej}, n_{kj})$, визначається питома витрата палива g_{ej} на j -му кроці. В іншому випадку (встановлений режим вибігу або гальмування) витрата палива на

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

i -му кроці визначається за величиною g_{xi} , прийнятої для локомотива.

Слід зазначити, що в області малих швидкостей ($V_j \leq 10$ км/год) ефективна величина потужності N_{ej} (3) може виявитися менше, ніж її нижня межа $N_{e \min}$, при якій існує характеристика навантаження $g_{ej} = f(N_e, n_{kj})$ для аналізованої ПКМ n_{kj} .

У такому разі величина g_{ej} на j -му кроці моделювання приймається рівною питомій витраті палива, що відповідає потужності $N_{e \min}$ для позиції n_{kj} . Ця обставина разом із раніше прийнятим припущенням про сталість величин β_j та $\eta_{ПД}$ вносять певну похибку до розрахунку витрати палива, виконаного за допомогою цієї методики.

Згідно методики 2 [9] розмір витрати палива E може бути визначена як

$$E = \sum_{j=1}^n g_{kj} \Delta t_j + \sum_{i=1}^m g_{xi} \Delta t_i, \quad (4.5)$$

де g_{kj} – витрата палива в одиницю часу при роботі дизеля під навантаженням, кг/хв;

g_{xi} – витрата палива в одиницю часу при роботі дизеля на холостому ході, кг/хв.

У режимі тяги величина витрати пального g_{kj} приймається відповідно до використовуваної на j -му етапі позицією n_{kj} . Значення параметра g_{kj} (під час роботи дизеля за тепловозною характеристикою) для кожної ПКМ локомотива ТЭМ2 прийняті згідно з [9] та наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Частота обертання колінчастого валу дизеля по позиціям контролера машиніста тепловоза ТЭМ2

Позиція контролера машиніста	1	2	3	4	5	6	7	8
Витрата палива g_{kj} , кг/год	31	63	96	110	120	160	178	198

Величина витрати палива g_{xi} під час роботи дизеля в режимі холостого ходу

					0032.160159.000.04MP.ПЗ				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

визначається аналогічно методиці 1.

Згідно методики 3 для визначення витрати палива маневровим тепловозом з електричної передачі пропонується використовувати величину ефективної роботи дизель-генераторної установки (ДГУ) A_G . При цьому годинна витрата палива g_G пов'язана з роботою A_G лінійною залежністю виду

$$g_G = g_x + bA_G, \quad (4.6)$$

де g_x – витрата палива дизелем при роботі на холостому ходу, кг/год;

b – постійний коефіцієнт, що характеризує норму витрати палива на 1 кВт-год ефективної роботи ДГУ, кг/кВт-год;

A_G – ефективна робота ДГУ, кВт-год/год.

Витрата палива g_x при роботі дизеля тепловоза в режимі холостого ходу приймається в відповідно до [4].

Для визначення величини коефіцієнта b було проаналізовано звітні дані системи «БИС-Р», що дозволяє вимірювати миттєву витратку палива локомотивом, а також фіксувати електричну потужність його ДГУ [13]. На підставі цих даних вказана система дає можливість сформулювати звіт про експлуатаційну витрату палива та виконаною генератором тепловоза роботи за необхідний період.

Величина ефективної роботи ДГУ A_G може бути визначена як [14]

$$A_G = \sum_{j=1}^n N_{Gj} \Delta t_j, \quad (4.7)$$

де N_{Gj} – потужність ДГУ на j -му кроці, пройденому в режимі тяги, кВт [7]

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N_{Гj} = \frac{N_{kj}}{\eta_{ГД}}, \quad (4.8)$$

де $\eta_{ГД}$ – ККД тягових двигунів.

Величина $\eta_{ГД}$ прийнята постійною відповідно до [7] ($\eta_{ГД} = 0,98$).

Згідно методики 4 принципово іншим підходом є визначення витрати палива E на основі даних про виконану локомотивом механічної роботи [15]:

$$E = \sum_{j=1}^n k_j R_{mj}, \quad (4.9)$$

де k_j – перехідний коефіцієнт;

R_{mj} – механічна робота сили тяги, т–км, яка визначається як [16]:

$$R_{mj} = F_{kj} \Delta S_j, \quad (4.10)$$

де ΔS_j – переміщення складу на кроці, км.

Коефіцієнт переходу k_j є співвідношенням, вираженим у кілограмах дизельного палива, що витрачається на виконання локомотивом 1 т–км механічної роботи; при цьому для маневрових тепловозів даний коефіцієнт приймається як стала величина $k_j = 0,85$ [15].

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Визначення середньоексплуатаційного ККД роботи силової установки тепловоза

Вираз для визначення середньоексплуатаційного ефективного ККД гібридної силової енергетичної установки (ГСУ) можна записати у вигляді:

$$\eta_e^{ГСУ} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_{eij}}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m G_{ij} \right) \cdot Q_H^P}, \quad (4.11)$$

де n – кількість джерел енергії в установці;

m – кількість режимів роботи ГСУ;

L_{eij} – робота, виконана i -м джерелом енергії в j -м режимі роботи ГСУ, кВт;

G_{ij} – витрата палива дизелем в j -м режимі роботи ГСУ, кг;

Q_H^P – питома теплота згоряння палива, кДж/кг.

Витрата палива i -м дизелем в j -м режимі роботи ГСУ

$$G_{ij} = (g_{eij} \cdot N_{eij} + g_{ixx}) \cdot t_{ij}, \quad (4.12)$$

де g_{eij} – питома ефективна витрата палива дизелем в j -м режимі роботи ГСУ, кг/(кВт-год);

N_{eij} – ефективна потужність i -го джерела енергії в j -м режимі роботи ГСУ, кВт;

t_{ij} – час роботи i -го джерела енергії в j -м режимі роботи ГСУ, год;

g_{ixx} – витрата палива дизелем на холостому ходу, кг/год.

У кожному j -му режимі роботи ГСУ i -й джерело енергії може працювати або під навантаженням, або на холостому ходу. В першому випадку виконуються

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

УМОВИ

$$N_{eij} > 0, b_{ixx} = 0, \quad (4.13)$$

у другому випадку

$$N_{eij} = 0, b_{ixx} > 0, \quad (4.14)$$

Робота i -го джерела енергії в j -м режимі роботи ГСУ

$$L_{eij} = N_{eij} \cdot t_{ij}, \quad (4.15)$$

Питома ефективна витрата палива i -го дизеля в j -м режимі роботи ГСУ

$$g_{eij} = \frac{3600}{\eta_{eij} \cdot Q_H^P}, \quad (4.16)$$

де η_{eij} – ефективний ККД i -го дизеля в j -м режимі роботи ГСУ.

Відповідно

$$\eta_e^{ГСУ} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (N_{eij} \cdot t_{ij})}{\frac{Q_H^P}{3600} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{N_{eij}}{\eta_{eij}} + b_{ixx} \right) \cdot t_{ij} \right) \right)}, \quad (4.17)$$

У кожен момент часу має виконуватися умова

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sum_{i=1}^n N_{eij} = N_j^{ГСУ}, \quad (4.18)$$

де $N_j^{ГСУ}$ - необхідна потужність силової установки в j -м режимі її роботи, кВт [10].

4.3 Визначення середьоексплуатаційного ККД тепловоза з гібридною установкою

Під агрегатними потужностями гібридної силової установки слід розуміти номінальні потужності окремих джерел енергії, що утворюють спільно силову установку. Оскільки одна і та ж номінальна потужність установки може досягатися при різному співвідношенні потужностей що входять в неї джерел, актуальною є завдання вибору раціональної компоновки ГСУ.

Класичний підхід до постановки оптимізаційної задачі включає наступну послідовність дій:

- 1) визначення характеристичного критерію;
- 2) визначення меж системи;
- 3) визначення незалежних змінних;
- 4) побудова моделі системи.

Об'єктивною характеристикою експлуатаційної економічності тепловоза, що враховує як характеристики і режими роботи дизелів, так і особливості експлуатаційних режимів роботи тепловоза, є середньоексплуатаційний коефіцієнт корисної дії тепловоза.

Середньоексплуатаційний ККД тепловоза з ГСУ визначається наступним чином:

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків витрати палива та середньоексплуатаційного ККД роботи тепловоза з гібридною силовою установкою по різних видах роботи

Показник	Величини по видах роботи		
	маневрова	горочна	вивізна
Енергія, яка витрачена локомотивом на виконання роботи, кВт-год	85	58	167
Витрата палива на виконання роботи згідно методики 1, кг	37,6	21,2	53,0
Витрата палива на виконання роботи згідно методики 4, кг	41,7	23,2	59,1
Середньоексплуатаційне ККД роботи силової установки, %	18,4	22,1	25,6
Середньоексплуатаційне ККД роботи тепловоза, %	7,3	9,3	11,3

Таблиця 4.3 – Порівняння розрахунків роботи витрати палива та середньоексплуатаційного ККД роботи гібридної силової установки та тепловоза з гібридною силовою установкою по різних видах роботи

Показник	Величини по видах роботи		
	маневрова	горочна	вивізна
Витрата палива на виконання роботи згідно методики 2 тепловозом ТЭМ2, кг	43,9	24,4	62,2
Середньоексплуатаційне ККД роботи тепловоза ТЭМ2, %	6,5	8,1	9,3
Витрата палива на виконання роботи згідно методики 1 тепловозом з ГСУ, кг	37,6	21,2	53,0
Середньоексплуатаційне ККД роботи тепловозом з ГСУ, %	7,3	9,3	11,3
Зменшення витрати палива тепловозом з ГСУ в порівнянні з тепловозом ТЭМ2	14,3	13,1	14,8
Збільшення середньоексплуатаційного ККД роботи тепловоза з ГСУ в порівнянні з тепловозом ТЭМ2	0,8	1,2	2,0

Висновок до розділу. Розглянуті методики розрахунку витрати палива та

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середньоексплуатаційного ККД маневрових тепловозів та тепловоза з гібридною силовою установкою. Згідно проведених розрахунків можна зробити висновок, що застосування тепловоза з гібридною силовою установкою дозволить зменшити витрату дизельного палива до 15% та збільшити середньоексплуатаційний ККД роботи маневрового тепловоза до 2 %. Ще збільшити ці показники можливо буде при використанні рекуперації енергії при гальмуванні тепловоза для підзаряду накопичувачів енергії.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

Зважаючи на світову тенденцію подорожчання паливно-енергетичних ресурсів, можливим вирішенням даних проблем є впровадження в експлуатацію маневрово-вивізного локомотива з гібридним приводом. Перевагою даної системи є зниження витрат паливно-мастильних матеріалів на одиницю виконаної роботи за рахунок впровадження більш економного малопотужного дизельного двигуна в порівнянні з базовим, який буде працювати на найбільш оптимальних режимах роботи. Впровадження гібридного приводу дозволить збільшити періоди циклів технічного обслуговування (ТО) та знизити витрати на обслуговування та ремонти. Впровадження модульної конструкції гібридного локомотива дозволяє провести оптимізацію витрат на утримання обладнання та технічного персоналу, забезпечує можливість створення страхового фонду деталей та вузлів, в межах ремонтних депо комбінатів, що в свою чергу призведе до зменшення часу знаходження локомотива в планових та позапланових ремонтах, та підвищить коефіцієнт готовності локомотивного парку підприємств. Впровадження сучасних накопичувальних акумуляторів дозволяє суттєво знизити рівень шуму локомотива, за рахунок його роботи з вимкненим дизельним двигуном, а саме роботи на низьких режимах, під час маневрових переміщень та виконанні господарчих переміщень в межах комбінату. Застосування сучасного економічного дизеля дозволить суттєво знизити рівень викидів токсичних речовин в навколишнє середовище при їзді в приміських районах населених пунктів.

Виходячи з вищезазначеного, можливо зробити висновок, що створення й впровадження локомотива з гібридним приводом в системі підприємств групи «МЕНТІНВЕСТ» та АТ «Укрзалізниця», є доцільним та обґрунтованим рішенням

В ході проведених тягових розрахунків були визначені основні параметри експлуатації та режими роботи маневрових тепловозів в різних видах роботи в умовах Криворізького регіону.

В якості проекту тепловоза з гібридною силовою установкою була

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запропонована можлива модернізація тепловоза ТЭМ2, була обрана передача змінно-постійного струму з накопичувачем енергії, який складеться з літій-іонних акумуляторних батарей. Ефективна потужність гібридної силової установки тепловоза становить 600 кВт, з яких 320 кВт розвиває дизель Cummins тип QSX15-G8, а решту 280 кВт – накопичувач енергії. Визначені основні параметри та тип тягового генератора та тягового електродвигуна. Розраховані та побудовані електромеханічні характеристики ТЕД, електротягові характеристики КМБ, тягова та техніко-економічні характеристики тепловоза при роботі силової установки в різних режимах. Виконаний розрахунок поздовжнього розважування тепловоза.

Розглянуті методики розрахунку витрати палива та середньоексплуатаційного ККД маневрових тепловозів та тепловоза з гібридною силовою установкою. Згідно проведених розрахунків можна зробити висновок, що застосування тепловоза з гібридною силовою установкою дозволить зменшити витрату дизельного палива до 15% та збільшити середньоексплуатаційний ККД роботи маневрового тепловоза до 2 %. Ще збільшити ці показники можливо буде при використанні рекуперації енергії при гальмуванні тепловоза для підзаряду накопичувачів енергії.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЛІТЕРАТУРА

1. Использование накопителей энергии для повышения параметров локомотивов. А. В. Устенко, О. В. Пасько. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Випуск 3/2012 (19).
2. Эффективность эксплуатации маневровых и промышленных локомотивов с гидравлической и электрической передачей. В. Н. Балабин. «Транспорт российской федерации» № 3 (34) 2011.
3. Анализ режимов работы силовых установок маневровых тепловозов. Щуров Н.И., Гурова Е.Г., Какаров С.В., Стрельникова Д.М.
4. Натрий-серный аккумулятор: новые направления развития. А.Г. Морачевский, А.А. Попович, А.И. Демидов. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. Том 23, №4, 2017.
5. Сравнительный анализ систем запасания энергии и определение оптимальных областей применения современных супермаховиков. М.А. Соколова, В.С. Томасова, R.P. Jastrzębski.
6. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2014, № 4 (92)
7. Правила тяговых расчетов для тепловозов на промышленном транспорте. 2-е изд., М.: Промтрансипроект, 1977. 117 с.
8. Інструкція по технічному нормуванню витрат електричної енергії і палива локомотивами на тягу поїздів. ЦТ-0059 [Текст]: Затв.: Наказ Укрзалізниці 05.03.2003 № 62-Ц. – К., 2003. – 85 с.
9. Бобровський, В. І. Моделювання процесу насуву та розпуску составів на сортувальній гірці [Текст] / В. І. Бобровський, Є. Б. Демченко //Зб. наук. праць ДНУЗТ «Транспортні системи та технології перевезень».– Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2012. – Вип. 4. – С. 13-19.
10. Бобровский, В. И. Совершенствование имитационной модели процесса надвига

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2017. – 35 с.

20. Фалендыш, А.П. Использование гибридных передач на маневровых тепловозах / А.П. Фалендыш, Н.В. Володарец // Локомотив-информ. – 2010 – Декабрь. – с. 4-7.
21. Яровий Р. О. Підвищення експлуатаційних характеристик маневрових тепловозів шляхом використання комбінованих накопичувачів енергії: Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєверодонецьк, – 2019.
22. Бобирь Д. В. Теорія та конструкція локомотивів: методичні вказівки до курсового проектування у 3 ч. – Ч. 2. – Розробка екіпажної частини тепловоза та визначення її основних параметрів / Д. В. Бобирь, М. П. Довбня, М. І. Мартишевській; Дніпропетр. націон. універ. залізнич. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – 21 с.
23. Поздовжнє розважування тепловозів : методичні вказівки до виконання контрольної роботи, курсового та дипломного проектування / уклад. Д. В. Бобирь, Є. Г. Нечаєв, Л. В. Колодій; Дніпропетр. націон. універ. залізнич. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – 39 с.

					0032.160159.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А. Програма та результати тягових розрахунків

					0032.160159.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження таблиці А.1

1	2	3
C11- Q11	Відповідні значення дотичної сили тяги (кгс) з тягової характеристики локомотива. Значення в межах обмеження на зчеплення можна встановити рівним $F_{зр}$, оскільки вони будуть обчислені в процесі розрахунку	33141; 31917; 19273; 13358; 10299; 8168; 6424
S10	Витрата електроенергії на допоміжні потреби. Для тепловоза встановлюємо "0"	0
T10	Годинна витрата пального	198
U10	Кількість підключених паралельно електродвигунів. Для тепловоза встановлюємо "1"	1
V10	Залежність напруги двигуна від струму. Для тепловоза встановлюємо "0"	0
W10	Постійний член залежності напруги двигуна від струму. Для тепловоза встановлюємо "1"	1
X10	Коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії. Для тепловоза задаємо «1»	1

Продовження таблиці А.2

1	2	3
АН	Проектна відмітка на кінець інтервалу інтегрування, м	=АН16+В17·D17/1000
АІ	$I_d^2 \cdot \Delta t$	=(АЕ17/У\$10)·(АЕ17/У\$10) ·S17
АJ	$\sum I_d^2 \cdot \Delta t$	=AJ16+AI17
АК	Ефективний струм I_e , А	=КОРЕНЬ(AJ17/T17)

