

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра «Локомотиви»

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

М. І. Капіца

« _____ » _____ 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня *«магістр»*

Галузь знань *27 Транспорт*

Спеціальність *273 Залізничний транспорт*

Освітньо-професійна програма *Локомотиви та локомотивне господарство*

Тема **ЕСКІЗНИЙ ПРОЕКТ ГІБРИДНОГО МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА
З ОСЬОВОЮ ФОРМУЛОЮ $3_0 - 3_0$**

Theme **CONCEPTUAL DESIGN OF HYBRID SHUNTING LOCOMOTIVE
WITH AXIAL FORMULA $3_0 - 3_0$**

Керівник дипломної
роботи

Д. В. Бобирь

Нормоконтролер

Л. В. Колодій

Студент групи ЛГ1921

О. В. Погрібниченко

Student

Oleksandr Pohribnychenko

Дніпро, 2020

Зміст

ВСТУП.....	5
1 ЗАГАЛЬНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ.....	7
1.1 Основні тенденції розвитку в області автономного тягового рухомого складу для маневрової роботи	7
1.2 Аналіз основних режимів роботи маневрових тепловозів	20
1.3 Аналіз систем накопичення енергії	26
1.4 Аналіз конструкційних схем гібридних силових установок (ГСУ)	34
2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛОКОМОТИВА.....	39
2.1 Визначення необхідної потужності локомотива, дизеля та енергоємності накопичувача енергії	40
2.2 Визначення техніко-економічних характеристик тепловоза.....	49
2.3 Визначення розмірів та габаритний баланс тепловоза	64
2.4 Визначення параметрів системи пружного підвішування.....	67
3 ПОЗДОВЖНЄ РОЗВАЖУВАННЯ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА.....	78
ВИСНОВКИ	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	90

					<i>0032.196375.000.04MP.ПЗ</i>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>Ескізний проект гібридного маневрового тепловоза з осью формулою Z_0-Z_0</i>					
Розроб.	Погрібниченко							Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Бобирь							4	101	
Реценз.								<i>ДНУЗТ, ЛГ1926</i>		
Н. Контр.										
Затверд.										

ВСТУП

Виконання необхідного обсягу перевезень пасажирів і вантажів, при одночасному зниженні витрат паливоенергетичних ресурсів є проблемою, актуальність якої підтверджується багаторічним досвідом роботи залізниць. Рішення цієї проблеми можливо шляхом відновлення й модернізації рухомого складу, удосконалення організації руху й водіння поїздів, впровадження передових методів обслуговування і ремонту локомотивів, а також інших заходів спрямованих на ефективне використання енергоресурсів.

Стан локомотивного парку ПАТ «Укрзалізниця» катастрофічно погіршується, особливо це стосується маневрових тепловозів. З часу отримання незалежності України закупівля маневрових тепловозів майже не проводилась. Це призвело до того, що понад 95 % маневрових тепловозів повністю вичерпали призначений термін служби.

Відповідно до «Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України», затвердженої наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 14 жовтня 2008 року №1259, передбачено оновлення парку тягового рухомого складу за рахунок створення та впровадження локомотивів нового покоління та модернізації сучасним силовим обладнанням наявних локомотивів для доведення їх показників до сучасних вимог.

Однією з головних задач при проектуванні, створенні нових локомотивів та модернізації існуючих є пошук способів зменшення споживання дизельного пального та скорочення обсягів шкідливих викидів до мінімуму. Перехід на більш чисті види пального вже почався. Надалі основною тенденцією стане перехід до використання транспортних засобів з повністю електричними двигунами. У той же час великі корпорації вкладають все більше і більше коштів у гібридні системи для підвищення гнучості в проектуванні і монтажі, оптимізації експлуатаційних характеристик і зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Сьогодні всі види транспортних засобів можуть використовувати гібридні технології для досягнення більш ефективних і екологічних показників. Переваги

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обумовлені очевидними економічними стимулами: поліпшення експлуатаційних характеристик; скорочення викидів; зменшення експлуатаційних витрат завдяки меншій витраті пального; низькі витрати на технічне обслуговування у зв'язку з відмовою від дизельних двигунів; зниження рівня шуму; збільшення довгострокової ефективності системи енергопостачання.

Застосування накопичувачів енергії у тяговій мережі локомотива є одним із шляхів зниження витрат пального на тягу в усьому світі. Це є найбільш актуальним для тягового рухомого складу, а особливо для маневрових локомотивів. Практика доводить, що середньоексплуатаційна потужність дизелів маневрових тепловозів складає 10...15 % від номінальної потужності дизеля. Тому використання накопичувачів енергії саме для маневрового тепловоза є найбільш перспективним.

Мета роботи полягає у визначенні параметрів та характеристик гібридного тепловоза, його систем та елементів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути та визначити особливості роботи маневрових тепловозів, проаналізувати напрямки поліпшення експлуатаційних показників локомотивів, сформулювати критерій ефективності та виконати необхідні розрахунки, включаючи розрахунки параметрів екіпажної частини.

Об'єктом дослідження в роботі є гібридний маневровий тепловоз, а *предметом* – його умови експлуатації, силові кола та екіпажна частина.

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ЗАГАЛЬНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ

1.1 Основні тенденції розвитку в області автономного тягового рухомого складу для маневрової роботи

Важливу роль у виконанні транспортних завдань відіграє автономний рухомий склад, особливо в області виконання маневрових, збірновивізних і внутрішніх робіт компаній, корпорацій та ін.

Значну частину інвентарного парку тягового рухомого складу ПАТ «Укрзалізниця» складають 2488 магістральних і маневрових тепловозів, з них експлуатуються 1343 тепловоза. Понад 75% інвентарного парку тепловозів вже відпрацювали встановлений заводами-виробниками нормативний термін служби та потребують негайної заміни або проведення капітально-відновлювального ремонту [1].

Значна частина експлуатаційного парку локомотивів зайнята виконанням маневрової роботи, з них 92 % маневрової роботи виконується тепловозами. Витрати на їх утримання становлять понад 25 % від загальних експлуатаційних витрат, основною статтею витрат при цьому є витрати на дизельне паливо. За рік Укрзалізниця споживає близько 440 тис тонн дизельного пального (у т.ч. на тягу 370 тис тонн), щодобово на екіпірування близько 840 тепловозів витрачається 1200–1250 тонн (у т.ч. 1130 тонн на тягу поїздів) [1–3].

Результати дослідження наявності маневрових тепловозів країн Європи за матеріалами журналів і сайтів [4] наведено на рис. 1.1–1.4 .

Загальна кількість маневрових тепловозів в західній Європі на даний час становить близько 7672 од. Відсоткове співвідношення кількості маневрових тепловозів країн Європи наведено на рис. 1.1. З рис. 1.1 видно, що домінуюче становище (86,82 %) за наявності маневрових тепловозів в розглянутих країнах Європи займають Німеччина – 36,64 %, Франція – 32,40 %, Італія – 17,77 %, наступну групу 11,75 % складають Швеція, Фінляндія, Австрія і всього лише 1,43 % парку маневрових тепловозів припадає на Норвегію, Данію, Бельгію.

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Рис. 1.1. Процентне співвідношення кількості маневрових тепловозів провідних країн Європи

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Рис. 1.2. Розподіл за часом кількості побудованих маневрових тепловозів

Середній вік усіх маневрових тепловозів залізниць Франції, Німеччини, Італії, Фінляндії, Норвегії, Данії, Австрії та Бельгії становить близько 46 років. Основний підйом маневрового тепловозобудування доводиться на 1961–1980 роки. В останні роки на тлі високих енергозберігаючих та екологічних вимог знову проглядається тенденція збільшення обсягів тепловозобудування (рис. 1.2).

Триває процес оновлення, заміни застарілого парку і модернізації раніше випущених серій тепловозів шляхом впровадження прогресивних видів автономної тяги. Затребувані більш ефективні, економічні, екологічні конструкції [1].

Середній вік рухомого складу "Укрзалізниці" становить 40 років. Згідно з інформацією, 297 вантажних тепловозів УЗ старше 30 років. Що стосується пасажирського тягового складу, то вік 331 локомотива перевищує 30 років.

Середній вік пасажирський тепловозів складає 28 років, 4 тепловози подолали позначку в 30 років. Повідомляється, що близько 100 локомотивів будуть списані в 2019 році.

При аналізі потужності тепловозного парку європейських країн встановлено, що 39 % складають маневрові тепловози з ефективною потужністю дизеля 501–1000 кВт, 30 % припадає на тепловози, діапазон потужності яких знаходиться в межах від 100 до 500 кВт [5, 6]. Причому, останнім часом спостерігається тенденція до підвищення потужності [5]. Більш докладний розподіл кількості маневрових тепловозів провідних країн Європи за діапазонами потужностей, з урахуванням процентного співвідношення між досліджуваними країнами представлено в табл. 1.1 та графічно на рис. 1.3.

На рис. 1.4 та в табл. 1.2 наведено розподіл процентного співвідношення кількості маневрових тепловозів провідних країн Європи за типами передачі. Перше місце, як показано на рис. 1.4, за кількістю в європейських країнах займають маневрові тепловози з гідропередачею (DH) – 70,32 %, друге – з електропередачею (DE+AE) – 20,92 %, на третьому місці тепловози з механічною передачею (DM) – 7,11 %, на четвертому – тепловози з накопичувачем електроенергії в акумуляторах (E+EB) – 1,31 %, на п'ятому місці гібридні тепловози (ED) – 0,25 %, на шостому –

										Арк.
										9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					

тепловози з безпосереднім приводом (D) – 0,07 %. Причому, більшість нових маневрових тепловозів побудованих, починаючи з 2000 року, мають гідропередачу.

Таблиця 1.1

Розподіл кількості маневрових тепловозів провідних країн Європи за діапазонами потужностей у %

Країна	Діапазон потужності, кВт			
	<100	100–500	501–1000	більше 1000
Бельгія	–	0,29	0,18	0,01
Австрія	0,08	0,90	1,99	1,01
Фінляндія	0,51	0,34	2,82	0,30
Данія	0,18	0,16	–	–
Швеція	0,10	1,97	0,13	1,56
Норвегія	0,03	0,56	0,03	–
Італія	7,35	8,41	1,48	0,72
Франція	6, 19	11,29	10,07	4,59
Німеччина	0,69	6,34	21,92	7,81

Таблиця 1.2

Розподіл процентного співвідношення маневрових тепловозів провідних країн Європи за типом передачі у %

Країна	Тип передачі					
	DE+AE	DN	DM	D	E+EB	ED
Бельгія		0,48				
Австрія	0,13	2,86			0,99	
Фінляндія	0,30	3,16	0,51			
Данія		0,33	0,01			
Швеція	1,55	2,06	0,03		0,14	
Норвегія	0,01	0,57				
Італія	2,10	15,63	0,10		0,01	

Франція	15,80	10,49	5,95			
Німеччина	1,03	34,74	0,51	0,07	0,17	0,25

Рис. 1.3. Розподіл відсоткового співвідношення кількості маневрових тепловозів провідних країн Європи за діапазоном потужності

Рис. 1.4. Розподіл процентного співвідношення маневрових тепловозів провідних країн Європи за типом передачі

Останнім часом позвавилася робота по модернізації та створення маневрових локомотивів. Побудовано десятки нових локомотивів, що відрізняються поєднанням різних енергетичних установок.

З'явився термін «Гібридна установка, гібридний тепловоз». Гібридними вважаються локомотиви, які мають енергетичну установку, в якій поєднуються два або більше різних принципів дії, або застосовується функціональне дублювання, засноване на використанні різних джерел енергії. Система вважається гібридною, якщо вона має хоча б одне додаткове рішення для виконання однієї і тієї ж функції. Поняття «гібрид» може також означати функціональне дублювання, засноване на використанні різних джерел енергії. Поряд з функціональністю важливу роль відіграє ККД компонентів приводу [7].

Метою застосування гібридного приводу є економія енергії та мінімізація викиду вихлопних газів у порівнянні з класичним дизельним приводом з гідравлічної або електричної передачею при рівному навантаженні. Ця мета

досягається за рахунок того, що дизель агрегата включається в роботу тільки на необхідний короткий час і працює в діапазоні необхідної потужності з максимальною ефективністю, тобто з максимальним ККД. При його використанні в якості приводу магістрального локомотива, розвиваючого в тривалому режимі високу швидкість, ця мета може досягатися, так як в цьому випадку дизель-генераторний агрегат буде працювати тривалий час в звичайному режимі. Перші локомотиви з гібридним приводом в основному були призначені переважно для використання в маневровій роботі.

Як правило, маневрові тепловози з гідравлічною та електричною передачею мають досить високу гнучкістю в експлуатації, проте у них є також деякі недоліки, такі, наприклад, як неефективна витрата пального під час роботи на холостому ходу, низький ККД в діапазоні низької потужності, а також шум і вихлопні гази. В гібридному приводі з комбінованим енергопостачанням від дизель-генераторного агрегата та накопичувача енергії – акумуляторної батареї процеси вироблення та накопичення енергії для енергопостачання компонентів приводу та допоміжного обладнання оптимізуються системою енергетичного менеджменту. Основними принципами при цьому є наступні [7]:

- виробляти стільки енергії, скільки необхідно для тяги, а надлишки направляти в накопичувальні пристрої;
- оптимізуючи енергоспоживання, оперувати категоріями енергії (кВт·год або кДж), а не потужності (кВт).

Прикладом застосування гібридних систем є канадська компанія Rail Power technologies Corp, яка розробила нові маневрові локомотиви [8], в яких низькооборотні дизельні двигуни потужністю до 1500 кВт поступилися місцем невеликому дизель-генератору потужністю 224 кВт, що працює тільки на підзарядку потужної свинцево-кислотної акумуляторної батареї з великим ресурсом.

У США в 2000 р була створена модель, відома тепер під назвою Green Kid – «зелений козеня», а у 2004 р – великий маневровий локомотив Railpower GG20B

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Green Goat's – «зелена коза» [9], спосіб роботи якого, полягає в живленні тягових двигунів тяговими акумуляторними батареями, при цьому зарядку акумуляторних батарей здійснюють живленням електроенергією від дизель-генератора невеликої потужності, що працює на дизельному пальному. У порівнянні з аналогічними дизельними моделями «зелені кози» витрачали на 40–60 % менше пального та скорочували викид шкідливих речовин на 80–90 %.

Інженери німецької філії концерну Alstom розробили свою модель гібридного локомотива, який приводиться в рух електродвигуном, що живиться від акумулятора. Коли напруга на клеммах акумулятора опускається нижче певного рівня, включається дизель-генератор і заряджає його. В умовах пікових навантажень обидва джерела можуть працювати одночасно [8]. Так само компанією Alstom було розроблено сімейство локомотивів «НЗ», що складається з чотирьох типів: локомотив, який працює тільки від акумуляторних батарей; гібридний локомотив потужністю 700 кВт; локомотив потужністю 700 кВт з двома дизелями і локомотив потужністю 1000 кВт з одним дизелем [10]. Локомотиви сімейства «НЗ» всіх чотирьох типів, на думку авторів, відповідають наступним вимогам: максимальна продуктивність; відповідність найвищим екологічним вимогам; переваги в експлуатації; уніфікація за величиною сили тяги при русанні з місця і технології обслуговування; максимальна швидкість 100 км/год; проходження кривої з радіусом 60 м; найкращі ергономічні умови в кабіні машиніста, зручна підніжка для зчіплювача; менша витрата дизельного пального у порівнянні з існуючими тепловозами [11].

У Обнінську на НПП «Політ» створений маневровий тепловоз ЛГМ1 (ТЭМ241) з комбінованою силовою установкою, що включає в себе модуль тягових акумуляторних батарей і дизель-генераторну установку. Тепловоз ЛГМ1 з електричною передачею змінно-постійного струму призначений для виконання легких маневрових і господарських робіт на коліях шириною 1520 мм промислових підприємств, залізничних станцій, ремонтних підприємств, підприємств колійного господарства, в тому числі в закритих приміщеннях без викиду випускних газів

						0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			13

дизеля [8] .

З'явилися дводизельні тепловози, тобто замість одного дизель-генератора застосовуються два з тієї ж сумарною потужністю. Сенс такого нововведення зрозумілий. На маневрах працює одна силова установка, і тільки в тих рідкісних випадках, коли необхідна велика потужність, як правило, при виїзді на перегін, задіяні обидва дизеля.

Як відомо, сьогодні пішли ще далі, створивши трьохдизельний тепловоз, у якого крім двох основних дизель-генераторів є ще третій – допоміжний, потужність якого розрахована на забезпечення живлення кіл управління, освітлення, опалення та приводу компресора [12]. Крім того, допоміжний дизель використовується для обігріву основних дизелів під час перерв в роботі.

Компанія National Railway Equipment (NRE) випустила кілька маневрових тепловозів сімейства «N-Viro Motive», оснащених двома або трьома дизель-генераторними силовими агрегатами потужністю по 500 кВт. Корпорація Brookville Equipment (BE) розробила маневровий тепловоз сімейства Co Generation з трьома дизель-генераторними агрегатами сумарною потужністю 1500 кВт, що відрізняється низькою питомою витратою дизельного пального та відповідає найсуворішим вимогам з охорони навколишнього середовища. Наявність декількох силових агрегатів дозволяє реалізувати принцип «потужність за потребою» і виключити її непродуктивне використання [3].

З'явилися багатодизельні тепловози серії MP21B, MPI (США), тепловози серії 3GS-21B, «CoGeneration» і RP20BH з рекуперативним гальмуванням, Terra Nova [14] та ін. Застосування багатодизельних тепловозів дозволяє за різними джерелами економити від 15 % до 27 % пального (в залежності від режиму роботи), значно знизити шум при маневровій роботі, зменшити до 50 % емісії CO₂, скоротити до 80 % шкідливі викиди в атмосферу.

У Франції в рамках проекту Plathée створений гібридний локомотив BB63413. Економія пального була отримана при маневровій роботі (40 % в порівнянні з традиційним тепловозом), а також в режимі холостого ходу (86 %) [5].

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

У 2010 році Toshiba представила гібридну модель JR Freight Class HD300. Тепловоз виявився настільки вдалим, що на його основі було розроблено кілька модифікацій для різних кліматичних зон. На даний час це лише одна серійна модель гібридного локомотива у світі. Перший тепловоз було обладнано дизелем потужністю 242 кВт і літій-іонною акумуляторною батареєю з номінальною енергоємністю 67,4 кВт·год. У якості тягових двигунів використані трифазні синхронні двигуни зі зрушенням від постійних магнітів. При випробуваннях на маневровій роботі була отримана економія пального близько 36 %, а обсяг викидів окислів азоту був нижче на 61 % в порівнянні з традиційними маневровими тепловозами з електричною передачею [5].

Російська компанія «Трансмашхолдинг» на базі тепловоза ТЭМ18-ДМ спроектувала маневровий тепловоз ТЭМ33 з силовою установкою на базі двох модульних дизель-генераторів С18 фірми Caterpillar потужністю 2×571 кВт, синхронного тягового генератора та асинхронних тягових двигунів. Тепловоз ТЭМ33 дозволяє максимально ефективно оперувати потужністю, уникати перевитрати пального та передчасного зносу силової установки, знизити викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище. Оснащення тепловоза двома дизелями забезпечує у разі необхідності його роботу на меншій потужності з одним дизелем або, навпаки, дозволить використовувати можливості відразу двох дизелів. Призначений ТЭМ33 для виконання маневрової, маневрово-вивізної, горочної та господарської роботи в депо, на станціях і промислових підприємствах на колії 1520 мм [6].

Також на базі тепловоза ТЭМ18-ДМ було спроектовано перший російський гібридний тепловоз ТЭМ35, що має цілу низку істотних переваг. При однаковій з серійними тепловозами потужності він витрачає менше пального (на 20–30 %), вимагає менших витрат на технічне обслуговування та більш екологічний. Робота тепловоза найбільш ефективна в режимах частих гальмувань, зупинок, запуску і розгону тепловоза. В тепловозі використовуються накопичувачі енергії, в якості яких застосовані електрохімічні конденсатори виробництва компанії «ЕЛТОН».

						Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ	

також системи GPRS і Wi-Fi;

- гальма з мікропроцесорним управлінням;
- центральний мікропроцесорний пристрій керування тепловозом типу БУЛ розробки ВАТ «ВНІКТІ» і інтелектуальні пульти управління;
- гвинтовий компресор з системою плавного пуску та вентилятор охолодження тягових двигунів з можливістю лінійного регулювання витрати охолоджуючого повітря;
- система віддаленого контролю, збору і зберігання інформації.

ВАТ «Сінара-Транспортні Машини» випустила двухдизельний маневрово-визізного тепловоз з електричною передачею ТЭМ14. Конструкція тепловоза передбачає модульне виконання основних вузлів агрегатів, що забезпечує зручність обслуговування і ремонту тепловоза. Економія палива тепловоза при його експлуатації на думку авторів становить близько 20 % [10].

Побудований в одному екземплярі енергоефективний тепловоз з інтелектуальним гібридним асинхронним приводом ТЭМ9Н Sinara Hybrid включає понад 20 інноваційних технічних рішень в конструкції. «Sinara Hybrid» має модульну архітектуру виробництва. На рамі тепловоза розміщені дизель-генераторний, кабіний, санітарно-побутовий модулі, а також модуль підготовки стисненого повітря, відсік чистого повітря, модуль перетворювачів і накопичувачів енергії. Електрична схема тепловоза передбачає наявність в конструкції літій-залізо-фосфатних акумуляторів і суперконденсаторів для зберігання електричної енергії. Тепловоз оснащений асинхронним тяговим приводом з векторним регулюванням моменту на валу двигунів, який є власною розробкою Центру інноваційного розвитку СТМ. Застосування активних накопичувачів енергії має забезпечувати підтримку роботи тепловоза під час простою протягом чотирьох годин. Холодний пуск двигуна здійснюється з використанням енергії суперконденсаторів [11].

В літку цього року презентували перший в Росії і другий у світі гібридний маневровий тепловоз ТЭМ5Х розробки Трансмашхолдінг в партнерстві з групою

										Арк.
										17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.196375.000.04MP.ПЗ

компаній Ctrl2GO. Це концепт з силовою установкою потужністю 200 кВт і літій-іонними акумуляторами потужністю 240 кВт, який стане родоначальником нового сімейства локомотивів. ТЭМ5Х – це двовісний гібридний тепловоз, призначений для маневрово-вивізних робіт на підприємствах і вокзальних комплексах, в тому числі закритого типу, а також для обслуговування промислової інфраструктури.

До передових технологій маневрового локомотива ТЭМ5Х відносяться: гібридна силова установка; швидкознімна та конфігурована модульна платформа; можливість прогнозування технічного стану; система дистанційного керування.

За попередніми оцінками, ТЭМ5Х дозволить скоротити експлуатаційний витрата пального на 30 % [12].

Кілька багатодизельних локомотивів модернізовано в Ярославлі на базі тепловоза ЧМЭЗ. Метою розробок було створення тепловозів, що відповідають перспективним вимогам по екології та витраті пального, а так само вимогам щодо поліпшення умов роботи машиніста. Економія пального тепловозом ЧМЭЗ з трьохдизельною силовою установкою забезпечується за рахунок того, що в режимі очікування роботи на тепловозі працює дизель-генератор малої потужності, який забезпечує передпусковий прогрів основних дизелів, заряд акумуляторної батареї, роботу компресорної установки, обігрів кабіни управління та роботу мікропроцесорної системи управління [13]. При малих навантаженнях працює один з дизелів потужністю 478 кВт і тільки при підвищенні навантаження (з четвертої позиції контролера) підключається третій дизель-генератор.

Наведені приклади показують, що використання накопичувачів енергії для тяги поїздів є досить ефективним енергозберігаючим заходом.

В Україні вивчаються різні варіанти вирішення питання дефіциту маневрових тепловозів. Зокрема, підписано меморандум з компанією Toshiba, яка виконує контракт на постачання гібридних маневрових локомотивів для Deutsche Bahn. Вивчаються й інші варіанти придбання локомотивів на гібридних, електричних або водневих двигунах [14].

На даний момент на перше місце серед вимог споживачів залізничної

											Арк.
											18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ						

техніки виходить якість тепловозів з поліпшеними експлуатаційними характеристиками та доступна вартість. В умовах зростаючої конкуренції, що вимагає підвищення технічного рівня тепловозів задоволення вимог споживачів залізничної техніки можливо на основі науково обґрунтованих рішень [15].

Створення гібридних маневрових тепловозів з рекуперацією енергії та багатодизельних тепловозів може дати великий економічний ефект і допомогти у вирішенні комплексу завдань, пов'язаних зі скороченням витрат пального тепловозами, підвищенням такого показника якості, як екологічність залізничного транспорту, зниження шумового забруднення та вібрацій, збільшення надійності, забезпечення тепловоза тягової потужністю при пікових випадкових навантаженнях та ін. [16].

Вибір конструктивного виконання та джерел енергії для маневрового тепловоза, розробка алгоритмів керування силовою установкою при наявності додаткових джерел енергії, що забезпечують раціональні режими експлуатації тепловоза в характерних умовах, є необхідним і складним завданням, пов'язаним з оцінкою енергоефективності та паливної економічності.

Різноманіття поєднання різних енергетичних установок при розробці нових маневрових тепловозів вказує, що процес пошуку раціональних варіантів триває, необхідні подальші наукові дослідження в області:

- моделювання виконання маневрової роботи;
- вивчення факторів, що впливають на витрату пального при експлуатації;
- проектування альтернативного виду автономного рухомого складу.

При створенні маневрових тепловозів нового покоління намагаються отримати такі ефекти:

- максимальне використання енергії на створення сили тяги;
- зниження енергетичних витрат на допоміжні потреби;
- зниження витрат на придбання пально-мастильних матеріалів;
- зниження витрат на обслуговування та ремонти всіх видів за весь термін

служби тепловоза;

										Арк.
										19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					

- скорочення терміну окупності;
- раціональне співвідношення ціна-якість;
- забезпечення високих екологічних та ергономічних якостей, які відповідають чинним і перспективним вітчизняним і світовим стандартам, зокрема вимог TSI.

Різноманіття маневрових тепловозів впливає з множини видів маневрових операцій та умов їх виконання. При виконанні одного виду маневрової роботи тепловозами однієї серії на одних і тих же ділянках в різні зміни режими експлуатації та режими роботи устаткування маневрових тепловозів варіюються.

Експлуатація маневрових тепловозів характеризується значним часом їх роботи на малих навантаженнях, холостому ходу, перехідних і часткових режимах. Транспортні операції проводяться на невеликих ділянках колії, при наявності безлічі стрілочних переводів, в умовах малих радіусів кривих, обмеженої видимості сигналів, при низьких швидкостях руху, частій зміні маси складу, великій кількості зупинок, частих розгонах і уповільненнях тепловоза з вагонами і без них. Це викликає необхідність великої кількості переключень позицій контролера та реверсування тепловоза зі стрибкоподібними збільшеннями або зменшеннями навантаження, що впливає безпосередньо на режими роботи та паливну економічність маневрових тепловозів в процесі їх експлуатації [17].

В даний час особлива увага приділяється підвищенню паливної економічності автономного рухомого складу для маневрової роботи, що обумовлює розвиток різних тенденцій і напрямків у цій галузі.

1.2 Аналіз основних режимів роботи маневрових тепловозів

Тривалий простій тепловоза в очікуванні чергового завдання, часта зміна позицій контролера машиніста, робота на низьких позиціях контролера і т.п., тобто режим роботи, обумовлюють специфіку технології роботи локомотива та особливості витрати пального при маневровій роботі. В цілому ці процеси носять

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

стохастичний характер. Витрата пального на маневрові роботи становить значну частину загальної витрати дизельного пального тепловозами [6].

При виконанні маневрових пересувань тепловози працюють в основному на несталіх режимах [18]. Для початку зрушення поїзда з місця та розгону потрібні великі тягові зусилля, що реалізуються короткочасно при зрушенні та розгоні, та відповідне цьому зусиллю величина зчіпної ваги. У той же час маневрово-вивізним тепловозам необхідна висока потужність для пересування составів на сусідні станції та вузли. При цьому маневровий тепловоз повинен забезпечувати максимально можливу, за умовами безпеки, швидкість руху, плавне гальмування, швидке реверсування. Як і до всього тягового рухомого складу до маневрових тепловозів пред'являються вимоги до високої експлуатаційної економічності та надійності [19].

Тільки на основі аналізу характеру роботи та умов експлуатації можливо визначити яку серію тепловоза доцільно використовувати при певному виді маневрової роботи по коліях певної станції. Умови виконання маневрової роботи визначають інтенсивність використання маневрових тепловозів, зміни параметрів їх енергетичного кола, режими роботи і, отже, основні технічні вимоги до них [10].

На основі аналізу маневрової роботи можна виділити наступні основні маневрові операції для маневрового тепловоза [11]:

1 Маневрова робота тепловоза на станції (спеціально-маневрова робота):

1.1 Гіркова робота;

1.2 Виконання сортування вагонів на станціях, не обладнаних гірками;

1.3 Технологічна операція (подача-прибирання складів або вагонів до місця навантаження-розвантаження, до місця відстоювання, на мийку, перестановка і т.п.);

2 Одиночне прямування маневрового тепловоза (вихід з депо, захід у депо та ін.);

3 Передавальна робота маневрового тепловоза;

4 Вивізні роботи маневрового тепловоза;

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 Робота на коліях промислових підприємств, складських комплексів та ін.

Кожна маневрова операція O_j є випадковою величиною, що складається з набору піврейсів – пересувань без зміни напрямку:

$$O_j = \sum_{i>1}^n P_i, \quad (1.1)$$

де O_j – маневрова операція j -го виду (наприклад, сукупність піврейс при виконанні горочної роботи);

P_i – піврейс i -го виду (наприклад, осаджування);

n – кількість піврейсів.

Найбільш часто використовувані піврейси [12, 13], для кожної маневрової операції наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Піврейси P_i , що використовуються для маневрових операцій

Маневрова операція	Піврейс
1	2
1 Під час маневрової роботи тепловоза на станції (спец. маневри)	
1.1 Гірочна робота	заїзд
	витягування та рух
	зміна напрямку та рух (тепловоз в хвості)
висота гірки 5 м	насування
	розпуск
	зупинка, відтягування
	<i>простій</i>
	рух без вагонів (холостий заїзд через горб гірки)
	навантажений виїзд через горб гірки

	осаджування
	рух без вагонів
1.2 Сортування на станціях, не обладнаних гірками	
<i>1.2.1 Поштовхи</i>	
1.2.1.1 поодинокі	заїзд
	витягування
	ПОШТОВХ
	відтягування
	<i>простій</i>
	осаджування
	рух без вагонів
1.2.1.2 серійні	заїзд
	витягування
	ПОШТОВХИ
	відтягування

Продовження табл. 1.3

1	2
	відтягування
	<i>простій</i>
	осаджування
	рух без вагонів
<i>1.2.2 Осаджування</i>	заїзд
	витягування
	осаджування
	<i>простій</i>
	відтягування
	<i>простій</i>
	рух без вагонів
1.3 Технологічна операція	
1.3.1 подача-прибирання	заїзд
	витягування
	рух з вагонами (тепловоз в голові)
	зміна напрямку (тепловоз в хвості) (при збиранні може не бути)
	осаджування
	рух без вагонів (з вагонами)
1.3.2 перестановка з парку в парк (з колії на колію)	заїзд
	витягування
	рух з вагонами
	зміна напрямку і рух (тепловоз в хвості)
	осаджування
	рух без вагонів
Переміщення тепловоза без вагонів при виконанні маневрової роботи на станції	заїзд і рух без вагонів
2 Одиночне проходження маневрового тепловоза (вихід з депо, захід у депо і ін.)	прямування тепловоза без вагонів

Продовження табл. 1.3

1	2
3 При передавальній роботі тепловоза	прямування тепловоза з вагонами
	прямування тепловоза без вагонів
4 При вивізної роботі тепловоза	прямування тепловоза з вагонами
	зупинки на станціях для причеплення-відчеплення вагонів
	прямування тепловоза без вагонів
5 Робота на коліях промислових підприємств, складських комплексів та ін.	див. п 1.3.1

На рис. 1.5 наведені середньостатистичні значення параметрів роботи тепловозів ЧМЭЗ в різних умовах експлуатації, отримані у результаті обробки даних автоматизованої системи реєстрації «БІС-Р». Маневрові тепловози, як правило, працюють в зоні низьких швидкостей, з недовикористанням потужності силових агрегатів, значну частину часу працюють в перехідних режимах дизеля і передачі. Як видно з рис.1.5, найбільша частка роботи на нульовій позиції контролера машиніста приходить на ділянкову роботу, а найменша – при сортувальній роботі на гірці. Найбільшу частку часу маневрові локомотиви знаходяться на стоянці при вантажній роботі, а найменше – при сортувальній роботі на гірці. Також необхідно відмітити, що при сортувальній роботі на гірці в основному використовуються перші п'ять позицій у порівнянні з іншими видами робіт. Останні позиції контролера машиніста більш за все використовуються при ділянковій роботі.

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Рис. 1.5. Середньостатистичні значення параметрів роботи тепловозів ЧМЭЗ в різних умовах експлуатації

1.3 Аналіз систем накопичення енергії

Перші дослідження у створенні електрорухомого складу з електричними накопичувачами енергії відносяться до самого початкового періоду розвитку електричної тяги. Автономне живлення тягових електродвигунів стало успішно застосовуватися на автомотрисах і маневрових локомотивах на початку ХХ століття, коли питома енергоємність свинцевих тягових батарей досягла 5...10 Вт·год/кг [14]. А починаючи з 70-80-х років ведуться інтенсивні наукові дослідження та дослідно-конструкторські роботи із створення тягового рухомого складу на базі накопичувачів енергії інших типів – інерційних, гідрогазових, індуктивних.

1.3.1. Інерційні системи накопичення енергії

До інерційних систем накопичення енергії відноситься маховичний накопичувач енергії. Він працює за рахунок розгону ротора (махового колеса) до високої швидкості й накопичує енергію (енергія обертання). Для використання накопиченої енергії обертання система із маховиком переводиться в електрогенераторний режим. Для розгону або гальмування маховика в більшості таких систем використовується перетворювач на електричну енергію, але також є пристрої, що прямо використовують механічну енергію, наприклад для пуску первинного двигуна внутрішнього згорання.

У сучасних маховичних системах ротори виготовляються з високоміцних вуглецевоволокняних композиційних матеріалів. Вони можуть розвивати частоту обертання від 20 000 до 50 000 хв⁻¹ у вакуумній камері, у якій вони закріплені на магнітних підшипниках. Розігнати такі маховики можна за лічені хвилини –

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ				

набагато швидше будь-яких інших типів накопичувачів енергії [15].

Зазвичай маховичний накопичувач енергії складається з ротора, утримуваного у вакуумній камері в підвішеному стані за допомогою підшипників для зменшення тертя, що приєднується до електричного мотора (електричного генератора).

У перших системах маховичних накопичувачів використалися великі сталеві диски, що обертаються на механічних підшипниках. У нових системах застосовуються ротори з вуглецевоволокняних композиційних матеріалів, які відрізняються більшою міцністю на розрив, ніж сталь, і на порядок легші.

Необхідним елементом маховичного накопичувачу енергії є магнітні підшипники. При використанні звичайних механічних підшипників неактивного типу величина виробленого тертя прямо пропорційна швидкості, тому при таких великих швидкостях занадто багато енергії витрачається на тертя у підшипниках.

Від використання в магнітних підшипниках низькотемпературних надпровідників швидко відмовилися через високу вартість охолодження. При цьому високотемпературні надпровідникові підшипники більш економічні. На даний час все більшого застосування знаходять системи з комбінованими підшипниками.

Високотемпературні надпровідникові підшипники при застосуванні в маховиках більших розмірів, не завжди забезпечують необхідних піднімальних зусиль, але проте вони завжди проявляють потрібні стабілізуючі властивості. Тому в комбінованих підшипниках для підтримки ваги використовуються постійні магніти, а для його стабілізації високотемпературні надпровідникові підшипники. Такі відмінні якості надпровідників по стабілізації навантаження пояснюються тим, що вони є хорошими діамагнетиками. У системах з комбінованими підшипниками звичайні неактивні магніти піднімають ротор у повітря, а високотемпературні надпровідникові підшипники втримують його у рівновазі.

У порівнянні з іншими системами накопичення енергії маховичні накопичувачи енергії характеризуються довговічністю (можуть працювати

									Арк.
									27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.196375.000.04MP.ПЗ

десятиліттями при незначному сервісному обслуговуванні або зовсім без нього), високими показниками щільності енергії (~ 130 Вт·год/кг або ~ 500 кДЖ/кг) та великою максимальною потужністю, що генерується. ККД енергії (відношення кількості переданої енергії до кількості отриманої енергії) у маховичних накопичувачах досягає 90 %. Показники енергоємності знаходяться у межах від 3 кВт·год до 133 кВт·год. Швидка зарядка системи здійснюється менш ніж за 15 хв [15].

За рахунок впровадження таких накопичувачів досягаються дві мети:

- економія енергії за рахунок більш ефективного використання енергії рекуперації;
- стабілізація рівня напруги в контактній мережі постійного струму на відгалуженнях або нових ділянках при подовженні ліній. Тут застосування накопичувачів енергії є альтернативою будівництву тягових підстанцій.

Ідея застосування інерційних накопичувачів енергії на залізницях народилася в Росії ще в XIX столітті і належить російському інженерові К. Э. Шуберському [16]. У 1860 році він запропонував використати кінетичну енергію, накопичену поїздом в процесі руху по спуску, для використання її на подальших підйомах, а також для подолання підйому поїздами зустрічного напрямку. Суть пропозиції полягала в тому, що до паровоза із складом перед спуском причіплювалася платформа, на рамі якої встановлені три пари махових коліс, що акумулюють кінетичну енергію поїзда при русі по спуску та віддають її на підйомі. Маса махових коліс передається на обід рушійного колеса без тертя, збільшуючи силу тяги по зчепленню. На дослідженнях з моделями К. Э. Шуберский довів корисність свого винаходу, проте у той час проект реалізований не був. Лише у другій половині минулого століття ця ідея стала поступово знаходити практичне застосування на сучасному рухомому складі. Так, наприклад, в США створені моторні вагони метрополітену R32 і електросекції міських залізниць АСТ-1 з інерційними накопичувачами енергоємністю 3 і 4,6 кВт·ч відповідно [27, 28].

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Як показали випробування вагонів R32 з маховиками, вони витрачають в середньому на 33 % енергії менше в порівнянні із звичайними вагонами такого ж типу. На коротких перегонах при типовому максимальному завантаженні економія енергії згідно з розрахунком може складати 42 %. Витрата енергії на розгін поїзда зменшується при цьому на 50 %.

Також відомо про розробку в США системи Flywheel з маховиком, яка забезпечує рекуперацію гальмівної енергії на дизельному рухомому складі. Генерована дизельним двигуном і гальмівна енергія, що рекуперує, приводить до обертання ротор з композитних матеріалів. Енергія, що акумулюється таким чином, використовується при зрушенні з місця та розгону поїзда. Очікується, що для автомотрис в регіональному сполученні економія енергії складе 20...30 %. Нині на залізницях Німеччини ця система використовується на дизельних вагонах серій VT 627.1 і VT 610 [29].

Ще одним проектом є створення фірмою Bombardier Transit газотурбовоза потужністю 2944 кВт з електричною передачею, на якому передбачена установка системи накопичення енергії з маховиком [20].

Було підписано відповідну угоду з Федеральною залізничною компанією (FRA); розробка локомотиву здійснювалася у рамках програми розвитку технологій високошвидкісного руху за участю державних транспортних агентств, компанії Amtrak і приватного сектора. Локомотив призначений для водіння пасажирських поїздів з максимальною швидкістю 240 км/год, що дозволить використати його при організації високошвидкісних сполучень у багатьох коридорах, уникнувши витрат на їх електрифікацію.

В якості наступного прикладу можна привести дані досліджень Di Maj F [21] з використання інерційних накопичувачів енергії для підвищення ефективності дизельного рухомого складу. Розрахунки показали, що автомотриса з дизелем потужністю 320 кВт і маховиком енергоємністю 22 кВт·ч при розгоні розвиває питому потужність 10 кВт/т. Для забезпечення такої потужності автомотрисі без накопичувача енергії потрібен дизель 900 кВт. При цьому питома

											Арк.
											29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ						

витрата пального зростає на 20 %. Найбільш прийнятна для умов приміського руху Італії автотрива потужністю 480 кВт реалізує значно менше прискорення при розгоні, чим автотрива з накопичувачем енергії. Прийнятна енергоємність маховика для локомотивів середньої потужності за даними тих же досліджень становить 140 кВт·ч.

Маховичні гідропідсилювачі також встановлювалися на більших локомотивах з електричною передачею, наприклад British Rati Class 70. Сучасні маховики, наприклад, маховики ємністю 133 кВт·год, розроблювальні Техаським університетом в Остині, можуть розігнати поїзд при рушанні з місця до ходової швидкості.

1.3.2. Пневматичні накопичувачі енергії

Компанія Energetix з Великобританії розробила й виготовила перший комерційний зразок системи безперебійного електроживлення Pnu Power TC1 на основі стисненого повітря. Компанія вважає цей напрямок в UPS-системах простим і дешевим варіантом. Зразок установлений на підстанції в мережі енергопостачання південноафриканської компанії Eskom Holdrngs, що входить у десятку найбільших світових виробників електроенергії. Система Pnu Power TC1 використовує балони зі стисненим повітрям під тиском 300 атмосфер і здатна забезпечувати подачу енергії протягом 10 годин. В основі Pnu Power TC1 лежить генерація електроенергії при протіканні повітря через камеру, яка аналогічна за будовою до відцентрованого вентилятора. Роль ротора відіграє гвинт вентилятора. Компанія вважає цей пристрій оптимальним варіантом, на якому зупинилися після випробувань газових турбін і інших варіантів перетворення кінетичної енергії стисненого повітря. Невелика маса лопаток вентилятора дозволяє вийти на повну потужність генерації електрики вже через 100 мс після подачі командного сигналу. Energetix у своїх розробках не придумувала нових конструкцій лопаток вентилятора, а просто запозичила їх із серійних зразків – спочатку з автомобілів, потім з автобусів. На

										Арк.
										30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					

черзі лопатки, використовувані в літаку Airbus A380, які, як сподіваються розробники, забезпечать потужність генерації до 50 кВт. Але цією цифрою інтереси розроблювачів не обмежуються – у їхніх планах створення систем на 200 кВт, і навіть на мегаватні потужності. Потужність – не єдиний важливий показник для подібних систем, іноді важливіше час безперебійної роботи. У цьому випадку він обмежується тиском у балонах. При переході на рідкий азот як джерело газу той же обсяг балона буде давати таку ж енергію, яку дає повітря, стиснене до 700 атмосфер (для такого тиску повітря потрібні інші балони). Перші експерименти підтвердили ефективність використання рідкого азоту.

У Франції створена автомотриса, в якій застосований гідрогазовий акумулятор масою 4 т, розрахований на тиск 600 Атм, з місткістю балонів 700 л. Дослідження показали, що на ділянці завдовжки 100 км при частих зупинках забезпечується економія пального до 15 % [22].

1.3.3. Електричні накопичувачі енергії

Однією з систем енергозбереження є спосіб, коли у гальмівному режимі кінетична енергія руху поїзду перетворюється не в теплову енергію в гальмах або в тепло на активних резисторах при електрогальмуванні, а накопичується у вигляді потенціальної енергії в електрохімічних або в конденсаторних акумуляторах.

Починаючи з 1910 році на залізницях Німеччини експлуатувалося більше 60, а в 1932 році – 180 акумуляторних вагонів. Питома енергоємність свинцевих тягових акумуляторів (АБ) за період з 1900 по 1952 роки підвищилася з 4,5 до 25 Вт·год/кг. Збільшилася їх експлуатаційна надійність і термін служби. До 1966 року парк акумуляторного рухомого складу Німеччини налічував 238 моторних і 224 причіпних вагонів, загальний пробіг яких в 1973 році досяг 22 млн секцій км/рік [34].

У перші роки Радянської влади Балтійський завод в Петрограді побудував шестивагонний акумуляторний поїзд [23], здійснюючий пробіг від Петрограду до Москви за 10–12 годин без заряду батарей.

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Розрахунки і експлуатаційні випробування на залізницях Європи показали, що експлуатація акумуляторного рухомого складу у ряді випадків може дати відчутний економічний ефект. Так, наприклад, реальний досвід експлуатації акумуляторної електромотриси в Шотландії довів, що її показники кращі за працюючі там же дизельні автомотриси [34]. У Англії розгорнулися широкі дослідження по створенню сірчано-натрієвих тягових акумуляторів, теоретична енергоємність яких складає 1000 Вт·год/кг. На практиці вона досягла рівня 200–300 Вт·год/кг.

У 1949 році в депо Москва-3 був створений перший в СРСР контактано-акумуляторний маневровий електровоз [23]. Починаючи з 1955 року велася розробка контактано-акумуляторного поїзда на базі моторвагонних секцій Сз, а також були намічені принципи їх експлуатації [24]. На цих поїздах були застосовані нікель-залізні тягові акумулятори.

В середині 60-х років були розроблені найбільш досконалі лужні акумулятори ТНЖТ-400 [24], якими обладнаний контактано-акумуляторний поїзд ЭР2А6 з тиристорно-імпульсним регулюванням і рекуперативним гальмуванням. В цей же час Дніпропетровським електровозобудівним заводом побудована партія маневрово-вивізних контактано-акумуляторних електровозів ВЛ26^М. Створений контактано-акумуляторний рухомий склад поступив в експлуатацію на Прибалтійську залізницю.

Питома витрата енергії контактано-акумуляторними поїздами, віднесена до повного пробігу на електрифікованих та неелектрифікованих ділянках, з урахуванням ККД батареї, майже не відрізнявся від витрати звичайних електропоїздів і складав близько 30 Вт·год/ткм брутто [24]. Дальність пробігу в автономному режимі живлення досягала 56 км.

Середня питома витрата енергії електровозами ВЛ26^М складала в середньому 9,8 Вт·год/ткм брутто [34]. При русі з поїздами масою 1200...1300 т ці електровози мали технічну швидкість 35...40 км/год на ділянках з рівнинним профілем. Час прямування в автономному режимі на маневрах складав 25...40 %

						0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			32

загального часу їх роботи.

Витрати при експлуатації контактної-акумуляторних поїзда виявилися нижчі, ніж у дизель-поїздів на 30...35 %, а контактної-акумуляторних електровозів – приблизно на 20 % нижче тяги тепловоза.

У 2003 році ВНКДТІ за замовленням Московської залізниці розробив і виготовив маневровий акумуляторний локомотив ЛАМ-01 [45]. Він створений на базі кузова та екіпажної частини локомотиву ЧМЭЗ, призначений для експлуатації в екологічно чистій зоні з можливістю заходу у виробничі приміщення. Технічні характеристики дозволяють локомотиву виконувати усі види маневрів з пасажирськими складами масою до 1000 т на станційних і депо-ських коліях, що мають ухил не більше 5 ‰. Завдяки екологічній чистоті локомотив може працювати в закритих приміщеннях ремонтно-екіпажувального депо та по встановленому циклу у вагономийному цеху.

Дуже незвичайний локомотив, названий Green Goat, згаданий вище, представлений компанією RailPower Technologies як маневровий з комбінованим тяговим приводом, проходив випробування в депо Розвилл (штат Каліфорнія) залізниці UP [26]. Тягові двигуни локомотива отримують живлення від батареї свинцево-кислотних акумуляторів спеціальної розробки, які періодично заряджалися від невеликого генератора потужністю 70 кВт.

У 2004-му році був створений перший у світі рейковий автобус з комбінованим дизель-акумуляторним приводом. В акумуляторній батареї накопичується енергія рекуперативного гальмування. В результаті випробувань були отримані позитивні результати [27].

На виставці Inno Trans 2004 був представлений накопичувач типу MITRAC. Bombardier Transportation запропонувала включати його в комплект устаткування тягового приводу для зменшення споживання електроенергії рухомим складом міського рейкового транспорту [28]. У цих накопичувачах акумулюється електроенергія, що виробляється тяговими двигунами при гальмуванні, і потім у разі потреби використовується для тяги. Завдяки цьому можна заощадити до 30 %

										Арк.
										33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					

енергії. У модулі накопичувача енергії MITRAC змонтовані декілька сотень спеціальних двошарових конденсаторів підвищеної місткості. На думку фахівців Bombardier таке чисто електричне технічне рішення має ряд переваг перед механічними (наприклад, із застосуванням маховиків), оскільки не має частин, що рухаються, і практично не вимагає обслуговування і відходу.

З вищенаведеного видно, що розвиток електричних систем накопичення стримувався відсутністю відповідних накопичувачів. Сьогодні, такі системи вже широко використовуються на транспортних засобах.

Перевага рекуперативних систем з накопичувачами електричної енергії полягає в тому, що вони ефективно працюють в широкому діапазоні напруг як джерела електричної енергії, так і її споживача, що дозволяє значно підвищити ефективність рекуперації за рахунок практично повного використання накопиченої енергії на розгінних та тягових режимах.

Впровадженню рекуперативних електричних систем на залізничному транспорті сприяє також поява надпотужних напівпровідникових елементів плавного регулювання електричного струму, що в порівнянні з тиристорами великої потужності діють більш надійно й мають більш високу граничну робочу частоту.

Ефективність використання рекуперативних систем зростає разом із підвищенням нерівномірності руху поїзда при частих гальмуваннях та розгінних режимах. З вищезазначеного можна зробити висновок, що на залізничному транспорті найбільший ефект від використання системи рекуперації електричної енергії може бути отриманий на маневрових тепловозах з електричною передачею, де спостерігається найбільша нерівномірність руху, що викликає значні зміни кінетичної енергії.

1.4 Аналіз конструкційних схем гібридних силових установок (ГСУ)

Центральним елементом ГСУ є комбінована мікропроцесорна система управління, що забезпечує роботу двигуна внутрішнього згорання на постійному

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

режимі з мінімальною питомою витратою пального при всіх швидкісних та навантажувальних режимах транспортного засобу шляхом регулювання роботи електроагрегатів і механічних вузлів силової установки.

Сучасні гібридні силові установки включають ДВЗ або двигун – генераторні агрегати та тягові накопичувачі енергії, які спільно з комбінованими електромеханічними трансмісіями будуються за принципом послідовної або паралельної архітектури, а також за схемою «спліт», що реалізує послідовно-паралельну систему. Аналіз сучасних гібридних транспортних засобів показує, що світовими фірмами розроблені дослідні зразки гібридних транспортних засобів усіх структурних схем [30].

У разі послідовної схеми двигун внутрішнього згорання віддає енергію тільки генератору, який або живить тільки тяговий електродвигун, або додатково заряджає накопичувач енергії. При нестачі енергії генератора для забезпечення необхідного режиму роботи транспортного засобу тяговий електродвигун отримує додаткову енергію від накопичувача енергії, при надлишку її – віддає надлишок в накопичувач. Також можливо обмежений час рухатися в режимі вимкненого двигуна внутрішнього згорання.

У разі паралельної схеми двигун внутрішнього згорання через відповідну механічну трансмісію віддає енергію ведучих коліс транспортного засобу і через спеціальну систему відбору потужності може при надлишку енергії через генератор живити накопичувач енергії, а при дефіциті енергії через цю ж систему отримувати додаткову енергію від накопичувача через елементи електротрансмісії.

1.4.1. Послідовна схема гібридної силової установки

В цьому випадку двигун внутрішнього згорання працює тільки на генератор, при цьому вибирається режим мінімального споживання пального. Енергія, що виробляється генератором, подається або на тяговий електродвигун, або в накопичувач енергії і на тяговий електродвигун, або тільки в накопичувач

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

енергії. Тяговий електродвигун забезпечує весь необхідний силовий та швидкісний діапазони роботи транспортного засобу та при гальмуванні працює в режимі генератора, забезпечуючи рекуперацію енергії гальмування. Принципова схема послідовної ГСУ представлена на рис. 1.6.

Рис. 1.6. Принципова схема послідовної ГСУ:

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння; Г – генератор; П – перетворювач;
Н – накопичувач; ТЕД – тяговий електродвигун; Т – трансмісія

Перевагами послідовної схеми є можливість роботи первинного двигуна (ДВЗ) на постійному режимі з мінімальною витратою пального, простота керування силовою установкою та відсутність спеціальних вузлів трансмісії, широкі компоновальні можливості, що дозволяють легко скомпонувати силову установку в обмеженому просторі транспортного засобу.

Недоліками послідовної схеми є занадто малий ККД системи перетворення енергії від ДВС до рушійних коліс з-за дворазового перетворення одного виду енергії в інший: механічної в електричну і потім електричної в механічну і обов'язкова наявність двох електромашин великої потужності.

1.4.2 Паралельна схема гібридної силової установки

В цьому випадку ДВЗ і тяговий електродвигун, що живиться від акумуляторної батареї (АКБ) через трансмісію пов'язані з рушійними колесами (рис. 1.7).

Перевагою паралельної схеми є більш високий ККД передачі енергії від первинного двигуна до рушійних коліс у порівнянні з послідовною схемою та можливість застосування однієї електромашини замість двох.

Недоліком є обов'язкове ускладнення трансмісії для забезпечення відбору (підводу) потужності електричної машини, відхід первинного двигуна від режиму

мінімальної витрати пального при застосуванні ступінчастої механічної трансмісії при регулюванні швидкості руху транспортної машини та певне ускладнення системи керування силовою установкою.

Рис. 1.7. Принципова схема паралельної ГСУ (варіант 1):

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння; МГ – мотор-генератор;
Н – накопичувач; Т – трансмісія

Можливий варіант паралельної схеми, коли оборотна електромашина встановлюється в приводі іншої колісної пари, ніж рушійна колісна пара (рис. 1.8). Перевагою такого варіанту слід вважати певне спрощення трансмісії первинного двигуна, недоліком – використання колісного рушія в якості елемента системи перетворення енергії.

Рис. 1.8. Принципова схема паралельної ГСУ (варіант 2):

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння; МГ – мотор-генератор;
Н – накопичувач; Т – трансмісія

1.4.3. Гібридна силова установка системи "спліт"

Гібридна силова установка системи "спліт" є симбіозом паралельної та послідовної схеми (рис. 1.9). Тут первинний двигун, генератор і вихідний вал передачі, який пов'язаний з валами приводу рушійних коліс і на який передає енергію тяговий електродвигун, пов'язані через планетарну передачу, при цьому первинний двигун працює на постійному режимі з мінімальною витратою пального, а регулювання швидкості вихідного вала передачі здійснюється зміною частоти обертання вала тягового електродвигуна за рахунок відповідного

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

управління, при цьому необхідно синхронно управляти потужністю на валу генератора для забезпечення постійного режиму роботи ДВЗ з мінімальною витратою пального та мінімальною токсичністю. До переваг системи "спліт" слід віднести досить високий ККД при передачі енергії від первинного двигуна до рушійних коліс та можливість роботи первинного двигуна на постійному режимі при мінімальній витраті пального, до недоліків – ускладнення механічної частини трансмісії (установка додаткової планетарної передачі) та ускладнення системи управління.

Рис. 1.9. Принципова схема ГСУ системи «спліт»:

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння; МГ – мотор-генератор;

Г – генератор; Н – накопичувач; Т – трансмісія

Аналізуючи вище наведене, необхідне відмітити, що для паралельної та «спліт» схем характерна велика кількість елементів механічного обладнання. У зв'язку з цим капітальний ремонт таких систем досить трудомісткий, а щоденні та щомісячні огляди припускають контроль за великою кількістю параметрів. У той же час послідовна схема вимагає наявності перетворювача енергії, що знижує її загальну ефективність у порівнянні з паралельною. Оскільки існує можливість використання в якості первинного джерела енергії при зрушенні з місця «суперконденсаторів» та паливних елементів замість дизеля, для подальшого дослідження обираємо послідовну гібридну схему.

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛОКОМОТИВА

Сучасні концепції з проектування та виготовлення нового рухомого складу полягають в тому, що створення маневрового локомотива необхідно виконувати на основі визначення його характеристик з урахуванням умов експлуатації, світового технічного рівня, системи обслуговування та ремонту на протязі всього життєвого циклу, модульного принципу їх побудови та особливостей промисловості та специфіки залізниць України.

У відповідності з [50] ескізний проект локомотива розкриває принципові конструктивні рішення, які дають загальне уявлення про будову та принцип роботи локомотива, а також містить дані, що визначають його призначення, основні параметри та габаритні розміри (будівельні креслення).

При розробці ескізного проекту необхідно:

- виконати конструктивну проробку кількох варіантів локомотива в обсязі, достатньому для аналізу та зіставлення;
- виготовити та випробувати фізичні моделі та макети;
- оцінити локомотив за відповідними показниками стандартизації та уніфікації, ергономіки та технічної естетики, охорони праці, виробничої санітарії та патентної чистоти;
- проробити основні питання технології та оцінити технологічність конструкції локомотива;
- скласти технічні вимоги на комплектувальні вироби та матеріали, що розробляються та виготовляються іншими підприємствами.

Ескізний проект включає креслення загального виду локомотива та пояснювальну записку, яка виконується згідно з вимогами чинного стандарту. Після узгодження та затвердження встановленим чином ескізний проект служить основою для розробки технічного проекту та іншої робочої конструкторської документації.

									Арк.
									39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.196375.000.04MP.ПЗ

2.1 Визначення необхідної потужності локомотива, дизеля та енергоємності накопичувача енергії

Згідно методиці, наведеної у [50], найбільша дотична потужність маневрового тепловоза, яка реалізується при розгоні поїзда масою m_B до розрахункової швидкості V_p , визначається з рівняння:

$$N_{кр} = \frac{m_B}{3600} (\omega_0 + j_{ср} + i_0) V_{ср}, \quad (2.1)$$

де ω_0 – питомий основний опір руху, Н/т; $\omega_0=30$ Н/т;

$j_{ср}$ – середнє прискорювальне зусилля, Н/т; приймається в межах 50–80 Н/т;

i_0 – питомий опір руху від підйому, Н/м; приймається величина до 20 Н/м;

$V_{ср}$ – середня швидкість при розгоні, км/год; приймається в межах 7–8,5 км/год.

Відповідно до значень доцільних мас поїздів і розрахунковим швидкостям руху [50], отримана за формулою (3.1) величина дотичної потужності маневрового тепловоза знаходиться у діапазоні: для пасажирських поїздів 124...1326 кВт, для вантажних – 778...1535 кВт.

Відповідно до фактично виконуваної роботою основними видами маневрової роботи є:

- розформування з одночасним формуванням з гірки (витяжки) составів поїздів та передач;
- закінчення формування составів поїздів і передач з боку гірки і витяжних колій;
- обслуговування місцевих пунктів, розташованих на станції і поза станцією (під'їзні колії), в тому числі і на проміжних станціях;
- причеплення, відчеплення та перестановка окремих вагонів, груп або составів поїздів в одному парку колії на колію або з парку в парк;
- подача (прибирання) вагонів до пунктів ремонту, усунення комерційних

									Арк.
									40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ				

несправностей і т.п.

Найбільш постійним з розглянутих вище видів маневрової роботи на прикордонних станціях є операції з обслуговування в парках складів пасажирських поїздів.

Відповідно до технологічного процесу з складами пасажирських поїздів і з пасажирськими вагонами на станціях виконуються наступні маневрові операції:

- формування составів пасажирських поїздів;
- подача составів на колії відправлення поїздів і прибирання їх з цих колій;
- причеплення до поїздів і відчеплення від поїздів груп і окремих вагонів;
- переформування составів пасажирських поїздів;
- подача на колії ремонту несправних вагонів поїзда після виконання

відповідних операцій та інш.

Результати хронометражних спостережень за роботою тепловоза протягом робочої зміни (12 годин) при виконанні маневрових операцій по переміщенню окремих вагонів, груп і цілих составів пасажирських поїздів з ранжованого парку на перонні колії свідчать, що маневровий тепловоз серії ЧМЭЗ знаходиться в русі за зміну (720 хв) тільки 251 хв, або 34,9% робочого часу. Решту часу зміни локомотив знаходиться або в робочому стані (364 хв або 50,6%), або з вимкненим двигуном (105 хв або 14,5%). Необхідно також відзначити, що в маневровому пересуванні переставляється в основному від 1 до 10 вагонів і тільки в окремих випадках в маневровий склад при обслуговуванні пасажирських поїздів включається більше 10 вагонів [30]. Попередній аналіз показує, що в зазначеному вище вигляді маневрової роботи можна використовувати дизель меншої потужності.

Таким чином, коректна постановка задачі вибору основних параметрів тепловоза з гібридною силовою установкою потребує застосування статистичного аналізу даних щодо розподілу часу роботи та реалізованої потужності тепловозів. Експлуатаційні цикли конкретних тепловозів, що працюють в різних умовах, відрізняються, тому при аналізі умов роботи тепловозів одного типу та

					<i>0032.196375.000.04MP.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		41

призначення необхідно користуватись узагальненими циклами, отриманими шляхом осереднення даних, отриманих у ході дослідження кількох маневрових тепловозів.

Статистичні дані фіксувалися за допомогою системи контролю витрат палива «БІС-Р» (ПП «РЕЗЕРВ», Україна), яка являє собою розподілену мікропроцесорну систему для контролю витрат пального маневровими тепловозами. Вона фіксує витрати пального, потужність, час роботи на кожній позиції контролера машиніста протягом 10 діб з дискретністю 2 хв.

Зафіксована системою контролю «БІС-Р» величина реалізованої експлуатаційної потужності за зміну (12 год) подані у вигляді тимчасового ряду на рис. 2.1.

Рис. 2.1. Залежність реалізованої експлуатаційної потужності маневрового тепловоза від часу його роботи за зміну

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Процедура визначення основних характеристик розподілу реалізованої тепловозом експлуатаційної потужності проводилася у наступній послідовності.

Знаходяться найменше y_{\min} та найбільше y_{\max} значення потужності, що реалізується тепловозом, розраховуються оптимальна величина інтервалу h та кількість інтервалів k за формулами:

$$h = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{1 + 3,322 \cdot \lg N}; \quad (2.2)$$

$$k = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{h}, \quad (2.3)$$

де N – об'єм статистичних даних.

Величина інтервалу округляється в більшу сторону до цілого значення. Для запобігання співпадання інтервалів потрібно відступити на половину інтервалу від найменшого та найбільшого значення:

$$\begin{aligned} y'_{\min} &= y_{\min} - 0,5h, \\ y'_{\max} &= y_{\max} + 0,5h. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Після цього проводиться об'єднання по інтервалах та визначаються:

- межі i -го інтервалу – $y_{\text{поч.}i}$ та $y_{\text{кін.}i}$;
- середнє значення параметру в i -му інтервалі за формулою:

$$y_i = \frac{y_{\text{поч.}i} + y_{\text{кін.}i}}{2}, \quad (2.5)$$

де $y_{\text{поч.}i}$, $y_{\text{кін.}i}$ – початкова та кінцева величини в i -му інтервалі;

- абсолютна частота (кількість потраплянь в інтервал) – m_i ;
- відносна частота за формулою:

$$n_i = \frac{m_i}{N}. \quad (2.6)$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Середнє значення цілого ряду параметра, який визначається, розраховується за формулою:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k (\bar{y}_i \cdot n_i)}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (2.7)$$

а середньоквадратичне відхилення –

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}}. \quad (2.8)$$

В результаті обробки статистичних даних отримана гістограма розподілу реалізованої експлуатаційної потужності, що наведена на рис. 2.2.

Рис. 2.2. Гістограма розподілу реалізованої експлуатаційної потужності маневрового тепловоза за зміну

З рис. 2.2 видно, що основне значення реалізованої експлуатаційної потужності потрапляє в інтервал до 650 кВт, а на більший діапазон – доводиться лише близько 1 %. В результаті аналізу також отримані: середня величина реалізованої експлуатаційної потужності – 406 кВт, середньоквадратичне відхилення 87 та стандартна похибка відхилення 24.

Таким чином, враховуючі втрати потужності на привод допоміжних агрегатів, а також вплив ККД силових кіл тепловоза на потужність, що реалізується, пропонується обрати дизель з ефективною потужністю в діапазоні 450...650 кВт.

									Арк.
									44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ				

Після аналізу існуючих пропозицій на ринку двигунів внутрішнього згоряння, пропонується обрати для проектуемого тепловоза дизель-генератор (ДГУ), технічні характеристики якого наведено в табл. 2.1, а загальний вигляд – на рис. 2.3 [30].

Таблиця 2.1

Основні характеристики дизель-генераторної установки (ДГУ) проектуемого маневрового тепловоза

Марка ДГУ	Вага ДГУ, кг	Номінальна ефективна потужність, кВт	Частота обертання, хв ⁻¹	Годинна витрата палива на холостому ході, кг/год	Питома ефективна витрата пального у залежності від завантаження дизеля, кг/кВт·год				
					10%	25%	50%	75%	100%
Caterpillar 3412C	10908	655	1500	9,3	0,378	0,275	0,254	0,240	0,243

При визначенні енергоємності накопичувача енергії виходимо з тих міркувань, що його потужність повинна компенсувати певні «піки» експлуатаційної потужності тепловоза, що спостерігалися при дослідженнях та склали до $N_{\Pi} = 725$ кВт. Таким чином необхідна потужність накопичувача енергії

$$N_{\text{не}} = \frac{N_{\Pi}}{\eta_{\text{тед}} \eta_{\text{зп}} \eta_{\text{пе}}} - \beta_{\text{доп}} N_{\text{дном}}, \quad (2.9)$$

Рис. 2.3. Загальний вигляд дизель-генератора Caterpillar 3412C

де $\eta_{\text{тед}}$ – значення ККД тягового електродвигуна у тривалому режимі,

$$\eta_{\text{тед}} = 0,915 \text{ [32];}$$

$\eta_{\text{зп}}$ – значення ККД зубчастої передачі тягового осьового редуктора,

$$\eta_{\text{зп}} = 0,975 \text{ [32];}$$

$\eta_{\text{пе}}$ – значення ККД перетворювача енергії $\eta_{\text{пе}} = 0,92$;

$\beta_{\text{доп}}$ – коефіцієнт, що враховує витрати потужності на допоміжні потреби;

$N_{\text{дном}}$ – номінальна ефективна потужність ДГУ, $N_{\text{дном}} = 655$ кВт.

Коефіцієнт $\beta_{\text{доп}}$ визначається з виразу:

$$\beta_{\text{доп}} = \frac{N_{\text{дном}} - \sum N_{\text{доп}}}{N_{\text{дном}}}, \quad (2.10)$$

де $\sum N_{\text{доп}}$ – потужність, що витрачається на привід допоміжних агрегатів, кВт.

Приблизно витрати потужності на привід допоміжних агрегатів складають 8...10 % від ефективної потужності. Приймаємо 10 %.

$$N_{\text{не}} = \frac{725}{0,915 \cdot 0,975 \cdot 0,92} - \frac{655 - 0,1 \cdot 655}{655} \cdot 655 = 230 \text{ кВт.}$$

Таким чином, сумарна потужність дизель-генератора та накопичувача енергії складе $\sum N = 655 + 230 = 885$ кВт.

Енергоємність накопичувача енергії знаходимо за умови, що при хронометражі роботи тепловоза було виявлено, що максимальний час роботи тепловоза на «піку» навантаження ($N_{\text{п}} = 725$ кВт) склав близько $t = 3,5$ хв або 210 с. Тоді енергоємність накопичувача енергії $E_{\text{не}}$

$$E_{\text{не}} = 10^3 \cdot N_{\text{не}} \cdot t = 10^3 \cdot 230 \cdot 210 = 48,3 \cdot 10^6 \text{ Дж.} \quad (2.11)$$

Приймаємо $E_{\text{не}} = 50$ МДж.

Пріоритет у виборі того чи іншого типу накопичувача енергії ґрунтується на порівняльному аналізі наступних основних характеристик:

- енергоємність на одиницю маси і об'єму;
- потужність циклу на одиницю маси і об'єму;
- ефективність зарядно-розрядного циклу;
- віддача акумулятора – співвідношення між значенням повної

										Арк.
										46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					

енергоємності і тією її частиною, яка може бути корисно використана в режимі розряду;

- питома вартість;
- надійність і безпеку в експлуатації.

Виходячи з вищенаведених умов на основі аналізу існуючих на ринку накопичувачів енергії, обираємо літій-іонні акумулятори виробництва ТОВ "Ліотех", сформовані у загальний модуль накопичувачів енергії (МНЕ). Складається з 300-ста елементів напругою 3,2 В і ємністю 300 А·год кожен, які об'єднані в акумуляторні комірки, рис. 2.4. Енергоємність МНЕ складає 300 А·год з робочою напругою на затискачах тягового накопичувача енергії 870...1152 В у залежності від ступеню розрядження.

Рис. 2.4. Акумуляторна комірка модуля накопичувача енергії

Технічні характеристики акумуляторних елементів типу LFP270, що складають комірки наведено в табл. 2.2, а загальний вигляд на рис. 2.5.

Рис. 2.5. Загальний вигляд акумуляторного елемента типу LFP270

Таблиця 2.2

Технічні характеристики акумуляторного елемента типу LFP270

Параметр	Значення
Номінальна ємність	270 А·год
Номінальна напруга	3,2 В
Маса	≤9,8
Внутрішній опір на частоті 1 кГц, мОм	≤ 0,50
Кількість циклів (при глибині розряду 70%)	3000 циклів

Струм саморозряду		$\leq 3\%$ в місяць
Габарити	довжина	160
	ширина	106
	висота	337
Заряд CC&CV	стандартний струм	0,2
	максимальний безперервний струм	2
	гранична напруга	3,7
	кінцевий струм	0,05
Розряд	стандартний струм	0,2
	максимальний безперервний струм	3
	кінцева напруга	2,7
	максимальний струм імпульсного розряду, А (розряд 1 с, пауза 45 с)	2160
Робоча температура	заряд	0 °C~50 °C
	розряд	-40 °C~50 °C
Температура зберігання		0~30 °C
Вологість при зберіганні		$\leq 80\%$

					<i>0032.196375.000.04MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

2.2 Визначення техніко-економічних характеристик тепловоза

2.2.1 Розрахунок параметрів тягового редуктора

Обертальний момент з вала тягового електродвигуна на колісну пару передається через зубчастий одноступінчастий циліндричний редуктор.

Основним параметром, що впливає на тягові властивості колісно-моторного блока в цілому, є передаточне число зубчастої передачі цього редуктора.

Передаточне число i є відношенням обертального моменту на ободі колеса до моменту на валу тягового електродвигуна (ТЕД), що визначене для тривалого режиму роботи колісно-моторного блока (КМБ):

$$i = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{д}\infty}} = \frac{F_{\text{д}\infty} \cdot D_{\text{к}}}{2 \cdot M_{\text{д}\infty}}, \quad (2.12)$$

де $M_{\text{д}\infty}$ – момент обертання на валу якоря ТЕД у тривалому режимі, кН·м;

$F_{\text{д}\infty}$ – сила тяги тривалого режиму одного колісно-моторного блока, кН;

$D_{\text{к}}$ – діаметр колеса, $D_{\text{к}}=1,05$ м.

Величини $F_{\text{д}\infty}$ і $M_{\text{д}\infty}$ можуть бути визначені з виразів

$$F_{\text{д}\infty} = \frac{3,6 \cdot P_{\text{д}\infty}}{V_{\text{р}}}, \quad M_{\text{д}\infty} = 9,5 \cdot \frac{P_{\text{д}\infty}}{n_{\text{д}\infty}}, \quad (2.13)$$

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

$n_{\text{д}\infty}$ – частота обертання якоря ТЕД у тривалому режимі, хв⁻¹;

$V_{\text{р}}$ – розрахункова швидкість, км/год. Згідно вихідних даних $V_{\text{р}}=10$ км/год.

$$n_{\text{д}\infty} = n_{\text{д max}} \cdot \frac{V_{\text{р}}}{V_{\text{к}}}, \quad (2.14)$$

де $n_{\text{д max}}$ – максимальна частота обертання якоря ТЕД (у розрахунках приймається

									Арк.
									49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04МР.ПЗ				

в межах 2200...2300 хв⁻¹ [33]). Приймаємо $n_{дmax} = 2200 \text{ хв}^{-1}$;

V_k – конструкційна швидкість, км/год. Згідно вихідних даних

$$V_k = 100 \text{ км/год.}$$

Підставляючи вирази (2.13), (2.14) у формулу (2.12), отримаємо

$$i_1 = 0,19 \cdot \frac{n_{дmax} \cdot D_k}{V_k}; \quad (2.15)$$

$$i_1 = 0,19 \cdot \frac{2200 \cdot 1,05}{100} = 4,39.$$

Передаточне число i_1 , визначене за формулою (2.15), забезпечить не тільки параметри $F_{д\infty}$, $M_{д\infty}$ тривалого режиму, відповідно швидкості тривалого режиму руху тепловоза, але й умову міцності зубчастого зачеплення та обмоток ТЕД, частота обертання якоря якого при конструкційній швидкості не перевищить максимально допустимого значення $n_{дmax}$.

Остаточне значення передаточного числа встановлюється з урахуванням прийнятої довжини централі A , що є відстанню між осями якоря ТЕД і колісної пари

$$A = \frac{(z_1 + z_2) \cdot m}{2}, \quad (2.16)$$

де z_1 – кількість зубів ведучої шестерні;

z_2 – кількість зубів веденої шестерні (зубчастого колеса);

m – модуль зубчастого зачеплення.

Для проектного тепловоза приймаємо довжину централі $A = 468,8 \text{ мм}$ [31].

Для тягових передач тепловозів модуль зубчастого зачеплення, що є відношенням діаметра ділильної окружності до зубів шестерні, приймається $m = 10$ [31].

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кількість зубів ведучої шестерні z_1 і веденого зубчастого колеса z_2 визначаються із сумісного рішення двох рівнянь:

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = \frac{2 \cdot A}{m}, \\ \frac{z_2}{z_1} = i_1. \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = \frac{2 \cdot 468,8}{10}, \\ \frac{z_2}{z_1} = 4,39. \end{cases}$$

Після розв'язання системи рівнянь отримаємо $z_1 = 18$ та $z_2 = 76$.

Після уточнення кількості зубів z_1 і z_2 , остаточно встановлюється передаточне число, яке в подальших розрахунках позначається як $i_2 = 76 / 18 = 4,22$.

Враховуючи, що КМБ має габаритні обмеження, слід перевірити можливість розміщення в нижній частині габариту рухомого складу веденого зубчастого колеса з кожухом за формулою:

$$\Delta = \frac{D_k - (d_2 + 2 \cdot C)}{2} \geq 120 - 130 \text{ мм}, \quad (2.18)$$

де C – відстань від торця зубів веденого колеса до нижньої поверхні кожуха ($C = 18 - 25$ мм) [31]. Приймаємо $C = 20$ мм;

d_2 – діаметр ділильної окружності веденого колеса, $d_2 = 10$ мм [31];

$$d_2 = m \cdot z_2 = 10 \cdot 76 = 760 \text{ мм}; \quad (2.19)$$

$$\Delta = \frac{1050 - (760 + 2 \cdot 20)}{2} = 125 \text{ мм} \geq 120 - 130 \text{ мм}.$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

2.2.2 Розрахунок зовнішньої характеристики синхронного тягового генератора та розрахунок електромеханічних характеристик ТЕД

При електричній передачі з синхронним тяговим генератором змінного струму та асинхронним тяговим електродвигуном змінного струму з короткозамкненим ротором у системі регулювання режиму роботи тягових електродвигунів замість ослаблення магнітного поля, як при електричній передачі постійного та змінно-постійного струму, з'являється інший регулювальний фактор – частотний. Ця обставина вносить певні особливості в методику узгодження характеристик тягових електродвигунів з характеристикою тягового генератора та певним чином відображується на тяговій характеристиці тепловоза з електричною передачею змінного струму. Залежність $F_d = f(V)$ у цьому випадку буде позбавлена характерних для електричної передачі постійного струму рис, пов'язаних з ослабленням магнітного поля тягових електродвигунів.

Повна потужність асинхронного тягового електродвигуна у тривалому режимі роботи

$$P_{1\infty} = \frac{\sum N}{k} \cdot \eta_{пе}, \quad (2.20)$$

де k – кількість тягових електродвигунів, $k=6$.

$$P_{1\infty} = \frac{885}{6} \cdot 0,92 = 136 \text{ кВт.}$$

Активна потужність асинхронного тягового електродвигуна у тривалому режимі

$$P_{1H\infty} = P_{1\infty} \cdot \cos \varphi_{\infty}, \quad (2.21)$$

де $\cos \varphi_{\infty} = 0,79$ – коефіцієнт потужності асинхронного двигуна.

									Арк.
									52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04МР.ПЗ				

$$P_{\text{H}\infty} = 136 \cdot 0,9 = 122 \text{ кВт.}$$

На підставі величини потужності ТЕД, що розрахована, обираємо асинхронний електродвигун серії ДТА-6У1, параметри якого приведено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Параметри тягового електродвигуна

Параметр	Значення
Номінальна потужність $P_{\text{д}}$, кВт	140
Частота обертання вала, хв^{-1} :	
– тривалого режиму	1000
– максимальна	2200
Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна	0,9
Коефіцієнт корисної дії	0,93
Напруга, В	407
Струм, А	237
Частота живлення, Гц	50
Клас ізоляції	Н
Маса, кг	800

Кутова швидкість ротора асинхронного тягового електродвигуна у тривалому режимі

$$\omega_{2\infty} = \omega_{2\text{max}} \frac{V_{\text{р}}}{V_{\text{max}}}, \quad (2.22)$$

де $\omega_{2\text{max}}$ – максимальна кутова швидкість вала електродвигуна. Приймаємо

$$\omega_{2\text{max}} = 230 \text{ рад/с [31];}$$

V_{max} – найбільша швидкість руху тепловоза. Згідно рекомендацій [32] для маневрових тепловозів приймається в межах $(0,6 \dots 0,8) \cdot V_{\text{к}}$.

Приймаємо значення $V_{\text{max}} = 0,6V_{\text{к}} = 0,6 \cdot 100 = 60 \text{ км/год.}$

$$\omega_{2\infty} = 230 \cdot \frac{10}{60} = 38,3 \text{ рад/с.}$$

Момент на валу ротора асинхронного тягового електродвигуна у тривалому режимі

$$M_{д\infty} = 10^3 \frac{P_{1\infty} \eta_{тед}}{\omega_{2\infty}} = 10^3 \cdot \frac{136 \cdot 0,915}{38,3} = 3249 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.23)$$

Частота струму асинхронного двигуна у тривалому режимі

$$f_{1\infty} = \frac{\omega_{2\infty} \cdot p}{2\pi(1-s)}, \quad (2.24)$$

де $p = 3$ – кількість пар полюсів в обмотці статора;

$s = 0,03$ – ковзання асинхронного двигуна [32].

$$f_{1\infty} = \frac{38,3 \cdot 3}{2 \cdot 3,14 \cdot (1 - 0,03)} = 19 \text{ Гц.}$$

Максимальна частота струму

$$f_{1\max} = f_{1\infty} \frac{V_{\max}}{V_p} = 19 \cdot \frac{60}{10} = 114 \text{ Гц.} \quad (2.25)$$

Максимальне значення коефіцієнта регулювання частоти

$$\bar{f}_{\max} = \frac{f_{1\max}}{f_{1\infty}} = \frac{114}{19} = 6. \quad (2.26)$$

Для знайденої величини \bar{f}_{\max} та величини коефіцієнта перевантаження при конструкційній (максимальній) швидкості k_{Π} (приймаємо $k_{\Pi} = 1,2$) по графіках (рис. 2.6) визначаємо величину коефіцієнта регулювання асинхронного тягового електродвигуна по напрузі k_T . Величина цього коефіцієнта дорівнює відносному

									Арк.
									54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ				

значенню максимальної напруги електродвигуна $\bar{U}_{1\max}$, а при паралельному з'єднанні тягових електродвигунів – відносному значенню максимальної напруги тягового генератора $\bar{U}_{\Gamma\max}$, тобто $k_{\Gamma} = \bar{U}_{\Gamma\max}$.

Рис. 2.6. Графіки залежності $k_{\Gamma} = f(\bar{f}_{\max})$

Для $\bar{f}_{\max} = 6$ та $k_{\Pi} = 1,2$ значення $\bar{U}_{\Gamma\max} = 1,85$.

Діюча фазна напруга обмотки статора асинхронного двигуна в тривалому режимі

$$U_{1\infty} = U_{01} \cdot f_{1\infty}, \quad (2.27)$$

де U_{01} – фазна напруга обмотки статора, віднесена до одиниці частоти. Для тепловозних асинхронних двигунів знаходиться в межах 14...16 В [32].
Приймаємо $U_{01} = 16$ В.

$$U_{1\infty} = 16 \cdot 19 = 304 \text{ В.}$$

Напруга генератора на виході ланки постійного струму в тривалому режимі

$$U_{\Gamma\infty} = \frac{3}{\sqrt{2}} U_{1\infty} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot 304 = 645 \text{ В.} \quad (2.28)$$

Струм генератора на виході ланки постійного струму в тривалому режимі

$$I_{\Gamma\infty} = \frac{\sum N \cdot 10^3}{U_{\Gamma\infty}} = \frac{885 \cdot 10^3}{645} = 1372 \text{ А.} \quad (2.29)$$

Сила струму фази асинхронного двигуна в тривалому режимі

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

$$I_{1\infty} = \frac{10^3 \cdot P_{1\infty}}{U_{1\infty} \cdot p} = \frac{10^3 \cdot 136}{304 \cdot 3} = 149 \text{ А.} \quad (2.30)$$

Величину $I_{\Gamma \max}$ (зона обмеження по струму генератора) обираємо на основі результатів розрахунку пускового режиму асинхронного електродвигуна. Розрахунок режиму пуску полягає у визначенні пускових значень моменту M_{Π} , кН·м, частоти $f_{1\Pi}$, Гц, магнітного потоку Φ_{Π} , Вб, і струму $I_{1\Pi}$, А, статора асинхронного електродвигуна. Граничне значення пускового моменту асинхронного електродвигуна обмежене граничним значенням дотичної сили тяги по зчепленню коліс тепловоза з рейками, допустимим прискоренням у момент пуску та при розгоні поїзда, а також допустимим значенням струму навантаження елементів електричної передачі. Величина M_{Π} визначається за умови обмеження по зчепленню коліс тепловоза з рейками. Залежно від роду служби тепловоза приймається відповідне відношення

$$\frac{M_{\Pi}}{M_{\infty}} = \frac{F_{зч}}{F_{д\infty}}. \quad (3.31)$$

Величину цього відношення для проектного тепловоза приймаємо рівним $M_{\Pi}/M_{\infty} = 1,6$ [31].

Величини $f_{1\Pi}$ і Φ_{Π} обираємо за умови оптимального режиму пуску, який характеризується тим, що при заданому значенні M_{Π}/M_{∞} частота $f_{1\Pi}$ повинна бути обрана такою, при якій струм при пуску буде як можливо мінімальним. Це, як відомо, дозволить поліпшити умови роботи тягового електрообладнання.

Величина моменту M_{Π} залежить від величини струму $f_{1\Pi}$ і магнітного потоку Φ_{Π} . Зменшення величини $I_{1\Pi}$ при тому ж значенні M_{Π} може бути досягнуте в результаті збільшення величини Φ_{Π} . Збільшення величини Φ_{Π} вище номінальної досягається відповідним збільшенням напруги. Кожному значенню пускового моменту відповідає певне значення магнітного потоку та пускової частоти, при якій величина струму статора є мінімальною. На рис. 2.7 зображені залежності

										Арк.
										56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					

оптимальних значень магнітного потоку, частоти та струму статора від обертаючого моменту в режимі пуску для тепловозних асинхронних тягових електродвигунів. По цих залежностях для прийнятого відношення $M_{\Pi}/M_{\infty} = \bar{M}_{\Pi}$ визначаються оптимальні значення $f_{1\Pi}$, $\bar{I}_{1\Pi} = I_{1\Pi}/I_{1\infty}$ та $\bar{\Phi}_{\Pi} = \Phi/\Phi_{\infty} = \bar{\Phi}_{\max}$. При цьому береться до уваги, що якщо $\bar{I}_{\Gamma} = \bar{\Phi}$, то й $\bar{I}_{\Gamma\max} = \bar{\Phi}_{\max}$. Таким чином, при $M_{\Pi}/M_{\infty} = 1,6$ – $f_{1\Pi} = 1,0$ Гц; $\bar{I}_{1\Pi} = 1,32$; $\bar{\Phi}_{\Pi} = \bar{\Phi}_{\max} = \bar{I}_{\Gamma\max} = 1,245$.

Рис. 2.7. Пускові характеристики асинхронного електродвигуна:
 1 – залежність $\bar{\Phi}_{\Pi} = f(\bar{M}_{\Pi})$; 2 – залежність $\bar{I}_{1\Pi} = f(\bar{M}_{\Pi})$; 3 – залежність $f_{1\Pi} = f(\bar{M}_{\Pi})$

Сила струму фази асинхронного двигуна в пусковому режимі

$$I_{1\Pi} = \bar{I}_{1\Pi} \cdot I_{1\infty} = 1,32 \cdot 149 = 197 \text{ А.} \quad (2.32)$$

Уточнюємо передаточне число зубчатої передачі

$$\mu_{\text{po}} = 1,8 \cdot \frac{D_{\text{к}} \cdot \omega_{2\max}}{V_{\text{к}}} = 1,8 \cdot \frac{1,05 \cdot 230}{100} = 4,35. \quad (2.33)$$

Дійсна зовнішня характеристика тягового генератора по ланці постійного струму може бути отримана при перерахунку універсальної характеристики (рис. 2.8) по відомих значеннях $I_{\Gamma\infty}$ і $U_{\Gamma\infty}$ з використанням формул:

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma\infty} \cdot \bar{I}_{\Gamma}; \quad (2.34)$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

$$U_{\Gamma} = U_{\Gamma\infty} \cdot \bar{U}_{\Gamma}. \quad (2.35)$$

Рис. 2.8. Універсальні характеристики тягового генератора тепловоза:
1, 2 – ККД генератора постійного струму та синхронного генератора; 3 – напруга генератора $\bar{U}_{\Gamma} = f(\bar{I}_{\Gamma})$; 4 – обмеження зовнішньої характеристики по напрузі

Для зручності розрахунки виконаємо у табличній формі (табл. 2.4).

За результатами розрахунку будемо дійсну характеристику тягового генератора (рис. 2.9).

Таблиця 2.4

Результати розрахунку зовнішньої характеристики синхронного тягового генератора

Параметр	Значення								
$\bar{I}_{\Gamma} = I_{\Gamma}/I_{\Gamma\infty}$	0,5	0,6	0,61	0,8	1,0	1,2	1,245	1,4	1,5
$\bar{U}_{\Gamma} = U_{\Gamma}/U_{\Gamma\infty}$	1,70	1,70	1,70	1,25	1,0	0,825	0,79	0,68	0,64
I_{Γ}, A	686	823	837	1098	1372	1646	1708	1921	2058
U_{Γ}, B	1097	1097	1097	806	645	532	510	439	413

Рис. 2.9. Дійсна характеристика тягового генератора

Дійсну механічну характеристику асинхронного двигуна отримуємо

					<i>0032.196375.000.04MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

шляхом перерахунку його універсальної характеристики (рис. 2.10) за формулами:

$$\omega_2 = \bar{\omega}_2 \cdot \omega_{2\infty}; \quad (2.36)$$

$$M_{\text{д}} = \bar{M} \cdot M_{\text{д}\infty}. \quad (2.37)$$

Для зручності розрахунки виконаємо у табличній формі (табл. 2.5).

Рис. 2.10. Універсальна електромеханічна характеристика асинхронного тягового електродвигуна

Таблиця 2.5

Розрахунок дійсних (реальних) електромеханічних характеристик асинхронного тягового електродвигуна

Параметр	Значення						
$\bar{\omega}_2 = \omega_2 / \omega_{2\infty}$	0,55	0,75	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
$\bar{M} = M_{\text{д}} / M_{\text{д}\infty}$	1,60	1,34	1,00	0,56	0,36	0,26	0,20
ω_2 , рад/с	21,1	28,7	38,3	76,6	115	153	192
$M_{\text{д}}$, кН·м	5,2	4,35	3,25	1,82	1,17	0,845	0,65

По отриманим значенням будемо дійсну (реальну) електромеханічну характеристику асинхронного тягового електродвигуна (рис. 2.11).

2.2.3 Розрахунок та побудова тягової характеристики тепловоза

Розрахунок тягової характеристики тепловоза здійснюється у табличній формі. Для розрахунку значення ω_2 та $M_{\text{д}}$ беруться з таблиці 2.5, а значення V та

$F_{\text{дот}}$ розраховуються за формулами:

Рис. 2.11. Дійсна електромеханічна характеристика асинхронного ТЕД

$$V = \frac{1,8 \cdot D_{\text{к}} \cdot \omega_2}{\mu_{\text{ро}}}; \quad (2.38)$$

$$F_{\text{дот}} = \frac{2 \cdot k \cdot M_{\text{д}} \cdot \mu_{\text{ро}} \cdot \eta_{\text{зп}}}{D_{\text{к}}}. \quad (2.39)$$

Для зручності результати розрахунків наводимо у табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Результати розрахунку тягової характеристики проектного тепловоза

Параметр	Значення						
ω_2 , рад/с	21,1	28,7	38,3	76,6	115	153	192
$M_{\text{д}}$, кН·м	5,2	4,35	3,25	1,82	1,17	0,845	0,65
V , км/год	9,2	12,5	16,6	33,3	50,0	66,5	83,4
$F_{\text{дот}}$, кН	252,1	210,9	157,5	88,2	56,7	41,0	31,5

Для накладення на тягову характеристику обмеження по зчепленню коліс із рейками необхідно скористатися основним законом локомотивної тяги

$$F_{\text{дот}} \leq F_{\text{зч}}, \quad (2.40)$$

де $F_{\text{зч}}$ – сила зчеплення коліс із рейками, кН.

$$F_{зч} = 9,81 \cdot \psi_{зч} \cdot m \cdot q_0, \quad (2.41)$$

де $\psi_{зч}$ – розрахунковий коефіцієнт зчеплення коліс із рейками;

$m = 6$ – кількість рушійних колісних пар;

$q_0 = 21$ т – осьове навантаження.

$$\psi_{зч} = 0,25 + \frac{8}{100 + 20 \cdot V}. \quad (2.42)$$

Результати розрахунку величини сила зчеплення коліс із рейками наведено у табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Величина сила зчеплення коліс із рейками

V , км/год	$\psi_{зч}$	$F_{зч}$, кН
0	0,300	405,5
5	0,272	367,6
10	0,251	339,9
15	0,236	318,7

По отриманим значенням будемо тягову характеристику проектного тепловоза (рис. 2.12).

Рис. 2.12. Тягова характеристика тепловоза

2.2.4 Розрахунок і побудова техніко-економічних характеристик

Тягові якості та параметри тягового режиму локомотива остаточно

оцінюємо через його так звані техніко-економічні характеристики, серед яких основною є характеристика ККД локомотива, тому що через ККД звичайно зрівнюється економічна ефективність різних видів тяги.

Техніко-економічні характеристики тепловозів прийнято представляти у вигляді графічних залежностей: $\sum N = f(V)$; $N_{\text{дот}} = f(V)$; $B_{\Gamma} = f(V)$; $\eta_{\Pi} = f(V)$; $\eta_{\Gamma} = f(V)$, де $\sum N$ – сумарна ефективна потужність ДГУ та накопичувача енергії, B_{Γ} – годинна витрата пального; $N_{\text{дот}}$ – дотична потужність локомотива; η_{Π} – ККД тягової передачі; η_{Γ} – ККД тепловоза.

ККД тепловоза η_{Γ} визначається за формулою:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{3600 \cdot N_{\text{дот}}}{B_{\Gamma} \cdot Q_{\text{p}}^{\text{H}}}, \quad (2.43)$$

де $N_{\text{дот}}$ – дотична потужність тепловоза, кВт;

B_{Γ} – годинна витрата палива, кг/год;

Q_{p}^{H} – питома теплота згоряння пального. Приймаємо $Q_{\text{p}}^{\text{H}} = 42745$ кДж/кг [32].

Дотична потужність тепловоза $N_{\text{дот}}$ залежно від швидкості його руху визначається зі співвідношення:

$$N_{\text{дот}} = \frac{F_{\text{дот}} \cdot V}{3,6}. \quad (2.44)$$

Величина сили тяги визначається за тяговою характеристикою проектного тепловоза в інтервалі швидкості руху від 0 до $V_{\text{max}} = 60$ км/год.

Годинна витрата пального визначається з виразу:

$$B_{\Gamma} = b_{\text{e}} \cdot \sum N, \quad (2.45)$$

де $b_{\text{e}} = 0,24$ кг/(кВт·год) – питома ефективна витрата пального.

$$B_{\Gamma} = 0,24 \cdot 655 = 157 \text{ кг/год.}$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ККД передачі η_{Π} визначається за формулою:

$$\eta_{\Pi} = \frac{N_{\text{дот}}}{\sum N - N_{\text{доп}}}. \quad (2.46)$$

Так як розрахунки необхідно провести у діапазоні швидкості руху тепловоза від 0 до V_{max} з інтервалом у 10 км/год, то для зручності розрахунки проведено у табличній формі (табл. 3.8).

За результатами розрахунків побудуємо графіки залежностей $\sum N = f(V)$, $N_{\text{дот}} = f(V)$, $B_{\Gamma} = f(V)$, $\eta_{\Pi} = f(V)$, $\eta_{\Gamma} = f(V)$, наведені на рис. 2.13.

Таблиця 2.8

Результати розрахунку техніко-економічних характеристик тепловоза

V , км/год	$F_{\text{дот}}$, кН	$N_{\text{дот}}$, кВт	N_e , кВт	B_{Γ} , кг/год	η_{Π}	η_{Γ}
0	408	0	0	0	0	0
5	358	498	885	157	0,608	0,267
7	342	665	885	157	0,812	0,357
10	245	681	885	157	0,831	0,366
20	128	714	885	157	0,871	0,383
30	88	733	885	157	0,895	0,393
40	67	748	885	157	0,912	0,401
50	55	759	885	157	0,926	0,407
60	46	768	885	157	0,937	0,412

Рис. 2.13. Техніко-економічні характеристики тепловоза

2.3 Визначення розмірів та габаритний баланс тепловоза

Довжина проектного тепловоза по осях автоточень L_T пропорційна ефективній потужності силової установки N_e , а у нашому випадку – сумарній потужності дизель-генератора та накопичувача енергії складе $\sum N = 885$ кВт. Її остаточна величина встановлюється в процесі компонування обладнання проектного тепловоза.

Попередньо величина L'_T для тепловоза потужністю до 1000 кВт може бути визначена за допомогою наступної емпіричної залежності:

$$L'_T = \sum N \cdot (27 - 0,011 \cdot \sum N) = 885 \cdot (27 - 0,011 \cdot 885) = 15280 \text{ мм.} \quad (2.47)$$

При попередній оцінці довжини секції тепловоза виходимо з наступних міркувань – максимальна довжина секції $L_{T \max}$ обмежується технічними вимогами на довжину ремонтних стійл депо та мінімальним радіусом кривих на ділянках звернення локомотива, а мінімальна довжина секції $L_{T \min}$ – міцністю верхньої будови колії та штучних споруд (наприклад, мостів) [33].

Таким чином, при проектуванні локомотива повинна бути виконана умова:

$$L_{T \min} \leq L_T \leq L_{T \max}. \quad (2.48)$$

Мінімальна довжина секції тепловоза $L_{T \min}$ може бути визначена з виразу:

$$L_{T \min} = 1000 \cdot P_{зч} / [q], \quad (2.49)$$

де $P_{зч}$ – зчіпна вага тепловоза, т;

$[q]$ – гранично припустиме навантаження на 1 метр колія, т/м. Приймаємо

$$[q] = 7,5 \text{ т/м [33].}$$

$$P_{зч} = m \cdot q_0 = 6 \cdot 21 = 126 \text{ т.} \quad (2.50)$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_{T \min} = 1000 \cdot 126 / 7,5 = 16800 \text{ мм.}$$

Максимальна довжина секції тепловоза $L_{T \max}$ по осях автозчепів відповідно до ГОСТ 25463-82 і технічними вимогами на магістральні тепловози нового покоління потужністю 2500..3500 кВт в одній секції з електричною передачею встановлюється не більше 22 800 мм [33].

Приймаємо довжину тепловоза за тепловозом-зразком (ЧМЭЗ) $L_T = 17220$ мм, що відповідає вищенаведеним умовам.

База секції тепловоза l_{ζ} – це відстань між шкворнями (центрами повороту візків в кривих навколо осі рами тепловоза) або геометричними центрами візків однієї секції локомотива, рис. 2.14. Попередньо, база секції l_{ζ} може бути встановлена з наступного виразу:

$$l_{\zeta} = e \cdot L_T, \quad (2.51)$$

де e – емпіричний коефіцієнт. Для тепловозів з тривісними візками і довжиною до 20 м приймається із діапазону $e=0,5 \dots 0,52$ [33]. Приймаємо $e=0,5$.

$$l_{\zeta} = 0,5 \cdot 17220 = 8610 \text{ мм.}$$

Довжина основних елементів кузова та підкузовних частин проектного тепловоза пов'язані між собою рівнянням габаритного балансу локомотива

$$n_K \cdot l_K + l_{\text{маш}} + l_{\text{хол}} = n_{\text{віз}} \cdot l_{\text{віз}} + 2 \cdot l_{\text{зв}} + l_{\text{мт}}, \quad (2.52)$$

де $n_K = 1$ – кількість кабін машиніста секції тепловоза;

l_K – довжина кабіни машиніста, мм;

$l_{\text{маш}}$ – довжина машинного відділення, мм;

$l_{\text{хол}}$ – довжина холодильника, мм;

$n_{\text{віз}} = 2$ – кількість візків в секції тепловоза;

$l_{\text{віз}}$ – довжина візка, мм;

										Арк.
										65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					

$l_{зв}$ – довжина звису рами локомотива відносно зовнішніх габаритів візка, мм;

l_{MT} – довжина міжвізкового простору, мм.

Рис. 2.14. Габаритний баланс локомотива

Довжина машинного відділення $l_{маш}$ залежить від потужності та габаритних розмірів силової установки тепловоза

$$l_{маш} = \frac{10^{-3} \cdot \sum N + 8,5}{0,76 - 0,74 \cdot 10^{-5} \cdot \sum N} = \frac{10^{-3} \cdot 885 + 8,5}{0,76 - 0,74 \cdot 10^{-5} \cdot 885} = 12,456 \text{ м.} \quad (2.53)$$

Довжину кабіни машиніста з урахуванням норм техніки безпеки та виробничої санітарії приймаємо рівною $l_k = 2$ м [54].

Довжина візка $l_{віз}$ залежить в першу чергу від осьової формули, а також типу приводу колісних пар та ефективної потужності силової установки.

У першому наближенні довжину візка можна визначити з наступного виразу:

$$l_{віз} = (1,7...1,9) \cdot n_0, \quad (2.54)$$

де $n_0 = 3$ – кількість рушійних осей у візку.

$$l_{віз} = (1,7...1,9) \cdot 3 = 5,1...5,7 \text{ м.}$$

При традиційному компоюванні охолоджувальних пристроїв дизеля тепловоза у вигляді шахти холодильника з вентиляторами охолодження орієнтовна *довжина холодильника* $l_{хол}$ визначається з наступного емпіричного виразу:

$$l_{хол} = 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot N_e + 1,14 = 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot 665 + 1,14 = 1,51 \text{ м.} \quad (2.55)$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Довжину одного звису рами локомотива приймаємо $l_{зв}=1,25$ м [33].

Довжина міжвізкового простору залежить від ємності паливного бака тепловоза та спочатку може бути визначена з рівняння:

$$l_{MT} = n_K \cdot l_K + l_{маш} + l_{хол} - n_{віз} \cdot l_{віз} - 2 \cdot l_{зв}, \quad (2.56)$$

$$l_{MT} = 1 \cdot 2 + 12,456 + 1,51 - 2 \cdot 5,4 - 2 \cdot 1,25 = 2,67 \text{ м.}$$

Ширина та висота проектного тепловоза. Максимальна ширина будівельного обрису локомотива $B_{л}$ обмежена габаритом рухомого складу. Згідно вимог стандарту РРІ (*Gabarit passe-partout international*) та ГОСТ 9238-83 для проектного тепловоза приймаємо габарит 03-ВМ, тоді $B_{л} = 3,15$ м.

Висота будівельного обрису тепловоза $H_{л}$ визначається від рівня верху головки рейки. Відповідно до габаритів рухомого складу 03-ВМ максимальне значення величини $H_{л} = 4,28$ м.

2.4 Визначення параметрів системи пружного підвішування

Пружне підвішування тепловоза призначене для зменшення динамічного впливу коліс на рейки при русі по нерівностях колії, забезпечення плавності ходу тепловоза та передачі ваги кузова та візків на колісні пари. З іншого боку, пружне підвішування полегшує виконання правильного розподілу навантаження від ваги тепловоза між колісними парами, а також забезпечує часткову передачу горизонтальних сил з боку коліс на раму візка.

Схема пружного підвішування візка наведена на рис. 2.15.

Рис. 2.15. Схема пружного підвішування візка

На проектному тепловозі підвішування тепловоза виконано одноступінчастим, одинарним (тільки пружини) та індивідуальним для кожного

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

буксового вузла колісної пари. Воно складається з 12 однакових груп (по шість груп для кожного візка), що мають по два однакових пружинних комплекта, встановлених між опорними кронштейнами корпуса букси та кронштейнами рами візка. Паралельно з кожною групою пружного підвішування встановлюємо гідравлічні гасителі коливань.

Пружинний комплект (рис. 2.16) складають три пружини: зовнішня 2, середня 4, внутрішня 3, дві опорні плити 1 і 5 й регулювальні прокладки 6.

2.4.1 Розрахунок на міцність пружини

Пружину на міцність розраховують по допустимій дотичній напрузі при динамічному навантаженні $[\tau]_{\max} = 650 \cdot 10^6$ Па.

Діаметр прутка визначиться з рівняння міцності пружини:

$$[\tau]_{\max} = \frac{8 \cdot K \cdot P'_{\text{дин}} \cdot D}{\pi \cdot d^3}. \quad (2.57)$$

Рис. 2.16. Пружинний комплект пружного підвішування візка

Звідки

$$d = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot K \cdot P'_{\text{дин}} \cdot D}{\pi \cdot [\tau]_{\max}}}, \quad (2.58)$$

де K – коефіцієнт, що враховує збільшення дотичної напруги в перетині на внутрішній поверхні витка пружини за рахунок її кривизни і інших факторів. Приймаємо $K = 1,25$ [34];

$D = 0,205$ м – діаметр пружини згідно вихідних даних;

$P'_{\text{дин}}$ – динамічне навантаження на пружину, Н.

						0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			68

$$P'_{\text{дин}} = 0,5P_{\text{дин}}; \quad (2.59)$$

де $P_{\text{дин}}$ – динамічне навантаження на буксовий вузол, Н.

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{ст}}(1 + K_{\text{д}}), \quad (2.60)$$

де $P_{\text{ст}}$ – статичне навантаження на буксовий вузол. Згідно вихідних даних

$$P_{\text{ст}} = 102500 \text{ Н};$$

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт вертикальної динаміки;

$$K_{\text{д}} = 0,1 + 0,2 \frac{V_{\text{max}}}{f_{\text{ст}}}, \quad (2.61)$$

$f_{\text{ст}}$ – статичний прогин пружного підвішування. Згідно вихідних даних

$$f_{\text{ст}} = 60 \text{ мм}.$$

$$K_{\text{д}} = 0,1 + 0,2 \frac{60}{60} = 0,3;$$

$$P_{\text{дин}} = 102500 \cdot (1 + 0,3) = 133250 \text{ Н};$$

$$P'_{\text{дин}} = 0,5 \cdot 133250 = 66630 \text{ Н};$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 1,25 \cdot 66630 \cdot 0,205}{3,14 \cdot 650 \cdot 10^6}} = 0,038 \text{ м}.$$

Кількість робочих витків визначають з рівняння деформації пружини:

$$f_{\text{пр}} = \frac{8 \cdot D^3 \cdot n_{\text{р}} \cdot P'_{\text{ст}}}{d^4 \cdot G \cdot 10^6}. \quad (2.62)$$

Звідки

$$n_{\text{р}} = \frac{f_{\text{пр}} \cdot d^4 \cdot G \cdot 10^6}{8 \cdot D^3 \cdot P'_{\text{ст}}}, \quad (2.63)$$

де $f_{\text{пр}}$ – прогин пружини, м. Приймаємо $f_{\text{пр}} = f_{\text{ст}}$;

						0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
							69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

G – модуль зсуву для сталі, $G = 8 \cdot 10^4$ МПа.

$P'_{ст}$ – статичне навантаження на пружину, Н.

Статичне навантаження на пружину прийmemo

$$P'_{ст} = 0,5P_{ст}; \quad (2.64)$$

$$P'_{ст} = 0,5 \cdot 102500 = 51250 \text{ Н};$$

$$n_P = \frac{0,12 \cdot 0,038^4 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{8 \cdot 0,205^3 \cdot 51250} \approx 6.$$

Приймаючи кількість опорних витків 1,5, отримаємо загальну кількість витків $n = 7,5$.

2.4.2 Розрахунок на міцність гумового амортизатора

При розрахунку гумових амортизаторів стиснення абсолютну деформацію під статичним навантаженням прийmemo:

$$\Delta H = 0,1H. \quad (2.65)$$

При більших значеннях ΔH гума швидко руйнується. Характеристика гумового амортизатора в межах $\varepsilon \leq 0,2$ приймається лінійною і виражається через закон Гука:

$$\sigma = E_P \varepsilon, \quad (2.66)$$

де σ – напруження стиснення, Па;

E_P – розрахунковий модуль пружності гуми, Па;

ε – коефіцієнт деформації. Приймаємо $\varepsilon = 0,1$ [34].

Так як

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

$$\sigma = \frac{P}{F} = \frac{P'_{ст}}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)} \quad (2.67)$$

i

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H}, \quad (2.68)$$

де F – площа амортизатора.

$$\Delta H = f_{РА} = \frac{HP}{E_p F}. \quad (2.69)$$

Якщо гумовий амортизатор зазнає деформації стиснення, то його жорсткість буде залежати від вільної поверхні випучування гуми та від стану опорних поверхонь. Розрахунковий модуль пружності амортизатора визначається за формулою:

$$E_p = E(1 + \alpha\Phi), \quad (2.70)$$

де E – модуль пружності гуми, Па;

α – коефіцієнт, що враховує стан опорних поверхонь. При міцному кріпленні опорних поверхонь гуми до металічних прокладок $\alpha = 4,67$ [34];

Φ – коефіцієнт форми гумового амортизатора.

Коефіцієнт форми являє собою відношення площі однієї опорної поверхні амортизатора до його повної бокової поверхні (поверхні випучування)

$$\Phi = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4\pi H(D + d)} = \frac{D - d}{4H}, \quad (2.71)$$

де D і d – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри амортизатора, м.

Модуль пружності E , Па пов'язаний з модулем зсуву гуми G_p , Па, виразом:

										Арк.
										71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04МР.ПЗ					

$$E = 3G_p. \quad (2.72)$$

Основним показником, по якому оцінюються властивості гуми є її твердість. Перехід від числа твердості h до G_p , здійснюється за емпіричною формулою:

$$G_p = \left(\frac{h}{19,5} \right)^2. \quad (3.73)$$

Напруження стиснення

$$\sigma = \frac{51250}{\frac{3,14}{4} (0,23^2 - 0,06^2)} = 1,32 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Розрахунковий модуль пружності

$$E_p = \frac{1,32 \cdot 10^6}{0,1} = 13,2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт форми гумового амортизатора

$$\Phi = \frac{0,23 - 0,06}{4 \cdot 0,03} = 1,42.$$

Модуль пружності гуми

$$E = \frac{13,2 \cdot 10^6}{1 + 4,67 \cdot 1,42} = 1,73 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Модуль зсуву гуми

$$G_p = \frac{1,73 \cdot 10^6}{3} = 0,577 \cdot 10^6 \text{ Па} = 5,77 \text{ кгс/см}^2.$$

Число твердості гуми

$$h = 19,5 \cdot \sqrt{5,77} = 47.$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Гума такої твердості забезпечить допустиму деформацію амортизатора.

3.4.3 Визначення жорсткості і статичного прогину ресорного підвішування

Основною пружною характеристикою ресорного підвішування візка є жорсткість, яка показує величину навантаження в кН, що викликає статичний прогин в один метр.

Жорсткість пружних елементів визначиться з наступних виразів:

– гумового амортизатора

$$J_{Ga} = \frac{E_p F}{H} = \frac{E_p \pi (D^2 - d^2)}{4H}, \quad (2.74)$$

$$J_{Ga} = \frac{13,2 \cdot 10^6 \cdot 3,14 (0,23^2 - 0,06^2)}{4 \cdot 0,03} = 17 \cdot 10^6 \text{ Н/м.}$$

– циліндричної пружини

$$J_{Pr} = \frac{d^4 G}{8n_p D^3}, \quad (2.75)$$

$$J_{Pr} = \frac{0,038^4 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{8 \cdot 6 \cdot 0,205^3} = 0,403 \cdot 10^6 \text{ Н/м.}$$

Сумарна жорсткість пружного підвішування залежить від способу навантаження та пружних елементів.

Загальна жорсткість індивідуального пружного підвішування з врахуванням жорсткості буксових поводків

$$J_B = 12 \frac{J_{Pr} \cdot J_{Ga}}{J_{Pr} + J_{Ga}} + \sum J_{PB}, \quad (2.76)$$

									Арк.
									73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ				

де $\sum \mathcal{J}_{\text{ПВ}}$ – сумарна жорсткість двох буксових поводків, кН/м.

Згідно [34] жорсткість двох буксових поводків приймається 0,3 кН/м. Тоді:

$$\sum \mathcal{J}_{\text{ПВ}} = 6 \cdot \mathcal{J}_{\text{ПВ}}, \quad (2.77)$$

$$\sum \mathcal{J}_{\text{ПВ}} = 6 \cdot 0,3 = 1,8 \text{ кН/м},$$

$$\mathcal{J}_{\text{В}} = 12 \frac{0,403 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^6}{0,403 \cdot 10^6 + 17 \cdot 10^6} + 1,8 \cdot 10^3 = 3,76 \cdot 10^6 \text{ Н/м}.$$

Жорсткість пружного підвішування візка, що віднесена до колеса визначиться як

$$\mathcal{J}_{\text{К}} = \frac{\mathcal{J}_{\text{В}}}{\kappa}, \quad (2.78)$$

де κ – кількість осей в візку, $\kappa = 3$.

$$\mathcal{J}_{\text{К}} = \frac{3,76 \cdot 10^6}{3} = 1,25 \cdot 10^6 \text{ Н/м}.$$

Статичний прогин пружного підвішування $f_{\text{СТ}}$ показує величину осадки пружних елементів під дією статичного навантаження

$$f_{\text{СТ}} = \frac{P_{\text{СТ}}}{\mathcal{J}_{\text{В}}}. \quad (2.79)$$

Статичне навантаження на візок приблизно визначається виходячи з навантаження на вісь

$$P_{\text{СТ}} = q_0 \cdot \kappa, \quad (2.80)$$

$$P_{\text{СТ}} = 210 \cdot 3 = 610 \text{ кН},$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$f_{\text{ст}} = \frac{610 \cdot 10^3}{3,76 \cdot 10^6} = 0,162 \text{ м.}$$

2.4.4 Визначення частоти коливань підресорної маси тепловоза

Коливання підресорних мас, що викликане впливом випадкової нерівності колії та залежить від жорсткості системи та величини підресорної маси, називається вільними (власними) коливаннями системи. Вони показують кількість повних періодів коливань в одиницю часу.

Оскільки листових ресор в ресорному підвішуванні тепловозу-зразка немає частота власних коливань визначиться як

$$H_c = \frac{5}{\sqrt{f_{\text{ст}}}}; \quad (2.81)$$

$$H_c = \frac{5}{\sqrt{1,62}} = 3,93 \text{ Гц.}$$

Між круговою та лінійною частотою коливань існує співвідношення

$$\omega_c = 2\pi H_c, \quad (2.82)$$

$$\omega_c = 2 \cdot 3,14 \cdot 3,93 = 24,7 \text{ с}^{-1}.$$

2.4.5 Визначення критичної швидкості руху тепловоза

Пружне підвішування являє собою складну коливальну систему, на яку періодично впливають збурення з боку колії, породжуючи так звані вимушені коливання.

Частота вимушених коливань

$$\omega_B = \frac{2\pi V}{L}, \quad (2.83)$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

де V – швидкість руху тепловоза, м/с;

L – довжина рейкових ланок, м.

Явище резонансу може наступити при рівності частот власних і вимушених коливань. Швидкість руху, при якій настає це небезпечне явище, що іноді приводить до сходу з рейок, називається критичною та визначається за формулою:

$$V_{\text{кр}} = \frac{\omega_c}{2\pi} L = \frac{5L}{\sqrt{f_{\text{ст}}}}. \quad (2.84)$$

Для довжини рейкових ланок $L = 12,5$ м

$$V_{\text{кр}} = \frac{5 \cdot 12,5}{\sqrt{1,62}} = 49,1 \text{ м/с} = 177 \text{ км/год.}$$

Для довжини рейкових ланок $L = 25$ м

$$V_{\text{кр}} = \frac{5 \cdot 25}{\sqrt{1,62}} = 98,2 \text{ м/с} = 354 \text{ км/год.}$$

Явище резонансу не наступить, оскільки максимальна швидкість тепловоза навіть на коротких рейках більша за конструкційну

2.4.6 Розрахунок демпфування коливань

В пружному підвішуванні тепловозів демпфування (гасіння) коливань здійснюється за допомогою гасників сухого тертя (фрикційних) та листових ресор. В окремих випадках застосовуються гідравлічні гасники, які ненадійно працюють в буксовій ступені з-за впливу на них ударних (імпульсних) навантажень.

Демпфування в пружному підвішуванні прийнято рахувати задовільним, якщо робота тертя, що створюється демпферами, складає 3...6 % від роботи пружних сил підвішування в цілому. Ця величина називається коефіцієнтом відносного тертя.

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Робота пружних сил підвішування візка:

$$A_{\Pi} = 4f_{\text{CT}} \mathcal{E}_B z_1, \quad (2.85)$$

де z_1 – величина відхилення рами візка при коливаннях (динамічний прогин).

Прийmemo $z_1 = 15$ мм [34].

$$A_{\Pi} = 4 \cdot 162 \cdot 3,76 \cdot 15 = 36\,547 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Робота сил терня в підвішуванні візка, яка створюється гасниками

$$W_{\Phi} = 4 \cdot F_{\text{Тр}} \cdot z_1 \cdot n, \quad (2.86)$$

де $F_{\text{Тр}}$ – сила в'язкого тертя одного гасника, згідно [34] $F_{\text{Тр}} = 6$ кН;

n – кількість гасників, $n = 6$.

$$W_{\Phi} = 4 \cdot 6 \cdot 15 \cdot 6 = 2160 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Коефіцієнт відносного тертя

$$\varphi_{\text{T}} = \frac{W_{\Phi}}{A_{\Pi}}, \quad (2.87)$$

$$\varphi_{\text{T}} = \frac{2160}{36547} = 0,059 \geq 0,03 \dots 0,06.$$

Можна рахувати, що демпфування в пружному підвішуванні тепловоза є задовільним, тому що робота тертя становить 5,9 % від роботи пружних сил підвішування.

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

3 ПОЗДОВЖНЄ РОЗВАЖУВАННЯ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА

У зв'язку із встановленням електричних накопичувачів енергії у тепловозі змінюється взаємне розміщення вузлів, вага тепловоза та у внаслідок цього осьове навантаження. Розважування локомотива визначає в процесі компоновки таке взаємне розміщення вузлів локомотива, при якому зберігаються функціональні зв'язки та реалізується найвигідніший розподіл навантажень від колісних пар на рейки. Зокрема, якщо всі колісні пари є рушійними, то це навантаження повинно бути розподілене між ними рівномірно. У практиці локомотивобудування нерівномірність розподілу навантаження по рушійних осях не повинно перевищувати 3 %. Розважування – задача статична, площинна. Навантаження від усіх елементів локомотивів представляють як систему сил, діючих в поздовжній вертикальній площині (в окремих випадках в поперечній площині) симетрії, що проходить крізь центр ваги локомотива. При вирішенні використовують два рівняння статички: суми сил та суми моментів цих сил відносно довільно обраної осі [35].

Розважування тепловоза виконується з метою:

- визначення службової ваги тепловоза та навантажень від кузова та рами з обладнанням на передній та задній візок;
- визначення навантажень від колісних пар на рейки;
- вирівнювання навантажень від кузова на візки та від колісних пар на рейки у випадку, коли різниця в навантаженні перевищує ± 3 %;
- доведення (шляхом застосування баласту) навантаження від колісних пар на рейки до заданої величини.

Розважування може бути поздовжнім (в поздовжній вертикальній площині) та поперечним (в поперечній вертикальній площині), з розважуванням візків і без нього.

Для визначення навантажень від кузова на рейки виконуємо тільки розважування надвізкових елементів тепловоза. Розважування візків не виконуємо, вважаючи, що навантаження від їх частин розподіляється по колісних парах рівномірно.

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

При поздовжньому розважуванні надвізкових елементів тепловоз розглядається як плоска, в статичній рівновазі система вертикальних сил, що виникають під дією ваги вузлів та груп деталей [35]. При цьому розглядаються наступні категорії навантажень:

- G_i – вага вузлів (груп деталей), розташованих в кузові та на рамі, в тому числі ваги власне кузова та рами, кН;
- G_k – сумарна вага надвізкових елементів тепловоза, тобто кузова та рами з обладнанням, кН;
- $G_{кп1}, G_{кз}$ – навантаження від кузова та рами з обладнанням на опори відповідно переднього та заднього візків, кН. Індексом «п» та «з» позначаємо належність параметра відповідно до переднього та заднього візків;
- G_B – вага візка, кН;
- $G_{п1}$ – підресорена вага секції тепловоза, кН;
- G_H – непідресорена вага секції тепловоза (вага колісних пар, букс, частина ваги ТЕД при опорно-осьовому підвішуванні, частина ваги підвішування та кожухів осьових редукторів), що жорстко передається на колію, кН;
- $G_{пв}$ – підресорена вага одного візка, кН;
- $G_{нв}$ – непідресорена вага, що припадає на один візок, кН;
- $P_{зч}$ – службова вага секції тепловоза, кН; у тепловозів, в яких всі колісні пари рушійні, ця вага співпадає із зчіпною вагою;
- P_{cp} – середнє навантаження від колісної пари на рейки, кН;
- $P_{п1}, P_{з}$ – повне навантаження на рейки від колісної пари заднього та переднього візків, кН;
- $P_{пп1}, P_{пз}$ – підресорене навантаження, що припадає на одну колісну пару переднього та заднього візків, кН;
- $P_{нп1}, P_{нз}$ – непідресорене навантаження, що припадає на рейки від колісної пари переднього і заднього візків, кН.

Основою для розрахунку повздовжнього розважування є схема екіпажної частини з необхідними розмірами (рис. 3.1 та таблиця 3.1), а також вагова відомість тепловоза, що наведена у таблиці 3.2.

Рис. 3.1. Схема екіпажної частини тепловоза для розважування

Таблиця 3.1

Основні геометричні параметри екіпажної частини тепловоза згідно схеми, наведеної на рис. 3.1

Розмір, мм						
<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>L_ш</i>	<i>L_н</i>
17220	4000	2000	2085	2000	8660	8660

Для виконання розрахунків та розважування відповідно до ескізу розважування та вагової відомості складаємо відомість розважування (табл. 3.3), визначаємо в ній статичні моменти, які створюються вагою вузлів (груп деталей) відносно умовної осі моментів

$$M_i = G_i \cdot l_i, \quad (3.1)$$

та визначаємо координату центру ваги надвізкової будови тепловоза $x_{цв}$ відносно умовної осі моментів

$$x_{цв} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{G_k} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n G_i}. \quad (3.2)$$

Таблиця 3.2

Вагова відомість тепловоза

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

Найменування вузла (групи деталей)	Вага G_i , кН	Плече l_i , м	Момент M_i , кН·м
Енергетична установка: – дизель-генератор	107,01	6,12	654,901
– накопичувач енергії з перетворювачем	65,20	8,86	577,672
Рама тепловоза з приналежностями і баластом	194,28	6,76	1313,333
Трубопроводи всіх систем та їх обладнання	59,24	7,83	463,849
Обладнання шахти холодильника	54,83	3,18	174,359
Високовольтна камера з обладнанням	38,00	12,90	490,2
Кабіна машиніста з обладнанням	51,27	12,80	656,256
Кузов з приналежностями	60,10	10,20	613,02
Обслуговуюча вага (бригада, паливо, масло, вода, пісок)	55,00	8,7	478,5
Надвізкова будова	$\sum G_i$ =683,12	$x_{цв} =$ 8,00	$\sum G_i \cdot l_i =$ =5465,813
Візки (два)	231,64×2		
Непідресорена вага тепловоза	251,30		

Умовна вісь, до якої визначається відстань проходить через центр однієї з автозчеплень. Прийmemo, що це переднє автозчеплення, тоді

$$x_{цв} = \frac{5465,813}{683,12} = 8,00 \text{ м.}$$

Встановивши координату центру ваги кузова та рами тепловоза з усім обладнанням, розміщуємо візки тепловоза.

Так як використовується рама серійного тепловоза, то розміщення опор візків передбачено в конструкції поперечних кріплень рами. Незначне переміщення координати центру ваги надвізкової будови тепловоза досягається

										Арк.
										81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					

незначним переміщенням окремих вузлів на рамі або за допомогою баласту.

У маневрових тепловозах баласт використовується не тільки для вирівнювання навантажень на візки, але ще і для збільшення зчіпного ваги.

Службова вага секції тепловоза знаходиться як сума ваг надвізкових елементів та двох візків

$$P_{зч} = G_K + 2 \cdot G_B; \quad (3.3)$$

$$P_{зч} = 683,12 + 2 \cdot 231,64 = 1146,4 \text{ кН.}$$

Середнє навантаження від колісної пари на рейки визначається як частка від ділення службової ваги тепловоза на кількість його колісних пар $m=6$

$$P_{ср} = \frac{P_{зч}}{m} = \frac{1146,4}{6} = 191,1 \text{ кН.} \quad (3.4)$$

Навантаження від кузова і рами з обладнанням на передній та задній візки визначаються обернено пропорційно відстаням від центру ваги надвізкової будови до умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки

$$G_{кп} = G_K \frac{a_3}{L_H}; \quad (3.5)$$

$$G_{кз} = G_K \frac{a_{п}}{L_H}, \quad (3.6)$$

де $a_{п}$, a_3 – відстань від центру ваги надвізкової будови до умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки, м;

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

$$a_{п} = x_{цв} - (D + C) = 8,00 - (2,085 + 2,00) = 3,915 \text{ м;} \quad (3.7)$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

$$a_3 = L_{\text{H}} - a_{\text{II}} = 8,66 - 3,915 = 4,745 \text{ м.} \quad (3.8)$$

$$G_{\text{кп}} = 683,12 \cdot \frac{4,745}{8,66} = 374,3 \text{ кН;}$$

$$G_{\text{кз}} = 683,12 \cdot \frac{3,915}{8,66} = 308,8 \text{ кН.}$$

Повне навантаження від колісної пари на рейки для переднього та заднього візків визначається як сума підресореного та непідресореного навантажень

$$P_{\text{II}} = P_{\text{III}} + P_{\text{HII}}, \quad (3.9)$$

$$P_{\text{з}} = P_{\text{пз}} + P_{\text{нз}}. \quad (3.10)$$

Тому що розважування візків не виконувалось і було прийнято, що їх підресорена та непідресорена вага розподіляється по колісних парах однаково, то підресорені навантаження, що припадають на одну колісну пару, можна вважати однаковими:

– для переднього візка (при кількості колісних пар у візку $m_{\text{в}}=3$)

$$P_{\text{III}} = \frac{G_{\text{кп}}}{m_{\text{в}}} + \frac{G_{\text{пв}}}{m_{\text{в}}} = \frac{374,3}{3} + \frac{231,64}{3} = 201,98 \text{ кН;} \quad (3.11)$$

– для заднього візка (при кількості колісних пар у візку $m_{\text{в}}=3$)

$$P_{\text{пз}} = \frac{G_{\text{кз}}}{m_{\text{в}}} + \frac{G_{\text{пв}}}{m_{\text{в}}} = \frac{308,8}{3} + \frac{231,64}{3} = 180,15 \text{ кН.} \quad (3.12)$$

Величину непідресореного навантаження від колісної пари на рейки для переднього та заднього візків вважаємо розподіленої однаково і визначаємо як частка від ділення непідресореної ваги тепловоза на кількість його колісних пар

									Арк.
									83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ				

$$P_{\text{нп}} = P_{\text{нз}} = \frac{G_{\text{н}}}{m} = \frac{251,30}{6} = 41,88 \text{ кН.} \quad (3.11)$$

Тоді

$$P_{\text{п}} = 201,98 + 41,88 = 243,86 \text{ кН;}$$

$$P_{\text{з}} = 180,15 + 41,88 = 222,03 \text{ кН.}$$

Відносна різниця навантажень між колісними парами переднього та заднього візків

$$\gamma = \frac{|P_{\text{п}} - P_{\text{з}}|}{\min(P_{\text{п(з)}})} \cdot 100 = \frac{243,86 - 222,03}{222,03} \cdot 100 = 9,83\%, \quad (3.12)$$

що значно більше допустимого значення 3%, тому необхідно вирівняти навантаження на рейки переднього та заднього візків.

Вирівнювання навантажень можна виконати кількома методами:

- зміною положення вузлів (груп деталей) в кузові і на рамі тепловоза;
- зміною положення умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки без зміни відстані між ними;
- зміною положення умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки із зміною відстані між ними;
- розміщенням баласту на необхідній відстані від умовної осі моментів, де вага баласту і плече його розташування підбираються дослідним шляхом.

Перші три способи виконуються лише в межах конструктивних переміщень та можуть бути реалізовані зміною положення шкворневих вузлів і опор кузова, причому зміна положень вузлів або груп деталей не повинна перевищувати 300 мм. Четвертий спосіб виконується конструктивно (баласт може бути розміщений в пустотах, утворених конструкцією рами тепловоза або підвішений до неї) і дозволяє довести при необхідності службову вагу тепловоза до заданої величини.

Таким чином, для збільшення зчіпної ваги тепловоза і, відповідно, тягових

									Арк.
									84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04МР.ПЗ				

властивостей, пропонується встановити баласт вагою 37,3 кН на відстані 16 м відносно умовної осі моментів.

Після перерахунку отримаємо

$$G_K = 720,42 \text{ кН};$$

$$x_{ЦВ} = 8,42 \text{ м};$$

$$P_{3ч} = 720,42 + 2 \cdot 231,64 = 1183,7 \text{ кН};$$

$$P_{ср} = \frac{1183,7}{6} = 197,3 \text{ кН};$$

$$a_{II} = 8,42 - (2,085 + 2,00) = 4,33 \text{ м};$$

$$a_3 = 8,66 - 4,33 = 4,33 \text{ м};$$

$$G_{кII} = 720,43 \cdot \frac{4,33}{8,66} = 360,21 \text{ кН};$$

$$G_{к3} = 720,43 \cdot \frac{4,33}{8,66} = 360,21 \text{ кН};$$

$$P_{III} = \frac{360,21}{3} + \frac{231,64}{3} = 197,28 \text{ кН};$$

$$P_{II3} = \frac{360,21}{3} + \frac{231,64}{3} = 197,28 \text{ кН};$$

$$P_{II} = 197,28 + 41,88 = 239,16 \text{ кН};$$

$$P_3 = 197,28 + 41,88 = 239,16 \text{ кН};$$

$$\gamma = \frac{|P_{II} - P_3|}{\min(P_{II(3)})} \cdot 100 = \frac{239,16 - 239,16}{239,16} \cdot 100 = 0\%,$$

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

що менше 3%, тому результати поздовжнього розважування досягнуто – навантажень від кузова на візки та від колісних пар на рейки вирівняні.

Ескіз розважування тепловоза наведено на рис. 3.2.

Рис. 3.2. Ескіз розважування тепловоза

					0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

ВИСНОВКИ

Стратегія ПАТ «Українська залізниця», що спрямована на зниження споживання дизельного пального, нагально актуальна та вимагає модернізації старих і створення тепловозів нового покоління з високим середнеексплуатаційним ККД.

Маневрові тепловози, що експлуатуються на даний час на залізничних коліях України, більшу частину часу експлуатації (від 50 до 90% загального часу) працюють на неекономічних режимах (холостий хід і малі навантаження) та мають завищені норми споживання дизельного пального.

При аналізі тенденцій у розвитку в області автономного тягового рухомого складу для маневрової роботи провідних країн Європи встановлено, що триває процес оновлення, заміни застарілого парку і модернізації раніше випущених серій тепловозів шляхом впровадження прогресивних видів автономної тяги. Затребувані більш ефективні, економічні, екологічні конструкції.

Останнім часом поживилася робота з модернізації та створення маневрових локомотивів. Побудовано десятки нових локомотивів, що відрізняються поєднанням різних енергетичних установок. При проектуванні та будівництві нових локомотивів основна увага приділяється зниженню шкідливих викидів, тобто поліпшенню екологічних показників, а також зменшенню витрат пального.

Застосування накопичувачів енергії у тяговому колі локомотива є одним із шляхів зниження витрат пального на тягу в усьому світі. Це є найбільш актуальним для тягового рухомого складу, а особливо для маневрових локомотивів.

Аналіз праць вчених свідчить, що для вирішення завдання визначення техніко-економічних показників гібридних локомотивів необхідний комплексний підхід, який має пов'язувати між собою технічні параметри локомотива, показники експлуатації та вартісні показники.

Проаналізовано специфіку роботи маневрового тепловоза та встановлено, що найбільша частка роботи на нульовій позиції контролера машиніста

										Арк.
										87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					

приходиться на ділянкову роботу, а найменша – при сортувальній роботі на гірці. Найбільшу частку часу маневрові локомотиви знаходяться на стоянці при вантажній роботі, а найменше – при сортувальній роботі на гірці. Також необхідно відмітити, що при сортувальній роботі на гірці в основному використовуються перші п'ять позицій у порівнянні з іншими видами робіт. Останні позиції контролера машиніста більш за все використовуються при ділянковій роботі.

При аналізі існуючих систем накопичення енергії встановлено, що на залізничному транспорті найбільший ефект від використання системи рекуперації електричної енергії може бути отриманий на маневрових тепловозах з електричною передачею, де спостерігається найбільша нерівномірність руху, що викликає значні зміни кінетичної енергії.

При виборі конструкційних схем гібридних силових установок з електричним накопичувачем енергії проаналізовано переваги та недоліки послідовної, паралельної та системи «спліт». Встановлено, що за умовами роботи та компоновання найбільш доцільно використовувати паралельну схему. Перевагою паралельної схеми є більш високий ККД передачі енергії від первинного двигуна до рушійних коліс у порівнянні з послідовною схемою та можливість застосування однієї електромашини замість двох.

При визначенні техніко-економічних показників гібридних тепловозів обрано методику, що базується на попередньому хронометражі та аналізі умов роботи тепловоза. В результаті обробки методами статистичного аналізу встановлено, що основне значення реалізованої експлуатаційної потужності потрапляє в інтервал до 650 кВт, а на більший діапазон – доводиться лише близько 1%. В результаті аналізу також отримані: середня величина реалізованої експлуатаційної потужності – 406 кВт, середньоквадратичне відхилення 87 та стандартна похибка відхилення 24. Тому після аналізу існуючих пропозицій на ринку двигунів внутрішнього згорання, пропонується обрати для проектуемого тепловоза дизель-генератор марки Caterpillar 3412C з номінальною ефективною потужністю 655 кВт.

										Арк.
										88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.196375.000.04MP.ПЗ

При визначенні енергоємності накопичувача енергії виходимо з тих міркувань, що його потужність повинна компенсувати певні «піки» експлуатаційної потужності тепловоза, що спостерігалися при дослідженнях та склали до $N_{\Pi} = 725$ кВт.

Енергоємність накопичувача енергії обрано за умови, що при хронометражі роботи тепловоза було виявлено, що максимальний час роботи тепловоза на «піку» навантаження ($N_{\Pi} = 725$ кВт) склав близько $t = 3,5$ хв або 210 с. Тому на основі аналізу існуючих на ринку накопичувачів енергії, обираю літій-іонні акумулятори виробництва ТОВ "Ліотех", сформовані у загальний модуль накопичувачів енергії (МНЕ). Складається з 300-ста елементів напругою 3,2 В і ємністю 300 А·год кожен, які об'єднані в акумуляторні комірки. Енергоємність МНЕ складає 300 А·год з робочою напругою на затискачах тягового накопичувача енергії 870...1152 В в залежності від ступеню розрядження.

При визначенні техніко-економічних характеристик тепловоза розраховано: параметри тягового осьового редуктора; зовнішня характеристика синхронного тягового генератора; електромеханічні характеристики ТЕД; тягова та техніко-економічні характеристики тепловоза. Крім цього визначені основні розміри проектного тепловоза та виконано його габаритний баланс. Обрано та обґрунтовано схему пружного підвішування тепловоза з визначенням характеристик елементів, що його складають.

В останньому розділі виконано розважування проектного тепловоза. Розважування локомотива визначає в процесі компоновки таке взаємне розміщення вузлів локомотива, при якому зберігаються функціональні зв'язки та реалізується найвигідніший розподіл навантажень від колісних пар на рейки. Для збільшення зчіпної ваги тепловоза і, відповідно, тягових властивостей, пропонується встановити баласт вагою 37,3 кН на відстані 16 м відносно умовної осі моментів.

					<i>0032.196375.000.04MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

10. Альтернативные источники энергии для локомотивов // Железные дороги мира. Москва. – 2012. – №12. – С. 32–36.
11. Новые тепловозы для маневровой и поездной работы // Железные дороги мира. – 2012. – № 10. – С. 38–42.
12. Обновление локомотивного парка железных дорог США и Канады // Железные дороги мира. Москва. – 2008. – № 10. – С. 62–65.
13. Зайцева, Т.Н. Многодизельные тепловозы [Электронный ресурс] / Т.Н. Зайцева, П.А. Полин // Локомотив. – 2012. – № 6. – Режим доступа: <http://scbist.com/zhumal-lokomotiv/19357-06-2012-nmogodizelnye-teplovozy.html> (дата звернения: 16.10.2019).
14. Новый дизельный локомотив Terra Nova // Локомотив-информ. – 2014. № 12. – С. 30–33.
15. Проекты гибридных локомотивов // Железные дороги мира. – 2015. №4. – С. 56–60.
16. Гапанович, В.А. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В.А. Гапанович, В.И. Киселев, И.К. Лакин [и др.]. – М.: Изд-во «ИРИС ГРУПП», 2012. – 576 с.
17. Кравченко, О. В. Инновационный маневровый тепловоз ТЭМ35 с комбинированной [гибридной] установкой / О. В. Кравченко // Техника железных дорог. – 2013. – № 3. – С. 69–73.
18. Надежность, экономия, инновации [Электронный ресурс] // Журнал для партнеров ЗАО «Трансмашхолдинг». – 2013. – № 2. – С. 14–17. – Режим доступа: www.tmholding.ru (дата звернения: 10.09.2019).
19. Лубягов, А.М. Тепловоз ТЭМ31М запускается в серию. [Электронный ресурс] / А. М. Лубягов // Локомотив. – 2013. – № 6. – Режим доступа: <http://scbist.com/xx2/27615-06-2013-teplovoz-tem31m-zapusketsya-v-seriyu.html> (дата звернения: 16.10.2019).
20. Тепловоз ТЭМ14 // Prolocomotiv, 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://prolokomotiv.ru/teplovoz-tem14.html/> (дата звернения: 04.10.2019).

					<i>0032.196375.000.04MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Подпис	Дата		91

21. Група Синара [Електронний ресурс]: офіційний сайт, Режим доступу: www.sinara-group.com (дата звернення: 02.10.2019).
22. Гибриды – какими они будут? Передовые технологии, инновационные разработки и новые модели // Trainandbrain, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zen.yandex.ru/media/trainandbrain/gibridy-kakimi-oni-budut-peredovye-tehnologii-innovacionnye-razrabotki-i-novye-modeli-5d6f78f592414d00ad250b32> (дата звернення: 15.10.2019).
23. Грищенко, А.В. Оценка эффективности тепловозной многодизельной энергетической установки с объединенной системой охлаждения /А.В. Грищенко, В.А. Кручек, В.В. Кручек / Известия Петербургского университета путей сообщения – 2012. – № 1(30). – С. 43–48.
24. УЗ залучатиме інвестиції в оновлення рухомого складу та інфраструктури. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://info.uz.ua/articles/uz-zaluchatime-investitsii-v-onovlennya-rukhomogo-skladu-ta-infrastrukturi> (дата звернення: 04.10.2019).
25. Маневровые тепловозы / Под редакцией Л.С. Назарова. – М.: Транспорт, 1977. – 414 с.
26. Кузнецова, И.А. О рациональном выборе маневровых гибридных локомотивов в зависимости от условий эксплуатации / И.А. Кузнецова // XII научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». 20–21 октября. – М.: МИИТ, 2011. – С. V–17–V–18.
27. Методичні вказівки з розрахунку норм часу на маневрові роботи, які виконуються на залізничному транспорті [Текст]: Затв.: Наказ Укрзалізниці 25.03.03 № 72–ЦЗ і Державна Адміністрація залізничного транспорту України. К., 2003. – 82 с.
28. Краснобаев Н.И., Барский М.Р., Шредер И.Б., Ванаг Я.А. Контактно-аккумуляторная тяга на железнодорожном транспорте. М.: Транспорт, 1977. – 279 с.
29. Вдосконалення методів визначення параметрів накопичувана енергії та силової установки для гібридного приводу локомотивів і суден [Електронний ресурс].

						0032.196375.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			92

Режим доступу:

https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/%D0%90%D0%92%D0%A2%D0%9E%D0%9C_%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D%D0%A1%D0%9F/%D0%95%D0%A0%D0%A2%D0%97/Hybrid-Vehicle_0.pdf (дата звернення: 04.10.2019).

30. Боднар, Б. Є. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування: Підручник для ВНЗ залізнич. трансп. / Під ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. – Д.: ПП «Ліра ЛТД», 2010. – 360 с.
31. Овчинников, В. М. О снижении расхода дизельного топлива в маневровой работе [Текст] / В. М. Овчинников, С. А. Пожидаев, В. В. Скряженцевский, Н. Г. Швец, Ю. К. Кирило, Е. В. Шкрабов // Энергоэффективность – 2010. – № 10 (134).
32. Electric power generation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/electric-power-generation.html (дата звернення: 04.10.2019).
33. Бобирь, Д. В. Теорія та конструкція локомотивів: методичні вказівки до курсового та дипломного проектування: у 3 ч. Ч. 1. Розрахунок техніко-економічних характеристик тепловоза [Текст] / Д. В. Бобирь, Є. Б. Боднар, М. І. Капіца; Дніпропетр. нац. ун-т. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – 20 с.
34. Руднев В.С., Маношин А.В. Выбор основных параметров экипажной части и компоновочной схемы тепловоза: Методические указания. –М: МИИТ, 2009. – 52 с.
35. 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 [Текст] / Д. В. Бобирь, М. П. Довбня, М. І. Мартишівській; 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.

										Арк.
										93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.196375.000.04MP.ПЗ					