

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний університет науки і технологій


НАЦІОНАЛЬНА ШКОЛА МАЙСТЕРНОСТІ І ПРОФЕСІЙ
CNAM, ФРАНЦІЯ

«ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО»

Завідувач кафедри:

д.т.н., професор  Капіца М. І.

(вчене звання, ступінь) (підпис) (ПІБ)

«» 15 жовтня 2021 р.

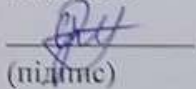
ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ
на отримання ОКР «магістр»

Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»

світня програма «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

тема **ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ
ЛОКОМОТИВІВ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ**

Виконав:


(підпис)

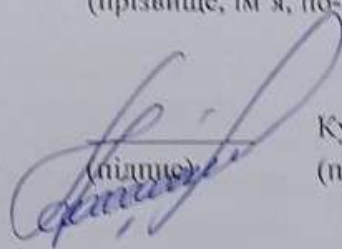
Орловський І. О.

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Керівник:

Phd

(вчене звання, ступінь)


(підпис)

Кузишин А. Я.

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Львів-Дніпро
2021

			0032.206553.MP.2021.001
№ докум	Підпис	Дата	

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна

НАЦІОНАЛЬНА ШКОЛА МАЙСТЕРНОСТІ І ПРОФЕСІЙ
СНАМ, ФРАНЦІЯ

«ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО»

Завідувач кафедри:

д.т.н., професор _____ Капіца М. І.

(вчене звання, ступінь) (підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2021 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ
на отримання ОКР «магістр»

Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»

Освітня програма «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

Тема **ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ
ЛОКОМОТИВІВ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ**

Виконав:

(підпис)

Орловський І. О.
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Керівник:

Phd
(вчене звання, ступінь)

(підпис) Кузіншин А. Я.
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Дніпро
2021

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						1
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
Кафедра «Локомотиви та локомотивне господарство»

НАЦІОНАЛЬНА ШКОЛА МАЙСТЕРНОСТІ І ПРОФЕСІЙ
CNAM, ФРАНЦІЯ

«ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО»

Завідувач кафедру:

д.т.н., професор _____ Капіца М.І.
(вч. звання, ступінь) (підпис) (ПІБ)
« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Орловський І.О.
(ПІБ)

- 1. Тема роботи** Дослідження перспектив використання гібридних
локомотивів у міжнародному сполученні
затверджено наказом по університету №166ст від «09» квітня 2021р.
- 2. Термін подачі студентом закінченої роботи** «10» листопада 2021 р.
- 3. Вихідні дані для роботи** Нормативно правові акти та нормативні документи в сфері залізничного рухомого складу, Директиви ЄС щодо залізничного транспорту, нормативні документи в сфері екологічної безпеки

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Об'єм, %	Рекомендована кількість слайдів
Аналіз розвитку маневрового рухомого складу та заходів по скороченню витрат дизельного палива	20	3
Вимоги нормативних документів України та країн ЄС щодо викидів палива в навколишнє середовище	20	2
Альтернативні джерела енергії для локомотивів	40	6
Методика розрахунку ефективності використання накопичувачів електричної енергії	20	2

Студент

Орловський І. О.

Науковий керівник

Кузишин А. Я.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						2
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І СЛОВНИК ТЕХНІЧНИХ ТЕРМІНІВ

CEY	Силовая энергетична установка
NRE	National Railway Equipment
ЄС	Європейський Союз
TCI	Технічні специфікації інтероперабельності
BE	Brookville Equipment
НМЛОС	Неметанові органічні сполуки
USC	United State Code
ГСТУ	Галузевий стандарт України
EN	Європейська норма
MEG	Mitteldeutsche Eisenbahn
НЕЕ	Накопичувач електричної енергії

					0032.206553.MP.2021.001 ЗМІСТ							
Вим	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата								
Розробив		Орловський І.О.			Дослідження перспектив використання гібридних локомотивів у міжнародному сполученні				Літ	Аркуш	Аркушів	
Перевірів		Кузишин А.Я.									4	
Н. контр.												
Затвердив		Капіца М.І.										

ВСТУП.....	6
I. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ МАНЕВРОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ТА ЗАХОДІВ ПО СКОРОЧЕННЮ ВИТРАТ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА.....	7
1.1 Основні тенденції та напрямки розвитку в області автономного тягового рухомого складу для маневрової роботи	7
1.2 Аналіз методик розрахунку енергетичної ефективності роботи маневрових тепловозів.....	19
1.3 Аналіз основних режимів роботи маневрових тепловозів	24
Висновки до розділу 1	27
II. ВИМОГИ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ УКРАЇНИ ТА КРАЇН ЄС ЩОДО ВИКИДІВ ПАЛИВА В НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ	28
2.1 Загальні відомості.....	28
2.2 Закордонний досвід правового регулювання викидів залізничного рухомого складу.....	31
2.3 Методи оцінки викидів від залізничної техніки.....	41
2.4 Дослідження техніко-екологічних та економічних характеристик тепловозних ДВЗ під час використання палив якості EURO стандарту	46
Висновки до розділу 2	51
III. АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЛОКОМОТИВІВ	52
3.1 Гібридні технології.....	52
3.2 Перша партія гібридних локомотивів	54
3.3 Використання сонячної енергії.....	59
Висновки до розділу 3	61
IV. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	62

4.1 Вступ.....	62
4.2 ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОКОМОТИВНОЇ ТЯГИ.....	62
4.3 СПІВВІДНОШЕННЯ ТЕОРІЇ ЛОКОМОТИВНОЇ ТЯГИ.....	63
4.4 ДИФЕРЕНЦІАЛЬНЕ РІВНЯННЯ РУХУ ПОЇЗДА	65
4.5 БАЛАНС СИЛ В РЕЖИМІ ТЯГИ	68
4.6 БАЛАНС ПОТУЖНОСТЕЙ У РЕЖИМІ ТЯГИ	69
4.7 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС В РЕЖИМІ ТЯГИ.....	70
4.8 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ТЕПЛОВОЗАХ, ЇХ ПАРАМЕТРІВ ТА УМОВ РОЗМІЩЕННЯ.....	71
Висновки до розділу 4.....	79
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	80
БІБЛІОГРАФІЯ.....	82
СПИСОК РИСУНКІВ	87
СПИСОК ТАБЛИЦЬ.....	89
АНОТАЦІЯ І КЛЮЧОВІ СЛОВА.....	90

ВСТУП

Пріоритетним напрямком стратегічних програм розвитку залізничного транспорту є проектування та впровадження в експлуатацію нового рухомого складу, що відрізняється високими показниками енергетичної ефективності, а також модернізація існуючого експлуатованого парку. Крім того, важливим напрямком у діяльності є постійне підвищення ефективності перевізного процесу в цілому, що виражається як у зниженні витрати паливно-енергетичних ресурсів, так і в економії коштів на їхнє придбання. Таким чином, щоб успішно і ефективно здійснювати перевезення залізничним транспортом, необхідно не тільки підвищувати масу поїздів і пропорційно збільшувати кількість рушійних осей і потужність локомотивів, але і вирішити ряд науково-технічних завдань, спрямованих на покращення їх показників енергетичної ефективності. Вказана особливість може бути вирішена, шляхом дослідження, розробки та подальшого застосування модульних силових енергетичних установок (СЕУ), заснованих на принципі приведення генерованої потужності у відповідність потужності поїзда.

Об'єктом дослідження в даній роботі є тепловози з модульними силовими енергетичними установками, які використовуються провідними компаніями на ринку залізничного транспорту.

Предметом дослідження являються підходи щодо проектування тепловозів з модульним силовими енергетичними установками відповідно до технічних специфікацій інтероперабельності (ТСІ).

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						6
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ І. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ МАНЕВРОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ТА ЗАХОДІВ ПО СКОРОЧЕННЮ ВИТРАТ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

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

Автономний рухомий склад при виконанні збірно-вивізних, внутрішніх та маневрових робіт відіграє важливу роль у виконанні транспортних завдань компаній, корпорацій та ін.

Велика частина локомотивного парку задіяна у виконанні маневрової роботи, переважна кількість якої виконується тепловозами. Загальна кількість витрат на їх утримання складає понад 25% від усіх експлуатаційних витрат, де основним із витрат припадає на витрати дизельного палива [1]. У зв'язку з цим однією з основних задач є вирішення питання паливної економичності даного типу рухомого складу, який використовується при виконанні маневрової роботи. Вказана особливість передбачає розвиток різних шляхів та напрямків у цій галузі.

Розглянуто статистичні дані щодо кількості маневрових локомотивів, часу їх побудови, їх процентне співвідношення відповідно до їх потужності та ін. Вказану статистику відображено у літературі [2] на наведено на (рис. 1-4).

Кількість маневрових тепловозів, які експлуатуються на залізницях країн Європейського союзу становить близько 7680 од. Процентний розподіл їх між країнами показано на (рис. 1).

Аналіз (рис. 1) показує, що переважна кількість маневрових тепловозів, а саме (86,82%) експлуатується у Німеччині - 36,64%, Франції - 32,40%, Італії - 17,77%, а менша їх кількість (11,75%) припадає на Швецію, Фінляндію, Австрію і всього лише 1,43% парку маневрових тепловозів припадає на Норвегію, Данію та Бельгію.

Середній вік експлуатації зазначених маневрових тепловозів на залізницях Франції, Німеччини, Італії, Фінляндії, Норвегії, Данії, Австрії та Бельгії

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						7
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

становить близько 44 роки. З аналізу можна відзначити, що основними роками коли відбулось проектування та виробництво зазначених локомотивів припадає на 1961-1980 роки. Проте, за останні роки відбулись зміни в законодавстві, які передбачають більш високі екологічні вимоги, що передбачає тенденції до збільшення об'ємів тепловозобудування (рис. 2).

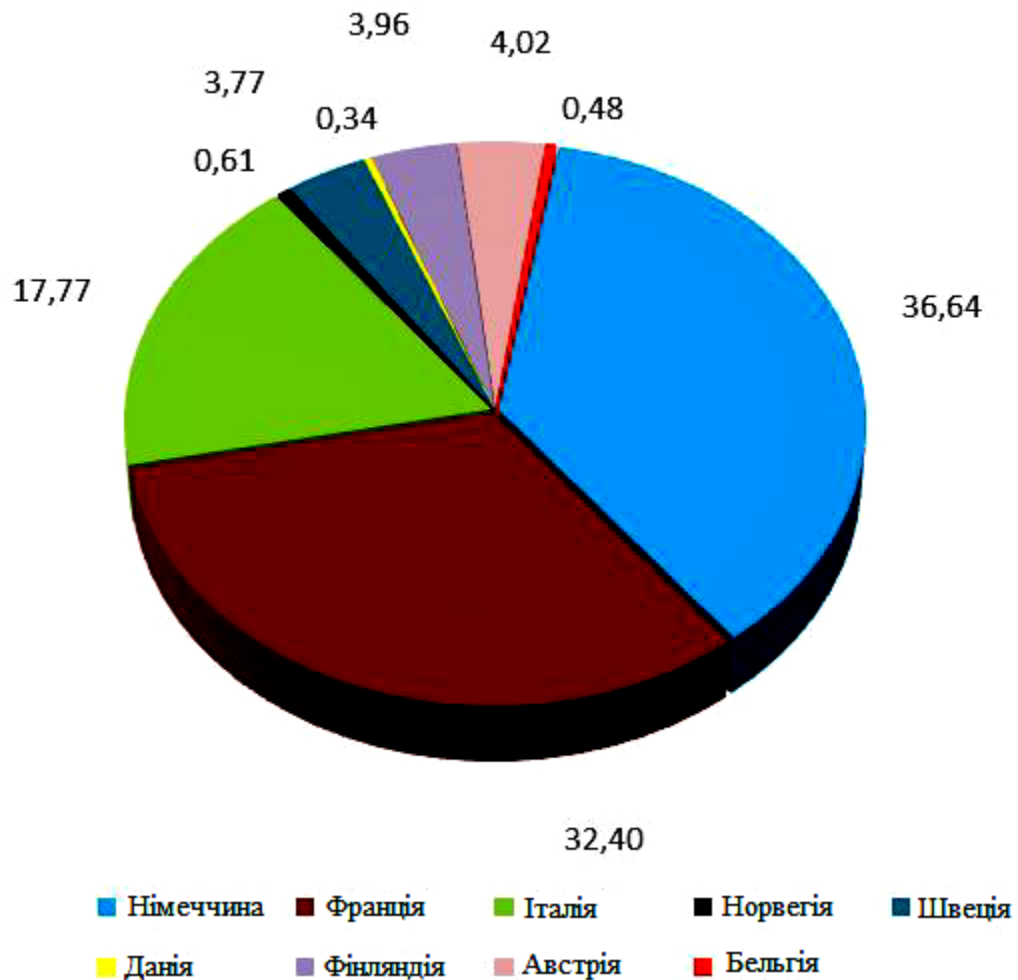


Рисунок 1 – Співвідношення кількості маневрових тепловозів відповідно до їх експлуатуючих країн

На даний час відбувається процес впровадження різних видів автономної тяги, що в майбутньому призведе до оновлення, заміни застарілого і модернізації раніше побудованих серій тепловозів. Все це призведе до експлуатації більш ефективних, економічних та екологічних конструкцій [3].

Якщо розглядати співвідношення кількості маневрових локомотивів до їх

потужності то значна їх кількість, а саме близько 39% припадає на потужність від 501 до 1000 кВт, потужність близько 30% маневрових локомотивів знаходиться в межах від 100 до 500 кВт. У зв'язку із значним розвитком сучасних технологій актуальним на сьогоднішній час є підвищення потужності маневрових локомотивів [3]. Більш детальне відображення співвідношення кількості маневрових тепловозів країн ЄС відповідно до їх потужності наведено на (рис. 3).

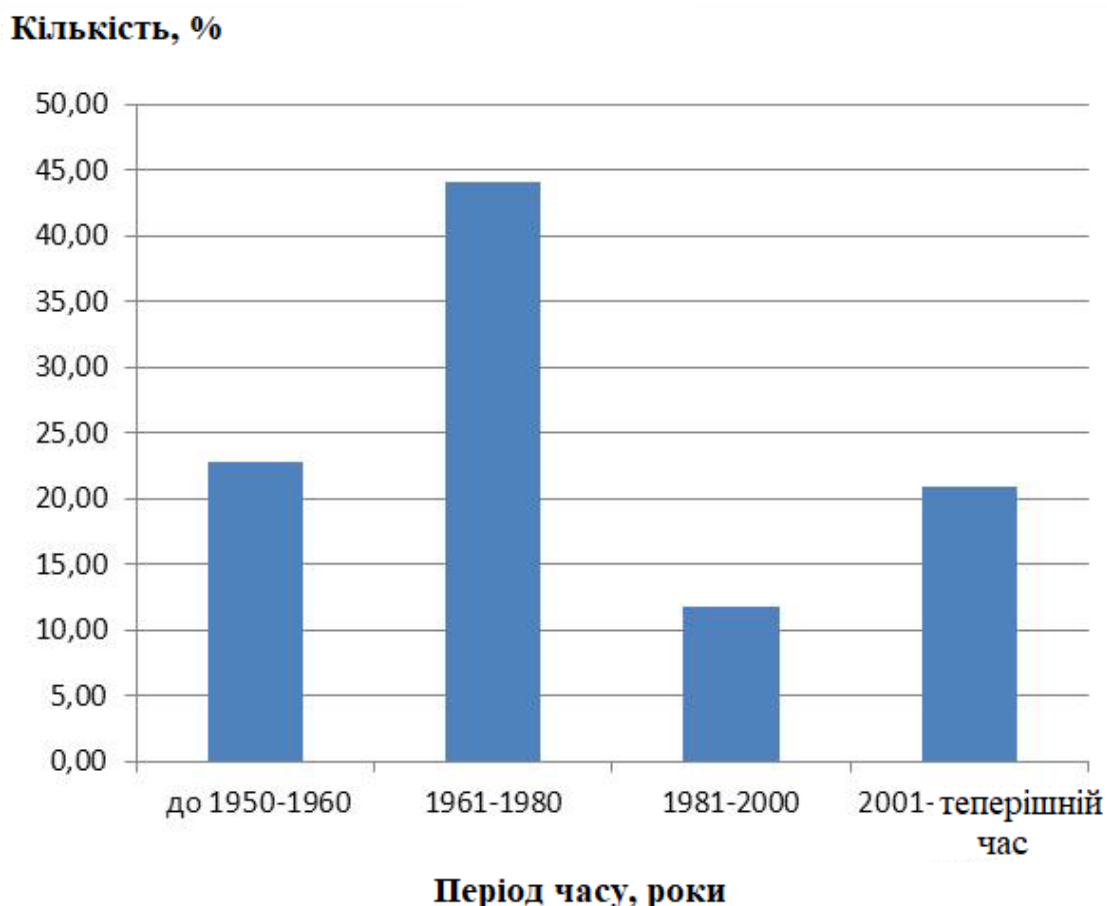
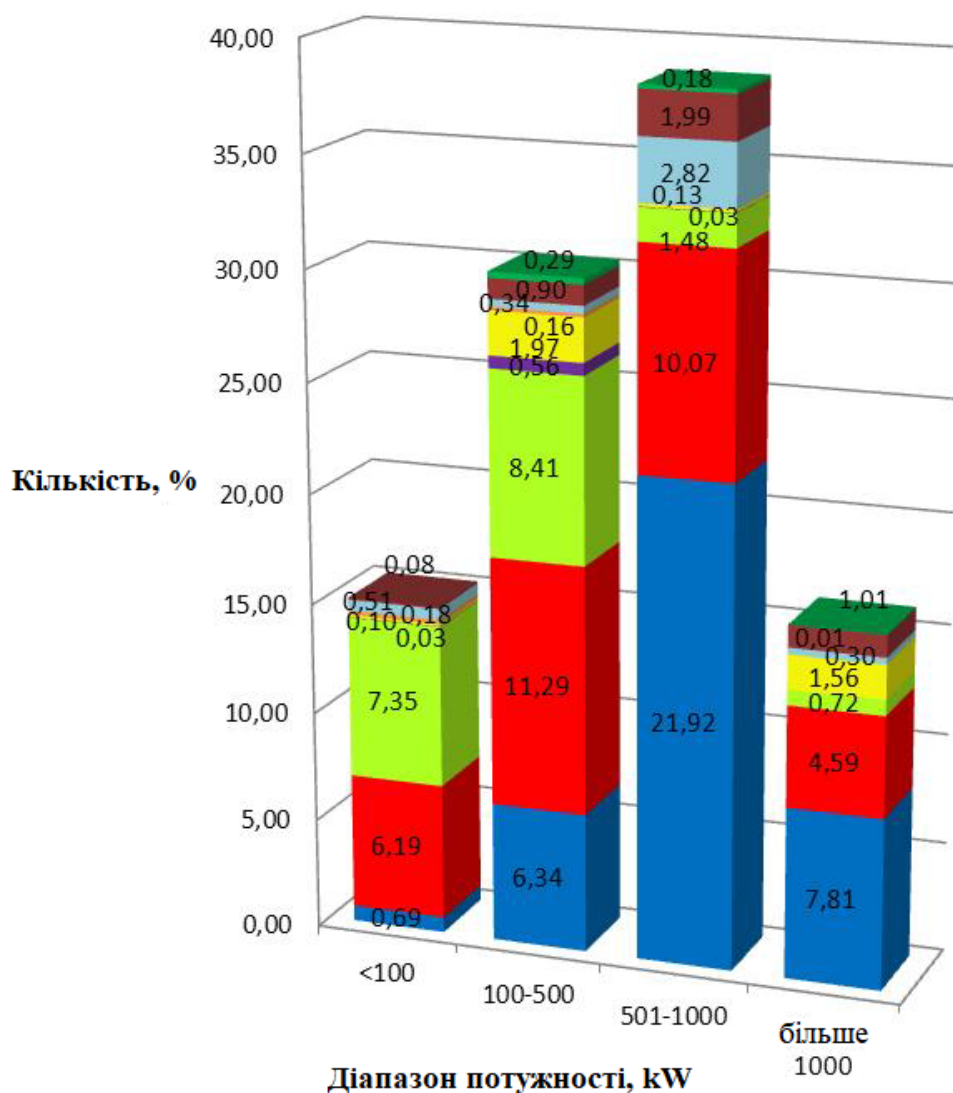


Рисунок 2 – Аналіз кількості маневрових тепловозів за часом їх побудови

Якщо аналізувати за типом передачі то перше місце, як показано на (рис. 4), в країнах Європейського Союзу займають маневрові тепловози з гідروпередачею (DH).

Друге місце займають маневрові тепловози з електропередачею (DE + AE), і уже на третьому місці маневрові тепловози з механічною передачею (DM). Слід

відзначити, що переважна кількість маневрових тепловозів, починаючи з 2000 р. обладнані гідропередачею.



	<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

Рисунок 3 – Аналіз кількості маневрових тепловозів країн ЄС відповідно до їх потужностей

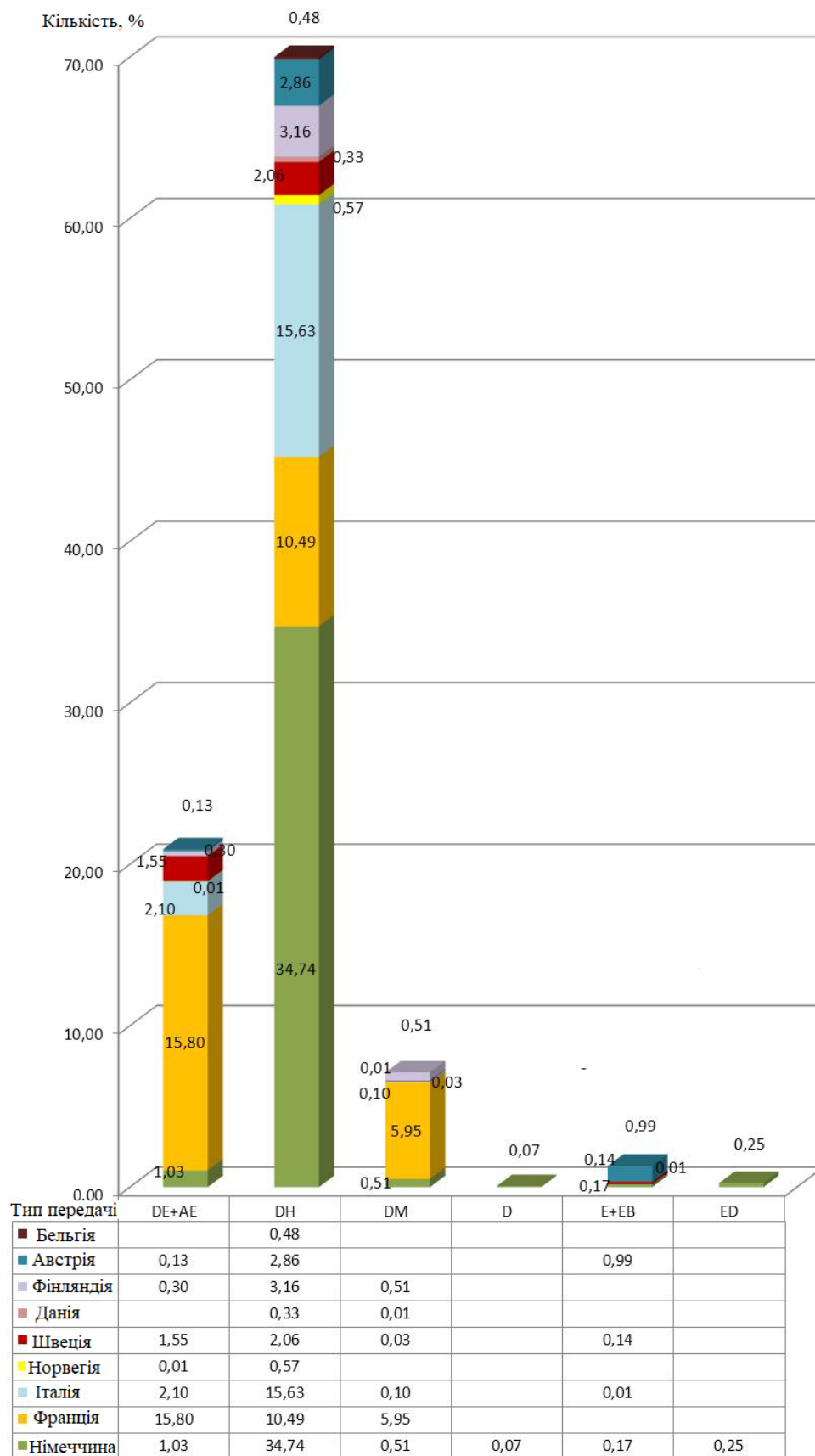


Рисунок 4 – Аналіз кількості маневрових тепловозів країн ЄС за типами передачі

За останні роки у залізничних термінах з'явився термін «Гібридний локомотив». Гібридними називаються локомотиви, які мають енергетичну установку, де передбачається поєднання двох або більше різних принципів дії, або застосовується функціональне дублювання, що передбачає використання різного роду джерел енергії. Гібридною вважається система, якщо у ній передбачена додаткова опція для виконання однієї і тієї ж функції [4].

В літературі [5] відзначено, що канадська компанія Rail Power technologies Corp розробила нові маневрові локомотиви, в яких дизель-генераторні установки потужністю 224 кВт витіснили малооборотні дизельні двигуни потужністю до 1500 кВт. В такому гібридному локомотиві дизель-генераторна установка працює тільки на підзарядку потужної свинцево-кислотної акумуляторної батареї з великим ресурсом.

Модель, відому під назвою Green Kid було створено у США. Маючи таку модель було прийнято рішення про будівництво великого маневрового локомотива під назвою Green Coat [6]. Принцип роботи такого локомотива передбачав живлення тягових електродвигунів акумуляторними батареями, а вже вони заряджалися від дизель-генераторної установки невеликої потужності, яка працює на дизельному паливі.

Свого часу модель гібридного локомотива було розроблено інженерами німецької філії концерну Alstom. Принцип роботи якого полягав у наступному: для приведення локомотива в рух використовувався електродвигун, який живився від акумулятора. Під час роботи локомотива, коли напруга на клеммах акумулятора падає нижче певного рівня, в роботу включається дизель-генератор і заряджає його. В умовах коли необхідні максимальні навантаження і акумулятор і дизель-генераторна установка можуть працювати одночасно [5].

Згодом даною компанією було розроблено сімейство гібридних локомотивів НЗ що складається з чотирьох типів: перший – робота локомотива відбувається тільки від акумуляторних батарей; другий – гібридний локомотив потужністю 700 кВт; третій – локомотив потужністю 700 кВт але з двома

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						12
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

дизелями; четвертий – локомотив потужністю 1000 кВт в складі якого є тільки один дизель [7].

Використання даних локомотивів на думку авторів призведе до покращення екологічних вимог; можливості реалізації максимальної швидкості руху 100 км/год.; можливості проходження мінімального радіусу кривої 60 м; максимальної продуктивності; покращення ергономічних умов в кабіні машиніста; меншої витрати дизельного палива. Отже, покращення вказаних показників відображає переваги використання таких локомотивів в експлуатації у порівнянні з існуючими [8].

Ще одними гібридним локомотивом з комбінованою силовою установкою є маневровий тепловоз ЛГМ1. Рух вказаного локомотива відбувається за рахунок спільної роботи тягових акумуляторних батарей і дизель-генераторної установки. Вказаний локомотив має електричну передачу змінно-постійного струму та призначений для виконання маневрової роботи на підприємствах залізничного та промислового транспорту з можливістю експлуатації на коліях шириною 1520 мм [5].

Згодом почали свою експлуатацію двухдизельні гібридні тепловози, які замість одного дизель-генератора використовують два, проте сумарна потужність залишається однаковою. Такий факт є цілком зрозумілий, оскільки при маневрових роботах коли не потрібно значної потужності буде працювати одна дизель-генераторна установка, а коли потрібно вийти на максимальні потужності в спільну роботу включається друга дизель-генераторна установка.

На даний час створено трьохдизельний гібридний тепловоз, де крім двох основних дизель-генераторів є ще третій – допоміжний. Допоміжний дизель-генератор розрахований на живлення низьковольтних кіл, а саме кіл управління, освітлення, опалення та приводу компресора [9]. Також допоміжний дизель-генератор використовується для обігріву основних дизелів під час їх зупинки у роботі.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						13
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Сімейство гібридних локомотивів N-Viro Motive, які експлуатуються з двома або трьома дизель-генераторними установками було спроектовано за запущено в експлуатацію компанією National Railway Equipment (NRE). Потужність одної дизель-генераторної установки становить 500 кВт. З трьома дизель-генераторними установками був розроблений гібридний маневровий тепловоз Co Generation корпорацією Brookville Equipment (BE). Сумарна потужність трьох дизель-генераторних установок становить 1500 кВт. Гібридний тепловоз Co Generation відрізняється низькою питомою ефективною витратою палива і відповідає жорстким вимогам з охорони навколишнього середовища. Наявність декількох силових агрегатів дозволяє реалізувати принцип «потужність за потребою» і виключити її непродуктивне використання [10].

Не менш цікавими є гібридні багатодизельні тепловози MP21B MPI, тепловози серії 3GS-21B, гібридні тепловози «CoGeneration», RP20BH з можливістю використання рекуперативного гальмування, Terra Nova [11] та ін.). Експлуатація зазначених тепловозів дозволила встановити, що використання декількох дизель-генераторних установок дозволяє в залежності від режиму роботи економити від 15% до 27% палива та значно знизити шум при виконанні маневровій роботі, зменшити до 50% емісії CO₂, скоротити до 80% шкідливі викиди в атмосферу.

Гібридний локомотив серії BB 63413 було створено та введено в експлуатацію у Франції в рамках проекту Plathée. Його експлуатація показала значну економію палива при виконанні маневрової роботи, яка становила до 40 % у порівнянні з традиційним тепловозом, а в режимі холостого ходу до 86 % [12].

Використання літій-іонно акумуляторної батареї на гібридних маневрових тепловозах серії HD300 дозволило отримати економію палива до 36 % в порівнянні з традиційними маневровими тепловозами, які мають електричну передачу та знизити викиди азоту на 61 %. Дані тепловози, які обладнані дизелем потужністю 242 кВт були введені в експлуатацію компанією Japan Freight Railway. Що стосується літій-іонно акумуляторних батарей, то у них номінальна

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						14
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

енергоємність становить 67,4 кВт-год. В якості тягових двигунів використані трифазні синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів [12].

Компанією «Трансмашхолдинг» було спроектовано з використанням двох дизель-генераторів і синхронного тягового генератора тепловоз ТЕМ33. Поставлені дизеля фірми Caterpillar серії С18 мають сумарну потужність 2х571 кВт. Особливостями тепловозу ТЕМ33 є те, що він дозволяє максимально ефективно регулювати потужністю, значно економити витрати палива, уникати понаднормативного зносу деталей силової установки, значно скоротити шкідливі викиди в навколишнє середовище. Використання на тепловозі двох дизелів, дозволить при меншій потужності використовувати один дизель, і навпаки при більшій потужності експлуатувати зазначений локомотив з двома спільно спрацюючими дизелями. В загальному тепловоз призначений для виконання маневрової та вивізної роботи на залізничних підприємствах та підприємствах промислового транспорту на коліях шириною 1520 мм [13].

Використання гібридного тепловоза ТЕМ35 дозволяє при однакових потужностях у порівнянні з іншими серійними тепловозами знизити витрату палива та витрати на його технічне обслуговування, бути більш екологічним. Саме під час гальмувань, зупинок і розгону тепловоза його робота є найбільш ефективною. Використання сучасних накопичувачів енергії, в якості яких застосовані електрохімічні конденсатори було зроблено відповідно до проекту БМЗ-ТЕМ35. Гібридний маневровий тепловоз ТЕМ35 обладнаний інтелектуальною векторною системою управління тяговим електроприводом і накопичувачами енергії. Під час руху гібридного маневрового тепловоза енергія від дизель-генератора потужністю 800 кВт поступає на всі шість асинхронних двигуна потужністю 180 кВт кожен і конденсатори. А коли відбувається процес гальмування частина енергії передається в накопичувальні конденсатори – відбувається процес рекуперації.

Отже, саме векторна система управління забезпечує передачу енергії дизель-генераторної установки в накопичувач і до двигунів, а також повернення

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						15
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

рекуперації в накопичувач.

Перевагами зазначеної системи є:

- збільшення ресурсу роботи колісних пар в півтора рази;
- збільшення надійності і довговічності роботи накопичувачів;
- досягнення сучасних стандартів автоматизації управління тепловозом, а також діагностики і тестування;
- зменшення питомих витрат енергії на тягу на 40-50%.

Також на даний час розробляються проекти гібридних тепловозів, в яких для економічної та екологічної роботи використовуються накопичувальні акумуляторні батареї [14].

Розглянемо, які іноваційні рішення та технології використані на даних тепловозах:

- регулятори, які виконані на IGBT-транзисторі використовуються для управління тяговими двигунами постійного струму;
- системи управління тепловозом, тяга та гальмування об'єднані в одну локальну мережу управління. Використання системи GPRS, Wi-Fi та радіоканалу дозволяє здійснювати дистанційне керування тепловозом;
- використовується центральний мікропроцесорний пристрій керування тепловозом та інтелектуальні пульти управління;
- особливістю компресора з системою плавного пуску і вентилятора охолодження тягових двигунів є можливість лінійного регулювання кількості охолоджуючого повітря;
- наявна система віддаленого контролю, збору та зберігання інформації, що дозволяє оперативно відслідковувати за експлуатацією локомотива та визначати його несправності в процесі експлуатації.

Також було створено двухдизельний маневрово-вивізний тепловоз з електричною передачею ТЕМ14, експлуатація якого передбачає економію палива близько 20%. Оскільки на даному тепловозі використовується модульне виконання основних конструктивних вузлів, то вказана особливість забезпечує

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						16
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

достатню зручність в обслуговуванні та ремонті тепловоза [15].

Модульна архітектура використовувалась при проектуванні та виробництві гібридних тепловозів з асинхронним приводом TEM9H Sinara Hybrid. Даний асинхронний привід включає значну кількість інноваційних технічних рішень в конструкції. Одними з основних модулів, які використовуються на тепловозі є дизель-генераторний модуль, модуль підготовки стисненого повітря, модуль перетворювачів і накопичувачів енергії. В конструкції гібридного локомотива присутні літій-залізо-фосфатні акумулятори і суперконденсатори, які використовуються для зберігання електричної енергії. Також не менш важливою особливістю тепловоза є те, що він оснащений асинхронним тяговим приводом з векторним регулюванням моменту на валу двигунів. Використання активних накопичувачів енергії дозволяє підтримувати роботу гібридного локомотива під час його зупинки протягом 4 годин. Використання енергії суперконденсаторів дозволяє здійснювати холодний пуск двигуна.

Також, використовуючи вітчизняний маневровий тепловоз ЧМЕЗ було проведено його модернізацію, шляхом використання на ньому декількох дизелів. Метою розробки такого гібридного локомотива було зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище та як наслідок покращення екологічної ситуації та зменшити витрати палива. Економія палива на такому локомотиві відбувається за рахунок того, що в режимі холостого ходу на тепловозі працює дизель-генератор малої потужності. Саме він забезпечує прогрів основних дизелів після тривалих зупинок, заряд акумуляторної батареї, роботу компресорної установки, обігрів кабіни управління і роботу мікропроцесорної системи управління [16]. При невеликих навантаженнях включений в роботу тільки один з дизелів потужністю 478 кВт і тільки при підвищенні навантаження (з 4 позиції контролера) підключається третій дизель-генератор [13].

На даний момент на перше місце серед вимог споживачів залізничної техніки виходить якість тепловозів з покращеними експлуатаційними характеристиками і доступна вартість [17]. В умовах зростаючої конкуренції, що

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						17
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

вимагає підвищення рівня автономних тепловозів задоволення вимог споживачів залізничної техніки можливо на основі науково обґрунтованих рішень [18].

Отже, проектування та виробництво гібридних маневрових тепловозів дозволяє використовуючи рекуперацію та декілька спільнопрацюючих дизелів значно зменшити витрату палива [19], що сприятиме покращенню екологічної ситуації та виконанню жорстких екологічних вимог та як наслідок отримання значного економічного ефекту, зниження шумового забруднення і вібрацій, збільшення надійності [20-22] та ін.

Для того, щоб оцінити енергоефективність та паливну економічність гібридного маневрового тепловоза необхідно вирішити комплекс задач, які пов'язані з конструктивними особливостями, джерелом енергії, проектуванням алгоритмів керування силовою установкою при наявності додаткових джерел енергії, які дозволяють у певні моменти забезпечити раціональні режими експлуатації тепловоза в характерних умовах.

Оскільки на даний час відсутній єдиний найбільш економічний варіант гібридного локомотива, то процес пошуку раціональних варіантів все ще триває та потребує подальших наукових досліджень в області моделювання маневрової роботи, вивчення факторів, що найбільш впливають на витрату палива у процесі експлуатації гібридного локомотива та проектування альтернативного виду автономного рухомого складу.

Конструктори, у своїй роботі, при створенні гібридних маневрових тепловозів завжди прагнуть отримати наступні ефекти:

- при створенні сили тяги максимально можливо використовувати створену енергію;
- оскільки на допоміжні потреби витрачається значна потужність локомотива, шукати шляхи до її зниження;
- зниження витрат на придбання пально-мастильних матеріалів;
- зниження витрат на технічне обслуговування і ремонти всіх видів за весь термін служби тепловоза;

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						18
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

- скорочення терміну окупності;
- раціональне співвідношення ціна-якість;
- забезпечити високі екологічні та ергономічні якості гібридного локомотива, які відповідатимуть нормам України та країн ЄС.

Значна кількість гібридних маневрових тепловозів значною мірою пов'язана з тим, що основна їх робота полягає у виконанні маневрової та вивізної роботи та передбачає виконання безлічі видів різноманітних операцій.

Оскільки, експлуатація маневрових тепловозів характеризується тим, що вони значний час працюють на малих навантаженнях, в режимі холостого ходу, перехідних і часткових режимах. Їх робота відбувається на невеликих ділянках колії, при наявності значної кількості 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. Ці експлуатаційні особливості призводять до необхідності значної кількості перемикачів позицій контролера машиніста і реверсування тепловоза зі стрибкоподібними збільшеннями або зменшеннями навантаження, що відповідно впливає на режими роботи та паливну економічність маневрових тепловозів в процесі їх експлуатації.

Отже, враховуючи описані вище причини моделювання процесу виконання маневрової роботи при різних експлуатаційних чинниках є досить складним завданням та відрізняється великою трудомісткістю, що в свою чергу ускладнює правильний вибір конструкції сучасних гібридних маневрових тепловозів.

1.2. Аналіз методик розрахунку енергетичної ефективності роботи маневрових тепловозів

Розробці методів оцінки показників роботи маневрових тепловозів присвячені роботи ряду вчених і організацій.

У роботі [23] наведено методику визначення тягово-енергетичних показників, в якій пропонується враховувати витрату палива тепловозом на

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		19

кожній позиції контролера за графіком питомої (віднесеного на одиницю реалізованої дотичної потужності) витрати палива на розгін в залежності від швидкості з урахуванням зміни ККД передачі тепловоза або із залежності питомої витрати палива від потужності і частоти обертання валу двигуна. Витрата палива на рушення складу з місця та розгін до заданої швидкості пропонується розраховувати для кожного відрізка колії за час по середній дотичній потужності на цьому відрізку, з урахуванням ККД передачі і по полю питомих витрат палива. Розрахунок маневрових режимів запропоновано виконувати виходячи з розрахунку окремих маневрових пересувань - піврейс і їх тривалості. Недоліками даної методики є:

- витрата палива в період розгону визначається в залежності від часу на переклад рукоятки контролера з початкового, в крайнє робоче положення, без урахування впливу перехідних процесів при перемиканні з позиції на позицію;

- при наявності паспортних даних витрати палива на кожній позиції контролера потрібна побудова графіка питомої витрати палива на розгін в залежності від швидкості руху або від потужності і частоти обертання валу двигуна, а при відсутності графіків питомої витрати за основу визначення питомих витрат палива приймаються паспортні характеристики дизеля. Графічний спосіб ускладнює досить точне визначення сили тяги, так як інтервали шляху малі, а зміни швидкості за час руху по інтервалу незначні;

- вплив перехідних процесів при перемиканні контролера на паливну економічність враховується за допомогою коефіцієнта, що розраховується на підставі напівемпіричних даних, спосіб отримання яких не вказується, що не обумовлює точність розрахунків і не відображає реального процесу.

У «Методиці проведення тягових розрахунків» визначено порядок тягових розрахунків для маневрової роботи за координатами і довжиною колії маневрових напіврейсів, встановлені основні нормативи, прийняті для розрахунку, а також описаний розрахунок витрат дизельного палива на виконання маневрової операції виходячи з розрахунку витрат палива на кожному

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		20

інтервалі шляху в умовах режиму тяги по статичним характеристикам, і окремо в умовах режиму вибігу і гальмування. Результати розрахунку підсумовуються. У режимі тяги запропоновано визначати витрату палива по експериментальним залежностям питомих витрат, отриманим на стаціонарних режимах роботи при реостатних випробуваннях або по залежностям витрат віднесених до одиниці часу роботи маневрового тепловоза в режимі тяги. На холостому ході і в режимі гальмування витрату палива визначають по залежностям витрат, віднесених до одиниці часу роботи маневрового тепловоза при вибігу і гальмуванні. У порівняльних розрахунках тимчасові питомі витрати палива запропоновано визначати за усередненими залежностям від дотичній потужності тепловоза.

Питання енергетичної ефективності тепловозів в експлуатації було широко розглянуто у роботі [24] де сформульовані принципи та науково обгрунтовані методи оцінки технічного стану тепловозів за ознакою зміни номінального рівня енергетичної ефективності. Розроблено та використовується система точкових інтервальних імовірнісних оцінок підсумкової (за один місяць) перевитрати палива тепловозами на тягу поїздів, що характеризує енергетичну ефективність, як окремої серії, так і експлуатованого парку в цілому. Проведено системний аналіз енергетичної ефективності парку тепловозів декількох серій, що експлуатуються на мережі залізниць Росії, розроблена і впроваджена методика послідовного аналізу енергетичної ефективності тепловоза за ознакою зміни накопиченої суми відхилень від номінальної витрати палива, приведеної до однієї поїздки. Встановлено, що енергетична ефективність парку тепловозів характеризується частотою пуассонового потоку втрат і показовою інтенсивністю відновлень номінального рівня енергетичної ефективності.

Дана робота може бути використана для тепловозів, які знаходяться в експлуатації, але не може бути використана для оцінки ефективності на етапі проектування.

Обгрунтуванню вибору основних параметрів маневрових і промислових тепловозів з різними передачами з урахуванням умов експлуатації присвячена

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		21

робота [25], в процесі виконання якої були вирішені наступні завдання:

- проведено аналіз і порівняння технічних характеристик і питомих параметрів вітчизняних і закордонних маневрових і промислових тепловозів;
- розроблена математична модель руху промислово-маневрового тепловоза;
- визначена вартість життєвого циклу маневрових і промислових тепловозів;
- проведено техніко-економічне порівняння маневрових і промислових тепловозів.

У запропонованій математичній моделі руху промислово-маневрового тепловоза проводиться розрахунок показників роботи маневрового тепловоза тільки за один піврейс, а не за маневрову операцію в цілому, облік перехідних процесів в дизелі не описано.

У роботі [26] приведений аналіз робіт маневрових тепловозів та обґрунтована необхідність оцінки якості використання маневрового тепловоза, як за критерієм часу, так і за витратою палива.

Українськими вченими проведено аналіз існуючих методик в області дослідження режимів роботи маневрових тепловозів на сортувальній гірці [27]. На їхню думку, тягові характеристики, що представляють собою емпіричні залежності питомих прискорюючих сил від швидкості руху, лише частково враховують особливості перехідних режимів розгону маневрового складу, а реалізація конкретного режиму складу залежить від дій машиніста гіркового тепловоза. Були розглянуті два режими перемикання рукоятки контролера: максимальний і уповільнений. Рішення про застосування того чи іншого режиму перемикання контролера для окремої серії тепловоза пропонується приймати перед кожним піврейсом на підставі маси складу. У разі необхідності руху з встановленою швидкістю в момент її досягнення процес розгону завершується, а використовується при цьому режим тяги, в залежності від конкретних умов, замінюється вибігом. Так само обґрунтовано необхідність імітаційного

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		22

модельовання роботи маневрових тепловозів, за допомогою, якого вирішується широке коло науково-практичних завдань: визначення тривалості технологічних операцій, нормування витрат палива, оптимізація плану і поздовжнього профілю сортувальних гірок та ін. Це ще раз підкреслює зацікавленість вчених різних країн у вирішенні питань імітаційного модельовання для маневрової роботи і вказує на актуальність досліджень в даній області.

Особливо важливо правильно оцінювати експлуатаційну ефективність нового рухомого складу в залежності від внесених технічних удосконалень, якщо змінюється система управління агрегату, спосіб енергетичного забезпечення тяги, наприклад, застосовані гібридні тепловози, або дві-три силові установки замість однієї і ін. Тому зрозумілий інтерес фахівців до питань оцінки ефективності роботи тепловозів в експлуатаційній роботі. Найбільш часто для цих цілей застосовують метод статистичного аналізу режимів роботи в умовах експлуатації, коли підсумовується час роботи на окремих режимах, а потім по заводським характеристикам тепловоза або за характеристиками, отриманими в результаті паспортних випробувань в стаціонарних режимах, оцінюють показники роботи в експлуатації. Такий підхід прийнятний для попередньої оцінки показників роботи тепловоза при розробці технічних вимог на тепловоз, що призначений для певного виду роботи. Однак при цьому неможливо оцінити вплив фактичних тимчасових процесів в силовій установці на техніко-економічні показники роботи тепловоза в експлуатації, особливо це стосується маневрових тепловозів, у яких число перемикань режимів роботи може досягати більше 200 на годину.

Були спроби виправити цю ситуацію шляхом включення в розрахунок показників роботи коефіцієнтів [28-29]. Однак вибір таких коефіцієнтів досить складний. Доводиться вдаватися до емпіричних методів, наприклад, до порівняння розрахункових по режиму експлуатації показників з експериментальними даними, отриманими при стендових випробуваннях наявного тепловоза на тих же режимах. Оцінка показників проектного

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		23

тепловоза таким шляхом неможлива. Сьогодні існує інший підхід до вирішення цієї проблеми. Маючи досить детальну математичну модель для розрахунку показників роботи нового тепловоза, що включає процеси в реалізації тяги, в електропередачі, в силовій установці і т.д., можна моделювати реальні процеси, що відбуваються в тепловозі при виконанні маневрової операції на заданій реальній ділянці колії. Сучасна обчислювальна техніка дозволяє моделювати процеси, що відбуваються в тепловозі, при переміщенні його з будь-якого реального профілю практично необмеженої довжини. Є приклади застосування такого підходу [17; 30]. Недоліком цього методу є певна обмеженість висновків, пов'язана з конкретними особливостями ділянки.

У всіх вище описаних підходах не відображається, близький до реального, розрахунок витрати палива при перехідних процесах і його вплив на загальну витрату палива, а так само зміна витрати палива при виконанні маневрової роботи із застосуванням різних режимів управління тепловозом. Вище перераховані методики і імітаційні моделі не адаптовані для розрахунку показників використання нових гібридних тепловозів і не дозволяють прогнозувати ефективність застосування тих чи інших їх модифікацій в умовах експлуатації. Так само виключають можливість, визначення необхідного розподілу витрат енергії між джерелами і не дають можливості визначити раціональний алгоритм керування силовою установкою. Використовувати згадані методики можливо тільки для конкретних об'єктів і певних ділянок.

1.3 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.д., тобто режим роботи обумовлює особливості витрат палива при маневровій роботі. В цілому ці процеси носять стохастичний характер. Витрата палива на маневрові роботи становить помітну частину загальної витрати дизельного палива тепловозами.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						24
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

При виконанні маневрових пересувань тепловози працюють в основному на несталих режимах [31]. Для початку руху поїздів і їх розгону потрібно велику зчіпну вагу і великі тягові зусилля, що реалізуються короткочасно при розгонах. В той же час маневровим тепловозам необхідна велика потужність для пересування складів 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 висуваються вимоги про високу експлуатаційну економічність та надійність [32].

Тільки на основі аналізу характеру роботи і умов експлуатації можливо визначити яку модель тепловоза доцільно використовувати при певному виді маневрової роботи. Умови виконання маневрової роботи визначають інтенсивність використання маневрових тепловозів, зміна параметрів їх енергетичного ланцюга, режими роботи і, отже, основні технічні вимоги до них [33-35].

На основі аналізу маневрової роботи можна виділити наступні основні маневрові операції для автономного маневрового тепловоза [36]:

1. Маневрова робота тепловоза на станції:

1.1 Гіркова робота;

1.2 Сортування вагонів на станціях, не обладнаних гірками;

1.3 Технологічна операція (подача – прибирання вагонів до місця навантаження - вивантаження, до місця відстою, на мийку, перестановка і т.д.);

2. Одиночне проходження маневрового тепловоза (вихід з депо, захід у депо і ін.);

3. Передавальна робота маневрового тепловоза;

4. Вивізна робота маневрового тепловоза;

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

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

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		25

$$Q_j = \sum_{i>1}^n P_i \quad (1)$$

де Q_j – маневрова операція j -го виду (наприклад, сукупність напівресів при виконанні гіркової роботи);

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

n – кількість напіврейсів.

На (рис. 5) наведені середньостатистичні значення параметрів роботи тепловозів ЧМЕЗ в різних умовах експлуатації.

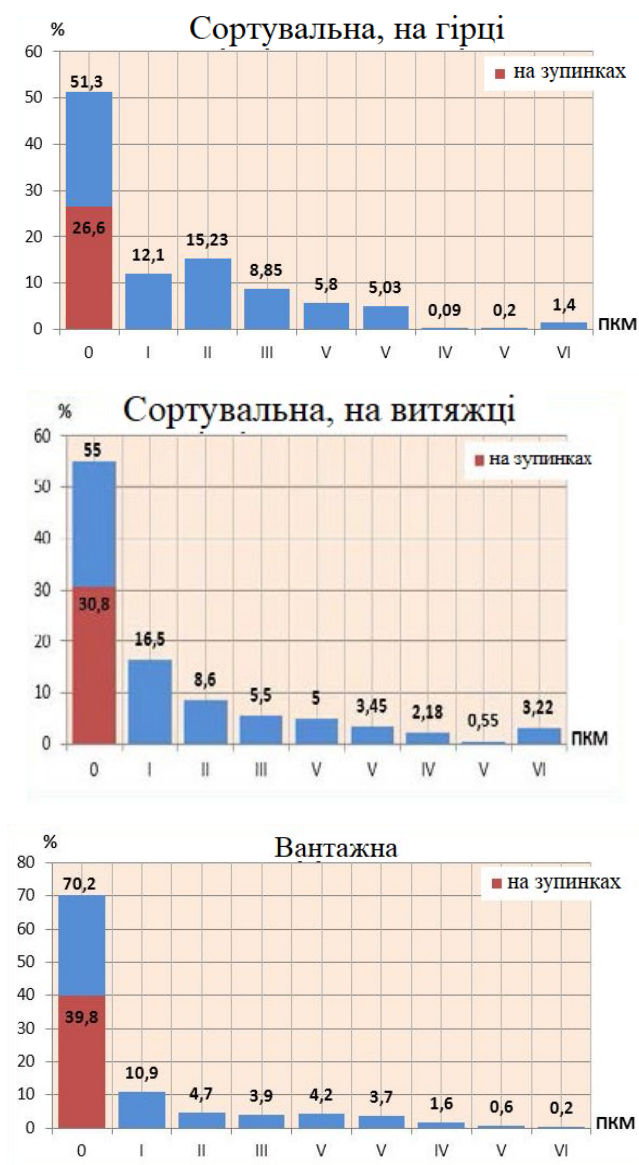


Рисунок 5 – Середньостатистичні значення параметрів роботи тепловозів ЧМЕЗ в різних умовах експлуатації

Маневрові тепловози, як правило, працюють в зоні низьких швидкостей, недовикористовують потужність силових агрегатів, значну частину часу працюють в перехідних режимах дизеля і передачі.

Висновки до розділу 1

– розглянуто актуальність питання зменшення витрат дизельного палива маневровими тепловозами шляхом використовуючи енергозберігаючих технологій у відповідності екологічним вимогам;

– проаналізовано загальний експлуатаційний парк маневрових тепловозів провідних країн Європи;

– проведено аналіз основних режимів роботи маневрових тепловозів та розглянуто методи оцінки їх енергетичної ефективності.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						27
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ II. ВИМОГИ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ УКРАЇНИ ТА КРАЇН ЄС ЩОДО ВИКИДІВ ПАЛИВА В НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

2.1 Загальні відомості

У даній главі розглядається питання викидів залізничного транспорту, а саме тягового рухомого складу. Залізничні локомотиви поділяються на три типи: дизельні тепловози, електровози і дуже рідко паровози. Дизельні тепловози використовують тільки дизельні двигуни для тягового зусилля або в поєднанні з вбудованим перетворювачем або генератором для вироблення електричної енергії, для роботи тягових електродвигунів (дизель-електричні).

Викиди від залізничних перевезень включають спалювання палива для руху поїздів. Найбільш важливими забруднювачами від залізничного транспорту є SO_2 , NO_x , CO_2 і тверді частинки і більш дрібні, але також певне значення мають викиди CO , НМЛОС (неметанових органічних сполук) і деяких металів.

Дизельні двигуни є головним видом силового обладнання, що використовується в залізничній промисловості. Двигуни можуть встановлюватися на трьох різних видах силових установок, а саме:

маневрові локомотиви - дані локомотиви використовуються для здійснення маневрової роботи (пересування вагонів). Вони оснащені дизельними двигунами, вихідна потужність яких, зазвичай становить від 200 до 2000 к.с.

автодрезини - автодрезини в основному використовуються для пересування на короткі відстані. Вони оснащені дизельними двигунами, вихідна потужність яких становить приблизно 150-1000 кВт;

локомотиви для міжміських перевезень - локомотиви використовуються для перевезення вантажів і пасажирів на великі відстані. Вони оснащені дизельними двигунами, вихідна потужність яких становить приблизно 400-4000 кВт.

Є два види палива, що використовується в дизельних двигунах на залізничному транспорті. Перший - це легке дизельне паливо, яке має високу щільність і вміст сірки.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		28

Інший вид - це стандартне дизельне паливо, подібне до того, яке використовується для дорожнього транспорту. Паливо має низьку щільність і вміст сірки.

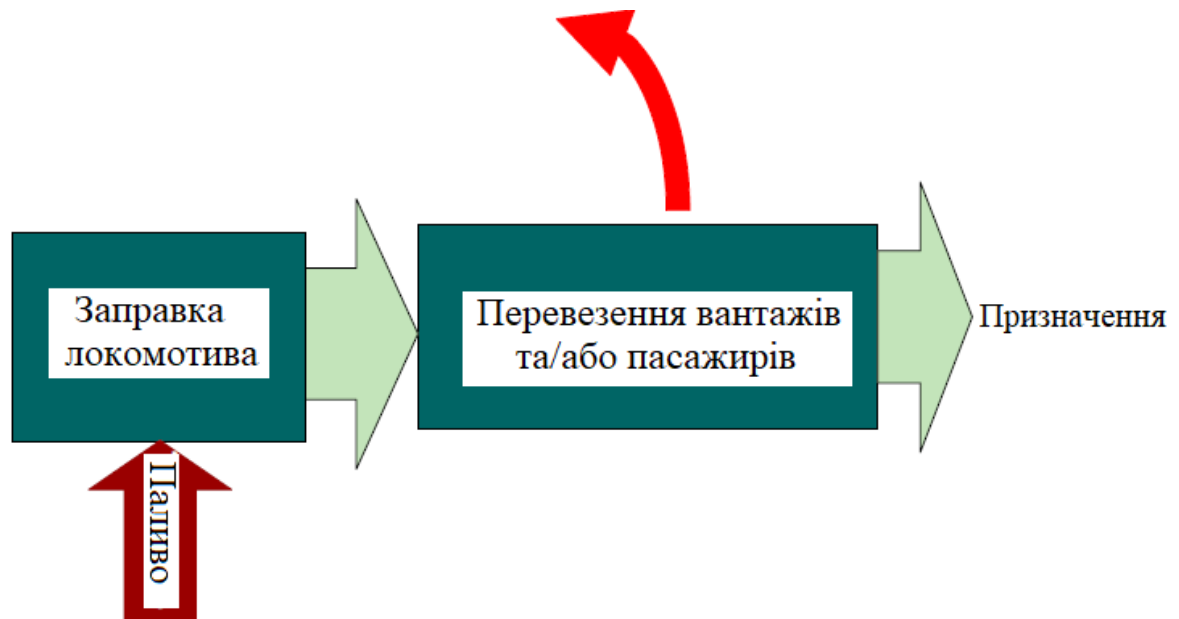


Рисунок 6 – Технологічна схема розподілу викидів, що утворюються при горінні, починаючи із залізничного транспорту і закінчуючи пересувними джерелами

Детальніше характеристики палива будуть розглянуті пізніше.

Викиди під час залізничних перевезень утворюються при спалюванні палива в двигунах внутрішнього згоряння. Отже, основними забруднювачами є забруднювачі, які утворюються від дизельних двигунів, подібних до тих, які використовуються для дорожньої техніки. Серед основних: CO_2 , NO_x , а також невелика кількість CO та вуглеводнів з SO_x і важкі метали, які утворюються через вміст сірки і металів в паливі, відповідно.

Проте, газоподібні викиди можна регулювати за допомогою двох механізмів: регулювання технології спалювання, яку можна поєднувати з газоочисткою, і регулювання якості палива. Обидва методи використовуються на залізничному транспорті.

Є ряд технічних технологій регулювання, в тому числі рециркуляція вихлопних газів (EGR) і селективне каталітичне відновлення (SCR), для

регулювання викидів NO_x і сажеві фільтри дизельних двигунів (DPF) для регулювання викидів ТЧ. Дані технології найбільш підходять для дизельних двигунів, які використовуються на автомобільній техніці (особливо на транспортних засобах великої вантажопідйомності). Проте, поступово вони адаптовуються до залізничного транспорту для відповідності обов'язковим стандартам щодо викидів. В Європі викиди від залізничного транспорту регулюються директивами по позашляховій пересувній техніці (NRMM). Першим рівнем, який використовується на залізничному транспорті, є Рівень IIIA (Директива 2004/26/EC) з локомотивами, які були виключені з ранньої версії директив NRMM (наприклад, 97/68/EC). Директива ЄС 2004/26/EC проводить відмінність між двигунами, які використовуються на дрезинах і локомотивами, а також дає поетапні граничні норми по NO_x , ТЧ, СО і вуглеводнів, відомі як Рівень IIIA і Рівень IIIB. Дати по впровадженню даних граничних норм наведені в (табл. 1).

Таблиця 1 – Дати по впровадженню Директиви ЄС 2004/26/EC відповідно до типу двигуна (P = корисна потужність двигуна).

Рухомий склад	Рівень IIIA	Рівень IIIB
Дрезини, $P > 130 \text{ кВт}$	01.01.2006	01.01.2012
Локомотиви $130 \text{ кВт} < P < 560 \text{ кВт}$	01.01.2006	01.01.2012
Локомотиви $560 \text{ кВт} < P$	01.01.2008	01.01.2012

Інші граничні норми, відомі як Рівень IV, вказані для деякого обладнання NRMM, але все ще обговорюються для двигунів, які використовуються на залізничному транспорті.

Ресурс більшості локомотивів - приблизно 30 років. На деяких з них, особливо дрезинах, доводиться часто міняти двигуни.

Якість дизельного палива для позашляхової техніки також регулюється. У Європі вміст сірки в паливі, що використовується на позашляховій техніці, регулюється директивою ЄС (1999/32/EC) щодо вмісту сірки в рідкому паливі

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						30
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

(SCLF). Граничні норми щодо вмісту сірки в рідкому паливі по масі складають менше 0,2% від 2000 року і 0,1% від 2008 р. Проте, у багатьох країнах стандартне дизельне паливо для дорожнього транспорту використовується і на залізничному транспорті, як правило. Дизельне паливо дорожнього транспорту регулюється Директивою 2003/17/ЕС (з поправками Директиви 98/70/ЕС), яка визначає максимальну граничну норму сірки 50 частин на мільйон (по масі) від 2005 року, яка знизилася до 10 частин на мільйон (по масі) від 2009 р. Перевізники такі як DB в Німеччині або Swedish Railways використовують <10 частин на мільйон дизеля на своєму транспорті. Паливо з низьким вмістом сірки в будь-якому випадку обов'язково має піддаватися сучасній системі контролю викидів, зазначеної в Директиві 2004/26/ЕС.

2.2 Закордонний досвід правового регулювання викидів залізничного рухомого складу

У 1998 році в США на виконання положень глави 85 розділу 42 Кодексу законів США (United State Code, USC) «Контроль і запобігання забрудненню атмосферного повітря» (42 U.S.C. 7401-7671q) і Закону про чисте повітря в США був прийнятий стандарт, що регулює вимоги до вихлопних газів тепловозів. Стандарт є частиною програми, основною метою якої є значне скорочення викидів дизельних двигунів і заснований переважно на застосуванні високоефективних технологій зниження викидів. Стандарт не обмежує виробників жорсткими вимогами до конструкції обладнання, а лише встановлює норми якості, яким повинна відповідати продукція. Вимоги закону були розроблені Агентством з охорони навколишнього середовища США (АООС США) і сформульовані в статті 92 розділу 40 Федеральних правил (Code of Federal Regulation, CFR) [37].

У 2003 р. агентство приступило до роботи над новим тепловозним регламентом. Вона була завершена навесні 2008 р., і в липні того ж року в розділі 40 Федеральних правил (Code of Federal Regulation, CFR) з'явилася нова

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		31

стаття 1033. Стандарт поширюється на всі тепловози й тепловозні двигуни нового проєктування або експлуатовані, що мали капітальний ремонт. При цьому вимоги до вихлопних газів локомотивів залежать від року створення тепловоза або двигуна.

У статті 92 першої редакції документа були сформульовані три рівня вимог до вихлопних газів тепловозів: норми класу 0 (Tier 0) поширювалися на локомотиви, виготовлені з 1973 по 2001 р. і пройшли капітальний ремонт або модернізацію після 2002 року, а також на деякі нові тепловози, випущені в 2000 - 2001 рр.; норми класу 1 (Tier 1) - на нові тепловози випуску з 2002 по 2004 р.; класу 2 (Tier 2) - на тепловози 2005 і пізніших років випуску. Стаття 1033 додала до цих класів два нових - 3 і 4 (Tier 3 і 4), які стають обов'язковими для тепловозів побудови 2012 - 2015 років.

Стандарт передбачає обов'язкову сертифікацію тепловозів і тепловозних двигунів відповідно до класу і містить вимоги, що пред'являються до кожного з них. Стандарт регулює викид двигунами чотирьох видів: оксидів азоту (NO_x), різних твердих частинок (PM), монооксиду вуглецю (CO) і вуглеводнів (HC). Вимоги, що пред'являються стандартом, представлені в (табл. 2-3). Крім того, стандарт обумовлює вимоги до димності вихлопів (табл. 4).

Таблиця 2 – Вимоги стандарту 40CFR 1033 до емісії магістральних тепловозів

Рік виготовлення	Клас	Норма не більше г/к.с.·в годину			
		NO_x	PM	HC	CO
1973-1992	Клас 0	8,0 (10,9)	0,22 (0,30)	1,00 (1,36)	5,00 (6,8)
1993-2004	Клас 1	7,4 (10,1)	0,22 (0,30)	0,55 (0,75)	2,2 (2,99)
2005-2011	Клас 2	5,5 (7,5)	0,10 (0,14)	0,30 (0,41)	1,5 (2,0)
2012-2014	Клас 3	5,5	0,10	0,30	1,5

		(7,5)	(0,14)	(0,41)	(2,0)
2015 - ...	Клас 4	1,3 (1,8)	0,03 (0,04)	0,14 (0,19)	1,5 (2,0)

* – в дужках вказано значення в г/кВт·год.

Таблиця 3 – Вимоги стандарту 40CFR 1033 до емісії маневрових тепловозів

Рік виготовлення	Клас	Норма не більше г/к.с.·в годину			
		NO _x	PM	HC	CO
1973-2001	Клас 0	11,8 (16,0)	0,26 (0,35)	2,10 (2,85)	8,00 (10,9)
2002-2004	Клас 1	11,0 (15,0)	0,26 (0,35)	1,2 (1,63)	2,5 (3,4)
2005-2010	Клас 2	8,1 (11,0)	0,13 (0,18)	0,60 (0,82)	2,4 (3,3)
2011-2014	Клас 3	5,0 (6,8)	0,10 (0,14)	0,60 (0,82)	2,4 (3,3)
2015 - ...	Клас 4	1,3 (1,8)	0,03 (0,04)	0,14 (0,19)	2,4 (3,3)

* – в дужках вказано значення в г/кВт·год.

Таблиця 4 – Вимоги стандарту 40CFR 1033 до димності вихлопних газів тепловозів

Клас	Норма, не більше (% ослаблення світлового потоку)		
	Максимальна частота обертання	Прискорення, max 30 с.	Прискорення, max 3 с.
Клас 0	30	40	50
Клас 1	25	40	50
Клас 2 і вище	20	40	50

Крім вимог, що пред'являються до двигунів стандарт містить опис процедури сертифікації і, що дуже важливо, методи проведення випробувань і контролю, в тому числі вказані види палив для кожного класу, допустимі для проведення випробувань. При проведенні сертифікації враховується призначений термін служби обладнання. Контроль проводиться як при сертифікаційних випробуваннях, так і в процесі виробництва і експлуатації обладнання.

Також стандарт містить:

- основні вимоги до систем контролю емісії тепловозів;
- загальні вимоги до викиду газів картерів;
- загальні вимоги безпеки роботи систем двигуна;
- умови роботи двигунів, в яких повинні виконуватися вимоги;
- деякі вимоги до конструкції обладнання.

Велика увага приділяється проблемі контролю роботи обладнання на холостому ходу. Стандарт передбачає обов'язкове обладнання нових локомотивів або які пройшли капітальний ремонт системами автоматичного контролю пуску / зупинки двигуна. Максимально допустима тривалість роботи дизеля на холостому ходу, відповідно до стандарту, становить 30 хв. Наступний пуск двигуна допускається тільки в разі потреби з метою збереження працездатного стану, підзарядки акумуляторних батарей, створення необхідного запасу стисненого повітря для гальмівної системи або створення комфортних і безпечних умов роботи для локомотивних бригад. Крім того, всі нові двигуни повинні бути розраховані на можливість бути перезапущеними як мінімум шість разів за добу.

Основною і необхідною умовою ефективного застосування пристроїв додаткової нейтралізації вихлопних газів є використання дизельного палива зі зниженим вмістом сірки, яка знижує ефективність дії багатьох каталітичних пристроїв. Починаючи з червня 2007 року, відповідно до вимог АООС США вміст сірки в дизельному паливі, призначеному для тепловозних дизелів, не

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		34

повинно перевищувати 500 мільйонних часток (мд), а після червня 2012 року цей показник необхідно знизити до 15 мд. Варто, однак, зауважити, що вже зараз на тепловозах в США в більшості випадків використовується паливо вантажних автомобілів, що має вміст сірки менше 15 мд.

В якості вимог щодо забезпечення виконання положень стандарту передбачена відповідальність виробника, яка зобов'язана надати відповідні гарантії.

За оцінками АООС США виконання програми, передбаченої стандартом, дозволить до 2030 року домогтися скорочення щорічної емісії NO_x і РМ на 800 000 т і 27 000 т відповідно. Загальне зниження викидів, що очікується від реалізації положень стандарту, становить 90% для РМ і 80% для NO_x . Динаміка зниження емісії NO_x і РМ, очікувана АООС США за останніми оцінками, проведеним у 2008 році, представлена на (рис. 7-8) [38].

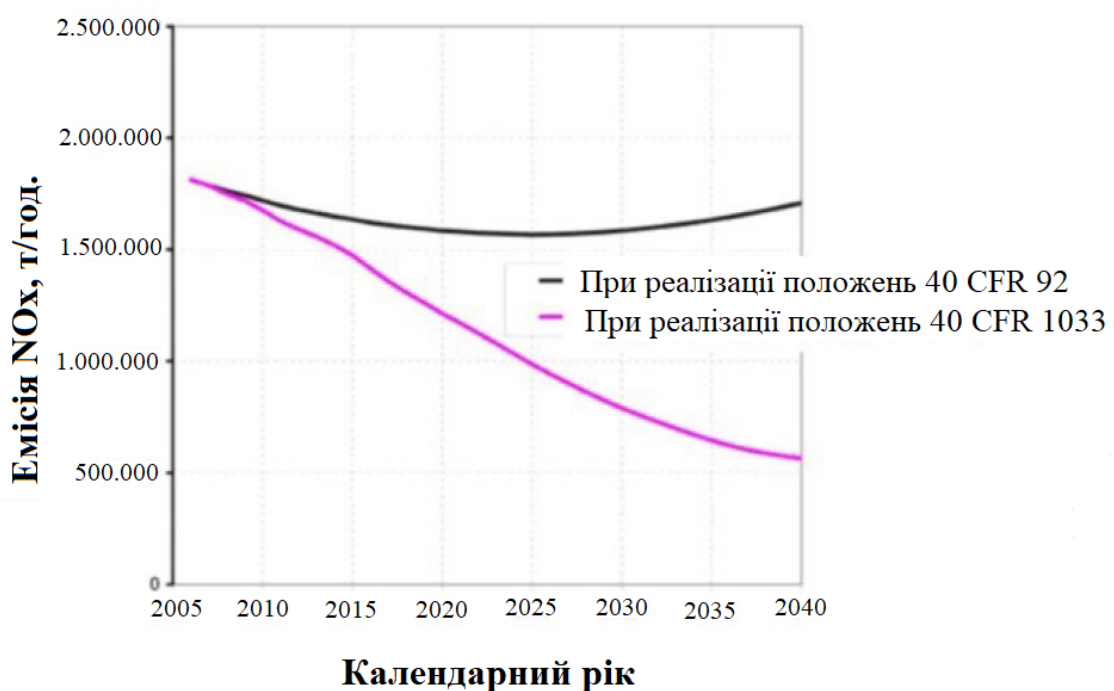


Рисунок 7 – Динаміка очікуваного зниження викидів NO_x

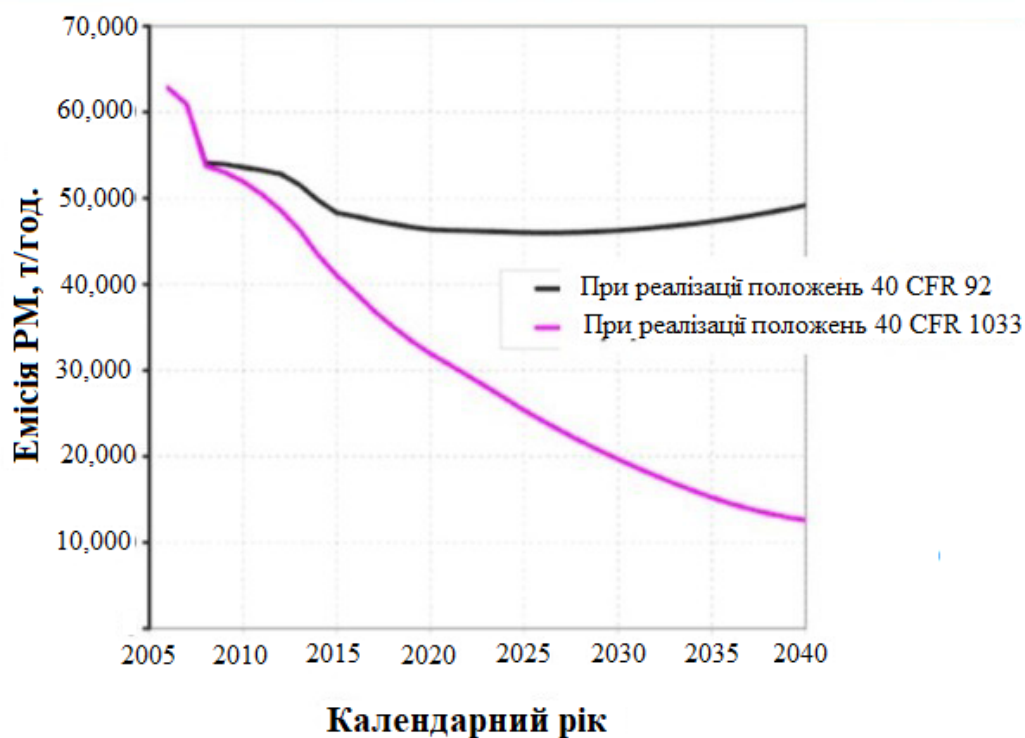


Рисунок 8 – Динаміка очікуваного зниження викидів $PM_{2.5}$
(частинок більше 2,5 мк в діаметрі)

Важливо відзначити, що всі норми і терміни, передбачені стандартом, були узгоджені з представниками промисловості, що забезпечує реалізацію встановлених заходів.

Європейський стандарт, що регулює викиди від залізничного транспорту: Директива 2004/26/ЄС, що є доповненням до Директиви 97/68/ЄС, що регламентує токсичність відпрацьованих газів позашляхових самохідних машин, багато в чому схожа зі стандартом США, тому що законодавчі органи Євросоюзу, США та Японії разом працюють над гармонізацією в світовому масштабі стандартів токсичності відпрацьованих газів двигунів, щоб прискорити і зробити однаковим їх розвиток і сертифікацію для виробників.

На основі директив Євросоюзу повинні бути створені національні закони.

Директива 2004/26/ЄС проводить відмінність між двигунами, використовуваними на локомотивах і автомотрисах, а також дає поетапні граничні норми по NO_x , PM , CO і HC , відомі як Рівень IIIA (Stage IIIA) і Рівень

IIIВ (Stage IIIВ). Зазначені норми представлені відповідно в (табл. 5-6). Відзначимо, в стандарті зазначено, що умови випробувань повинні відповідати реальним умовам роботи обладнання і включати в себе всі режими роботи двигуна, в тому числі роботу на холостому ході. Стандарт відображає докладний опис схеми випробувань. Стандарт також регламентує позначення терміну служби обладнання, для якого виробник гарантує дотримання даних вимог. Вимоги до димності стандартом не встановлені.

Таблиця 5 – Вимоги рівня IIIА Директиви 2004/26/ЄС до емісії тепловозів та дрезин

Категорія транспортного засобу, потужність	Норма, не більше (г/кВт·год.)			
	CO	HC+NO _x		PM
Дрезини, $P < 130$ кВт	3,5	4,0		0,2
Локомотиви $130 \text{ кВт} < P < 560 \text{ кВт}$	3,5	4,0		0,2
	CO	HC	NO _x	PM
Локомотиви $560 \text{ кВт} < P$	3,5	0,5	6,0	0,2
Локомотиви з двигунами робочим об'ємом більше 5 л/циліндр, $P > 2000$ кВт	3,5	0,4	7,4	0,2

Варто відзначити, що обидва стандарти формулюють вимоги, засновані на вже освоєних технологіях, таких як рециркуляція вихлопних газів (EGR) і селективне каталітичне відновлення (SCR) для регулювання викидів NO_x, сажові фільтри дизельних двигунів (DPF) для регулювання викидів PM.

Вміст сірки в паливі, що використовується на позашляховій техніці, в Європі регулюється Директивою: 1999/32/ЄС [39] щодо вмісту сірки в рідкому

паливі (SCLF). Граничні норми щодо вмісту сірки в рідкому паливі по масі складають менше 0,2% от 2000 року і 0,1% від 2008 р Проте, у багатьох країнах стандартне дизельне паливо для дорожнього транспорту використовується і на залізничному транспорті. Максимальна гранична норма сірки для дизельного палива дорожнього транспорту становить 50 частин на мільйон (по масі) від 2005 року, і 10 частин на мільйон (по масі) від 2009 р Паливо з низьким вмістом сірки в будь-якому випадку обов'язково має піддаватися сучасній системі контролю викидів, яка зазначена в Директиві 2004/26/ЄС.

Таблиця 6 – Вимоги рівня ІІВ Директиви 2004/26/ЄС до емісії тепловозів та дрезин

Категорія транспортного засобу, потужність	Норма, не більше (г/кВт·год.)			
	CO	HC+NO _x		PM
Локомотиви, 130 кВт < P	3,5	4,0		0,025
	CO	HC	NO _x	PM
Дрезини, 130 кВт < P	3,5	0,19	2,0	0,025

В Україні 25.05.2015 року питання викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами тепловозних дизелів було урегульовано нормативним документом ГСТУ 32.001-94.

Величини середньоексплуатаційних питомих викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами тепловозних дизелів не повинні перевищувати значень, зазначених в (табл. 7).

Таблиця 7 – Величини середньоексплуатаційних питомих викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами тепловозних дизелів

Назва забруднюючих речовин	Норми викидів, г/кВт·год.	
	дизель в експлуатації до 4-х років	дизель в експлуатації більше 4-х років
Оксид азоту	18	18
Оксид вуглецю	10	12
Вуглеводи	4	4,5

У Росії правове регулювання в галузі охорони навколишнього середовища на залізничному транспорті, як і в країнах Заходу, в першу чергу спирається на широкий ряд документів, що встановлюють загальні для всіх галузей господарської діяльності норми в сфері екології. Більш конкретні вимоги зазначені в галузевих стандартах, проте варто враховувати те, що в даний час дані стандарти є нормативними неправовими актами.

ГОСТ Р 50953-2008 встановлює гранично допустимий викид шкідливих речовин і гранично допустиме значення димності відпрацьованих газів нових тепловозів. Їх значення представлені в (табл. 8). Норми гранично допустимих викидів встановлено в об'ємних частках, що не дає можливості їх безпосереднього співвіднесення з нормами ЄС та США, розглянутими вище. Дана розбіжність в першу чергу пов'язана з відсутністю необхідної технічної бази для визначення питомих викидів в г/кВт-год поза заводськими (лабораторними) умовами. Гранично допустимі значення димності, які визначаються ГОСТ, встановлюють значно жорсткіші вимоги до тепловозів у порівнянні зі стандартом США.

Основною перевагою стандартів США є те, що вони містять не тільки норми щодо викидів локомотивів, а й інженерно-технічні, економічні та управлінські заходи щодо їх впровадження. Відставання залізничного транспорту в сфері екології від рівня провідних залізниць світу обумовлено малим ступенем реалізації встановлених норм і контролю за їх дотриманням.

Таблиця 8 – ГОСТ Р 50953-2008. Гранично допустимий викид шкідливих речовин і гранично допустиме значення димності відпрацьованих газів нових (після побудови) тепловозів, а також модернізованих (із заміною двигуна)

Рік введення в експлуатацію	Режим	Максимально допустима об'ємна частка шкідливих речовин			Максимально допустимі значення коефіцієнта послаблення світлового потоку, N %
		Окисли азоту у перерахунку на NO ₂	Окис вуглецю	Вуглеводень у перерахунку на C ₃ H ₈	
До 2001 р.	Нульове навант. (холостий хід)	0,06	0,045	0,050	8
	Часткове навант.	0,29	0,190	0,070	25
	Повне навант.	0,27	0,175	0,060	20
2001-2005 рр.	Нульове навант. (холостий хід)	0,05	0,015	0,020	7
	Часткове навант.	0,24	0,060	0,030	20
	Повне навант.	0,23	0,055	0,025	15
2006-2010 рр.	Нульове навант. (холостий хід)	0,04	0,015	0,020	6
	Часткове навант.	0,20	0,060	0,030	17
	Повне навант.	0,19	0,055	0,025	12
з 2011 р.	Нульове навант.	0,03	0,020	0,010	5

	(холостий хід)				
	Часткове навант.	0,15	0,070	0,014	15
	Повне навант.	0,14	0,065	0,013	10

Очевидно, що успішній реалізації положень стандарту на викиди сприятиме розробка відповідного технічного регламенту. Але не менш важливим є і розробка і прийняття детального плану заходів щодо забезпечення реалізації прийнятих нормативів.

2.3 Методи оцінки викидів від залізничної техніки

Вибір методу

На (рис. 9) представлена процедура вибору методів для оцінки викидів від залізничної техніки. Це дерево прийняття рішень може бути застосовано для всіх країн. Його основними концепціями є:

- якщо доступна докладна інформація, необхідно її використовувати;
- якщо категорія джерел є ключовою категорією, то для оцінки викидів слід використовувати метод рівня 2 або рівня 3.

Методологія Рівня 1 загальної витрати палива

Метод Рівня 1 для залізничного транспорту є методологією витрати палива і використовує наступне рівняння:

$$E_i = \sum_m FC_m \cdot EF_{i,m} \quad (1)$$

де E_i — викиди забруднюючих речовин i на період, який вказаний в інвентаризації (кг або г);

FC_m — витрата палива m на даний період і зону (тонни);

EF_i — коефіцієнт викидів забруднюючої речовини i по кожному використовуваному типу палива m (кг/тонни);

m — тип палива (дизельне паливо).

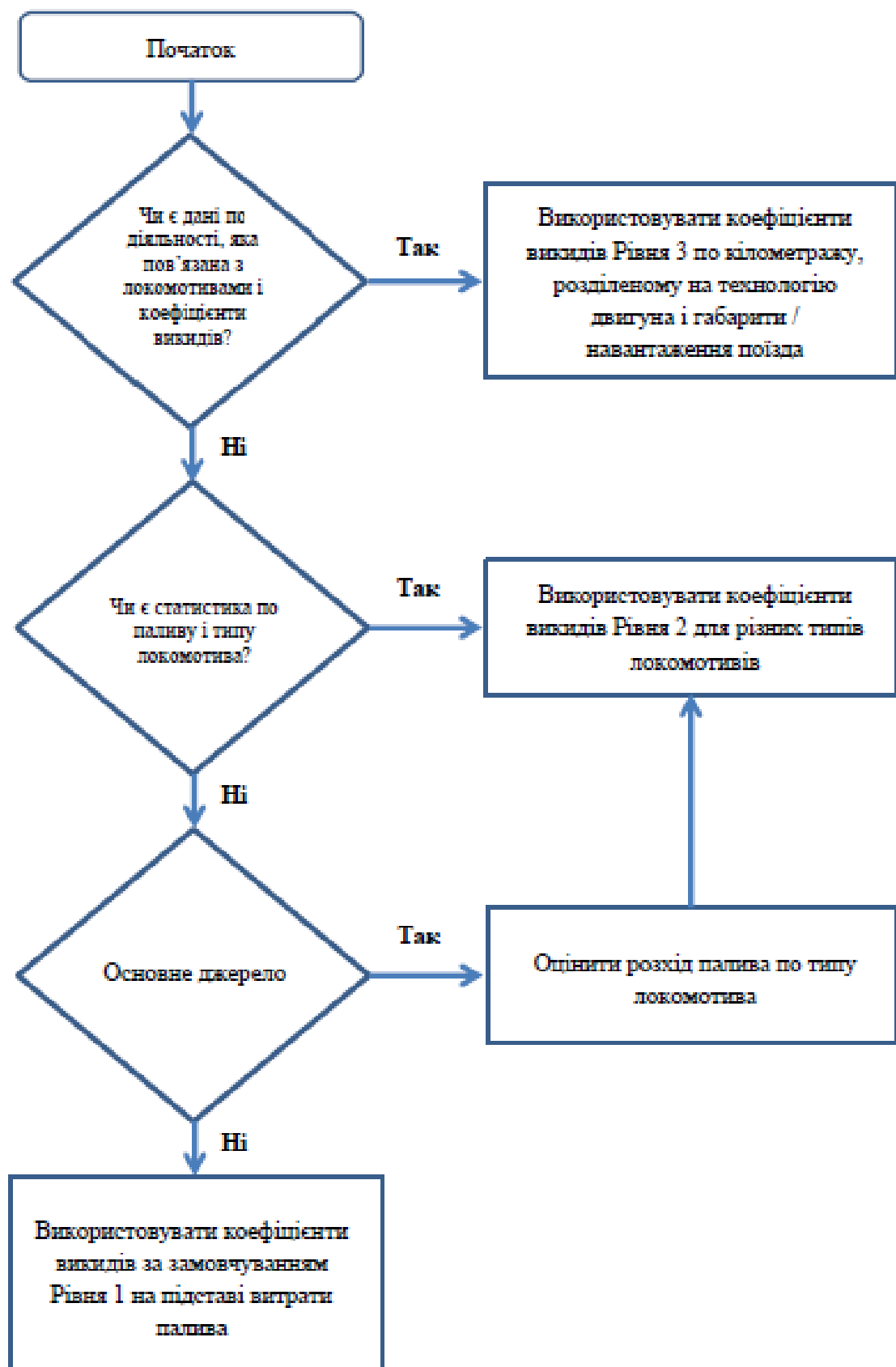


Рисунок 9 – Дерево прийняття рішення щодо викидів від залізничного транспорту

Коефіцієнти викидів Рівня 1 (EF_i) допускають середню технологію для залізничного парку локомотивів. Для викидів CO_2 , SO_2 і важких металів коефіцієнти викидів розраховуються, допускаючи, що вуглець в паливі повністю окислюється до CO_2 , а сірка і важкі метали в паливі в кількісному відношенні викидаються в атмосферу.

Коефіцієнти викидів по замовчуванню

Коефіцієнти викидів по замовчуванню розглядаються як для дизельного палива, так і для газойля.

Викиди SO_2 можуть бути розраховані за допомогою наступного рівняння:

$$E_{\text{SO}_2} = 2 \cdot \sum_m k_{s,m} \cdot FC_m \quad (2)$$

де E_{SO_2} — викиди двоокису сірки на період, зазначений у інвентаризації;
 $k_{s,m}$ — вміст сірки в паливі (% по масі).

Методологія Рівня 2 витрати палива різними типами локомотивів

Метод Рівня 2 заснований на поділі загальної витрати палива залізничним транспортом по різним типам локомотивів. Передбачається, що паливо може бути розділене за допомогою статистики за кількістю локомотивів, типам і середній частоті використання, наприклад за звітами про технічне обслуговування локомотивів. Для даного методу використовується алгоритм:

$$E_i = \sum_m \sum_j (FC_{j,m} \cdot EF_{i,j,m}) \quad (3)$$

де E_i — викиди забруднюючих речовин i на період, який вказаний в інвентаризації (кг або г);
 $FC_{j,m}$ — витрата палива m на даний період і зону j (тонни);
 $EF_{i,j,m}$ — коефіцієнт викидів забруднюючої речовини i по кожному використовуваному типу палива m (кг/тонни);
 m — тип палива (дизельне паливо, газойль);
 j — тип локомотива (маневровий тепловоз, дрезина, локомотиви для міжміських перевезень).

Коефіцієнти викидів Рівня 2 розраховуються з урахуванням діапазону потужності двигунів за кожним типом локомотивів і на підставі середнього розподілу тривалості терміну служби. За деякими забруднюючих речовин не дані коефіцієнти викидів, вони повинні бути адаптовані за коефіцієнтами викидів для дорожньої техніки великої вантажопідйомності.

Дані по розділенню витрати палива по різних типах локомотивів, можливо, можуть бути недоступні. Замість кількості локомотивів і середньої витрати палива (літрів в рік) будуть потрібні дані депо. Метод Рівня 2 вимагає, щоб національна статистика по витраті палива поділялася на локомотиви, щоб застосовувати три різних групи коефіцієнтів викидів. Якщо даний рівень інформації недоступний в національній статистиці, він може бути отриманий на підставі кількості та середнього напрацювання на рік кожного локомотива, застосовуючи коефіцієнти витрати палива в (табл. 9).

Таблиця 9 – Витрата палива по різних типах локомотивів

Категорія	Витрата палива	Одиниці вимірювання
Локомотиви для міжміських перевезень	219	кг/год.
Маневрові локомотиви	90,9	кг/год.
Дрезини	53,6	кг/год.

Дані по кількості локомотивів та напрацювання можна взяти з статистики по залізничному транспорту, залізничним компаніям, графіку руху або в національному залізничному агентстві. Важливо, щоб сума середньої витрати палива і напрацювання для трьох типів локомотивів дорівнювала сумі загальної витрати палива. В іншому випадку витрата палива по типу локомотива повинен бути перерахований за національною статистикою для того, щоб переконатися, що зберігається енергетичний баланс.

Підхід Рівня 3 по використанню особливих локомотивів

Підходи Рівня 1 і Рівня 2 використовують обсяги продажів палива, як первинний показник виду діяльності, або агрегованого (Рівень 1) або розділеного

по різним типам локомотивів (Рівень 2). Підхід Рівня 3 може застосовуватися за допомогою оцінки кількості локомотивів та їх середнього напрацювання на рік, як показник виду діяльності та оцінки середніх викидів від локомотивів для внесення в інвентаризацію викидів. З іншого боку навіть більш детальний підхід Рівня 3 розділяє експлуатацію локомотивів за окремими типами локомотивів.

Алгоритм, наведений нижче, є прикладом найбільш докладної методології Рівня 3, яка ґрунтується на методі Агентства з охорони навколишнього середовища США (USEPA) для розрахунку викидів від позашляхової техніки. Отже, є узгодженість між підходом, представленим тут та який є в Методичних вказівках МГЕЗК 2006 і аналогічними методиками Рівня 3 для основної позашляхової техніки. Рівняння використовують наступну основну формулу для розрахунку викидів:

$$E_i = \sum_m \sum_j (N_{j,m} \cdot H_{j,m} \cdot P_{j,m} \cdot LF_{j,m} \cdot EF_{i,j,m}) \quad (4)$$

де E_i – викиди забруднюючих речовин i на період, який вказаний в інвентаризації (кг або г);

$N_{j,m}$ – кількість локомотивів в категорії j , де використовується тип палива m ;

$H_{j,m}$ – середнє напрацювання, яку напрацювали локомотиви категорії j за аналізований період часу, який використовує тип палива m (год.);

$P_{j,m}$ – середня номінальна потужність на виході в категорії j з паливом m (кВт);

$LF_{j,m}$ – середній (стандартний) коефіцієнт навантаження категорії локомотива i (діапазон від 0 до 1);

$EF_{i,j,m}$ – коефіцієнт викидів забруднюючої речовини i на кожну одиницю потужності на виході локомотивів в категорії j , де використовується тип палива m (кг/кВт/год або г/кВт/год);

- j – категорія локомотива (для міжміських перевезень, маневрові, дрезини);
- m – тип палива (дизельне паливо, газойль).

2.4 Дослідження техніко-екологічних та економічних характеристик тепловозних ДВЗ під час використання палив якості EURO стандарту

Якість дизельних палив має суттєвий вплив на надійність, довговічність, економічність ДВЗ і на формування шкідливих викидів. Небажаними є сіро і азотовмісні сполуки і ароматичні вуглеводні, особливо конденсовані. Тому особлива увага приділяється посиленню вимог до змісту сірки і поліциклічних ароматичних вуглеводнів в моторних паливах.

З 1996 року в країнах Європейського економічного співтовариства діє європейський стандарт EN 590, в якому введено обмеження на вміст сірки в дизельних паливах - не більше 0,05%. Стандарт передбачає випуск дизельних палив для різних кліматичних регіонів. Спільними для дизельних палив є наступні вимоги: температура спалаху - не нижче 55°C; коксованість 10%; залишку - не більше 0,30%; зольність - не більше 0,01%; вміст води - не більше 200 ppm; механічних домішок - не більше 24 ppm; корозія мідної пластинки - клас 1; стійкість до окислення - не більше 25 г осаду/м³.

Порівняльний аналіз основних властивостей дизельних палив, що застосовуються в даний час на залізничному транспорті по ГОСТ 305-82, і палив, що випускаються вітчизняними виробниками відповідно до європейських вимог EN 590, наведено в (табл.10).

Таблиця 10 – Порівняльний аналіз основних властивостей дизельних палив

Компонент	Одиниці вимірювання	Марка палива		
		ГОСТ 305-82	EURO 4	ЭКТО-дизель
поліароматичні вуглеводні	% масс.	9,0	4,15	2,1
сірка	%, масс.	0,062	0,033	0,053
цитанове число	-	45	52	52

щільність при 20 ⁰ С	кг/м ³	827,4	830,2	831,6
в'язкість при 40 ⁰ С	мм ² /с	4,5	3,12	2,99
температура спалаху	⁰ С	58	58	48
нижча теплота згоряння	кДж/кг	42914	42914	42835
Змащуюча здатність	МКМ	-	290	400

Результати проведених експериментальних досліджень

Випробування включали в себе визначення таких показників, як: величини компресії по циліндрах; рівнів шуму в контрольних точках тепловоза; тиску масла в системі змащення при фіксованих оборотах двигуна і певній температурі; електричної потужності силової установки тепловоза; масової витрати палива двигуном; тиску і температури надувочного повітря в дизель; температури відпрацьованих газів у випускному колекторі дизеля; температури води і масла в системі охолодження дизеля [40].

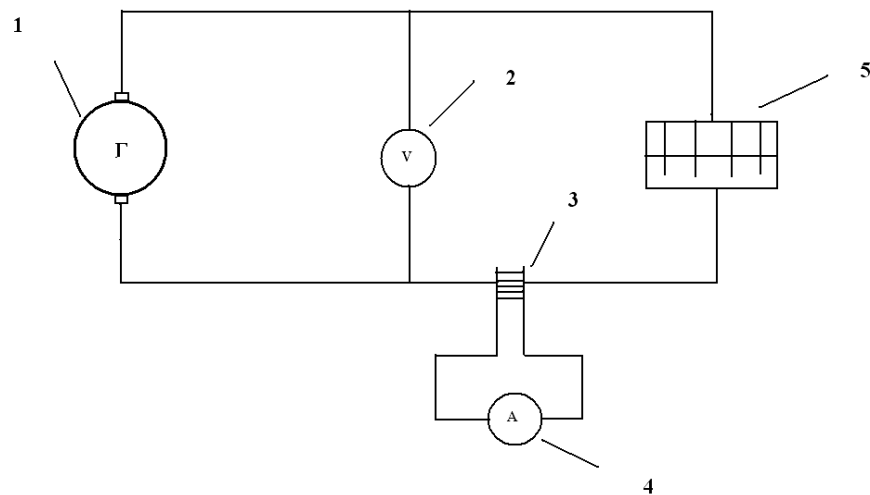


Рисунок 10 – Схема реостатної установки для вимірювання потужності тепловоза: 1 – головний генератор; 2 – вольтметр (0-1000 В); 3 – шунт кілоамперметри; 4 – кілоамперметр; 5 – водяний реостат

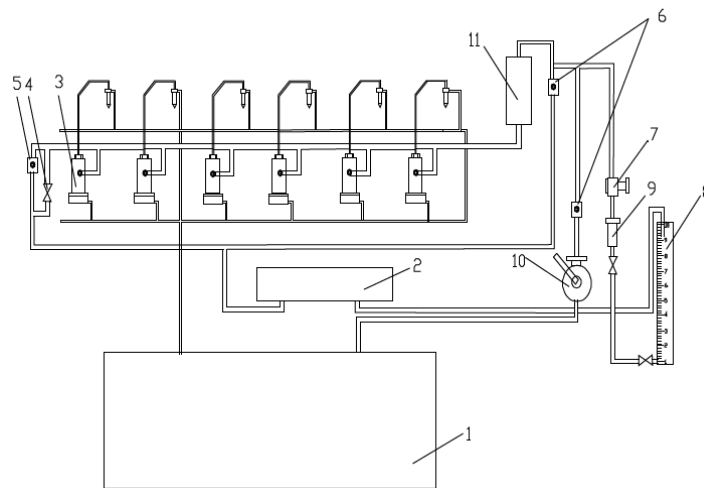


Рисунок 11 – Схема вимірювання масової витрати палива дизелем тепловоза:

1 – паливний бак; 2 – паливопідігрівач; 3 – паливний насос високого тиску;
4 – вентелі; 5 – перепускний клапан; 6 – зворотний клапан;
7 – паливопідкачуючий насос; 8 – об’ємний паливомір; 9 – фільтр грубого очищення; 10 – ручний насос; 11 – фільтр тонкого очищення

У ємності контролювалась температура і щільність палива для того, щоб підвищити точність подальшого перерахунку об’ємної витрати в масову. Об’ємна витрата палива визначається за рахунок різниці показань паливоміра і об’єму, що зливається в ємність.

Результати експериментальних досліджень представлені на (рис. 12-13), де режимами 2, 3, 4, 5 позначена відповідна потужність тепловоза на 2, 4, 6 і 8 поз. - контролера-машиніста.

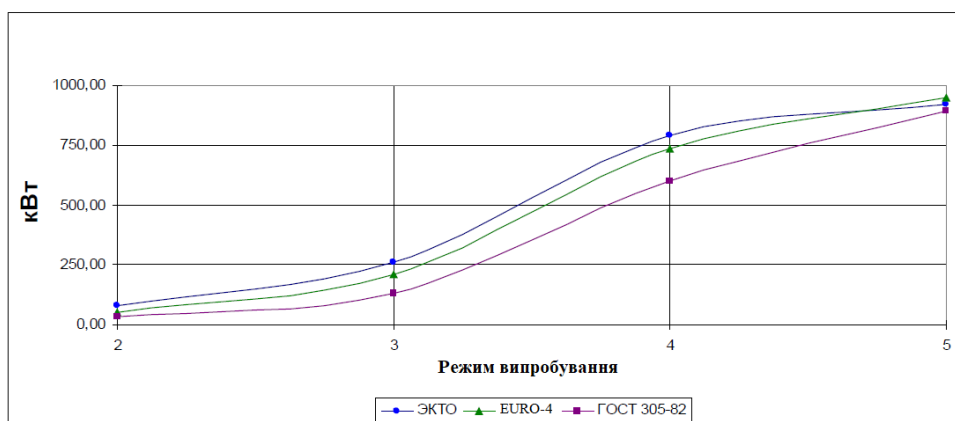


Рисунок 12 – Тягова характеристика тепловоза

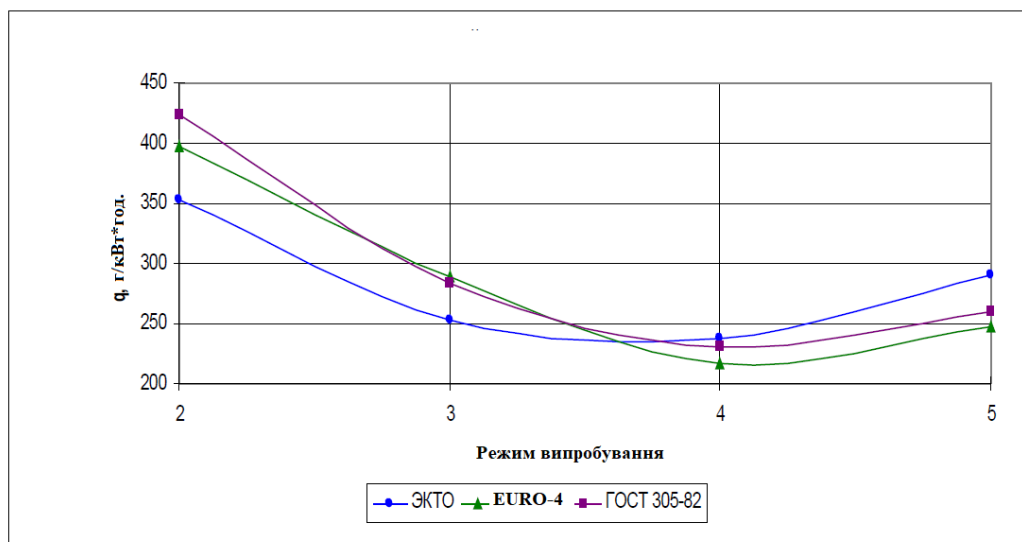


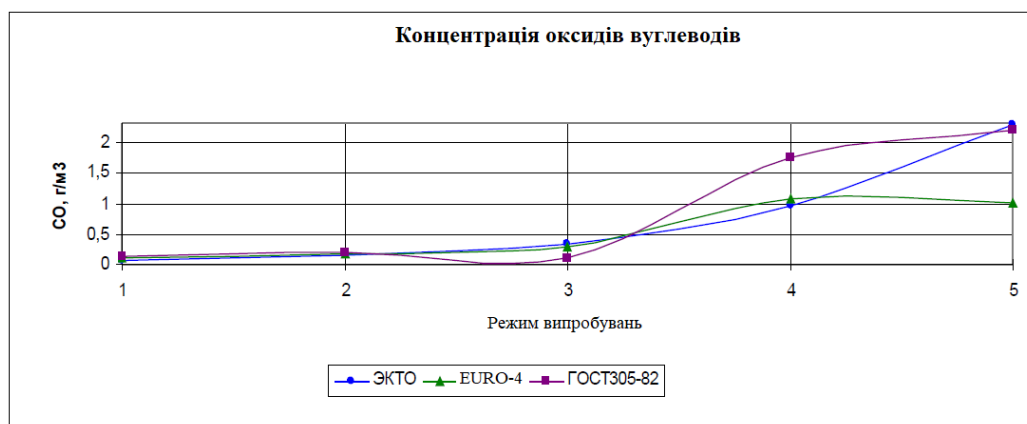
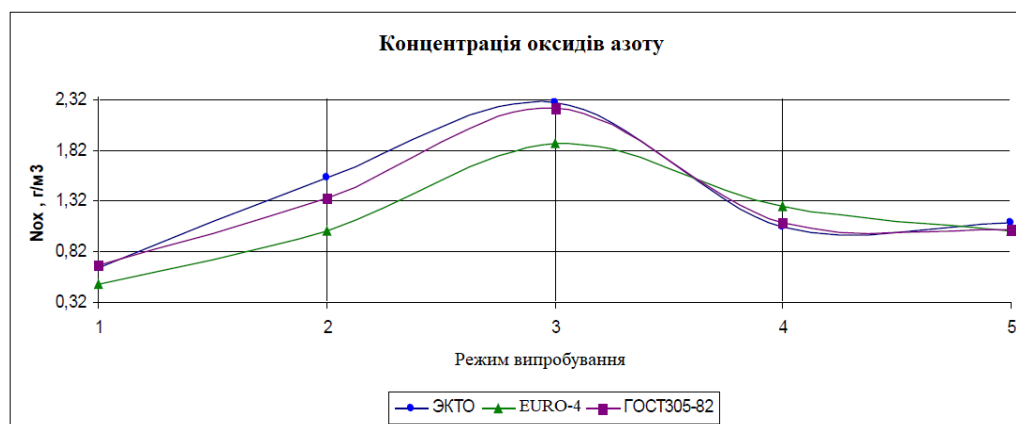
Рисунок 13 – Питома витрата палива

Як впливає з тягових характеристик тепловоза (рис. 12), при роботі на паливах EURO 4 і «ЕКТО-дизель» досягається явний ефект збільшення потужності силової установки в порівнянні з застосовуваним паливом по ГОСТ 305-82. Причому, якщо на номінальному навантаженні це становить 3,0 ... 6,1%, то при роботі на часткових режимах (поз.2 і 4 контролера) ефект досягає великих значень. Поряд зі збільшенням потужності робота дизеля на паливах EURO 4 і «ЕКТО-дизель» супроводжується більш «м'якою» роботою ДВЗ, максимальні тиски згоряння по циліндрах дизеля K6S310DR при його роботі на випробовуваних паливах знижуються (близько 5-6%), зменшується жорсткість процесу, що свідчить про зниження швидкості наростання тиску всередині камери при згорянні палива. Останній висновок підтверджується вимірами рівнів шуму на відстані 1 м від тепловоза на пункті екологічного контролю (ПЕК), які знижуються на 2-3 дБ.

При роботі тепловоза на EURO 4 спостерігається зниження температури відпрацьованих газів у залежності від режиму на 55 ... 110⁰С. При номінальному навантаженні це зниження відзначено і для палива «ЕКТО-дизель», однак при часткових навантаженнях і на холостому ході T значно вища (на 80 ... 120⁰С) для «ЕКТО-дизель», ніж при роботі на паливі з ГОСТ305-82. Остання обставина

очевидно пов'язано з тим, що в паливо «ЕКТО-дизель» додані додаткові присадки. Про покращення економічності тепловоза при переході на нові види палива EURO стандарту свідчать залежності, отримані експериментально і представлені на (рис. 13). Як видно з графіків при роботі ДВЗ тепловоза ЧМЕЗ на паливі EURO-4 питомі витрати палива знижуються в середньому на 12,7 ... 23,7 г/кВт·год, що значно перевищує похибку даного способу вимірювання - 5-6 г/кВт·год. Ефект зниження питомих витрат палива зафіксовано і при роботі на «ЕКТО-дизель», який склав на режимах холостого ходу і поз.2 контролера машиніста - 30 ... 50 г/кВт·год.

Що стосується екологічних ефектів, то зниження найбільш токсичних у відпрацьованих газах тепловоза оксидів азоту склало від 10 до 20% практично на всіх навантажувальних режимах при роботі на паливі EURO 4 (рис. 14). Концентрації оксидів вуглецю зменшилися практично в 2 рази особливо на 6 і 8 поз. контролера (рис. 14, б). Значно знизилася димність відпрацьованих газів від 25 до 40% (рис. 14, в).



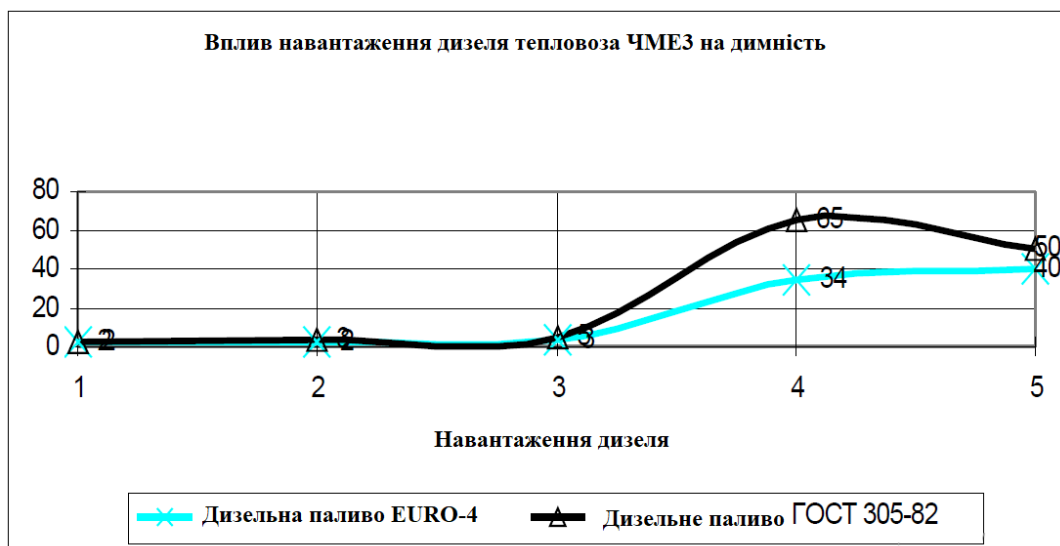


Рисунок 14 – Концентрації у відпрацьованих газах дизеля К6S310DR тепловоза ЧМЕЗ: а – оксидів азоту; б – оксидів вуглецю; в - відпрацьованих газів

Висновки до розділу 2

- розглянуто види палива, що використовується в дизельних двигунах на залізничному транспорті;
- проаналізовано використання рівнів Директиви ЄС 2004/26/ЄС щодо викидів залізничного транспорту в навколишнє середовище та Директиви ЄС (1999/32/ЄС) щодо якості дизельного палива;
- встановлено, що правове регулювання викидів залізничного транспорту в США передбачає п'ять рівня вимог до вихлопних газів тепловозів в залежності від терміну виготовлення рухомого складу;
- встановлено дерево прийняття рішень дощо викидів від залізничного транспорту;
- проведено порівняльний аналіз основних властивостей дизельних палив;
- наведено залежності для порівняння потужності силової установки, питомої витрати палива та екологічних ефектів при використанні різних марок дизельних палив.

РОЗДІЛ III. АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЛОКОМОТИВІВ

3.1. Гібридні технології

Одна з характерних тенденцій сучасного ринку локомотивів – розширення використання альтернативних джерел енергії та гібридного тягового приводу. Інноваційні розробки в цій галузі ведуть, зокрема, компанія Alstom і експлуатуючий нечисленний парк тепловозів оператор інфраструктури залізниць Нідерландів Strukton Rail.

Ще порівняно недавно реалізація концепції сталого розвитку стосовно тягового рухомого складу інтерпретувалася переважно з точки зору необхідності мінімізації негативного впливу, що чиниться на навколишнє середовище. Однак поступово залізничні компанії приходять до розуміння значення стійкого розвитку як невід’ємної складової бізнесу і досягнення кінцевого результату своєї діяльності. В умовах зростання цін на паливо поступове вдосконалення тягового приводу рухомого складу з метою підвищення його ефективності сприяє істотній економії грошових коштів. Реагуючи на зацікавленість операторів в зниженні витрат палива, виробники розробляють інноваційні конструкції локомотивів. Компанія Alstom є твердим прихильником впровадження гібридних технологій на ринку дизельного рухомого складу порівняно невеликої потужності і стала першим виробником, які поставили кілька таких локомотивів для комерційної експлуатації. В даний час Alstom готується до початку виробництва локомотивів нового покоління, в яких гібридні технології домінують. Інноваційні ініціативи виходять не тільки від постачальників локомотивів. Оператори також експериментують з перспективними технологіями, хоча і в менших масштабах. Так, нідерландська компанія Strukton оснастила один зі своїх локомотивів сонячними батареями, і успіх проекту стимулював подальші розробки в цьому напрямі. В останні роки завод компанії Alstom Locomotive Services – спільного підприємства компанії Alstom і залізниць Німеччини (DB) в Штендалі (Німеччина) спеціалізувався на

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						52
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

модернізації тепловозів серії V100 (BR 203) з метою продовження терміну їх служби. У період лібералізації ринку вантажних перевезень в Європі такі локомотиви дозволяють порівняно економічним чином забезпечити потребу в тяговому рухомому складі діючих і нових невеликих компаній-операторів, що виходять на цей ринок.

Один з модернізованих тепловозів помітно відрізнявся від інших, оскільки був обраний для проведення експериментів по застосуванню гібридного приводу на основі концепції, яку Alstom почала розробляти в 2004 р. В кузов локомотива були вбудовані акумуляторна батарея, дизель-генератор, силові електронні перетворювачі і механічна передача. Для тяги використовуються акумуляторні батареї. Постійно працює в оптимальному режимі дизель-генератор відносно невеликої потужності заряджає батареї, коли не використовується для потреб тяги (він може служити джерелом додаткової енергії, якщо потрібно збільшити тягову потужність). Оскільки під час стоянок енергія на тягу не витрачається, споживання палива може бути скорочено на 40% для експлуатаційного циклу з часткою часу роботи в режимі холостого ходу 75%, що є істотною перевагою при використанні локомотива на маневровій роботі. У 2006 р модернізація локомотива була закінчена, і він експонувався на виставці InnoTrans в Берліні (рис. 15), після чого проходив дослідну експлуатацію у різних операторів, зокрема у компанії Rotterdam Rail Feeding в порту Роттердам (Нідерланди). В даний час він знаходиться на автомобілебудівному заводі компанії Volkswagen в Вольфа-бурге (Німеччина), де буде постійно працювати протягом найближчих 2 років. Передача локомотива у тимчасове користування різним операторам не тільки дозволила познайомити потенційних замовників з новою технологією, а й дала фахівцям компанії Alstom можливість зібрати цінну інформацію про його поведінку в умовах експлуатації. Отримана інформація використовувалася для подальших розробок і вдосконалення локомотива. Так, в 2007 р встановлені на ньому акумуляторні батареї були замінені на більш ефективні нікель-кадмієві. В

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						53
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

ході експлуатації були також відрегульовані системи управління акумуляторними батареями.



Рисунок 15 – Експериментальний локомотив V100 на виставці InnoTrans 2006

3.2 Перша партія гібридних локомотивів

У 2010 р компанія Alstom і компанія-оператор Mitteldeutsche Eisenbahn (MEG), DB Schenker, уклали контракт на поставку п'яти гібридних дизель-акумуляторних локомотивів потужністю 600 кВт, виконаних на базі тепловозів V100 (рис. 16). Спочатку локомотиви передавались в лізинг, проте в 2018 р, після закінчення терміну дії контракту, MEG придбав їх у власність. Чотири локомотива були передані замовнику в червні 2012 р. і використовуються на хімічному заводі в Шкопау (Німеччина). Фахівці Alstom тісно співпрацюють з представниками замовника, відстежуючи стан тепловозів разом з технічним персоналом залізниць Німеччини (DB). Наявність парку (хоча і нечисленного) таких локомотивів і достатня тривалість періоду лізингу надають великі

					0032.206553.MP.2021.001	Арк. 54
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

можливості для досліджень і оцінки, ніж випробування тільки одного локомотива.



Рисунок 16 – Гібридний локомотив виробництва Alstom для компанії MEG

За даними Alstom, використання гібридного локомотива на базі тепловоза V100 дозволить скоротити на 30-50% споживання енергії, зменшити на 50% емісію вуглекислого газу і знизити рівень шуму за рахунок зменшення потужності дизеля і скорочення часу його роботи на холостому ходу.

Моніторинг та оцінка експлуатаційних показників невеликого парку експериментальних локомотивів матимуть важливе значення для створення гібридного рухомого складу нового покоління. Реалізація цього проекту була розпочата компанією Alstom в 2009 р.

Рішення про розробку абсолютно нового локомотива брали з урахуванням кількох факторів:

- для відпрацювання технічних нововведень залишається доступним лише невелике число локомотивів V100, що не пройшли модернізацію;

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						55
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

- гібридний локомотив V100 занадто великий і потужний, щоб була доцільна його заміна менш великими маневровими тепловозами;
- модернізація обходиться досить дорого (вартість модернізованого гібридного локомотива V100 майже дорівнює вартості нового тепловоза внаслідок використання значної кількості нових компонентів);
- на ринку потрібні локомотиви з більш широким діапазоном характеристик;
- необхідний більш високий рівень експлуатаційних показників і ефективності.

В результаті було розроблено сімейство тривісних локомотивів НЗ (рис. 17), що складається з чотирьох типів (таблиця): 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 (в таблиці для порівняння наведені також характеристики гібридних локомотивів V100-експериментальної і наступної партії).

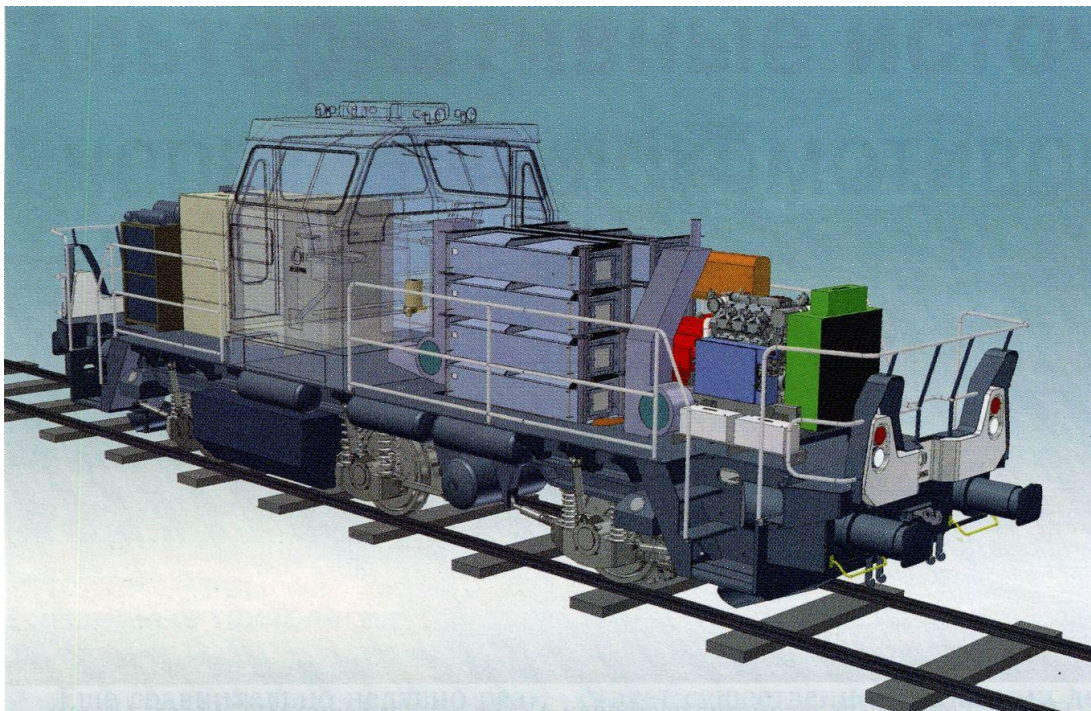


Рисунок 17 – Концепція локомотива НЗ

Застосування компонування з трьома моторними осями дозволяє створити локомотив, який має меншу масу, дешевше в експлуатації та обслуговуванні. Однак у зв'язку з особливостями ходових характеристик тривісних локомотивів можливості їх експлуатації, як правило, обмежені. З урахуванням результатів проведених фахівцями компанії Alstom досліджень ходової частини експлуатованих в Копенгагені зчленованих електропоїздів S-Train була розроблена ходова частина трьохвісного локомотива досить великої довжини, здатного розвивати швидкість до 100 км/год (що прийнятно при його використанні і в якості магістрального) і при цьому вписується в криві з мінімальним радіусом 60 м. Сила тяги локомотива досягає 240 кН, що істотно більше в порівнянні з гібридним локомотивом V100 і тим більше з будь-яким з наявних на ринку тривісних маневрових локомотивів.

Вартість нового гібридного локомотива вище, однак додаткові витрати компенсуються скороченням експлуатаційних витрат. За оцінками фахівців Alstom, зниження витрати палива перевищить 25 тис. л на рік на один локомотив. Типові сучасні маневрові тепловози за 1 год споживають близько 16 л палива, а використання розробленого Alstom гібридного локомотива забезпечує економію приблизно 7 л/год. В середньому маневровий локомотив експлуатується 4000 год на рік. Економія палива при використанні тепловоза в режимі магістрального також істотна.

Ще один аргумент на користь гібридного локомотива – його здатність працювати практично з нульовою емісією шкідливих речовин, що особливо важливо, наприклад, у внутрішніх приміщеннях депо і в тунелях. Крім того, локомотив відрізняється зниженим рівнем шуму при роботі як від акумуляторної батареї, так і від дизель-генератора.

Важливе значення має і сумісність. Кілька локомотивів НЗ різних версій здатні працювати за системою багатьох одиниць в різних режимах під керуванням одного машиніста. Так, головний локомотив може вести поїзд з

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						57
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

працюючим дизелем, в той час як другий локомотив буде працювати в режимі гібридного або тільки від акумуляторної батареї.

Таблиця 11 – Технічні характеристики локомотивів V100 і H3

Параметр	Тип локомотива		
	V100 (дослідний)	V100 (перша партія)	H3
Довжина, мм	14240		12800
Висота, мм	4255		4245
Ширина, мм	3110		3080
Маса, т	67		67,5
Максимальна швидкість, км/год.	60		100
Максимальна сила тяги, кН	196	200/100	240
Осьова формула	B ₀ -B ₀		A'A'A'
Осьове навантаження, т	16,5		22,5
Силова установка	Дизель 6-циліндровий, V-подібний		Без дизеля (тільки акумуляторна батарея); Акумуляторна батарея + дизель 6-циліндровий V-подібний; два дизеля 6-циліндрових V-подібних; дизель 12-циліндровий V-подібний
Номінальна потужність, кВт	238		350; 2x350; 1000

Потреба в таких локомотивах може бути досить суттєвою. В Європі експлуатуються близько 3000 тепловозів потужністю до 1000 кВт. Багато з них мають значний вік і потребують заміни. В умовах зростання цін на енергоносії і

посилення обмежень за рівнем шуму і змістом вуглекислого газу в вихлопних газах конструктивна платформа НЗ має непоганий потенціал. У той же час попит на відносно потужні маневрові тепловози знижується.

3.3 Використання сонячної енергії

У Нідерландах компанія Strukton Rail Equipment, компанії – оператора інфраструктури Strukton Rail, почала експерименти по застосуванню сонячної енергії на рухомому складі залізничного транспорту. Розроблено концепцію використання сонячних батарей на локомотивах.

Для проведення випробувань був обраний побудований в 1963 р. компанією Deutz чотиривісний тепловоз серії 1200BBM, який отримав назву Janine (експлуатованим Strukton Rail локомотивів традиційно присвоюються жіночі імена, їх разом з номером пишуть на капоті), потужністю 808 кВт з кабіною управління, яка розташована в центральній частині капотного кузова. Сонячна батарея встановлена на капоті тепловоза таким чином, щоб дим з вихлопної труби не закривав сонячне світло, що могло б вплинути на її роботу (рис. 18 і 19). Розміри сонячної батареї 1920x990x50 мм, потужність - 280 Вт при напрузі 24 В.

Є кілька вагомих причин для дослідження можливостей застосування сонячної енергії на локомотивах. Екологічні проблеми набувають все більшого значення, в тому числі на залізничному транспорті. Економія енергії і відсутність шкідливих впливів на навколишнє середовище стають важливими факторами, нехтування якими може знизити шанси на отримання нових контрактів. Компанія Strukton Rail розглядає покращення екологічних характеристик як шлях до підвищення ефективності використання енергії та скорочення витрат, а випробування сонячних батарей – як новий крок на цьому шляху.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						59
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		



Рисунок 18 – Сонячна батарея, встановлена на капоті тепловоза Janine



Рисунок 19 – Тепловоз Janine, який експлуатується Strukton Rail

Метою випробувань була оцінка скорочення емісії вуглекислого газу, зменшення витрат палива, зниження рівня шуму, підвищення надійності та експлуатаційної готовності.

Ще до повного завершення випробувань було виявлено безперечні переваги нової технології. Покращено показники експлуатаційної готовності.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						60
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Локомотив застосовується для виконання робіт з поточного утримання інфраструктури. Це означає, що, поки локомотив не використовується, акумулятори розряджаються. При наявності сонячних батарей акумулятори можуть постійно підзаряджатися. Випробування були розпочаті в холодних зимових умовах, і з тих пір, незважаючи на низькі температури, не було необхідності в заміні батарей.

Акумуляторні батареї необхідні не тільки для пуску локомотива, а й для живлення допоміжного обладнання. При вимкненому дизелі потужність навантаження, підключеної до батареї, може бути збільшена. Застосування сонячної батареї дозволяє швидко заряджати акумулятор в більшості ситуацій.

Підвищення надійності сприяє скороченню експлуатаційних витрат. У зв'язку з цим відпадає необхідність витрачати робочий час персоналу на виїзд до локомотиву і заміну на ньому акумуляторних батарей після того, як він протягом деякого часу не використовувався. Потреба в нових акумуляторах з початком дослідної експлуатації сонячних батарей також знизилася.

Протягом декількох місяців після завершення випробувань було проведено обробку та аналіз результатів, на підставі чого може бути прийняте рішення про оснащення сонячними батареями решти парку локомотивів Strukton Rail.

Фахівці компанії розглядають шляхи подальшого розширення використання сонячної енергії на рухомому складі, зокрема на колійних машинах, де широко застосовується живлення від акумуляторних батарей.

Висновки до розділу 3

- розглянуто гібридні технології, як один із шляхів покращення екологічності та економічності експлуатації тепловозів;
- розглянуто використання сонячної енергії, що передбачає скорочення емісії вуглекислого газу, зменшення витрат палива, зниження рівня шуму.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						61
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ IV. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

4.1 Вступ

У цій главі отримано розв'язок диференціального рівняння руху поїзда, складені рівняння балансу сил, балансу потужностей та енергетичного балансу і запропонована методика для знаходження корисної роботи, яку здійснює локомотив з поосним регулюванням сили тяги при заданому профілі колії, масі поїзда і заданому швидкісному режимі. Вона дозволяє отримати об'єктивну основу для оцінки ефективності використання потужності, яку споживає силова енергетична установка.

4.2 Показники енергетичної ефективності локомотивної тяги

Енергетична ефективність локомотивної тяги характеризується коефіцієнтом корисної дії і коефіцієнтом використання потужності. Перехід від миттєвих значень ККД до середнього значення ККД $\eta_{\text{лсеред}}$ за час руху по перегону здійснюється шляхом інтегрування та відображається виразом:

$$\eta_{\text{лсеред}} = \frac{A_{\text{кор}}}{E_{\text{сп.}}} \quad (5)$$

де $A_{\text{кор}}$ – корисна робота на тягу поїзда, кВт·год.;

$E_{\text{сп.}}$ – спожита енергія, кВт·год.

Корисна робота на тягу поїзда $A_{\text{кор}}$ в (5) являє собою «корисний ефект від використання енергетичних ресурсів» і визначається:

$$A_{\text{кор}} = \int P_{\text{т}} dt \quad (6)$$

Повна спожита енергія $E_{\text{сп.}}$, дорівнює інтегралу за часом від спожитої потужності та визначається за виразом:

$$E_{\text{сп.}} = \int P_{\text{сп.}} dt \quad (7)$$

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						62
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Таким чином, бачимо, що середнє значення ККД локомотива $\eta_{л\text{ серед}}$ являє собою саме «відношення корисного ефекту від використання енергетичних ресурсів до витрат енергетичних ресурсів, виробленим з метою отримання такого ефекту». Підвищення ККД локомотива означає збільшення енергетичної ефективності. При цьому необхідно розрізняти ККД локомотива як силової установки (саме це значення вказується в технічній документації) і ККД експлуатаційний, який залежить від часу роботи локомотива в різних режимах при русі поїзда і від витрати енергії на підтримку локомотива в працездатному стані під час зупинок.

Виконаємо перехід від миттєвого значення коефіцієнту використання потужності до його середнього значення, яке є відношенням корисної роботи на тягу поїзда $A_{кор.}$ до роботи, що виконана локомотивом в номінальному режимі за той же час $A_{ном.}$:

$$\gamma_{л\text{ серед}} = \frac{A_{кор.}}{A_{ном.}} \quad (8)$$

4.3 Співвідношення теорії локомотивної тяги

Співвідношення теорії локомотивної тяги, які пов'язані з розрахунком корисної роботи локомотива, викладемо згідно положень [41-42].

Параметри ділянки колії. Довжину перегону позначимо як S . План і профіль колії вважаємо відомими, в подальшому звідси отримуємо спрямлений профіль колії, необхідний для проведення тягових розрахунків.

Спрямлений профіль складається з елементарних ділянок, в межах кожного з яких ухил i (вимірюється в ‰) постійний. Крім того, необхідно враховувати тип корлії - ланкова або безстикова.

Параметри поїзда. Модель руху поїзда, що прийнята в тягових розрахунках, будується наступним чином. Приймаються наступні загальноприйняті спрощення: не враховується технічний стан вагонів і

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		63

локомотива, їх вертикальні та поперечні коливання і т. д. Однак, повинно бути вказано число вагонів і число осей, а також вказано тип підшипників (кочення або ковзання) і тип гальмівних колодок.

Поїзд, як система пов'язаних між собою елементів (локомотив і вагони), рухається поступально із загальною для всіх елементів швидкістю V . Маса локомотива позначимо P , т; масу вагонів – q_1, \dots, q_n , т; сумарну масу вагонів (масу складу) позначимо Q , т. Далі, поїзд представляється як тверде тіло маси $m = P + Q$, що зосереджена в його центрі мас.

Для врахування кінетичної енергії з урахуванням обертових елементів конструкції (колісні пари, ротори тягових електродвигунів і т.д.), вводиться величина $\gamma_{об.}$ – коефіцієнт інерції обертових частин.

Тоді приведена маса поїзда запишеться як:

$$m_{пр.} = m \cdot (1 + \gamma_{об.}) \quad (9)$$

Таким чином, нехтуємо кінцевої довжиною поїзда, а його рух вважаємо поступальним.

Діючі сили. Перейдемо до розгляду діючих на поїзд зовнішніх поздовжніх сил. До них відносяться: дотична сила тяги локомотива F_T ; сили опору руху W_k ; гальмівні сили B_g .

Дотичній силою тяги локомотива F_T називається зовнішня керована сила, створювана локомотивом при взаємодії його коліс з рейками і спрямована в бік руху. У режимі електричного (реостатного або рекуперативного) гальмування F_T є силою електричного гальмування, яка спрямована протилежно руху.

Силами опору руху називаються виникаючі в процесі руху зовнішні некеровані сили, величину цих сил позначимо як W_k . До їх числа відносяться сили опору повітря, сили тертя в підшипниках і т.д., які залежать від швидкості і маси поїзда. При русі по ділянках, які мають підйоми і спуски, помітний вплив становлять сили тяжіння. Сюди ж відноситься додатковий опір, що виникає при проходженні кривих.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		64

Гальмівними силами поїзда B_{Γ} називаються штучно викликані машиністом зовнішні керовані гальмівні сили колодкового або дискового гальма, спрямовані в бік, протилежний руху, і призначені для зменшення швидкості руху поїзда або повної його зупинки. Розрізняють три основні режими руху поїзда: 1) тяга; 2) вибіг; 3) гальмування (пневматичне або електричне).

4.4 Диференціальне рівняння руху поїзда

Диференціальне рівняння руху поїзда запишемо в проекції на вісь x , спрямовану в бік руху поїзда (рис. 20):

$$m_{np} \cdot \frac{dV}{dt} = F_{x\kappa} + W_{x\kappa} + B_{x\Gamma} \quad (10)$$

де t — час, с;
 V — швидкість, м/с;
 F_{κ} — дотична сила тяги, кН;
 W_{κ} — сили опору руху, кН;
 B_{Γ} — гальмівні сили, кН.

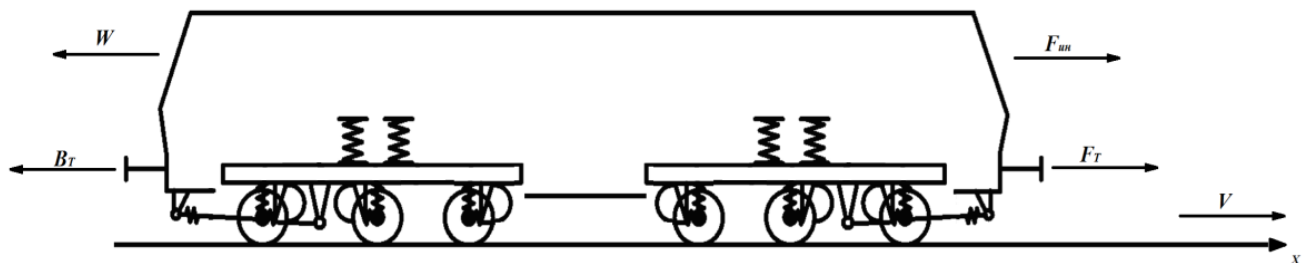


Рисунок 20 – Схема дії сил

Перший доданок в правій частині рівняння (10) являє собою силу, яка при роботі локомотива в режимі тяги спрямована в бік руху, а при електричному гальмуванні – протилежно руху. Величина цієї сили F_{Γ} визначається машиністом, шляхом набору позицій, а її проекція на вісь x дорівнює:

$$F_{x\Gamma} = k_1 \cdot F_{\Gamma} \quad (11)$$

Коефіцієнт k_1 визначається наступним чином:

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						65
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

$$k_1 = \begin{cases} +1, & \text{в режимі тяги} \\ -1, & \text{в режимі електричного гальмування} \\ 0, & \text{в режимі вибігу} \end{cases} \quad (11)$$

Далі, в правій частині рівняння (10) присутня проекція сили опору руху $W_{xк}$. Повний опір руху поїзда до $W_к$ складається з основного опору руху W_0 і додаткових опорів, що виникають при наявності ухилів та кривих:

$$W_к = W_0 + W_i + W_r \quad (12)$$

Сила основного опору завжди спрямована протилежно руху:

$$W_{0x} = -W_0 < 0 \quad (13)$$

За величиною, основний опір W_0 залежить від швидкості руху V , маси поїзда і навантаження на вісь. Для прикладу показано руху поїзда на прямій горизонтальній ділянці колії. Спостерігається, що сила основного опору зростає зі збільшенням швидкості і маси поїзда (рис. 21).

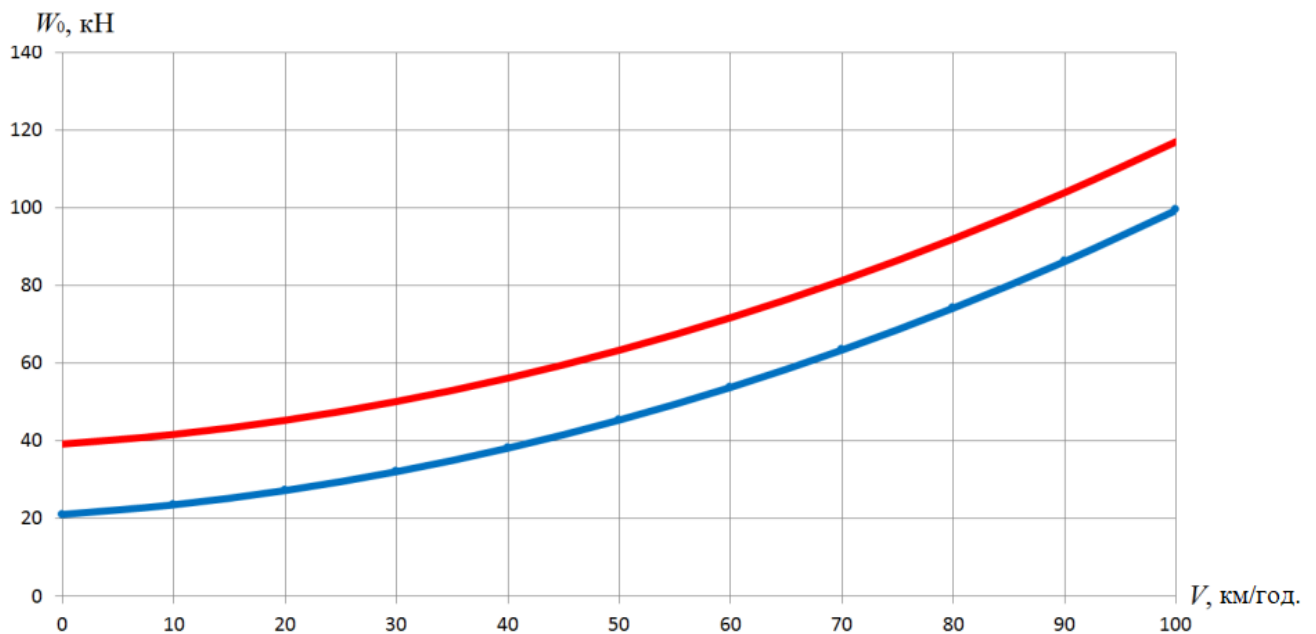


Рисунок 21 – Зміна сили основного опору $W_0(V)$ для поїздів з тягою тепловоза різної маси: 5000 т (червона лінія); 1500 т (синя лінія).

Додатковий опір від ухилу W_i відображає дію сил тяжіння. Питомий додатковий опір від ухилу w_i чисельно дорівнює величині ухилу, а його

проекція на вісь x додатня при русі на спуск ($i < 0$, i виміряна в ‰) і від'ємна при русі на підйом ($i > 0$), тобто:

$$w_{ix} = -i \quad (14)$$

Таким чином, при русі на підйом ($i > 0$), додатковий опір від ухилу w_i направлено протилежно руху. Під час руху споском ($i < 0$), додатковий опір від ухилу направлено в сторону руху і викликає збільшення швидкості поїзда.

При русі поїзда виникає також додатковий опір при проходженні кривих W_r , який завжди спрямований проти напрямку руху. В тягових розрахунках використовують спрямлений профіль колії (криві замінюються фіктивним підйомом. Проекція питомого додаткового опору під час руху поїзда в кривій ділянці колії визначається:

$$w_{rx} = -i_r = -\frac{700}{R} \quad (15)$$

Таким чином, з (12) отримуємо проекцію повного опору руху поїзда на вісь x у вигляді:

$$W_{\kappa x} = W_{ox} + W_{ix} + W_{rx} \quad (16)$$

причому W_{ox} і W_{rx} завжди від'ємні, а W_{ix} може бути і додатнім, і від'ємним в залежності від того, на спуск або на підйом рухається поїзд.

Проекцію сил пневматичного гальмування на напрямок руху $B_{\Gamma x}$ запишемо як:

$$B_{\Gamma x} = -B_{\Gamma} = k_2 B_{\Gamma} \leq 0 \quad (17)$$

Введемо в розгляд коефіцієнт k_2 наступним чином:

$$k_2 = \begin{cases} -1, \text{ під час роботи в режимі гальмування} \\ 0, \text{ під час роботи на інших режимах} \end{cases} \quad (18)$$

Тоді рівняння (10), з урахуванням прийнятих позначень, буде мати наступний вигляд:

$$m_{np.} \frac{dV}{dt} = k_1 F_{\Gamma} + W_{\kappa x} + k_2 B_{\Gamma} \quad (19)$$

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		67

Далі будемо розглядати тільки рух в режимі тяги. Рух на вибігу і при гальмуванні можуть бути вивчені аналогічним чином.

4.5 Баланс сил в режимі тяги

Під час роботи локомотива в режимі тяги використовуючи рівняння (19) отримуємо рівняння кінетостатики:

$$F_{\text{інх}} + F_{\text{к}} + W_{\text{кх}} = 0 \quad (20)$$

Проекція сили інерції на вісь x (20) дорівнює:

$$F_{\text{інх}} = -m_{\text{пр}} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (21)$$

Використовуючи рівняння (20) виразимо силу тяги:

$$F_{\text{к}} = -F_{\text{інх}} - W_{\text{кх}} \quad (22)$$

та отримаємо баланс сил, що діють на поїзд, у режимі тяги:

$$F_{\text{к}} = m_{\text{пр}} \cdot \frac{dV}{dt} - W_{\text{кх}}(V) \quad (23)$$

Варто зазначити, що для виконання конкретних розрахунків повинні бути відомі всі параметри перегону та поїзда, що зазначені вище. Крива швидкості $V(t)$ може бути отримана за допомогою бортових приладів реєстрації. Тоді можна приходити до першої (прямої) задачі динаміки: за відомою швидкістю руху $V = V(t)$ можна знайти діючі сили, які викликають цей рух. Сила тяги $F_{\text{к}}$, може бути визначена з рівняння (23) знаючи закон зміни швидкості.

Проаналізуємо різні варіанти руху:

1. Нехай перегін є прямою горизонтальною ділянкою колії, і поїзд рухається по ньому з постійною швидкістю $V = \text{const}$. Тоді сила інерції відсутня, а з формули (23) отримуємо:

$$F_{\text{к}} = -W_{\text{кх}}(V) = W_{\text{к}}(V) \quad (24)$$

тобто в даному випадку сила тяги врівноважує тільки силу основного опору, що виникає при русі зі швидкістю V . Даний випадок відповідає тому факту, що

енергетичні витрати на тягу мінімальні під час руху поїзда з постійною швидкістю прямою горизонтальною ділянкою колії.

2. Нехай перегін являє собою горизонтальну пряму ділянку колії, але швидкість руху змінюється, залежно від обставин поїзд може як розганятися, так і сповільнюватись, тобто $\frac{dV}{dt} \neq 0$. У цьому випадку сила тяги буде мати вигляд:

$$F_k = m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} + W_k(V) \quad (25)$$

Перша складова у правій частині рівняння – це проекція сили інерції, взята з протилежним знаком. При розгоні, коли прискорення поїзда додатне (тобто спрямоване у бік руху), маємо $\frac{dV}{dt} > 0$ і швидкість зростає, ця складова набуває великого значення. Відповідно, при розгоні, порівняно з рівномірним рухом, потрібно збільшити силу тяги. Після набору швидкості, перша складова у правій частині рівняння (25) стає рівною нулю. Відповідно, після набору швидкості сила тяги локомотива може бути дещо зменшена.

3) Нехай перегін являє собою ділянку складного плану та профілю, що має підйоми, спуски та криві, а швидкість руху постійно змінюється. У цій ситуації, найбільш наближеній до реальності, для визначення сили тяги F_k застосовується безпосередньо вираз (23). Порівняно з випадком №1, сила тяги локомотива матиме набагато більші значення.

4.6 Баланс потужностей в режимі тяги

Розглянемо баланс потужностей, для чого помножимо вираз (23) на швидкість V . В результаті отримаємо:

$$F_k \cdot V = m_{\text{пр}} \cdot \frac{dV}{dt} \cdot V - W_{\text{кx}}(V) \cdot V \quad (26)$$

Потужність локомотива в даний момент часу дорівнює добутку сили тяги на швидкість (ліва частина виразу (26)):

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						69
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

$$P_{\text{т}} = F_{\text{к}} \cdot V \quad (27)$$

Потужність сил інерції (перша складова у правій частині виразу (26)) є похідною за часом від кінетичної енергії поїзда:

$$P_{\text{ін}} = m_{\text{пр}} \cdot \frac{dV}{dt} \cdot V = \frac{dT}{dt} \quad (28)$$

де T – кінетична енергія поїзда, що рухається зі швидкістю V .

$$T = \frac{1}{2} m_{\text{пр}} \cdot V^2$$

Потужність сил опору, що діють на поїзд (друга складова у правій частині виразу (26)) дорівнює:

$$P_{\text{опор.}} = -W_{\text{кк}}(V) \cdot V = W_{\text{к}}(V) \cdot V \quad (29)$$

Таким чином, з (27) – (29) отримуємо баланс потужностей в даний момент часу t :

$$P_{\text{т}} = P_{\text{ін}} + P_{\text{опор.}} \quad (30)$$

тобто, при роботі локомотива в режимі тяги його корисна потужність $P_{\text{т}}$ у кожний момент часу дорівнює сумі потужностей сил інерції та сил опору.

4.7 Енергетичний баланс в режимі тяги

Перейдемо до визначення роботи, що виконана локомотивом за час проходження $t_{12} = t_2 - t_1$ деякої елементарної ділянки спрямованого профілю, що має постійний ухил i . Для цього помножимо (3.21) на dt і проінтегруємо за часом:

$$\int_{t_1}^{t_2} P_{\text{т}} dt = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ін}} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{опор.}} dt \quad (31)$$

Корисна робота, що виконана локомотивом при переміщенні поїзда елементарною ділянкою, знаходиться в лівій частині виразу (31) і визначається за формулою:

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						70
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

$$A_{\text{кор.}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{т}} dt \quad (32)$$

Робота сил інерції на цьому ж переміщенні, з урахуванням формули (29), дорівнюватиме різниці значень кінетичної енергії поїзда:

$$A_{\text{ін}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ін}} dt = \int_{t_1}^{t_2} dT = T_2 - T_1 = \frac{1}{2} m_{\text{пр.}} \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad (33)$$

тобто робота сил інерції забезпечує зміну швидкості руху.

Робота сил опору знаходиться за формулою:

$$A_{\text{опор.}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{опор.}} dt \quad (34)$$

Отже, згідно формул (31) – (34), отримуємо для корисної роботи на елементарному переміщенні енергетичний баланс:

$$A_{\text{кор.}} = A_{\text{ін}} + A_{\text{опор.}} \quad (35)$$

Отже, можна зробити висновок, що корисна робота локомотива на кожній ділянці з постійним ухилом i витрачається на:

- збільшення швидкості руху при розгоні (тобто збільшення кінетичної енергії поїзда);
- на подолання основного опору;
- на подолання додаткового опору під час руху ділянкою, що має ухил, і навіть під час руху в кривих (тобто зміна потенційної енергії і подолання сил тертя внаслідок бокового контакту «колесо-рейка» під час руху в кривих).

4.8 Розрахунок ефективності застосування накопичувачів електричної енергії на тепловозах, їх параметрів та умов розміщення

Застосування у перспективі накопичувачів електричної енергії на залізничному транспорті спрямовано на підвищення енергетичної ефективності.

В даний час накопичувачі електричної енергії (НЄЕ) знайшли своє застосування у різних сферах людської діяльності: автомобільний та

електричний міський транспорт; системи резервування в електроенергетичних системах; системи електропостачання нетрадиційної енергетики; приміський транспорт та ін. НЕЕ застосовуються і на залізничному транспорті як традиційні акумуляторні батареї для резервування малопотужних споживачів.

Наймасовіші накопичувачі електричної енергії – це звичайні радіотехнічні конденсатори. Вони мають велику швидкість накопичення і віддачі енергії – як правило, від кількох тисяч до багатьох мільярдів повних циклів на секунду, і здатні так працювати в широкому діапазоні температур багато років, а то й десятиліття. Поєднуючи кілька конденсаторів паралельно, легко можна збільшити їхню сумарну ємність до потрібної величини. Стосовно цієї роботи використовуються суперконденсатори.

Створення енергоефективного рухомого складу потребує ретельного аналізу та розрахунку параметрів НЕЕ. Крім того, необхідно враховувати масогабаритні показники накопичувачів, оскільки це впливає на розвантаження тепловоза і на компоновання обладнання на тепловозах.

При компонованні обладнання на локомотиві необхідно забезпечити наступне:

- рівномірність розподілу навантаження на рейки від колісних пар;
- мінімальну довжину екіпажної частини, малогабаритність та компактність складальних одиниць;
- зручність монтажу та доступність обслуговування обладнання;
- простоту конструкцій елементів робочих зв'язків силового та допоміжного обладнання;
- високу технологічність конструкції;
- оптимальні умови роботи локомотивної бригади та ремонтного персоналу тощо.

Крім того, на компоновання локомотива впливають його призначення, умови експлуатації, габаритні обмеження, рівень технічної та технологічної

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						72
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

досконалості виробництва, сучасні тенденції розвитку вітчизняного та закордонного локомотивобудування.

Основне призначення розважування тепловоза полягає у розміщенні обраного обладнання локомотива таким чином, щоб забезпечити задані навантаження коліс на рейки. Якщо у тепловоза кожна колісна пара має індивідуальний привід, то навантаження на кожную вісь має бути однаковим, що забезпечує найкраще використання зчіпної ваги тепловоза.

Можливе також використання НЕЕ на тепловозах разом із застосуванням рекуперативного гальмування. В такому випадку зберігання і розподіл енергії, що виробляється від рекуперативного гальмування є функцією НЕЕ. Дане використання можливе при застосуванні так званого «гібридного приводу» на тепловозах. Під поняттям «гібридний привід» мається на увазі використання двох і більше різних силових установок, під рекуперативним гальмуванням розуміють вид електричного гальмування, при якому не задіяна пневматична система локомотива, при цьому тягові двигуни переходять в генераторний режим, а електрична енергія, що виробляється ними, може бути корисно використана. З метою встановлення правильності виконання розвіски тепловоза, дотримання габаритних розмірів з урахуванням розміщення додаткового обладнання на тепловозі (НЕЕ) проводиться розрахунок параметрів накопичувачів енергії [43].

З урахуванням попередньо розрахованої кількості виробленої (зекономленої) енергії, можна розрахувати кількість ланок накопичувача енергії:

$$n_{\text{лан.}} = \frac{\sum R_{\text{вир.}}}{c_{\text{я}}} + n_{\text{о}} \quad (36)$$

де $\sum R_{\text{вир.}}$ – вироблена (зекономлена) електрична енергія, МДж;

$n_{\text{о}} = 1$ – додаткова ланка, для недопущення пового розряду;

$c_{\text{я}}$ – об'єм енергії, що вміщає одна ланка накопичувача, МДж.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						73
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Знаючи кількість ланок накопичувача, розраховуються габаритні характеристики накопичувача енергії, м³:

$$V_{\text{нак.}} = V_{\text{лан.}} \cdot n_{\text{лан.}} \quad (37)$$

де $V_{\text{лан.}}$ — габаритний об'єм однієї ланки накопичувача, м³;

$n_{\text{лан.}}$ — кількість ланок накопичувача енергії, шт.

Як показує досвід найбільш доцільним є встановлення ланок накопичувача рівномірно по всій площі на даху локомотива. Таке розташування накопичувачів не порушує розважування та спрощує їх монтаж, при цьому не порушуються габаритні розміри для рухомого складу.

Маса накопичувача енергії складає, т:

$$m_{\text{нак.}} = m_{\text{лан.}} \cdot n_{\text{лан.}} \quad (38)$$

де $m_{\text{лан.}}$ — маса однієї ланки накопичувача енергії, т;

$n_{\text{лан.}}$ — кількість ланок накопичувача енергії, шт.

Вказана особливість збільшить масу тепловоза, яка у разі встановлення накопичувачів енергії складе, т:

$$Q_{\text{т.заг.}} = Q_{\text{т.попер.}} + m_{\text{нак.}} \quad (39)$$

де $Q_{\text{т.попер.}}$ — маса тепловоза, т;

$m_{\text{нак.}}$ — маса накопичувача енергії, т.

Перейдемо до розрахунку навантаження на вісь, яке при встановленню обладнанні рівне:

$$F_{\text{к.п.}} = \frac{Q_{\text{т.заг.}}}{n} \quad (40)$$

де $Q_{\text{т.заг.}}$ — маса тепловоза після установки накопичувача енергії, т;

n — кількість осей тепловоза.

Розрахувавши за формулою (40) навантаження на вісь, необхідно перевірити чи не перевищує вказане значення максимально допустиме згідно норм по навантаженню на вісь рухомого складу.

Для наочної демонстрації ефективності застосування «гібридного приводу» з використанням НЕЕ (суперконденсаторів) необхідно розрахувати загальний ККД тепловоза та кількість зекономленого палива з урахуванням застосування даного приводу та обладнання.

Таким чином, ККД при роботі від накопичувачів енергії складе:

$$\eta_{\text{уст.}} = \eta_{\text{нак.}} \cdot \eta_{\text{пер.}} \cdot \eta_{\text{тд.}} \quad (41)$$

де $\eta_{\text{нак.}}$ — ККД електрохімічного накопичувача енергії;

$\eta_{\text{пер.}}$ — ККД електричної передачі тепловоза;

$\eta_{\text{тд.}}$ — ККД тягових електродвигунів.

За нормами витрати палива на шляху прямування тепловоз витрачає певну кількість дизельного палива, що еквівалентно енергії рівної, МДж:

$$F_{\text{пал.}} = m_{\text{пал.}} \cdot q \cdot \eta_{\text{тепл.}} \quad (42)$$

де $m_{\text{пал.}}$ — сума палива, затраченого тепловоз на шляху прямування, кг;

q — питома тепловта згоряння дизельного палива, МДж/кг;

$\eta_{\text{тепл.}}$ — коефіцієнт корисної дії тепловоза.

Витрата палива на тонну ваги складу в обох напрямках руху складає, кг/т:

$$f_{\text{пал.}} = \frac{m_{\text{пал.}}}{Q_{\text{т.попер.}} + Q_{\text{заг.ваг.}}} \quad (43)$$

де $m_{\text{пал.}}$ — сума палива, затраченого тепловоз на шляху прямування, кг;

$Q_{\text{т.попер.}}$ — маса тепловоза, до постановки додаткового обладнання т;

$Q_{\text{заг.ваг.}}$ — загальна маса вагонів, т.

З урахуванням збільшеної маси тепловоза після встановлення додаткового обладнання витрата палива за одну поїздку в обох напрямках складе, кг:

$$m'_{\text{пал.}} = f_{\text{пал.}} \cdot (Q_{\text{т.заг.}} + Q_{\text{заг.ваг.}}) \quad (44)$$

де $f_{\text{пал.}}$ — витрата палива на тонну ваги складу в обох напрямках руху, кг/т;

$Q_{\text{т.заг.}}$ — маса тепловоза після установки накопичувача енергії, т.

З урахуванням повного використання (виробленої) зекономленої енергії кількість отриманої накопичувачами енергії складе, МДж:

$$F_{\text{енерг.}} = \sum R_{\text{вир.}} \cdot \eta_{\text{уст.}} \quad (45)$$

де $\sum R_{\text{вир.}}$ – вироблена (зекономлена) електрична енергія, МДж;
 $\eta_{\text{уст.}}$ – ККД при роботі від накопичувача енергії.

Дану величину можна виразити в кількості зекономленого палива, кг:

$$m_{\text{пал.}}^{\text{екон.}} = \frac{F_{\text{енерг.}}}{q \cdot \eta_{\text{тепл.}}} \quad (46)$$

де $F_{\text{енерг.}}$ – кількість вихідної енергії при роботі від накопичувачів, МДж;
 q – питома теплота згоряння дизельного палива, МДж/кг;
 $\eta_{\text{тепл.}}$ – коефіцієнт корисної дії тепловоза.

За умови збільшення витрати палива через встановлення додаткового обладнання, норма витрати палива для тепловоза з накопичувачами енергії складе, кг:

$$m_{\text{пал.}}'' = m_{\text{пал.}}' - m_{\text{пал.}}^{\text{екон.}} \quad (47)$$

де $m_{\text{пал.}}'$ – витрата палива за одну поїздку, з урахуванням ваги додаткового обладнання кг;
 $m_{\text{пал.}}^{\text{екон.}}$ – кількість зекономленого за одну поїздку в обох напрямках палива, кг.

Годинна витрата палива для тепловоза-зразка та тепловоза зі встановленими накопичувачами складає, кг/год:

$$B_{\text{год.}} = \frac{m_{\text{пал.}}}{t} \quad (48)$$

$$B'_{\text{год.}} = \frac{m_{\text{пал.}}''}{t} \quad (49)$$

де $m_{\text{пал.}}$ – витрата палива тепловоза-зразка на одну поїздку в обидва напрямки, кг;

$m''_{\text{пал.}}$ – витрата палива тепловоза з встановленим накопичувачем енергії, кг;

t – час в дорозі в обидва напрями, год.

Відсоток економії при використанні гібридної установки щодо тепловоза зразка, %:

$$\mu = \frac{m_{\text{пал.}} - m''_{\text{пал.}}}{m_{\text{пал.}}} \quad (50)$$

Відповідно ККД тепловоза з накопичувачем енергії буде збільшено по відношенню до ККД тепловоза-зразка і складе:

$$\eta'_{\text{тепл.}} = \eta_{\text{тепл.}} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{100}\right) \quad (51)$$

де $\eta_{\text{тепл.}}$ – ККД тепловоза-зразка;

μ – відсоток економії при використанні гібридної установки щодо тепловоза-зразка.

Ресурс дизеля так само буде збільшено еквівалентно енергії взятої від накопичувача, тобто пропорційно відсотку економії, км:

$$L' = L \cdot \left(1 + \frac{\mu}{100}\right) \quad (52)$$

Отже, проведені дослідження у роботі [1] показують, що тепловоз із впровадженою гібридною установкою має набагато вищі показники в порівнянні з показниками тепловоза-зразка, що наочно показано на (рис. 22).

Технічні показники тепловоза-зразка та тепловоза на якому застосовується гібридна установка зведені в (табл. 12).

Таким чином, важливою перевагою тепловоза з накопичувачем енергії є його висока економічність за рахунок зниження витрати палива.

Таблиця 12 – Порівняльні параметри тепловоза-зразка та тепловоза з використанням гібридної установки [43].

Назва показника	Значення показника для тепловоза-зразка	Значення показника під час впровадження установки
маса тепловоза, т	135	137
маса складу, т	735	737
витрата палива, кг/поїздка	756,5	623,76
годинна витрата, кг/год.	72,74	59,98
ККД	0,36	0,42
ресурс дизельного двигуна, км	270000	317375

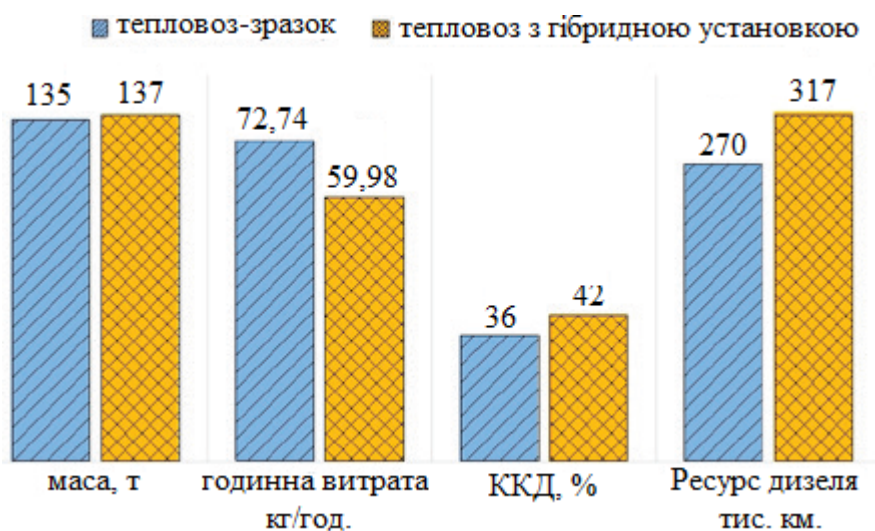


Рисунок 22 – Графік порівняння характеристик тепловоза - зразка і тепловоза, що розраховується, з гібридною установкою

Слід зазначити підвищення автономності, порівняно із звичайними тепловозами, яка досягається за рахунок реалізації живлення тягових двигунів від накопичувачів енергії, розвантаження дизель-генераторної установки шляхом подачі живлення від накопичувачів енергії на привід допоміжного обладнання.

Висновки до розділу 4

- розглянуто диференціальні рівняння руху поїзда, складені рівняння балансу сил, балансу потужностей та енергетичного балансу;
- проаналізована залежність зміни сил основного опору для поїздів різної маси;
- наведена методика визначення кількості ланок накопичувача енергії, його габаритних розмірів, загальної маси накопичувача енергії, питомої витрати палива, кількості зекономленого палива, годинної витрати палива та відповідно ККД тепловоза з накопичувачем енергії;
- порівняно технічні показники тепловоза-зразка та тепловоза на якому застосовується гібридна установка.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						79
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

- розглянуто актуальність питання зменшення витрат дизельного палива маневровими тепловозами шляхом використовуючи енергозберігаючих технологій у відповідності екологічним вимогам;
- проаналізовано загальний експлуатаційний парк маневрових тепловозів провідних країн Європи;
- проведено аналіз основних режимів роботи маневрових тепловозів та розглянуто методи оцінки їх енергетичної ефективності;
- розглянуто види палива, що використовується в дизельних двигунах на залізничному транспорті;
- проаналізовано використання рівнів Директиви ЄС 2004/26/ЄС щодо викидів залізничного транспорту в навколишнє середовище та Директиви ЄС (1999/32/ЄС) щодо якості дизельного палива;
- встановлено, що правове регулювання викидів залізничного транспорту в США передбачає п'ять рівня вимог до вихлопних газів тепловозів в залежності від терміну виготовлення рухомого складу;
- встановлено дерево прийняття рішень дощо викидів від залізничного транспорту;
- проведено порівняльний аналіз основних властивостей дизельних палив;
- наведено залежності для порівняння потужності силової установки, питомої витрати палива та екологічних ефектів при використанні різних марок дизельних палив;
- розглянуто гібридні технології, як один із шляхів покращення екологічності та економічності експлуатації тепловозів;
- розглянуто використання сонячної енергії, що передбачає скорочення емісії вуглекислого газу, зменшення витрат палива, зниження рівня шуму;
- розглянуто диференціальні рівняння руху поїзда, складені рівняння балансу сил, балансу потужностей та енергетичного балансу;

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						80
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

- проаналізована залежність зміни сил основного опору для поїздів різної маси;
- наведена методика визначення кількості ланок накопичувача енергії, його габаритних розмірів, загальної маси накопичувача енергії, питомої витрати палива, кількості зекономленого палива, годинної витрати палива та відповідно ККД тепловоза з накопичувачем енергії;
- порівняно технічні показників тепловоза-зразка та тепловоза на якому застосовується гібридна установка.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						81
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Щуров Н. И. Анализ режимов работы силовых установок маневровых тепловозов / Н.И. Щуров, Е.Г. Гурова, С.В. Макаров, Д.М. Стрельникова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 104.
2. Railfaneurope.net Stock Lists [Electronic resource] // The European Railway Server.
3. Перспективы рынка дизельного подвижного состава в Европе // Железные дороги мира. – 2012. – № 1 – С. 38–42.
4. Гибридный маневровый локомотив // Железные дороги мира. Москва. – 2010. – № 9. – С. 26–29.
5. Фалендыш, А.П. Использование гибридных передач на маневровых тепловозах / А.П. Фалендыш, Н.В. Володарец // Локомотив-информ. – 2010. – № 12. – С. 4–6.
6. Локомотив Green Goat [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – 2004. – №3.
7. Альтернативные источники энергии для локомотивов // Железные дороги мира. Москва. – 2012. – №12. – С. 32–36.
8. Новые тепловозы для маневровой и поездной работы // Железные дороги мира. – 2012. – № 10. – С. 38–42.
9. Обновление локомотивного парка железных дорог США и Канады // Железные дороги мира. Москва. – 2008. – № 10. – С. 62–65.
10. Зайцева, Т.Н. Многодизельные тепловозы [Электронный ресурс] / Т.Н. Зайцева, П.А. Полин // Локомотив. – 2012. – № 6.
11. Новый дизельный локомотив Terra Nova // Локомотив-информ. – 2014. – № 12. – С. 30–33.
12. Проекты гибридных локомотивов // Железные дороги мира. – 2015. – № 4. – С. 56–60.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						82
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

13. 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.
14. Надежность, экономия, инновации [Электронный ресурс] // Журнал для партнеров ЗАО «Трансмашхолдинг». – 2013. – № 2. – С. 14–17.
15. Маневровые локомотивы [Электронный ресурс] // Инновационный дайджест. – Режим доступа: http://rzd-expo.ru/innovation/stock/shunting_locomotives/
16. 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.
17. Приоритеты ОАО «РЖД»: энергосбережение и энергетическая эффективность // Локомотив. – 2009. – № 12. – С. 8–10.
18. Резервы экономии топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов/ С сетевой школы // Локомотив. – 2009. – № 12. – С. 11–13.
19. Носырев, Д.Я. Инновационные энергосберегающие технологии в локомотивном хозяйстве – монография / Д.Я. Носырев, А.В. Муратов, С.А. Петухов [и др.]; под ред. Ю.Е. Просвинова. – Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2012. – 123 с.
20. Грищенко, А.В. Повышение надежности и экономичности локомотивов: сборник научных трудов. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2008. – 95 с.
21. Грищенко, А.В. Совершенствование конструкции локомотивов и системы их обслуживания: сборник научных трудов. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2004. – 201 с.
22. Балакин, А.Ю. К вопросу о переходе эксплуатации локомотивов по техническому состоянию / А.Ю. Балакин, А.Д. Росляков, П.В. Шепелин / Бюллетень результатов научных исследований. – 2015. – № 3-4 (16-17). – С. 7–12.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						83
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

23. Боков, В.М. Методика определения экономической эффективности маневровых и промышленных тепловозов РТМ 24.040.016-81 №ЕМ002/141-76/ В.М. Боков, Л.И. Баранов [и др.] – М.: Изд-во Министерство тяжелого и транспортного машиностроения, 1981. – 194 с.
24. Игин, В.Н. Анализ существующих методик нормирования дизельного топлива и рекомендации по их совершенствованию / В.Н. Игин // Материалы сетевой школы: «Опыт организации работы по рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов». – М., 2002. – С. 17–19.
25. Воронько, В.А. Математическая модель движения маневрового тепловоза / В.А. Воронько // Сборник трудов ЦНИИТЭИ МПС. – 2001. – № 12. – С. 27–32.
26. Овчинников, В.М. Сокращение расходов дизельного топлива на маневрах / В.М. Овчинников, С.А. Пожидаев, Н.Г. Швец, В.В. Скрежендевский // Транспортные системы и технологии перевозок. – 2011. – С. 62–70.
27. Бобровский, В.И. Совершенствование имитационной модели процесса надвига и роспуска составов на сортировочных горках / В.И. Бобровский, Е.Б. Демченко // Транспортные системы и технологии перевозок. – 2012. – С. 5–9.
28. Васильев, В.Н. Эксплуатационная экономичность тепловозных дизелей с учетом переходных процессов: труды МИИТ / В.Н. Васильев. – М.: Транспорт, 1978. – 611 с.
29. Третьяков, А.П. Экономичность тепловозных дизелей и способы ее повышения / А.П. Третьяков, В.Н. Васильев // Электрическая и тепловозная тяга. – 1968. – № 4. – С. 40.
30. Фалендиш, А.П. Розробка моделі розрахунку техніко-економічних параметрів маневрового тепловозу із застосуванням гібридної тяги / А.П. Фалендиш, М.В. Володарець // Збірник наукових праць ДонІЗТ . – 2010. – № 23. – С. 125–162.

31. Балабин, В.Н. Расход топлива можно учитывать точно / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, О.Ю. Живов // Локомотив. – 2003. – № 4. – С. 33–35.
32. Фалендыш, А.П. Оценка технического уровня маневровых тепловозов с гибридной передачей / А.П. Фалендыш, Н.В. Володарец // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2010. – № 5(147). – Ч. 2. – С. 134–141.
33. Гончаров, Н.Е. Маневровая работа на железнодорожном транспорте / Н.Е. Гончаров, В.П. Казанцев. – М.: Транспорт, 1978. – 183 с.
34. Бородин, А.Ф. Технология работы сортировочных станций / А.Ф. Бородин, Г.М. Биленко, О.А. Олейник, Е.В. Бородина – М.: РГОТУПС, 2002. – 192 с.
35. Маневровые тепловозы / Под редакцией Л.С. Назарова. – М.: Транспорт, 1977. – 414 с.
36. 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.
37. Environmental protection agency 40 CFR Parts 9, 85, 86, 89, 92, 94, 1033, 1039, 1042, 1065, and 1068 [EPA-HQ-OAR-2003-0190; FRL-8545-3] RIN 2060-AM06 Control of Emissions of Air Pollution From Locomotive Engines and Marine Compression-Ignition Engines Less Than 30 Liters per Cylinder; Republication
38. Regulatory Announcement of The U.S. Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality EPA-420-F-08-004 “EPA Finalizes More Stringent Emissions Standards for Locomotives and Marine Compression-Ignition Engines”
39. Council Directive 1999/32/EC relating to a reduction in the sulphur content of certain liquid fuels and amending Directive 93/12/EEC
40. Каменский Е. Н., Булыгин Ю. И. Исследование технико-экологических и экономических характеристик тепловозных ДВС при использовании

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						85
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

топлив качества euro стандарта // Advanced Engineering Research. – 2009. №9 (3). – С. 458-468.

41. Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров // М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
42. Кузьмич, В.Д. Теория локомотивной тяги / В.Д. Кузьмич, В.С. Руднев, С.Я. Френкель // М.: Маршрут, 2005. – 448 с.
43. Расчет эффективности применения накопителей электрической энергии на тепловозах, их параметров и условий размещения / А. В. Литвинов, П. А. Бернс, Е. Г. Абишов [и др.]. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 22 (126). – С. 40-44.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		86

СПИСОК РИСУНКІВ

- Рисунок 1 – Співвідношення кількості маневрових тепловозів відповідно до їх експлуатуючих країн.
- Рисунок 2 – Аналіз кількості маневрових тепловозів за часом їх побудови.
- Рисунок 3 – Аналіз кількості маневрових тепловозів країн ЄС відповідно до їх потужностей.
- Рисунок 4 – Аналіз кількості маневрових тепловозів країн ЄС за типами передачі.
- Рисунок 5 – Середньостатистичні значення параметрів роботи тепловозів ЧМЕЗ в різних умовах експлуатації.
- Рисунок 6 – Технологічна схема розподілу викидів, що утворюються при горінні, починаючи із залізничного транспорту і закінчуючи пересувними джерелами.
- Рисунок 7 – Динаміка очікуваного зниження викидів NO_x.
- Рисунок 8 – Динаміка очікуваного зниження викидів PM_{2.5} (частинок більше 2,5 мк в діаметрі).
- Рисунок 9 – Дерево прийняття рішення щодо викидів від залізничного транспорту.
- Рисунок 10 – Схема реостатної установки для вимірювання потужності тепловоза.
- Рисунок 11 – Схема вимірювання масової витрати палива дизелем тепловоза.
- Рисунок 12 – Тягова характеристика тепловоза.
- Рисунок 13 – Питома витрата палива.
- Рисунок 14 – Концентрації у відпрацьованих газах дизеля K6S310DR тепловоза ЧМЕЗ.
- Рисунок 15 – Експериментальний локомотив V100 на виставці InnoTrans 2006.

Рисунок 16 – Гібридний локомотив виробництва Alstom для компанії MEG.

Рисунок 17 – Концепція локомотива НЗ.

Рисунок 18 – Сонячна батарея, встановлена на капоті тепловоза Janine.

Рисунок 19 – Тепловоз Janine, який експлуатується Strukton Rail.

Рисунок 20 – Схема дії сил.

Рисунок 21 – Зміна сили основного опору $W_0(V)$ для поїздів з тягою тепловоза різної маси.

Рисунок 22 – Графік порівняння характеристик тепловоза - зразка і тепловоза, що розраховується, з гібридною установкою.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		88

СПИСОК ТАБЛИЦЬ

Таблиця 1 – Дати по впровадженню Директиви ЄС 2004/26/ЄС відповідно до типу двигуна (P = корисна потужність двигуна).

Таблиця 2 – Вимоги стандарту 40CFR 1033 до емісії магістральних тепловозів.

Таблиця 3 – Вимоги стандарту 40CFR 1033 до емісії маневрових тепловозів.

Таблиця 4 – Вимоги стандарту 40CFR 1033 до димності вихлопних газів тепловозів.

Таблиця 5 – Вимоги рівня ША Директиви 2004/26/ЄС до емісії тепловозів та дрезин.

Таблиця 6 – Вимоги рівня ШВ Директиви 2004/26/ЄС до емісії тепловозів та дрезин.

Таблиця 7 – Величини середньоексплуатаційних питомих викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами тепловозних дизелів.

Таблиця 8 – ГОСТ Р 50953-2008. Гранично допустимий викид шкідливих речовин і гранично допустиме значення димності відпрацьованих газів нових (після побудови) тепловозів, а також модернізованих (із заміною двигуна).

Таблиця 9 – Витрата палива по різним типам локомотивів.

Таблиця 10 – Порівняльний аналіз основних властивостей дизельних палив.

Таблиця 11 – Технічні характеристики локомотивів V100 і НЗ.

Таблиця 12 – Порівняльні параметри тепловоза-зразка та тепловоза з використанням гібридної установки [43].

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		89

АНОТАЦІЯ І КЛЮЧОВІ СЛОВА

Орловський І.О. Дипломна магістерська робота на тему: «Дослідження перспектив використання гібридних локомотивів у міжнародному сполученні»: 91 с., 22 рис., 12 табл., 43 дж.

МАНЕВРОВІ ТЕПЛОВОЗИ, ВИТРАТА ПАЛИВА, ЕКОЛОГІЯ, ЕНЕРГІЯ, ТЕХНІЧНІ СПЕЦИФІКАЦІЇ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ

Об'єкт дослідження – тепловози з модульними силовими енергетичними установками, які використовуються провідними компаніями на ринку залізничного транспорту.

Предмет дослідження – підходи щодо проектування тепловозів з модульним силовими енергетичними установками відповідно до технічних специфікацій інтероперабельності (ТСІ).

Мета роботи – дослідити перспективи використання гібридних локомотивів у міжнародному сполученні у порівнянні з вітчизняним рухомим складом.

Для досягнення поставленої мети в роботі виконано аналіз основних тенденцій та напрямків розвитку в області автономного тягового рухомого складу для виконання маневрової роботи, розглянуто основні режими роботи маневрових тепловозів, закордонний досвід правового регулювання викидів залізничного рухомого складу, проаналізовано методи оцінки викидів від залізничної техніки, наведено розрахунок ефективності застосування накопичувачів електричної енергії та тепловозах, їх параметри та умови розміщення.

Проведені дослідження дозволяють, використовуючи даний підхід, підбирати відповідні параметри накопичувачів електричної енергії рухомого складу відповідно до технічних специфікацій інтероперабельності.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						90
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

ABSTRACT AND KEYWORDS

Orlovsky Ivan. Master's degree on «Research of the prospects for the use of hybrid locomotives in international traffic»: 91 p., 22 figs., 12 tables, 43 sources.

SHUTTER LOCKS, FUEL CONSUMPTION, ECOLOGY, ENERGY, INTEROPERABILITY TECHNICAL SPECIFICATIONS

The object of research is diesel locomotives with modular power plants used by leading companies in the railway transport market.

The subject of the research is approaches to the design of diesel locomotives with modular power plants in accordance with the technical specifications for interoperability (TSI).

The purpose of the work is exploring the prospects for the use of hybrid locomotives in international traffic in comparison with domestic rolling stock.

To achieve this goal, the paper analyzes the main trends and directions of development in the field of autonomous traction rolling stock for performing shunting work, considers the main modes of operation of shunting diesel locomotives, foreign experience in legal regulation of emissions from railway rolling stock, analyzes methods for assessing emissions from railway equipment, efficiency of application electric energy storage units and diesel locomotives, their parameters and placement conditions.

The studies carried out make it possible, using this approach, to select the appropriate parameters of the electric energy storage units of the rolling stock in accordance with the technical specifications of interoperability.

					0032.206553.MP.2021.001	Арк.
						91
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		