Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Львівський інститут
(назва факультету)

Рухомий склад залізниць і колія
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

«Бакалавр»
(ступінь вищої освіти)

на тему: Модернізація автономних локомотивів з використанням модульних силових установок
за освітньою програмою Локомотиви та локомотивне господарство
зі спеціальності: 273 "Залізничний транспорт"
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: ЛГ 19117

(підпис студента) /Назарій ДЕМКІВ/
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: (підпис) /ст. викладач, Андрій КУЗИШИН/
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер: (підпис) /викладач, Іван КРАВЕЦЬ/
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент (підпис)

Львів – 2022 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Lviv Institute
(faculty)

Rolling stock of railways and tracks
(department)

Explanatory Note
to Master's Thesis
«Bachelor»
(higher education degree)

on the topic: Modernization of autonomous locomotives with the use of modular power plants

according to educational curriculum «Locomotives and locomotive economy»

in the Speciality: 273 «Railway transport»
(speciality and its code)

Done by the student of the group: LG19117 /Nazariy DEMKIV/
(name, surname)

Scientific Supervisor: /senior lecturer, Andrii KUZYSHYN/
(position, name, surname)

Normative controller : /teacher, Ivan KRAVETS/
(position, name, surname)

Supervisors

(Chapter title heading)	/ / (position, name, surname)
(Chapter title heading)	/ / (position, name, surname)
(Chapter title heading)	/ / (position, name, surname)
(Chapter title heading)	/ / (position, name, surname)

Lviv – 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 6
ВСТУП 7
1 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ 9
1.1 Гібридні технології компанії Toshiba 10
1.2 Гібридні маневрові локомотиви HD300 і DB CARGO HELMS 12
1.3 Гібридні локомотиви компанії ALSTOM 15
1.4 Гібридні локомотиви DE60 C Hybrid і DE75 BB компанії Gmeinder 18
1.5 Гібридний локомотив DE 18 SmartHybrid компанії Vossloh 20
1.6 Гібридний локомотив DE-Hybrid і HSL 700 Hybrid 22
1.7 Контактно-акумуляторний електровоз e-Hybrid InnoShunt 2016 компанії TecSol 25
2 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ 27
2.1 Накопичувачі енергії 27
2.2 Конденсатори та іоністори 29
2.3 Основні типи електрохімічних акумуляторів 32
3 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ 37
3.1 Режими руху тягового рухомого складу 37
3.2 Ефективність використання накопичувачів електричної енергії на тепловозах 42
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 50
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 51

(ЗАВДАННЯ НА РОБОТУ (ОКРЕМИЙ ДОКУМЕНТ, ОДИН ЛИСТ З ДВОХ СТОРІН ЗГІДНО ШАБЛОНУ)

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

(БУДЕ РОЗРОБЛЕНО ГЗЯОП)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра:

52 с., 17 рис., 9 табл., 11 джерел.

Об’єкт дослідження – різні типи гібридних установок для тягового рухомого складу.

Мета роботи – дослідження ефективності роботи силових установок тепловозів у перехідних режимах, шляхом застосування накопичувача енергії в силовому енергетичному колії.

Методи дослідження – математичні методи дослідження ефективності застосування накопичувачів електричної енергії, враховуючи режими експлуатації тягового рухомого складу.

Проаналізовано схеми роботи гібридних локомотивів з використанням сучасних світових технологій. Встановлено кількість ланок накопичувача енергії, його габаритні розміри, загальну маси накопичувача енергії, питому витрату палива, кількість зекономленого палива, годинну витрату палива та відповідно ККД тепловоза з накопичувачем енергії.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні гібридних локомотивів, що дозволить зменшити витрати палива та підвищити економічність роботи тягового рухомого складу при різних режимах його експлуатації.

Ключові слова: ГІБРИДНИЙ ЛОКОМОТИВ, НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ, ВИТРАТА ПАЛИВА, РЕЖИМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ

ПЕРІЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

EPC	Електрорухомий склад
SCiB	Super Charge Ion Batter
TESS	Traction Energy Storage System
КНР	Китайська Народна Республіка
ШІМ	Широтно-імпульсна модуляція
НЕ	Накопичувачі енергії
ЄНЕ	Ємнісні накопичувачі енергії
МНЕ	Молекулярні накопичувачі енергії
ІНЕ	Індуктивні накопичувачі енергії
НПІНЕ	Надпровідні індуктивні накопичувачі енергії
ККД	Коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

У сучасних умовах, поряд із підвищенням продуктивності локомотивів дедалі більшої важливості набуває економія паливно-енергетичних ресурсів, підвищення надійності та екологічної ефективності. В даний час на мережі залізниць експлуатується значна кількість локомотивів, що виробили свій ресурс. Розробка нового рухомого складу та заміна ним застарілих локомотивів пов'язана зі значними матеріальними витратами, тому особливого значення набуває удосконалення існуючих локомотивів. Основною метою модернізації експлуатованих та створення нових локомотивів є підвищення їх продуктивності та/або енергетичної ефективності, що сприяють скороченню витрати пального на тягу поїздів та при простої з працюючою силовою установкою.

Одним із способів досягнення цієї мети є застосування комбінованих силових установок, до складу яких входять накопичувачі різних видів енергії. Тип та параметри накопичувача повинні обґрунтовуватись, виходячи з конкретних умов. У свою чергу, обрані характеристики накопичувача енергії визначають тип та параметри тягової передачі, що забезпечує узгоджену роботу всіх ланок силового кола локомотива.

Проблеми акумулювання енергії при автономній тязі розглядалися фахівцями і раніше, проте донедавна практичне вирішення цього питання було пов'язано з низкою технічних труднощів, які переважають у відсутності технологій і матеріалів для створення ефективних перетворювачів та накопичувачів енергії підвищеної енергоємності, що володіють до того ж досить високою надійністю. Застосування подібних систем часто виявлялося економічно недоцільним через їхню високу вартість, у зв'язку з чим, витрати на впровадження цих систем перекривали очікувану економію палива від їх використання.

Застосування накопичувачів енергії, здатних сприймати змінні навантаження за одночасної стабілізації режиму роботи двигуна, дозволять підвищити його надійність та екологічні показники.

Враховуючи чималі витрати, необхідні при розробці та створенні систем накопичення та рекуперації енергії, розпочинати практичні роботи з їх впровадження на локомотивах слід після всебічного аналізу можливих переваг від їх застосування у співвідношенні з додатковими витратами по обладнанню ними рухомого складу.

Отже, метою даної роботи є дослідження ефективності роботи силових установок тепловозів у перехідних режимах, шляхом застосування накопичувача енергії в силовому енергетичному колії.

Об'єктом дослідження в даній роботі є різні типи гібридних установок для тягового рухомого складу.

Предметом дослідження являються підходи щодо використання на тяговому рухомому складі накопичувачів енергії та розрахунку їх ефективного використання.

1 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Назву «гібридний» отримав рухомий склад, що має різні силові установки або отримує енергію від різних джерел. До гібридів відносяться тепловози та дизель-поїзди з накопичувачами енергії на основі електричних або гідропневматичних акумуляторів енергії, контактно-акумуляторні електровози, локомотиви, здатні використовувати різні види палива. З певною часткою умовності гібридним можна вважати багатосистемний електрорухомий склад (EPC), дизель-електровози та дизель-поїзди. Основний прорив у цьому напрямку спостерігається у сфері накопичувачів енергії. Рухомий склад такого типу використовувався і раніше, використання гібридної конструкції було швидше вимушеним, враховуючи умови експлуатації.

Технічний прогрес у галузі накопичувачів дозволив суттєво покращити значення їх масових та габаритних показників. У результаті одному рухомому складу стало можливим використовувати декілька різнотипних енергоресурсів.

Гібридний рухомий склад розглядають як перехідний етап до нових силових установок. Однак поки важко сказати, що є гібридами третього покоління (тяговий рухомий склад з акумуляторами): вид рухомого складу або ступінь поступового переходу до акумуляторного рухомого складу.

У 2010 р. агентство з дослідження ринку Pike Research представило роботу «Технологічні інновації та драйвери зростання попиту на тепловози, електровози, дво- та багато-дизельні локомотиви та гібридні локомотиви [1].

Сьогодні можна сказати, що прогноз зростання навряд виконався: на початку 2018 р. у світі налічувалося близько 350 гібридних локомотивів, включаючи контактно-акумуляторні електровози, причому частина з них вийшла з ладу та відставлена від експлуатації. Але у вересні 2018 р. майже всі найбільші виробники локомотивів представили серійні зразки на виставці InnoTrans-2018. Таким чином, найближчим часом ситуація має докорінно змінитися [2].

1.1 Гібридні технології компанії Toshiba

На виставці InnoTrans-2018 найбільш представницькою була експозиція компанії Toshiba (Японія), що випускає як акумулятори для гібридного приводу, так і рухомий склад (рідкісність у світовій практиці). Бренд компанії – літій-титанатні (літій-титаново-оксидні) акумуляторні батареї SCiBTM (табл. 1.1), які застосовуються на гібридних локомотивах та електропоїздах. Такі батареї поки називають літій-титановими або нанобатареями, хоча це один із різновидів літій-іонних батарей. Абревіатура SCiB розшифровується як Super Charge Ion Batter, або дослівно (літій-) іонна батарея, що допускає надшвидкий заряд. Літій-титанатні батареї суттєво поступаються традиційним літій-іонним і навіть літій-залізофосфатним за щільністю енергії на одиницю маси (у кращих зразків до $50\,\frac{\text{Вт}\cdot\text{год}}{\text{кг}}$) і лише трохи «випереджають» за значеннями цього показника кислотні. Однак за іншими критеріями нові акумулятори значно перевершують традиційні: можливість прискореного шестихвилинного заряду з гігантським (за мірками традиційних батарей) струмом, більше 10 000 циклів заряду-розряду, термін служби більше 10 років, здатність працювати при температурі до -30 °С.

Таблиця 1.1 – Характеристики літій-титанатних акумуляторів

№	Характеристика	Значення
1	Геометричні розміри, мм	1900x2300x545
2	Маса, кг	1850
3	Запас енергії, $\text{кВт}\cdot\text{год}$	60
4	Тип охолодження	Примусове
5	Кількість циклів заряд-розряд	До 20000
6	Тип елементу (акумулятора)	SCiB^{TM}, $20\ \text{А}\cdot\text{год}$.
7	Місце установки	На даху або під вагоном

За шість хвилин при заряді струмом 8С (тобто величину ємності, А·год. необхідно помножити на 8), що для акумулятора 20 А·год. складе 160 А, за шість хвилин батарея заряджається на 80 %, а за 10 хв – на 100 % (рисунок 1.1)

при схемі заряду постійний струм – постійна напруга.

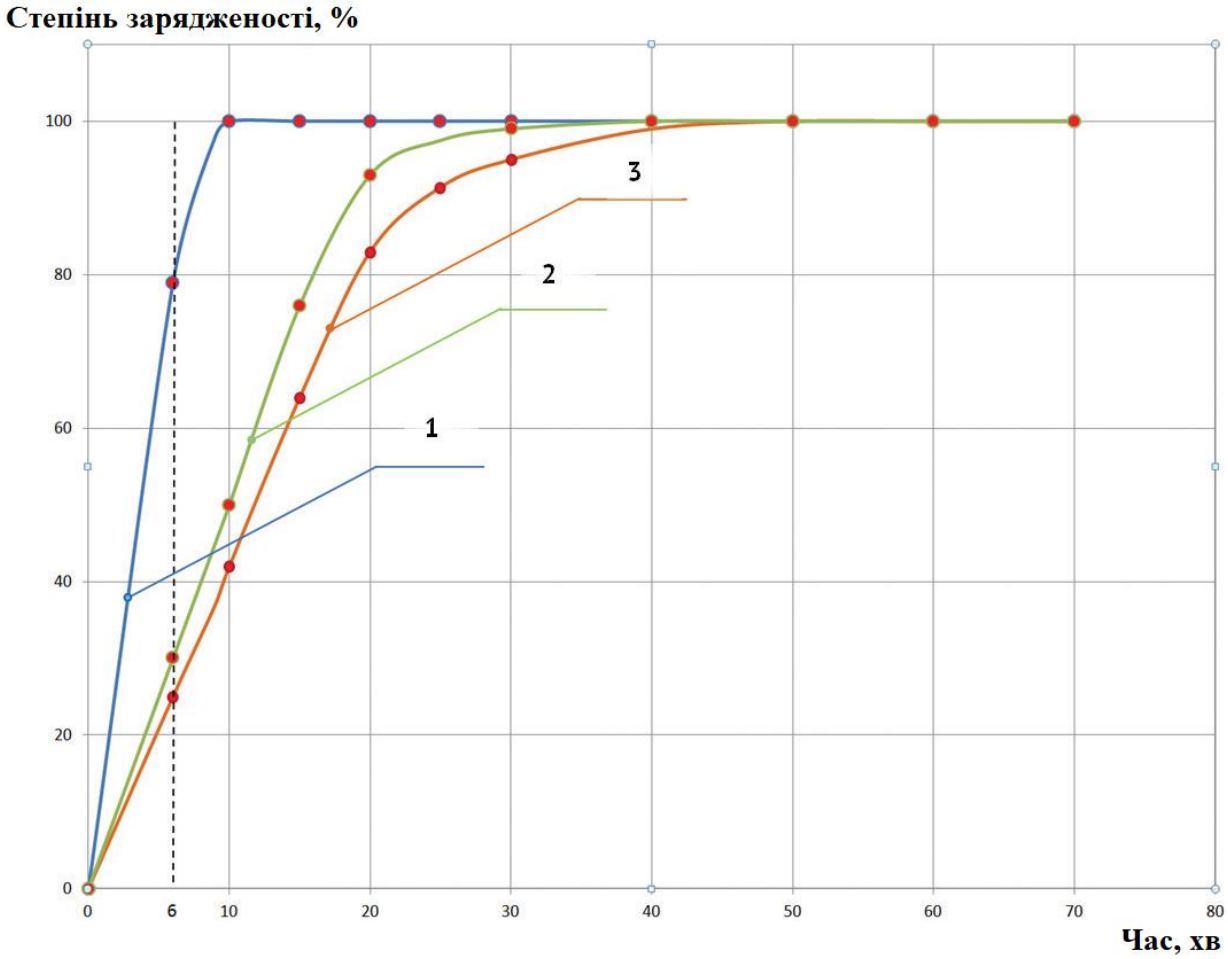

Рисунок 1.1 – Криві прискореного заряду тягових літій-іонних батарей

З наведених даних (див. рис. 1.1) випливає, що за швидкістю заряду та величиною зарядного струму (8С) літій-титанатна батарея істотно виграє у тягових літій-іонних батарей інших типів: літій-залізофосфатної (3С) та літієвомарганцевої (1,5С).

Раніше компанією Toshiba була представлена бортова система накопичувачів електроенергії для моторвагонного рухомого складу. У разі використання на електропоїздах система дозволяє накопичувати енергію гальмування до повної зупинки і віддавати її тяговим двигунам під час пуску. Одна з основних сфер передбачуваного використання - дизельний гібридний моторвагонний рухомий склад. Накопичувач SCiBTM, дизель-генератор та інвертори для живлення ТЕД з'єднані через ланку постійного струму. У процесі руху акумулятор заряджається від дизель-генераторної установки. При

гальмуванні енергія, вироблена тяговими двигунами, що працюють у режимі генераторів, використовується для заряду батареї та живлення допоміжного обладнання. При пуску енергія надходить від батареї на тягові двигуни та допоміжне обладнання через перетворювач (інвертор).

Якщо в 2014 р. була представлена лише батарея SCiBTM, то сьогодні компанія має лінію власного гібридного рухомого складу з такими джерелами.

Основні напрямки розвитку гібридного приводу такі:

– гібридний дизель-електропоїзд або дизель-поїзд з паралельно-послідовною схемою, що дозволяє підвищити потужність при пуску та розгоні за рахунок батареї (Traction Assistance), та можливістю прийняття енергії рекуперації на спусках або при уповільненнях (Deceleration Regeneration);

– гібридні тепловози із виконанням аналогічних функцій;

– контактно-акумуляторні електровози та дизель-електровози;

– система аварійного (бортового) живлення тягових двигунів для виведення поїздів із тунелів, з мостів до найближчої станції, наприклад, у метрополітенах.

Крім того, розроблені колійні системи для зберігання тягової енергії (Traction Energy Storage System, TESS) з прийняттям надлишкової енергії рекуперації з контактної мережі та стабілізацією напруги в ній при великому навантаженні, а також для забезпечення аварійного живлення при порушенні зовнішнього енергопостачання У деяких випадках система дозволяє відмовитися від додаткових тягових підстанцій [3].

1.2 Гібридні маневрові локомотиви HD300 і DB CARGO HELMS

Локомотиви HD 300 (рисунок 1.2; табл. 1.2) експлуатуються на залізницях Японії, а DB CARGO HELMS знаходяться у стадії проектування на замовлення компанії DB Cargo. Перший з них – гібридний тепловоз з електричною передачею, другий – модернізований тепловоз, обладнаний механічною передачею.

Таблиця 1.2 – Основні технічні характеристики гібридного локомотива компанії Toshiba HD300

№	Характеристика	Величина
1	Осьова формула	B_0 B_0
2	Енергія батареї, кВт · год.	40
3	Конструктивна швидкість, км/год.	45
4	Тип тягових двигунів	Синхронні, з постійними магнітами
5	Потужність, кВт	500
6	Тип гібридної схеми	Послідовна

Рисунок 1.2 – Маневрові гібридні локомотиви компанії Toshiba:
а) HD 300; б) DB CARGO HELMS

Відповідно до прийнятої класифікації гібридні схеми локомотивів відносяться до четвертого роду (дизельні локомотиви з накопичувачем іншої енергії в порівнянні з основним двигуном). В основі приводу локомотива DB CARGO HELMS лежить послідовно паралельна гібридна схема, в якій пристроєм, що узгоджує передачу потужності від дизельної установки до генератора, колісних пар і акумуляторної батареї SCiB, служить планетарний редуктор. Розглянуті локомотиви отримані внаслідок переобладнання типових німецьких тепловозів BR 294. Конструкція останніх включала збільшуючий зчіпну масу баласт, тому вдалося розмістити акумуляторну батарею та гібридний привід без збільшення маси та осьового навантаження. У ході

модернізації гідропередача замінюється механічним проводом із планетарними редукторами, блоком батарей, тяговими двигунами та генератором. Блок батарей аналогічний встановленому на раніше гібридному тепловозі японських залізниць HD 300, проте має велику енергоємність: до 150 кВт год.

Електрична схема гібридного локомотива DB CARGO HELMS передбачає встановлення накопичувача у ланку постійного струму. Таким чином, гібридний привід може працювати як послідовний, і як паралельний (рисунок 1.3).

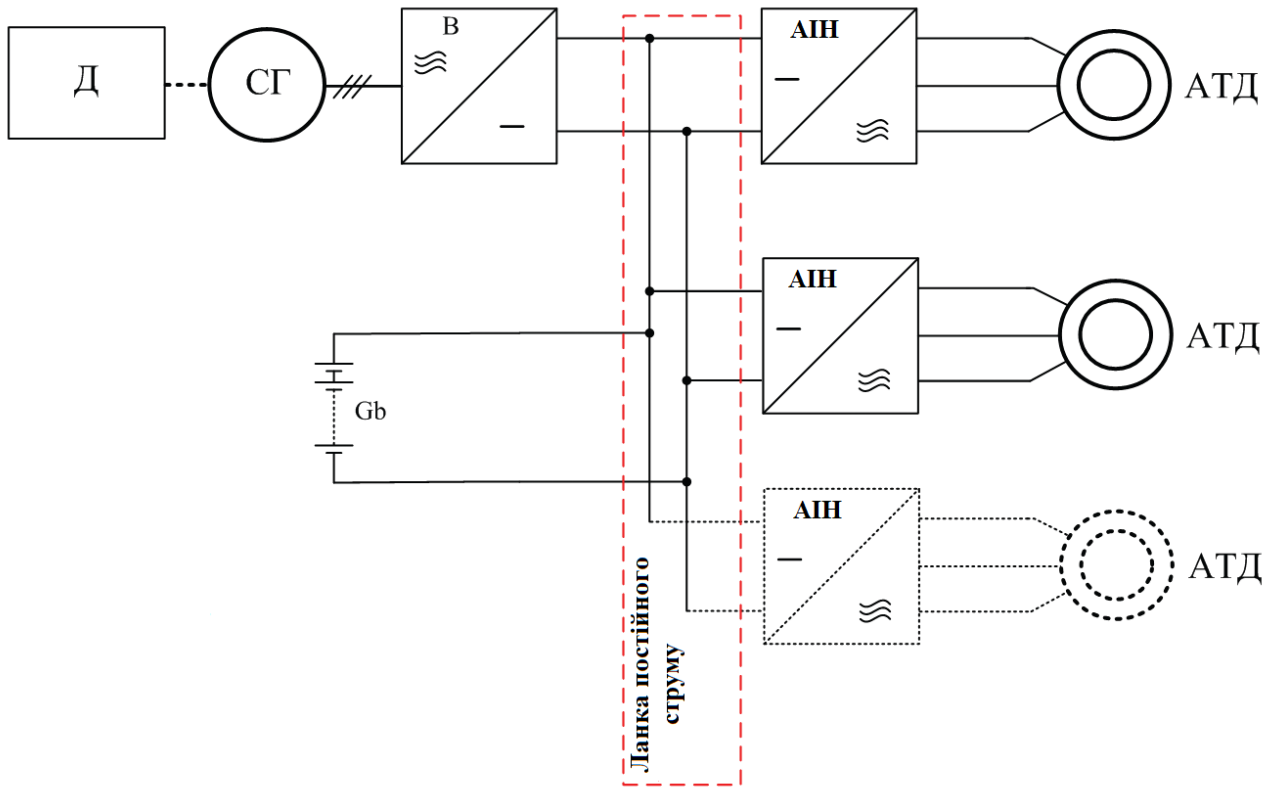

Рисунок 1.3 – Схема гібридного електроприводу Toshiba:

Д – дизель; СГ – генератор; В – випрямляч; АІН – автономний інвертор напруги; АТД – асинхронний тяговий електродвигун

Тягова характеристика гібридного локомотива компанії Toshiba наведена на (рисунок 1.4).

При рушанні з місця сила тяги становить 300 кН. Перехід на гіперболічну частину (розрахунковий режим) характеристики відбувається при швидкості близько 10 км/год, що є нормальним для маневрової машини. Асинхронний привід забезпечує сталість потужності 750 кВт у всьому діапазоні значень швидкості.

Рисунок 1.4 – Тягова характеристика гібридного локомотива компанії Toshiba

Таким чином, локомотив зможе виконувати маневрову роботу зі складом масою до тисячі тон або поїзну роботу з легкими поїздами [4].

1.3 Гібридні локомотиви компанії ALSTOM

В останні роки компанія Alstom налагодила випуск серії гібридних локомотивів, насамперед тепловозів із накопичувачами на основі акумуляторних батарей. Компанія випускає серію гібридних локомотивів сімейства PRIMA H3 (рисунок 1.5) з різними технічними характеристиками та схемами, зараз понад 20 локомотивів перебувають в експлуатації.

Також є і акумуляторна машина (акумуляторний електровоз), двох-дизельний варіант і найбільш потужний дизель-акумуляторний гібрид з дизелем до 1000 кВт. На локомотивах використається нікель-кадмієва акумуляторна батарея. Локомотиви випускаються у тривісному виконанні (осьова формула $A_0 - A_0 - A_0$).

Рисунок 1.5 – Гібридний локомотив компанії Alstom PRIMA H3

Принципова електрична схема гібридного локомотива PRIMA H3 наведена на (рисунок 1.6).

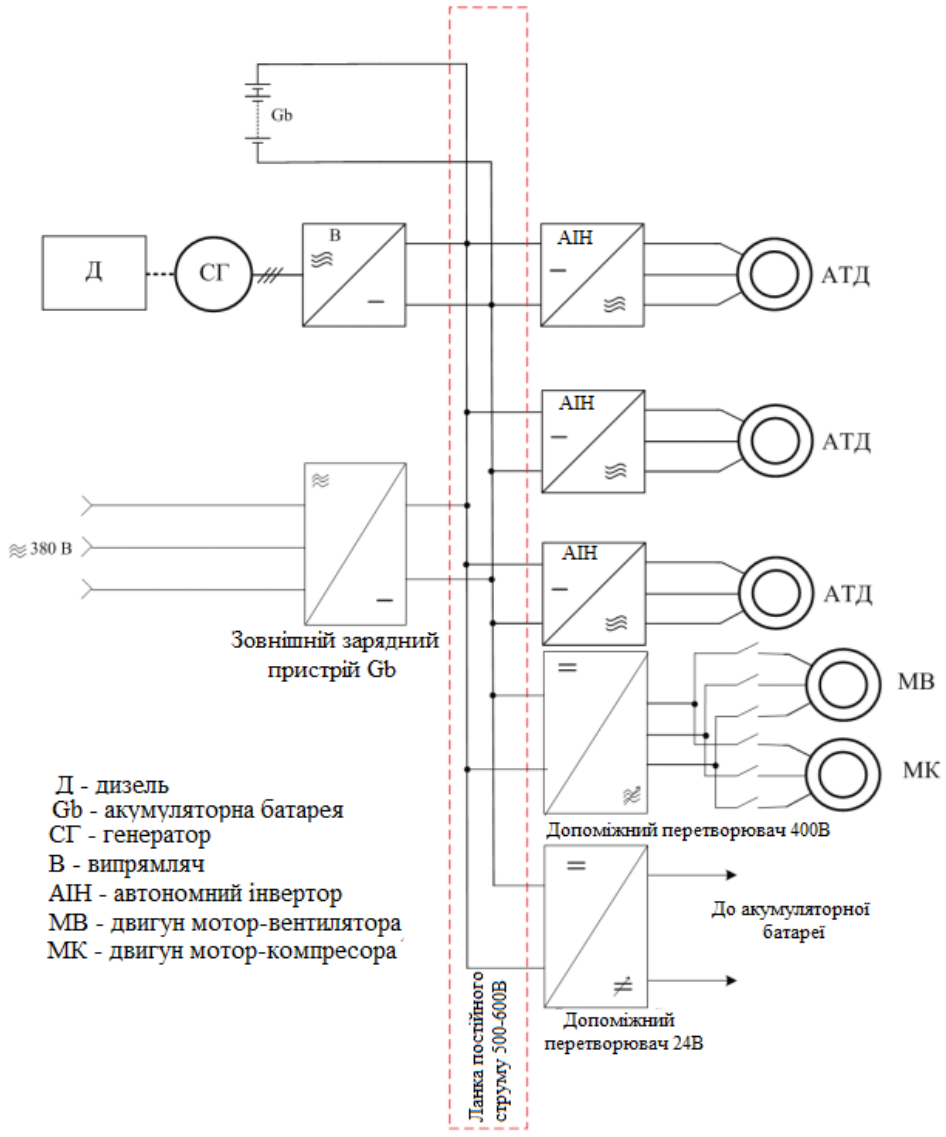

Рисунок 1.6 – Схема гібридного локомотива PRIMA H3

Як і в розглянутій гібридній схемі Toshiba, асинхронні тягові двигуни живляться від індивідуальних інверторів, акумуляторна батарея підключена паралельно до ланки постійного струму.

У схему гібридного локомотива входить зарядний пристрій акумуляторної батареї, що дає можливість роботи без використання дизеля.

На виставці InnoTrans-2018 була представлена одна з останніх розробок – потужніший чотиривісний гібридний маневровий локомотив (дизель-електровоз) PRIMA H4 (рисунок 1.7; табл. 1.3).

Рисунок 1.7 – Гібридний локомотив PRIMA H4

Таблиця 1.3 – Основні технічні характеристики локомотива PRIMA H4

№	Характеристика	Величина
1	Осьова формула	B_0 B_0
2	Службова маса, т	80-90 в залежності від конфігурації
3	Конструктивна швидкість, км/год.	120
4	Тягові зусилля при рушанні з місця, кН	300
5	Потужність, кВт	до 2000
6	Робота по системі багатьох одиниць	до 4

За існуючою класифікацією він відноситься до гібридів першого, третього або четвертого роду, тому що в залежності від комплектації може бути забезпечений (чи ні) приводом із накопичувачем енергії. У першому випадку це або дизель-акумуляторний локомотив, або контактно-акумуляторний електровоз. Великий вибір модифікацій дозволяє враховувати специфіку експлуатації на

певних ділянках. На виставці був представлений маневровий дизель-електровоз із живленням від дизель-генераторної установки (рисунок 1.8) або від контактної мережі 15 кВ, 162/3 Гц [5].

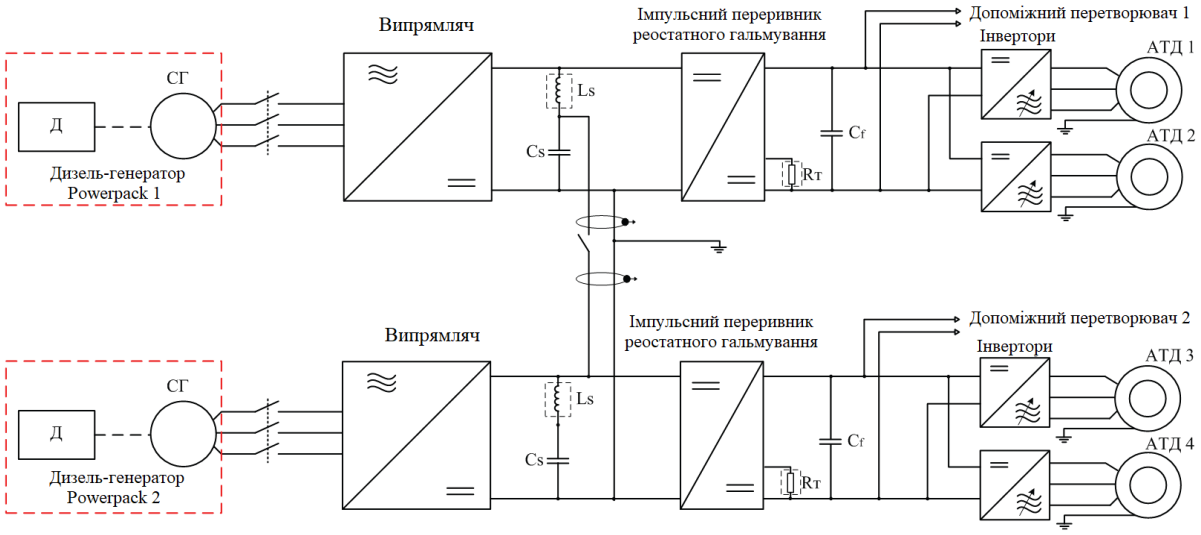

Рисунок 1.8 – Схема гібридного локомотива PRIMA H4 SBB Aem 940 в режимі живлення від дизель-генератора

1.4 Гібридні локомотиви DE60 C Hybrid і DE75 BB компанії Gmeinder

Німецька компанія Gmeinder Lokomotiven GmbH, яка давно займається виробництвом маневрових локомотивів, представила свої нові розробки в галузі гібридної техніки. На виставці InnoTrans-2016 було представлено DE 60C Hybrid, а на InnoTrans-2018 – DE 75BB (рисунок 1.9, 1.10).

Рисунок 1.9 – Локомотиви DE 60C на виставці InnoTrans-2016 (а) і DE 75C на виставці InnoTrans-2018 (б)

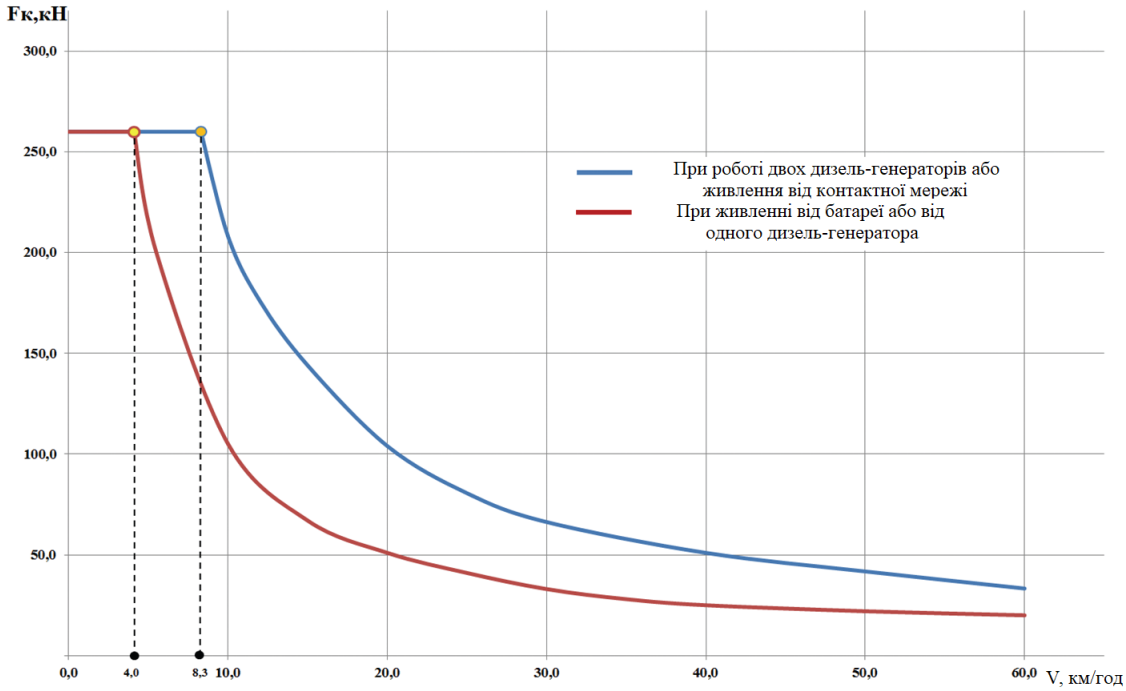

Рисунок 1.10 – Тягова характеристика гібридного локомотива DE 75C

Слід зазначити, що локомотиви, як і в прикладі з Alstom, є багатоваріантними конструкціями, створеними відповідно до останніх світових тенденцій: батарейний накопичувач на основі літій-іонних батарей, силова установка з двома дизельними двигунами, можливість живлення від третьої рейки з напругою 750 В (тільки варіант DE 75BB). Модель DE 60C (результат модернізації DE 500C) являє собою тривісний локомотив з індивідуальним приводом осей від тягових електродвигунів, варіант DE 75BB – чотиривісний. Технічні характеристики локомотивів наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики локомотивів DE 60C Hybrid і DE75BB

№	Характеристика	DE 60C Hybrid	DE75BB
1	2	3	4
1	Осьова формула	C_0	B_0 B_0
2	Службова маса, т	67±3%	80±3%
3	Конструктивна швидкість, км/год.	60	100
4	Тягове зусилля при рушанні з місця, кН	200	260

Продовження таблиці 1.4 – Технічні характеристики локомотивів DE 60C Hybrid і DE75BB

1	2	3	4
5	Силова установка	Дизель-генератор Caterpillar C13 і літій-іонна акумуляторна батарея	Два дизель-генератора або дизель-генератор і літій-іонна акумуляторна батарея. Додатково живлення від третьої рейки 750В або контактної мережі
6	Потужність, кВт	від дизель-генератора: 354 від батареї: 350 на ободі колеса: 435	від дизель-генератора: 354 або 2х354; на ободі колеса: 600

1.5 Гібридний локомотив DE 18 SmartHybrid компанії Vossloh

Випущений компанією Vossloh гібридний локомотив DE18 (рисунок 1.11) може використовуватися як у важкій маневровій, так і в поїзній роботі (табл. 1.5).

Рисунок 1.11 – Макет (ліворуч) та досліджуваний зразок гібридного локомотива DE 18 Smart Hybrid компанії Vossloh

Таблиця 1.5 – Основні технічні характеристики локомотива DE18

Номер	Характеристика	Величина
1	Осьова формула	B_0 B_0
2	Службова вага, т	84
3	Конструктивна швидкість, км/год.	120
4	Максимальна маса поїзда, т	до 1000
5	Потужність, кВт	до 1800

Конструктори розмістили літій-іонну акумуляторну батарею ємністю 120 кВт·год під кузовом, в додатковому паливному баку об'ємом 1000 л (рисунок 1.12).

Рисунок 1.12 – Корпус батареї, виконаний у вигляді додаткового паливного бака

До переваг локомотива відноситься можливість скоротити зовнішні викиди, він підходить для експлуатації в приміщеннях та тунелях.

Ємності акумуляторної батареї достатньо для переміщення складу масою 1000 т на відстань до 10 км. без запуску дизеля або для виконання маневрової роботи протягом години.

Відомо, що літій-іонна батарея має ресурс від трьох до шести тисяч циклів заряд-розряд, заряд може здійснюватися від дизель-генератора в режимі оптимального споживання палива та від зовнішнього джерела. Як струмоприймач може виступати зовнішня мережа. Локомотив передбачається використовувати у Німеччині, Франції та Люксембурзі [6].

1.6 Гібридний локомотив DE-Hybrid і HSL 700 Hybrid

Основне призначення гібридного локомотива (табл. 1.6; рисунок 1.13), випущеного компанією CRRC (КНР), – виконання маневрової роботи зі зменшеним споживанням палива та зниженим викидом забруднюючих речовин у навколишнє середовище.

Рисунок 1.13 – Локомотив DE-Hybrid

Це виявляється можливим внаслідок скорочення роботи дизель-генераторної установки в режимі холостого ходу та рекуперації електроенергії, що дозволяє зберегти в батареях до 80% енергії, що виділяється при гальмуванні.

Таблиця 1.6 – Основні технічні характеристики локомотива DE 18 Hybrid

Номер	Характеристика	Величина
1	Осьова формула	B_0 B_0
2	Службова вага, т	до 64
3	Конструктивна швидкість, км/год.	120
4	Сила тяги при рушанні з місця, кН	100
5	Потужність на ободі колеса, кВт	400
6	Температура навколишнього середовища	від -30 до +40°С

Гібридний тепловоз застосовується на лініях міської залізниці S-Bahn у Гамбурзі. Жорсткі умови по навантаженню на вісь визначили невелику силу тяги та потужність, проте тепловоз здатний виконувати маневри з моторвагонним рухомим складом.

Гібридний локомотив (рисунок 1.14; табл. 1.7) отримано в результаті значної модернізації маневрового тепловоза DE 11000 (від вихідної конструкції залишилися візки та силові елементи кузова). Конструкція розроблена у співпраці корпорації TCCD (Державні залізниці Туреччини), компанія TULOMSAS (локомотивобудівна компанія) та ASELSAN (виробник електронного обладнання у сфері озброєнь).

Рисунок 1.14 – Гібридний локомотив HSL-700

Для гібридного локомотива компанія ASELSAN розробила батарейний блок високої напруги на основі літій-титанатних акумуляторів.

Принципова схема локомотива істотно відрізняється від розглянутих раніше. Тягова акумуляторна батарея пов’язана з проміжною ланкою за допомогою підвищуючого перетворювача постійно-постійного струму (DC-DC converter), що забезпечує заряд батареї та зворотне живлення. Це дає можливість покращити режим роботи батареї та стабілізувати напругу. Тягові двигуни живляться від інверторів на основі кремній-оксидних IGBT, тривала потужність (загальна) становить 400 кВт із короткочасним підвищенням до 700 кВт. Перетворювач вміщує вхідну напругу 600-1000 В і струм до 700 А. Для заряду батареї від зовнішнього джерела використовується випрямляч, який може забезпечити режим роботи з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Допоміжний перетворювач живиться від проміжної ланки і має вихідні канали з трифазною та однофазною змінною напругою. Є зарядний пристрій для допоміжної батареї з напругою 24 В.

Таблиця 1.7 – Основні технічні характеристики локомотива HSL-700 Hybrid

Номер	Характеристика	Величина
1	Осьова формула	B_0 B_0
2	Службова вага, т	68
3	Конструктивна швидкість, км/год.	80
4	Сила тяги максимальна, кН	220
5	Максимальна потужність на ободі колеса, кВт: при живленні від дизель-генератора при живленні від батареї	700 300 400
6	Температура навколишнього середовища	від -25 до +45°С

Перетворювач має модульну конструкцію та систему рідинного охолодження.

Тягову батарею складають комірки, в кожній з них знаходяться чотири включені паралельно літій-титанатні акумулятори. Така батарея забезпечує живлення споживачів струмом великої величини, кількість циклів заряду – розряд значна кількість.

Маса батареї 1850 кг, запас енергії 1117 кВт·год. Батарея має систему управління та захисту, обмін даними із системою управління локомотивом здійснюється згідно з протоколом CAN 2.0. Охолодження батареї рідинне. Батарея зберігає працездатність у діапазоні температури від –30 до +55 °С.

Схема локомотива дозволяє заряджати батарею як від дизель-генератора, так і зовнішньої мережі 380 В. У батареї зберігається енергія, отримана в процесі рекуперації при гальмуванні і на спусках.

У підготовлених до виробництва локомотивів є і «негібридні» версії:

– маневровий тепловоз із електропередачою;

– акумуляторний електровоз.

Досконала мікропроцесорна система управління локомотивом, що має високий рівень надійності та безпеки, відповідає вимогам нормативів IEC 61508 і EN 50155 [7].

1.7 Контактно-акумуляторний електровоз e-Hybrid InnoShunt 2016 компанії TecSol

На виставці InnoTrans-2016 компанія TecSol представила інноваційний гібридний локомотив (табл. 1.8; рисунок 1.15), проте – лише стендову експозицію.

Рисунок 1.15 – Контактно-акумуляторний електровоз компанії TecSol

За прийнятою класифікацією контактно-акумуляторний електровоз належить до гібридів третього роду. Особливість схеми електровоза – використання енергоємної акумуляторної батареї разом із батареєю іоністорів. Така схема забезпечує сприятливі умови для джерел живлення: іоністорна батарея витримує швидкий заряд і розряд, акумуляторна служить «основним» накопичувачем. За допомогою контактної мережі (15 кВ, 162/3 Гц) можна швидко зарядити батарею іоністорів, щоб пізніше передати енергію акумуляторній батареї в режимі заряду невеликим струмом.

Зазначена технологія дозволяє продовжити термін служби батареї, підвищити ККД локомотива та забезпечити його роботу в режимі короткочасних заходів під контактну мережу. Тому основне призначення машини – маневрова робота на станціях із неелектрифікованими боковими коліями. Проект виконано разом із ОВВ (Австрійські федеральні залізниці). Контактно-акумуляторний електровоз з'явився в результаті суттєвої модернізації діючого електровоза серії 1063: все обладнання було перенесено в кузов, реостатне гальмування замінено рекуперативним з віддачою енергії на

іоністорну батарею.

Таблиця 1.8 – Основні технічні характеристики контактно-акумуляторного електровозу

Номер	Характеристика	Величина
1	Осьова формула	B_0 B_0
2	Система електропостачання	15 кВ, 162/3 Гц
3	Зчіпна маса, т	81,4
4	Сила тяги, кН	220
5	Потужність при живленні від контактної мережі, кВт	1700
6	Потужність при живленні від накопичувачів, кВт	200-800 в залежності від режиму живлення
7	Запас ходу з поїздом 400т на електрифікованій ділянці, км	35-40
8	Конструктивна швидкість, км/год.	100
9	Максимальна сила тяги, кН	220
10	Загальна енергоємність накопичувачів енергії, кВт·год.	155

Відомо, що з використанням подібної схеми переобладнано два локомотиви [8-9].

2 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

2.1 Накопичувачі енергії

Накопичувачі енергії (НЕ) – це пристрої, що дозволяють запасати енергію, отримуючи це від якогось джерела або в результаті протікання будь-яких процесів, і віддавати її, коли це необхідно, виходячи з принципу дії пристрою, що містить НЕ.

Розрізняють:

– механічні НЕ (гравітаційні механічні накопичувачі, гравітаційні коливальні (резонансні) накопичувачі енергії, гіроскопічні накопичувачі енергії, гірорезонансні накопичувачі енергії, механічні накопичувачі з використанням сил пружності, пружинні механічні накопичувачі, газові механічні;

– теплові НЕ (накопичення енергії за рахунок теплоємності, накопичення енергії при зміні фазового стану речовини, накопичення енергії в процесах плавлення та кристалізації, накопичення енергії в результаті випаровування та конденсації, накопичення енергії в процесі фазових переходів другого роду, накопичення енергії за допомогою термохімічних реакцій);

– електричні НЕ (конденсатори, іоністори, електрохімічні акумулятори);

– хімічні НЕ (накопичення енергії напрацюванням палива, безпаливне хімічне накопичення енергії);

– інші типи НЕ.

Наймасовіші «електричні» накопичувачі енергії – це звичайні радіотехнічні конденсатори. Вони мають величезну швидкість накопичення і віддачі енергії – як правило, від декількох тисяч до багатьох мільярдів повних циклів в секунду, і здатні так працювати в широкому діапазоні температур багато років. Конденсатори можна розділити на два великі класи – неполярні (не містять рідкого електроліту) і полярні (зазвичай електролітичні). Використання рідкого електроліту забезпечує істотно більшу питому ємність, але майже завжди вимагає дотримання полярності при підключенні. Крім того, електролітичні конденсатори часто чутливіші до зовнішніх умов, насамперед до температури, і мають менший термін служби.

Іоністори, які іноді називають «супер конденсаторами», можна розглядати як свого роду проміжну ланку між електролітичними конденсаторами і електрохімічними акумуляторами Від перших вони успадкували практично необмежену кількість циклів заряду-розряду, а від других – відносно невисокі струми зарядки і розрядки (цикл повної зарядки-розрядки може тривати секунду, а то й набагато довше). Ємність їх також знаходиться в діапазоні між найбільш ємними конденсаторами та невеликими акумуляторами – зазвичай запас енергії становить від одиниць до кількох сотень джоулів.

Ємнісні накопичувачі енергії (ЄНЕ) відносяться до найбільш потужніших енергоджерел. Вони надійні в роботі, мають високу ефективність передачі накопиченої енергії в навантаження. Для заряджання ЄНЕ можуть бути використані малопотужні зарядні пристрої. Внаслідок малої питомої енергоємності створення ЄНЕ із енергією понад 10 МДж важко. Збільшення питомої енергоємності можливе за рахунок застосування досконаліших компонентів при виготовленні конденсаторів, удосконалення технології їх складання, зменшення ресурсу (числа пусків), роботи конденсаторів в аперіодичному режимі розряду.

Молекулярні накопичувачі енергії (МНЕ) є конденсаторами з подвійним електричним шаром. Вони відрізняються від звичайних імпульсних конденсаторів тим, що для просторового поділу різнойменних зарядів, що створюють робоче електричне поле, використовуються не макроскопічний діелектричний шар між провідними обкладками, а мікроскопічний поляризований шар на межі поверхні двох середовищ.

Індуктивні накопичувачі енергії (ІНЕ) характеризуються високими вихідними параметрами електроенергії, а також високими питомими та економічними показниками. Для накачування енергії в ІНЕ використовують джерела струму з великою електричною потужністю, щоб зменшити час зарядки до одиниць секунд. В іншому випадку джоулеві втрати енергії при їх накопиченні в ІНЕ можуть виявитися рівними із енергією, що накопичується в накопичувачі. Для накопичення ІНЕ можуть бути використані електромашинні

накопичувачі (ударні уніполярні та синхронні генератори), МГД-генератори короткочасної дії, хімічні джерела струму.

Надпровідні індуктивні накопичувачі енергії (НПІНЕ) мають широкі перспективи використання, зумовлені можливістю тривалого зберігання енергії у формі магнітної енергії, що дозволяє створювати системи з високим рівнем часу готовності. Важливою у практичному відношенні особливістю НПІНЕ є можливість їх живлення від джерела з малою електричною потужністю. У конструкції НПІНЕ можна умовно виділити три основні конструктивні вузли: власне, магнітна система, кріогенна система та система зв'язку із зовнішньою мережею, так званий перетворювач-інвертор. Метод накопичення електроенергії за допомогою НПІНЕ відрізняється екологічною чистотою. Не використовуються шкідливі матеріали, жодних хімічних реакцій не відбувається. Відходи виробництва відсутні. Нові технічні можливості у створенні НПІНЕ можуть бути пов'язані з розробкою високотемпературних надпровідників. Високотемпературні надпровідні матеріали характеризуються порівняно високими значеннями критичних полів (100 Тл) та все ще високими температурами надпровідних станів. Основний розвиток імпульсних джерел даного класу передбачається у напрямку зростання електричної енергії, що запасається, без помітного збільшення вихідної потужності. Для імпульсних накопичувачів енергії характерний широкий діапазон зміни вихідних струмів та напруг електричних імпульсів.

Накопичувач енергії дозволяє здійснювати безперебійне електропостачання у разі критичного падіння, зниження або повної відсутності напруги у мережі. Останнім часом спостерігається більше розширення сфери застосування накопичувачів електричної енергії. Це свідчить про велику область застосування накопичувачів електричної енергії.

2.2 Конденсатори та іоністори

Конденсатори є незамінним елементом будь-якої електронної схеми, від найпростішої до найскладнішої. Важко уявити якусь електронну схему, у якій

не використовуються конденсатори. За два з половиною століття свого існування вони значно змінили свій вигляд.

Конструкція конденсатора

В даний час існує безліч типів та різновидів конденсаторів. Але за своєю суттю всі вони повторюють найпростіший конденсатор, який складається із двох металевих пластин, ізольованих одна від одної.

Пластини зазвичай називають оболонками, а ізоляційний шар – діелектриком.

Мініатюризація є основним напрямком у вдосконаленні конструкції конденсаторів, тому що від неї залежить подальша мініатюризація інтегральних схем. Основна класифікація конденсаторів заснована на типі діелектрика у конденсаторі. Тип діелектрика визначає основні електричні параметри конденсаторів: Опір ізоляції, стабільність ємності, рівень втрат та ін.

Конденсатори поділяються на різні типи:

Залежно від типу діелектричної проникності:

– Вакуумні конденсатори (кришки без діелектрика знаходяться у вакуумі).

– Конденсатори із газоподібним діелектриком.

– Конденсатори із рідким діелектриком.

– Конденсатори із твердим неорганічним діелектриком: скло (скляна емаль, склокераміка, скляна плівка), кераміка, тонка неорганічна плівка.

– Конденсатори з твердим органічним діелектриком: паперовий, паперово-металевий, плівковий, комбінований – паперово-плівковий, тонкоплівковий з синтетичних органічних плівок.

– Електролітичні та оксидні напівпровідникові конденсатори. Ці конденсатори відрізняються від інших типів, головним чином, своєю високою питомою потужністю. Як діелектрик використовується оксидна плівка на металевому аноді. Другим покриттям (катодом) є або електроліт (для електролітичних конденсаторів) або напівпровідниковий шар (для оксидних напівпровідникових конденсаторів), який осаджується безпосередньо на оксидний шар. Залежно від типу конденсатора анод складається з алюмінієвої,

ніобієвої або танталової фольги або спеченого порошку.

– Твердотільні конденсатори. Замість традиційного рідкого електроліту використовується спеціальний органічний провідний полімер або полімеризований органічний напівпровідник.

Крім того, конденсатори відрізняються своєю здатністю змінювати ємність:

Постійні конденсатори – базовий клас конденсаторів, які змінюють свою ємність (крім як протягом терміну служби).

Конденсатори змінні – конденсатори, які можуть змінюватися під час роботи обладнання. Ємність може керуватися механічно, електричною напругою та температурою (теплові конденсатори).

Підстроювальні конденсатори – конденсатори, ємність яких змінюється під час одноразового або періодичного балансування і не змінюється під час роботи пристрою. Вони використовуються для балансування та вирівнювання вихідного ємнісного опору безперервних кіл, для періодичного балансування кіл, що вимагають лише невеликої зміни ємності.

Залежно від призначення конденсатори можна поділити на:

– конденсатори загального призначення;

– конденсатори спеціального призначення.

Конденсатори загального призначення використовуються практично у всіх типах та класах обладнання. Зазвичай до них відносяться найпоширеніші низьковольтні конденсатори, до яких не пред’являються особливі вимоги.

Решта конденсаторів є спеціальними конденсаторами. До них відносяться конденсатори високої напруги, імпульсні конденсатори та ін.

Конденсатори також класифікуються формою обмоток:

– плоскі;

– циліндричні;

– сферичні та інші.

Однак у конденсаторів є два основних недоліки. По-перше, це дуже мала питома щільність енергії, що накопичується, і тому невелика (щодо інших видів накопичувачів) ємність. По-друге, це малий час зберігання, який зазвичай

обчислюється хвилинами і секундами і зрідка перевищує кілька годин, а в деяких випадках становить лише малі частки секунди. В результаті область застосування конденсаторів обмежується різними електронними схемами та короткочасним накопиченням, достатнім для випрямлення, корекції та фільтрації струму в силовій електротехніці – на більшу їх поки що не вистачає.

2.3 Основні типи електрохімічних акумуляторів

Свинцево-кислотний акумулятор

За більш ніж столітню історію, найбільшого поширення набув свинцево-кислотний акумулятор, винайдений французьким фізиком в 1859 році. Його поширеність пов’язана, в основному, з успішним використанням даного типу акумуляторів як джерело електроенергії на автотранспорті (для пуску двигуна).

Суть роботи свинцево-кислотного акумулятора зводиться до перекладу сульфату свинцю, що покриває обидві пластини акумулятора в розрядженому стані, під дією постійного електричного струму в металевий свинець на катоді.

Заряджання акумулятора призводить до того, що однакові спочатку електроди стають хімічно різними і між ними з’являється різниця потенціалів. Якщо пластини зарядженого акумулятора з’єднати провідником, проходитиме зворотний процес – розряд, і по провіднику піде електричний струм.

Елемент свинцево-кислотного акумулятора складається з електродів (позитивних і негативних) і роздільних пористих пластин (сепараторів), виготовлених з матеріалу, що не взаємодіє з кислотою, та перешкоджають замиканню електродів, які занурені в електроліт – сірчану кислоту Електроди є плоскими ґратами з металевого свинцю. У ці ґрати запресовані порошки діоксиду свинцю (PbO_2) – в анодних пластинах та металевого свинцю – у катодних пластинах. Застосування порошкових матеріалів збільшує поверхню розділу фаз електроліт – електрод, тим самим збільшуючи електричну ємність акумулятора.

Основні переваги свинцево-кислотного акумулятора:

– висока питома потужність;

– циклування (витримують від 500 до 1000 циклів заряду-розряду);

– екологічність;

– високий ККД (близько 80-90%)

Окремо хочеться відзначити високий рівень вторинного використання даного типу акумуляторів. Як було зазначено вище, цикл вторинного використання свинцево-кислотних акумуляторів є найповнішим і успішним. Сьогодні у США утилізується понад 97% свинцю з батарей. Завдяки простоті процесів, понад 70% від ваги батареї зазнає вторинної переробки. Понад 50% щорічного виробництва свинцю – це вдруге перероблений свинець.

Недоліки:

– низька питома густина енергії;

– зниження ємності внаслідок сульфітації при зберіганні в незарядженому стані;

– небажаність глибоких розрядів;

– небажаність сильних механічних впливів (що призводять до обсипання електродів).

Необхідно згадати про розроблені технології покращення кислотно-свинцевих акумуляторів, об’єднаних загальною назвою - герметичні свинцево-кислотні акумулятори.

а) Гелеві акумулятори

б) AGM акумулятори

Обидві технології пов’язані з «загущенням» електроліту, у разі гелевих – використовується силікагель або інші загусники, а у разі AGM – електроліт адсорбується в пористому матеріалі. Такі акумулятори мають перед класичними акумуляторами ряд переваг:

– стійкість до вібрації;

– можливість встановлення у будь-якому положенні;

– відсутність потреби обслуговування;

– зниження ймовірності короткого замикання пластин;

– деяке зниження ймовірності сульфітації.

Головною перешкодою широкого застосування є їхня висока ціна. Так AGM в два, а гелеві до п’яти разів дорожчі, ніж звичайні стартерні батареї.

Розглянемо найуспішніші типи акумуляторів, які мають окремі переваги перед свинцево-кислотними.

Залізо-нікелевий акумулятор

У 1899 року шведським винахідником було розроблено нікель-кадмієві акумулятори. Також вченим проводилися дослідження із заміщення частини кадмію залізом (зокрема зі 100% заміщенням).

У цьому типі акумуляторних батарей, як активний матеріал анода – використовується залізо, катода – гідрат окису нікелю (III), а як електроліт – водний розчин гідроксиду натрію/калію з домішкою гідроксиду літію. Активний матеріал міститься в перфорованих нікельованих сталевих трубках.

Основні переваги:

– здатність витримувати вібрацію;

– стійкість до низьких температур (до -40°C), відсутня небезпека замерзання електроліту;

– повні цикли розряду мало впливають на термін служби;

– великий термін служби (більше 50 років);

– відсутність високотоксичних речовин;

А також недоліки:

– великий рівень саморозряду;

– невисока ємність;

– невисока ефективність заряду-розряду (65%).

Здатність цих акумуляторів витримувати часті цикли розряду/заряду пов’язана з низькою розчинністю реагентів в електроліті.

Ці акумулятори вважаються найкращим рішенням для акумулювання електроенергії в стаціонарних автономних системах альтернативної енергетики Є більш екологічно безпечними, оскільки не містять важких металів (свинцю та кадмію, ртуті).

Нікель-кадмієвий акумулятор

Нікель-кадмієвий акумулятор (NiCd) – вторинне хімічне джерело струму. Катодом є гідрат закису нікелю Ni(OH)2 з графітовим порошком (близько 5-8 %), електролітом - гідроксид калію КОН з добавкою гідроксиду літію LiOH (для утворення літію та збільшення ємності на 21-25 %), анодом – гідрат закису кадмію Cd(OH)2 або металевий кадмій Cd (у вигляді порошку).

В даний час використання нікель-кадмієвих акумуляторів дуже обмежене з екологічних міркувань, тому вони застосовуються тільки там, де використання інших систем неможливе.

Літій-іонний акумулятор

Літій-іонний акумулятор – тип електричного акумулятора, який широко поширений у сучасній побутовій електронній техніці і знаходить своє застосування як джерело енергії в електромобілях та накопичувачах енергії в енергетичних системах (рисунок 2.1). Перший літій-іонний акумулятор випустила корпорація Sony у 1991 році. Принципи заряду та розряду дещо відрізняються від традиційних електрохімічних систем. Заряд і розряд, в акумуляторах даного типу, пов’язаний із перенесенням іона літію Li+ між позитивним та негативним електродами. Іон літію має здатність заходити в кристалічну решітку інших матеріалів (наприклад, у графіт, оксиди та солі металів) з утворенням хімічного зв’язку, наприклад: у графіт з утворенням LiC6.

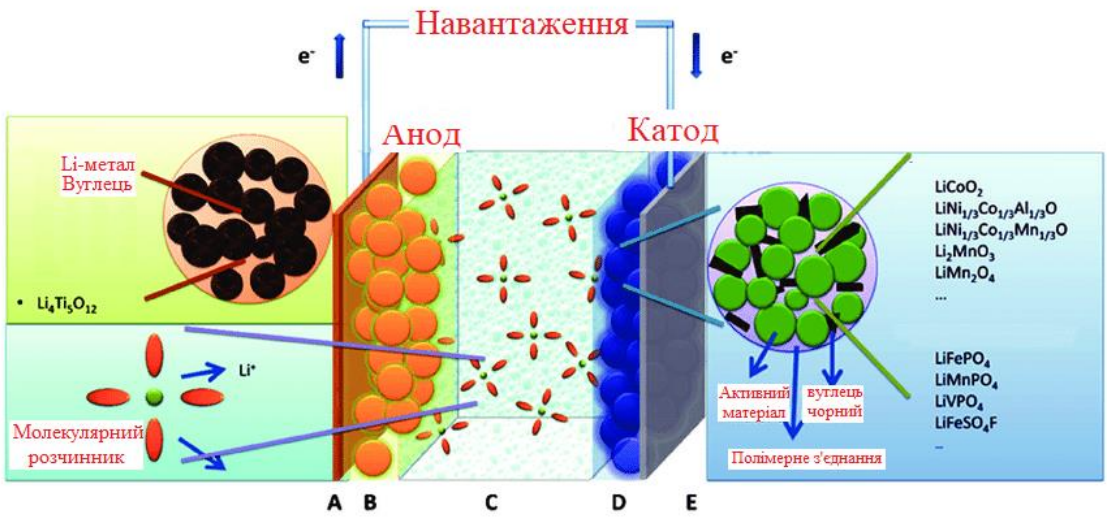

Рисунок 2.1 – Літій-іонний акумулятор

Літій-іонний акумулятор складається з електродів (катодного матеріалу на алюмінієвій фользі та анодного матеріалу на мідній фользі), розділених просоченим електролітом пористим сепаратором.

Переваги літій-іонних акумуляторів:

– висока напруга комірки (більше 3В);

– низький саморозряд;

– можливість швидкого заряду (до 15 хв);

– висока питома ємність;

– хороша циклічність;

– висока ефективність заряду-розряду (понад 80%).

Необхідно відзначити, що для приватних систем накопичення електроенергії даний тип батарей малопридатний внаслідок високої вартості. Маючи основну перевагу перед свинцево-кислотними акумуляторами у вигляді більш тривалого терміну служби (до 3000 циклів заряду розряду проти 500-1000) вони мають вартість утричі та більше разів більшу. Тобто відбувається нівелювання переваги – за термін експлуатації одного комплекту літій-іонних акумуляторів буде використано близько трьох комплектів акумуляторів свинцевих, при цьому комплекти матимуть близьку вартість. Крім того, можна виділити такі недоліки літій іонної технології:

– вибухонебезпечність (містять легкозаймисті органічні розчинники у складі електроліту);

– мають ефект пам’яті заряду;

– не можуть зберігатися у розрядженому стані тривалий час (вимагають заряду на 40%);

– вимогливі до температурного режиму (не працюють за низьких температур).

3 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

3.1 Режими руху тягового рухомого складу

Умови роботи локомотива при керуванні поїздами характеризуються безперервною зміною сили тяги та швидкості руху. При цьому потужність локомотива при різних швидкостях непостійна, вона змінюється в залежності від швидкості, що реалізується. Ці обставини дозволяють реалізувати різноманітні режими управління тяговим рухомим складом, найчастіше відмінні від прийнятих при тягових розрахунках.

Режим роботи локомотива визначає ступінь використання потужності та сили тяги, надійність та економічність його у конкретних експлуатаційних умовах. Прагнення покращення використання потужності та сили тяги супроводжується вдосконаленням режимів керування поїздами, раціональним використанням паливно-енергетичних ресурсів на тягу поїздів.

При розробці раціональних режимів керування поїздами велике значення має вивчення та узагальнення досвіду кращих машиністів. Зростання кваліфікації локомотивних бригад, покращення якості ремонту та технічного обслуговування локомотивів необхідні для ефективного використання їх тягових властивостей та потужності.

Великий вплив використання потужності локомотивів надає також сформована система експлуатації локомотивів. Важливу роль грає графік руху поїздів, який має передбачати найвигідніші умови їх пропуску дільницями. Правильне диспетчерське керівництво рухом поїздів, недопущення обгону та схрещення поїздів на станціях, розташованих на несприятливому профілі, скорочення кількості схрещень, своєчасне інформування локомотивних бригад про умови пропуску поїздів, ліквідація затримок їх у закритих сигналів - необхідні умови для раціональних режимів.

Для різних умов експлуатації раціональні режими керування поїздами мають суттєві особливості. Це не дозволяє рекомендувати один режим ведення

поїзда як оптимальний для всіх практично можливих умов руху по ділянці, оскільки навіть на тій самій ділянці ці умови часто змінюються. Крім того, характеристики електричних машин і конкретних локомотивів, залежно від їх технічного стану, можуть у певних межах відрізнятися від відповідних паспортних даних.

Все це створює труднощі при розробці та практичному використанні раціональних режимів керування поїздами. Досвід показує, що навіть за наявності режимних карт та реалізації рекомендованих режимів керування поїздами, технічно обґрунтованих для деяких середніх експлуатаційних умов, фактична витрата електроенергії та палива у різних машиністів на одних і тих же ділянках різна, відхилення можуть бути як у велику, так і в меншу сторону від встановленої норми (до 10%).

Передові, добре підготовлені технічно та глибоко розуміючі основи енергетики роботи локомотива, тяги та руху поїзда машиністи вміло враховують конкретні експлуатаційні умови, швидко приймають правильні рішення, коригують рекомендації режимних карт та добиваються значної економії електроенергії чи палива. Раціональний за витратою паливно-енергетичних ресурсів режим ведення поїзда повинен передбачати і оптимальне використання потужності локомотива за умов нагрівання тягового електрообладнання, зчеплення коліс з рейками на лімітуючих підйомах ділянки. Зазвичай режими ведення поїзда, раціональні за умов використання потужності локомотивів на підйомах, що лімітують, не суперечать режимам, раціональним за витратою електроенергії або палива.

Великий вплив на витрату енергоресурсів має технічний стан тепловозів, які можуть мати значні розбіжності характеристик паливної економічності, потужності, а також тягових характеристик унаслідок низької якості ремонту та технічного обслуговування, зміни стану в міжремонтний період, а також неузгодження ланок системи керування дизель-генераторів. Тому неодмінною умовою економного витрачання дизельного палива при тепловозній тязі є високоякісні реостатні випробування після планового ремонту з регулюванням

паливної апаратури, електричних апаратів та машин відповідно до чинних вимог.

Значний резерв економії електроенергії полягає у застосуванні рекуперативного гальмування поїздів. Як показують розрахунки, а також підтверджує практика роботи залізниць, розширення застосування рекуперації електроенергії дає велике зниження її витрати. Навіть на ділянках із рівнинним профілем колії вона суттєво знижується.

Раціональний режим ведення поїзда розробляють для заданого часу ходу перегонами. Це дуже складне завдання має вирішуватися на основі кривої зміни швидкості, отриманої в результаті тягових розрахунків і відповідної заданому часу ходу. Формування оптимального режиму зводиться до вдосконалення вихідного режиму, тобто. внесення до нього змін, спрямованих на скорочення витрати електроенергії або палива за збереження заданого часу ходу.

Зменшити витрати паливно-енергетичних ресурсів можна зменшенням механічної енергії локомотива та втрат енергії при її перетворенні. Значне зниження механічної роботи можна отримати зі збільшенням часу ходу перегонами; однак, як правило, це неприйнятно, оскільки спричиняє скорочення пропускної здатності ділянки. Зменшити механічну роботу можна, знижуючи середню швидкість руху поїзда, а також нерівномірність швидкості руху, швидкість початку гальмування поїзда.

Зменшення нерівномірності швидкості руху дає помітний ефект в економії електроенергії та палива на рівнинних ділянках колії з рідкісними зупинками поїздів. При зміні режиму для вирівнювання швидкості слід враховувати значення ККД локомотива, щоб можливе підвищення втрат енергії на локомотиві було компенсовано економією від вирівнювання швидкості.

Пуск і розгін характеризуються значними втратами енергії у пусковому реостаті на ЕРС постійного струму та роботою за зниженого ККД на ЕРС змінного струму. Щоб скоротити втрати електроенергії у пусковому реостаті, слід реалізувати максимальне можливе прискорення поїзда, для чого необхідно збільшувати середнє значення пускового струму електровозу та застосовувати

послаблення збудження двигунів електровозів постійного струму.

Складовими елементами раціональних режимів водіння поїздів є: використання максимальної можливої сили тяги, реалізація високих значень коефіцієнта зчеплення і раціональне використання запасів кінетичної енергії для подолання підйомів, правильний вибір швидкості початку гальмування, вміле регулювання сили тяги із застосуванням ослаблення збудження тягових двигунів електричних машин та дизеля.

Енергетична ефективність локомотива характеризується ККД і коефіцієнтом використання потужності. Перехід миттєвого значення ККД до середнього значення ККД $\eta_{лсеред}$ здійснюється за допомогою інтегрування:

$$\eta_{л\ серед} = \frac{A_{кор}}{E_{сп.}}, \qquad (3.1)$$

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

$E_{сп.}$ – енергія, що була спожита, кВт·год.

Корисний ефект від використання енергетичних ресурсів визначається:

$$A_{кор} = \int P_т dt, \qquad (3.2)$$

Знаходження інтегралу за часом від спожитої потужності є повною спожитою енергією $E_{сп.}$, що визначається за виразом:

$$E_{сп.} = \int P_{сп.} dt, \qquad (3.3)$$

Відношенням корисної роботи на тягу поїзда $A_{кор.}$ до роботи, яка була виконана рухомим складом в номінальному режимі за той же час $A_{ном.}$:

$$\gamma_{л\ серед.} = \frac{A_{кор.}}{A_{ном.}}, \tag{3.4}$$

Визначимо роботу, яка була виконана рухомим складом за час проходження $t_{12} = t_2 - t_1$ ділянки спрямованого профілю, що має постійний ухил i. Для цього помножимо баланс потужностей на dt і проінтегруємо:

$$\int_{t_1}^{t_2} P_т dt = \int_{t_1}^{t_2} P_{ін} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{опор.} dt\,, \tag{3.5}$$

Робота, яка була виконана рухомим складом при переміщенні поїзда елементарною ділянкою, знаходиться в лівій частині виразу (3.5) та виражається за формулою:

$$A_{кор.} = \int_{t_1}^{t_2} P_т dt\,, \tag{3.6}$$

За допомогою різниці кінетичної енергії поїзда буде знайдена робота сил інерції, яка дорівнюватиме:

$$A_{ін} = \int_{t_1}^{t_2} P_{ін} dt = \int_{t_1}^{t_2} dT = T_2 - T_1 = \frac{1}{2} m_{пр.} \cdot \left(V_2^2 - V_1^2\right), \tag{3.7}$$

тобто за рахунок роботи сил інерції відбувається зміна швидкості руху.

Робота сил опору знаходиться за формулою:

$$A_{опор.} = \int_{t_1}^{t_2} P_{опор.} dt\,, \tag{3.8}$$

Отже, для корисної роботи на елементарному переміщенні енергетичний баланс буде дорівнювати:

$$A_{\text{кор.}} = A_{\text{ін}} + A_{\text{опор.}}, \qquad (3.9)$$

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).

3.2 Ефективність використання накопичувачів електричної енергії на тепловозах

Одним з інноваційних енергозберігаючих напрямків розвитку енергетичної стратегії є застосування енергоємних накопичувачів енергії на локомотивах, системах тягового електропостачання, в автономній тязі. Режими роботи залізниць з навантаженням, що постійно змінюється, і періодичним поєднанням тяги і гальмування значною мірою схильні до високоефективного використання накопичувачів. Їх застосування покращує проходження перехідних процесів одночасно у перетворювачах та приводі локомотивів. Вони також дозволять найбільш повною мірою використовувати енергію рекуперативного гальмування, яка витрачатиметься при пуску рухомого складу та ін.

В останні роки досягнуто суттєвого прогресу в галузі створення ємнісних накопичувачів енергії (НЕ). Електрохімічні конденсатори відносяться до пристроїв, принцип дії яких заснований на накопиченні електричної енергії у подвійному електричному шарі, сформованому на міжфазній межі електронного провідника та інертного електроліту. На відміну від традиційних

конденсаторів полягає у використанні бар'єрного електричного поля, сформованого над об'ємом діелектрика, а поблизу поверхні контакту матеріалів з різними електрофізичними властивостями. Контактна пара як основа накопичувального елемента повинна забезпечувати отримання максимальної густини енергії в об'ємі бар'єрного шару при мінімальному струмі витоку через бар'єрний шар, що визначає час зберігання накопиченої енергії [10].

Отже, для побудови енергоефективного рухомого складу необхідно провести ретельний аналіз та розрахувати відповідні параметри накопичувачів електричної енергії. Також, потрібно враховувати масогабаритні показники НЕ, оскільки даний факт має вплив на розвантаження тепловоза і як наслідок визначає зчіпні властивості тягового рухомого складу.

В даний час освоєно випуск накопичувачів, що є прийнятними для використання на залізничному транспорті, застосування яких можливе як буферне джерело живлення. Також до основних параметрів при впровадженні накопичувача енергії відносяться його показники за масою та габаритами, оскільки вони впливають на вагу електричного рухомого складу. Спостерігається, що збільшення питомої потужності спричиняє зниження питомої енергії та навпаки – збільшення питомої енергії супроводжується зниженням питомої потужності.

При встановленні накопичувачів електричної енергії на тяговому рухомому складі необхідно забезпечити наступне:

– рівномірність вертикального навантаження на рейки від колісних пар;

– мінімальні габаритні розміри екіпажної частини рухомого складу;

– зручність в обслуговуванні та монтажі;

– простоту конструкцій елементів, які необхідні для повного функціонування основних та допоміжних систем;

– високу технологічність конструкції;

– оптимальні умови роботи локомотивної бригади та ремонтного персоналу тощо.

Кількість ланок накопичувача електричної енергії з урахуванням величини виробленої енергії, визначається за формулою:

$$n_{\text{лан.}} = \frac{\sum R_{\text{вир.}}}{c_{\text{я}}} + n_{б}\,, \qquad (3.10)$$

де $\sum R_{\text{вир.}}$ – сумарне значення виробленої електричної енергії, МДж;

$n_{б} = 1$ – додаткова ланка;

$c_{\text{я}}$ – об’єм енергії однієї ланки накопичувача, МДж.

Оскільки знайшовши кількість ланок накопичувача, можна розрахувати габаритні характеристики накопичувача електричної енергії, м^3:

$$V_{\text{нак.}} = V_{\text{лан.}} \cdot n_{\text{лан.}}, \qquad (3.11)$$

де $V_{\text{лан.}}$ – габаритний об’єм однієї ланки накопичувача, м^3;

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

Як показує аналіз практичного використання накопичувачів електричної енергії найбільш доцільним є встановлення ланок накопичувача рівномірно по всій площі на даху тягового рухомого складу. В такому випадку не буде порушуватися розважування локомотива та спрощуватиме їх монтаж, при цьому не порушуються габаритні розміри для самого рухомого складу.

Масу накопичувача енергії знаходиться за формулою, т:

$$m_{\text{нак.}} = m_{\text{лан.}} \cdot n_{\text{лан.}}\,, \qquad (3.12)$$

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

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

Після встановлення накопичувачів електричної енергії маса локомотива збільшиться, та дорівнюватиме, т:

$$Q_{\text{т.заг.}} = Q_{\text{т.попер.}} + m_{\text{нак.}}, \qquad (3.13)$$

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

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

Маючи змінену масу локомотива яка враховує масу накопичувачів електричної енергії знайдемо навантаження на вісь, яке буде рівне:

$$F_{\text{к.п.}} = \frac{Q_{\text{т.заг.}}}{n}, \tag{3.14}$$

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

n – кількість осей тепловоза.

Знайшовши за формулою (3.14) навантаження на вісь, обов'язково необхідно перевірити чи не перевищує дане значення максимально допустиме згідно норм по навантаженню на вісь рухомого складу.

Для більшої наглядності у ефективному застосуванні «гібридного приводу» з використанням накопичувачів електричної енергії, необхідно розрахувати загальний ККД тепловоза та кількість зекономленого палива з урахуванням застосування додаткового обладнання.

Таким чином, загальний коефіцієнт корисної дії тепловоза при роботі від накопичувачів енергії складе:

$$\eta_{\text{уст.}} = \eta_{\text{нак.}} \cdot \eta_{\text{пер.}} \cdot \eta_{\text{тд.}}, \tag{3.15}$$

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

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

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

Кількість дизельного палива, що витрачає тепловоз на шляху прямування є еквівалентно певній енергії, яка рівна, МДж:

$$F_{\text{пал.}} = m_{\text{пал.}} \cdot q \cdot \eta_{\text{тепл.}}, \tag{3.16}$$

де $m_{\text{пал.}}$ – кількість палива, що використано тепловозом на шляху прямування, кг;

q – питома теплота 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:

$$f_{\text{пал.}} = \frac{m_{\text{пал.}}}{Q_{\text{т.попер.}} + Q_{\text{заг.ваг.}}}, \tag{3.17}$$

де $m_{\text{пал.}}$ – кількість палива, що затрачено тепловозом при виконанні певної роботи, кг;

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

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

Витрата палива за виконану роботу з урахуванням збільшеної маси тепловоза, внаслідок встановлення НЕЕ складатиме, кг:

$$m'_{\text{пал.}} = f_{\text{пал.}} \cdot \left(Q_{\text{т.заг.}} + Q_{\text{заг.ваг.}}\right), \tag{3.18}$$

де $f_{\text{пал.}}$ – кількість витраченого палива під час виконання певної частини роботи, кг/т;

$Q_{\text{т.заг.}}$ – маса тепловоза після встановлення НЕЕ, т.

Кількість енергії, що отримана накопичувачами енергії з урахуванням повного використання (виробленої) енергії, буде становити, МДж:

$$F_{\textit{енерг.}} = \sum R_{\text{вир.}} \cdot \eta_{\text{уст.}}, \tag{3.19}$$

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

$\eta_{\text{уст.}}$ – ККД при роботі від накопичувача енергії.

Кількість енергії, що отримана накопичувачами енергії можна перетворити в кількість зекономленого палива, кг:

$$m_{\text{пал.}}^{\text{екон.}} = \frac{F_{енерг.}}{q \cdot \eta_{\text{тепл.}}}, \tag{3.20}$$

де $F_{енерг.}$ – вихідна енергія при роботі від накопичувачів, МДж;

q – питома теплота згоряння дизельного палива, МДж/кг;

$\eta_{\text{тепл.}}$ – ККД тепловоза.

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

$$m''_{\text{пал.}} = m'_{\text{пал.}} - m_{\text{пал.}}^{\text{екон.}}, \tag{3.21}$$

де $m'_{\text{пал.}}$ – витрата палива за певну виконану роботу, з урахуванням ваги додаткового обладнання кг;

$m_{\text{пал.}}^{\text{екон.}}$ – кількість зекономленого, за певну виконану роботу, палива, кг.

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

$$B_{\text{год.}} = \frac{m_{\text{пал.}}}{t}, \tag{3.22}$$

$$B'_{\text{год.}} = \frac{m''_{\text{пал.}}}{t}, \tag{3.23}$$

де $m_{\text{пал.}}$ – витрата палива тепловоза-зразка за певну виконану роботу, кг;

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

t – час виконання певної роботи, год.

У відсотках, економія при використанні гібридної установки відносно тепловоза зразка, %:

$$\mu = \frac{m_{\text{пал.}} - m''_{\text{пал.}}}{m_{\text{пал.}}}, \tag{3.24}$$

ККД тепловоза з накопичувачем електричної енергії буде збільшено по відношенню до ККД тепловоза-зразка і складатиме:

$$\eta'_{\text{тепл.}} = \eta_{\text{тепл.}} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{100}\right), \tag{3.25}$$

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

μ – відсоток економії при використанні гібридної установки.

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

$$L' = L \cdot \left(1 + \frac{\mu}{100}\right), \tag{3.26}$$

Отже, аналіз проведених досліджень у роботі [11] показує, що тепловоз з гібридною установкою має кращі показники у порівнянні з показниками тепловоза-зразка, що наведено на (рисунок 3.1).

Технічні показники тепловоза-зразка та тепловоза на якому застосовується гібридна установка зведені в (табл. 3.1).

Отже, перевагою тепловоза з накопичувачем енергії є його висока економічність, яку ми отримуємо за рахунок зниження витрати палива.

Таблиця 3.1 – Параметри тепловоза-зразка та тепловоза з використанням гібридної установки [11].

Назва показника	Значення показника для тепловоза-зразка	Значення показника для тепловоза з гібридною установкою
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

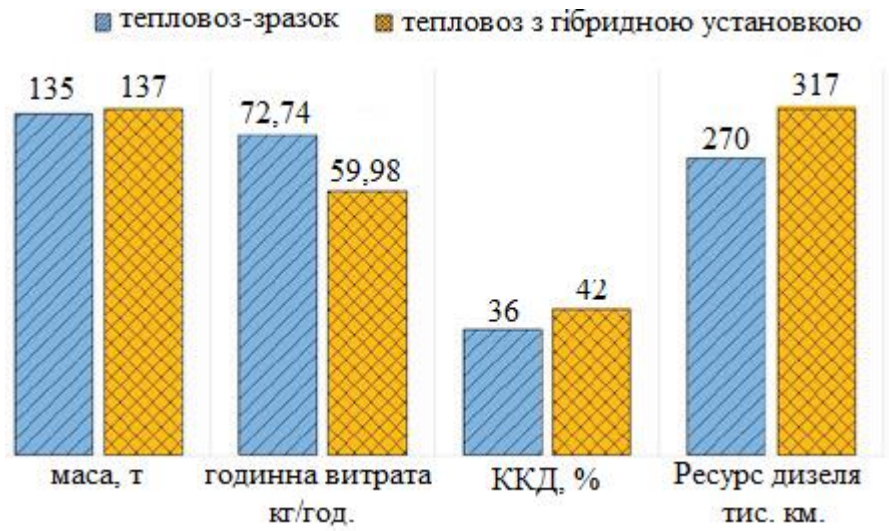

Рисунок 3.1 – Порівняння характеристик тепловоза - зразка і тепловоза, на якому встановлено накопичувачі електричної енергії

Також, слід відзначити підвищення автономності тепловоза з гібридною установкою, яка досягається за рахунок живлення тягових двигунів та приводу допоміжного обладнання від накопичувачів електричної енергії.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

– розглянуто схеми роботи гібридних локомотивів різних світових компаній з урахуванням особливостей їх експлуатації;

– проаналізовано основні пристрої, які використовуються для накопичування електричної енергії, їх конструкції та умови експлуатації;

– аналізуючи режими руху тягового рухомого складу було отримано математичну модель енергетичної ефективності локомотива на основі роботи, яка була виконана тяговим рухомим складом при переміщенні елементарною ділянкою;

– 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;

– на основі математичної моделі визначення параметрів накопичувачів електричної енергії було побудовано гістограми витрат палива, ККД та ресурсу дизельного двигуна тепловоза-зразка та тепловоза, на якому встановлено накопичувачі електричної енергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. EXECUTIVE SUMMARY: Hybrid Locomotives Technology Innovations and Demand Drivers for Diesel and All Electric Locomotives, Genset Locomotives, and Hybrid Locomotives: Market Analysis and Forecasts: отчет компании Pike Research. 2010. – 52 с.
2. URL: https://www.innotrans.de/en/
3. URL: https://www.scib.jp/en/
4. URL: https://railcolornews.com/2017/01/10/de-db-cargo-and-toshiba-studydevelopment-of-new-hybrid-locomotives/
5. Max Wittwer. Alstom Platform H3/H4 SBB Aem 940 Lokomotive. – URL: https://docslide.net/documents/ sbb-aem-940-lokomotive-tu-berlinwittwer-projektleiter-09-mai-2016-sbb-aem-940.html
6. URL: www.vossloh-locomotives.com/en/products_and_services/products.html
7. URL: http://www.genco-energy.de/index.php/news/173-tuelomsas-hybrid-rangierlokomotive-de
8. URL: http://www.tecsol.at/en/
9. Информационное сообщение TecSol на официальном сайте Railway Gazette International. – URL: https://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/oebb-unveils-prototype-electric-supercapacitorbattery-loco.html
10. Молекулярные накопители электрической энергии на основе двойного электрического слоя / А. М. Иванов, А. Ф. Герасимов // Электричество. – 1991. – № 8. – С. 16–19.
11. 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.