

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.3:629.421

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288177

© Рой С.В.¹, Качан А.В.², Тихонов А.С.³, Якунін Д.І.⁴,
Рябов Є.С.⁵

ЗАСТОСУВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПРИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЗУ ТГМ6

Розглянуто питання оновлення локомотивного парку промислових підприємств шляхом модернізації застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності. Проаналізовано попередні дослідження щодо вибору типу приводу колісних пар та встановлено, що застосування групового приводу колісних пар забезпечує можливості реалізації високих тягових зусиль без додаткових пристроїв, а сам привід має меншу вартість. Це обумовлює доцільність застосування групового приводу колісних пар при модернізації тепловозів з гідравлічною передачею потужності. Для реалізації вказаних переваг необхідним є застосування тягового електроприводу на основі електромеханічних перетворювачів змінного струму. Проведено аналіз тягового електроприводу тепловозу ТГМ6, модернізованого ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод» з використанням тягового електроприводу на основі асинхронного електродвигуна та групового приводу колісних пар. Проведено аналіз шляхів удосконалення тягового електроприводу для зменшення споживання паливно-енергетичних ресурсів. Визначено, що доцільним може бути застосування силової енергетичної установки з накопичувачем енергії та застосування двох тягових електродвигунів для приводу колісних пар.

Ключові слова: тяговий електропривод, енергоефективність, рухомий склад, модернізація, локомотив.

S.V. Roi, A.V. Kachan, A.S. Tykhonov, D.I. Iakunin, Ye.S. Riabov. Application of electric traction drive for the modernization of locomotives with hydraulic power transmission. The issue of updating the locomotive fleet of industrial enterprises by modernizing outdated diesel locomotives with hydraulic power transmission was considered. The analysis of existing modernizations shows the possibility of using traction electric drive while preserving the original group drive of wheel pairs. This approach is used by manufacturers when updating outdated and creating new diesel locomotives and traction modules for rolling stock. A possible option is the use of single-motor carts. Previous studies on the choice of the type of wheel pairs drive were analyzed and it was established that the use of a group

¹ директор, ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0009-0009-0610-308X, rsyntz@gmail.com

² інженер, ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0009-0006-9961-322X, inbox.ak@ukr.net

³ головний енергетик, ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0009-0002-7014-1186, ntrzconstructor@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0000-0002-3995-3162, unicomber@ukr.net

⁵ канд. техн. наук, ст. наук. співроб., доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0000-0003-0753-514X, riabov.ievgen@gmail.com

drive of wheel pairs provides the possibility of realizing high traction forces without additional devices, and the drive itself has a lower cost. This determines the expediency of using a group drive of wheel pairs when modernizing diesel locomotives with hydraulic power transmission. To realize these advantages, it is necessary to use a traction electric drive based on electromechanical alternating current converters. This approach was implemented by Mykolaiv Locomotive Repair Plant LLC during the modernization of TGM6 diesel locomotives. The diesel locomotive is intended for shunting and hauling operations, as a result of which it was assumed during the design that the traction force when moving is equal to 320 kN, the continuous traction force is 300 kN, and the maximum speed is 50 km/h. The power plant consists of a modern Cummins diesel engine and a synchronous generator. A frequency-controlled asynchronous traction electric motor is used to drive the wheel pairs. Power and control of the electric motor is carried out using a voltage inverter. Diesel locomotives use a controlled electric drive of cooling motor-fans, and semiconductor converters are used to power auxiliary systems. The locomotive and its systems are controlled by a microprocessor control system. The application of the traction electric drive based on the asynchronous electric motor provided the estimated efficiency of the diesel locomotive and the efficiency of the diesel power at the nominal power and the estimated speed of the long-term mode, equal to 6 km/h, are 0.312 relative units and 0.69 relative units, respectively. The analysis of ways to improve the traction electric drive to reduce the consumption of fuel and energy resources was carried out. It was determined that the use of a power plant with energy storage and the use of two traction electric motors for the group drive of wheel pairs may be expedient.

Key words: traction electric drive, energy efficiency, rolling stock, modernization, locomotive.

Постановка проблеми. Залізничний транспорт широко застосовується у технологічних процесах промислових підприємств гірничо-видобувної та металургійної галузей, на підприємствах з виробництва будівельних матеріалів, хімічних підприємствах тощо. Для переміщення вагонів застосовуються тепловози з гідравлічною передачею потужності типу ТГМ3, ТГМ4, ТГМ6, ТГМ40, ТГМ23, ТГК2 та інші. Вказані тепловози – технічно застарілі, що викликає підвищені витрати на паливо-мастильні матеріали, технічне обслуговування та ремонт. Внаслідок тривалих термінів експлуатації, неякісного обслуговування та ремонту все частіше виникають поломки ключових агрегатів та вузлів, відновлення чи заміна яких неможлива.

Для оновлення тепловозів з гідравлічною передачею потужності здебільшого застосовується ремоторизація, при якій встановлюється сучасний дизельний двигун. Такий вид модернізації застосовують вітчизняні локомотиворемонтні заводи. За кордоном здійснюють модернізації із застосуванням сучасної гідропередачі [1].

Альтернативним варіантом є застосування тягового електроприводу при збереженні оригінальної екіпажної частини з груповим приводом колісних пар. Проекти таких модернізацій розробляються (а за повідомленнями на інтернет-ресурсах – вже реалізовані) у СНД та країнах Балтії. В Україні модернізацію тепловозу типу ТГМ6 із застосуванням тягового електроприводу виконано ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод». У розрізі цього вбачається актуальним розробка та дослідження тягового електроприводу для тепловозів з груповим приводом колісних пар.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Груповий привод колісних пар та електричний привод колісних пар застосовуються на тягових модулях колійних машин (рис. 1а).

Передача крутного моменту на колісні пари в транспортному режимі відбувається від одного тягового електродвигуна ЕД-118А через режимний редуктор, карданні вали та осьові редуктори, а в робочому режимі – від одного електродвигуна ДК-213 через знижувальний і режимний редуктори, карданні вали та осьові редуктори. Аналогічну трансмісію мають тягово-енергетичні модулі ТЕУ-630, УТМ2. На колійній тяговій машині ПТМ-630 рух у транспортному режимі здійснюється від дизеля через гідропередачу. У робочому режимі колісні пари приводяться у

обертання від електродвигуна, який через погоджувальний редуктор з'єднано з вихідним валом гідропередачі.



а)



б)

Рис. 1 – Загальний вигляд універсального тягового модуля УТМ-1 (а) дослідного тепловозу ТЕМ12 (б)

Відомим є тепловоз ТЕМ12 (рис.1б), дослідний зразок якого експлуатувався на Маріупольському коксохімічному заводі «Маркохім». На тепловозі застосовано два тягові електродвигуни ЕД-121, підвішені до головної рами кузова. Вали електродвигунів з'єднані між собою та сполучені з карданними валами осьових редукторів візків. Це забезпечує механічний зв'язок між собою всіх колісних пар локомотива. Живлення та керування тяговими електродвигунами здійснюється від дизель-генераторної установки.

Наразі модернізація тепловозів з гідравлічною передачею шляхом застосування тягового електроприводу виконується європейськими компаніями. Компанія Alstom застосувала тяговий електропривод при модернізації застарілих тепловозів з гідропередачею типу BR203 (V100) [2] (рис. 2а). Важливим є те, що на модернізованому тепловозі також застосовано гібридну енергетичну установку. Компанія Kolejové pohonu [3] застосовує тяговий електропривод при модернізації застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності різних модифікацій (рис. 2б). Оновлені локомотиви можуть бути з живленням від тягових акумуляторів або дизель-генератора. При створенні гібридного локомотиву LHy-M (рис. 2в) було використано екіпажну частину тепловозу з гідравлічною передачею потужності LDH 1250 CP [4]. На усіх вказаних тепловозах застосовано тяговий електропривод на основі електродвигунів змінного струму.



а)



б)



в)

Рис. 2 – Загальний вигляд: а) тепловозу BR203H; б) Battery Locomotives of A415; в) гібридний локомотив LHy-M

Компанія Toshiba використала екіпажну частину тепловозу з гідравлічною передачею потужності VR90 при створенні гібридного локомотиву HELMS [5] (рис. 3а).

Компанія CFD [6] пропонує нові локомотиви, які обладнані тяговим електроприводом з груповим приводом колісних пар (рис. 3б). Компанією Skoda опрацьований проєкт електровозу із застосуванням групового приводу колісних пар [7] (рис. 3в). На електровозі запропоновано застосування двох електродвигунів, розміщених під рамою електровозу, які через карданні вали та проміжні редуктори з'єднані з осьовими редукторами колісних пар трьох двовісних візків. У [8] можна знайти пропозиції щодо застосування групового приводу на магістральних електровозах.

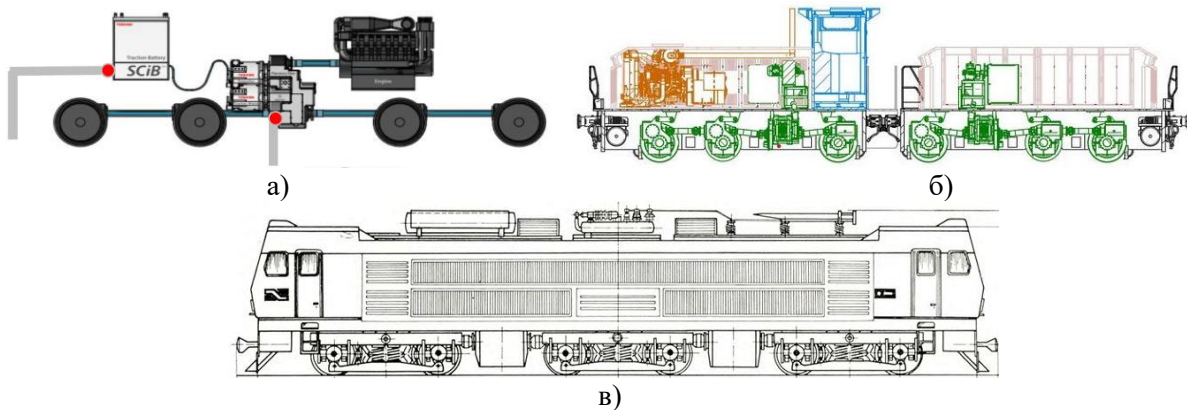


Рис. 3 – Схема трансмісії локомотиву HELMS (а), проект локомотиву F2D33 компанії CFD (б); проект електровозу Skoda з груповим приводом колісних пар (в)

Створення локомотивів з груповим приводом колісних пар також можливе шляхом застосування *мономоторних візків*, в яких від одного тягового електродвигуна приводяться у обертання декілька колісних пар (рис. 4). Електровози з такими візками створювалися для французьких залізниць, а згодом поширилися і на інші європейські країни. У мономоторних візках застосовано електродвигуни пульсуючого струму. Мономоторний візок аналогічної конструкції створений для електровозу ВЛ83, де було застосовано вентильний (синхронний) двигун.

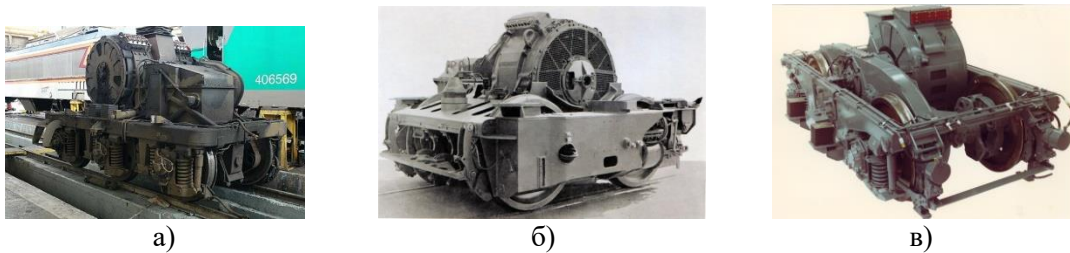


Рис. 4 – Мономоторні візки: а) моторний візок електровозу серії CC6500 SNCF; б) моторний візок електровозів серії BB8500, BB17000 та BB25500; в) візок електровозу ВЛ83

Таким чином, найбільшого поширення набуло застосування мономоторних візків на електрорухомому складі. Розповсюдженим підходом є використання екіпажної частини тепловозів з гідравлічною передачею потужності для створення маневрових локомотивів з тяговим електроприводом. В цьому випадку є можливим застосування гібридних енергетичних установок та тягових акумуляторних батарей. Також відомо про створення нових локомотивів з тяговим електроприводом та груповим приводом колісних пар.

Тяговий електропривод локомотивів з груповим приводом колісних пар створюється з використанням електродвигунів змінного струму, як правило, асинхронних.

Метою статті є представлення результатів розробки тягового електроприводу для модернізації тепловозів з гідравлічною передачею потужності.

Виклад основного матеріалу. Узагальнення матеріалів, присвячених аналізу та порівнянню індивідуального та групового тягового приводу колісних пар [9, 10], дозволяє виділити наступні переваги групового приводу колісних пар:

- потребує меншої кількості агрегатів;
- має меншу вартість;
- має меншу трудомісткість обслуговування та ремонтів;
- екіпажна частина локомотиву з груповим приводом колісних пар має меншу масу, моменти інерції та розміри;
- підвищений коефіцієнт зчеплення;

– менша схильність до боксування та юзу в умовах нестабільності зчеплення колеса з рейкою.

До недоліків групового приводу колісних пар відносять:

- більш низький коефіцієнт корисної дії;
- збільшений опір рухові;
- зменшення статичного прогину ресорного підвішування;
- підвищені вимоги до технічного обслуговування;
- значні динамічні навантаження у нестационарних режимах роботи.

Як бачимо, груповий привід колісних пар має суперечливі властивості. Однак вказані переваги у вигляді меншої вартості приводу та можливості реалізації високих тягових зусиль без додаткових пристроїв є значущими. А отже, збереження групового приводу колісних пар при модернізації тепловозів з гідравлічною передачею потужності та його застосуванні при створенні нових локомотивів автори вважають доцільним.

Зважаючи на вищенаведене, ТОВ «Миколаївський тепловозремонтний завод» розробив проект модернізації застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності типу ТГМ та уперше в Україні виконав за цим проектом модернізацію тепловозу ТГМ6Д (рис. 5). Умови експлуатації модернізованого тепловозу передбачають його застосування для виконання «середньої» та «важкої» маневрової роботи. За результатами аналізу режимів експлуатації маневрових тепловозів на ПАО «АрселорМітал Кривий Ріг» визначено параметри тепловозу, які наведено у таблиці. Гранична тягова характеристика тепловозу показана на рис. 6.

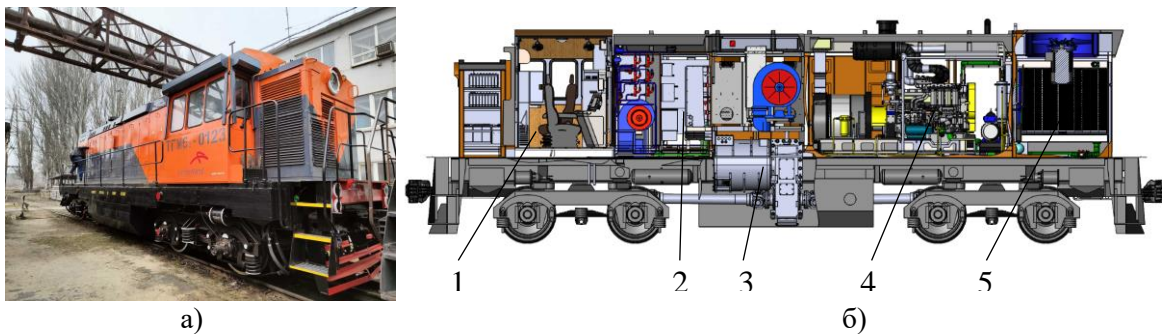


Рис. 5 – Загальний вигляд (а) та розміщення обладнання (б) на модернізованому тепловозі ТГМ6Д №0123: 1 – кабіна; 2 – апаратна камера; 3 – мотор-редуктор; 4 – дизель-генератор; 5 – охолоджуючий пристрій

Таблиця

Параметри модернізованого тепловозу ТГМ6 з тяговим електроприводом

Параметр	Од.вим.	Значення
Потужність по дизелю	кВт	747
Сила тяги тривалого режиму	кН	300
Максимальна швидкість	км/год	50
Тип тягового електроприводу		на основі електричних машин змінного струму
Тип приводу колісних пар		груповий із застосуванням екіпажної частини тепловозу ТГМ6
Маса тепловозу	т	98

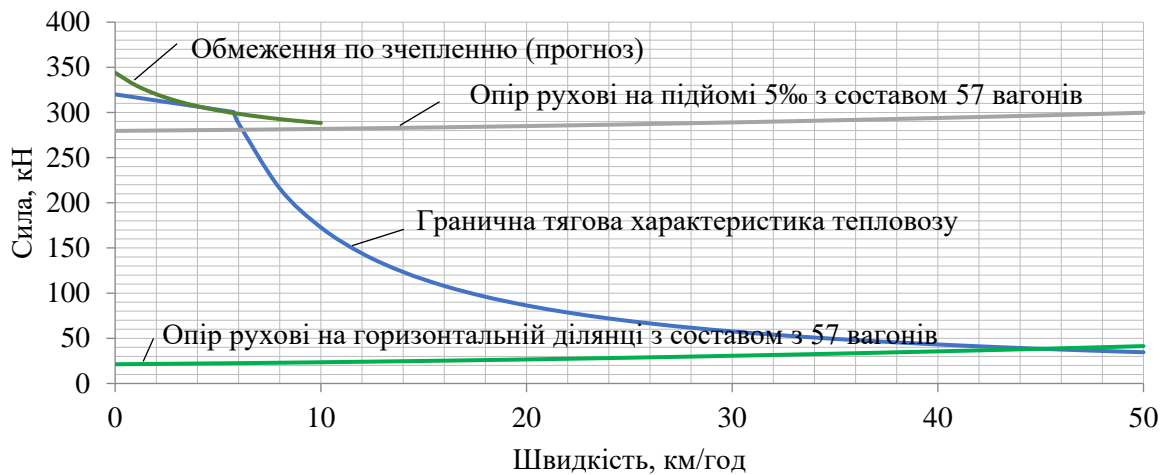


Рис. 6 – Тягові характеристики модернізованого тепловозу

Для забезпечення тягових властивостей тепловозу та реалізації переваг групового приводу колісних пар на тепловозі застосовано тяговий електропривод на основі асинхронного електродвигуна. Структурну схему тягової системи тепловозу показано на рис. 7.

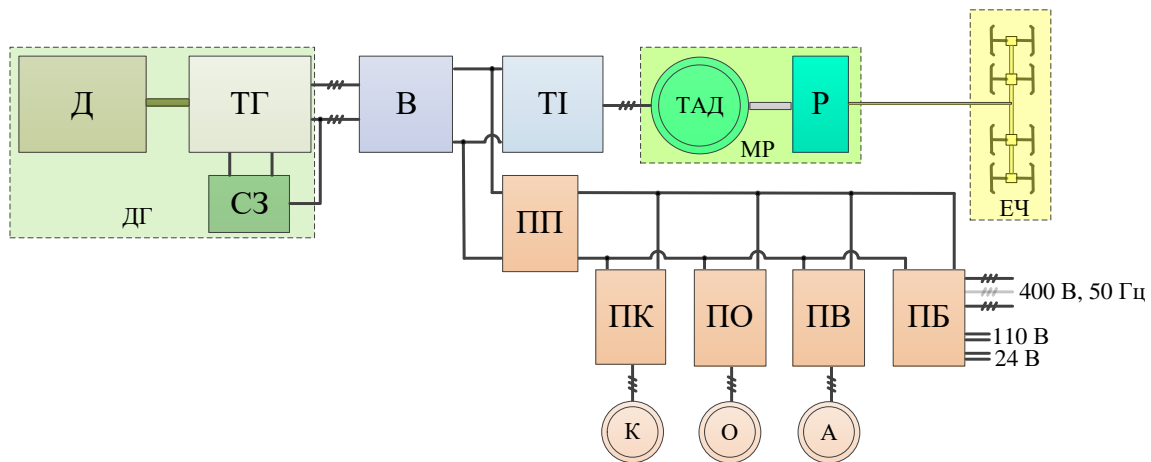


Рис. 7 – Структурна схема тягової системи модернізованого тепловозу: ДГ – дизель-генераторна установка; Д – дизельний двигун; ТГ – тяговий генератор; СЗ – система збудження; В – випрямляч; ТІ – тяговий інвертор; МР – мотор-редуктор; ТАД – тяговий асинхронний двигун; Р – проміжний редуктор; ЕЧ – екіпажна частина тепловозу; ПП – проміжний перетворювач; ПК – перетворювач для живлення електродвигуна компресора; К – мотор-компресор; ПО – перетворювач для живлення електродвигуна вентилятора охолоджуючого пристрою; О – електродвигун мотор-вентилятора охолоджуючого пристрою; ПВ – перетворювач для живлення електродвигуна вентилятора охолодження тягового асинхронного електродвигуна; А – електродвигун мотор-вентилятора охолодження тягового електродвигуна; ПБ – багатоканальний перетворювач для живлення електричних кіл тягового електрообладнання та бортової мережі

Джерелом живлення є дизель-генераторна установка ДГ з дизелем виробництва Cummins потужністю 747 кВт при частоті обертання 1800 об/хв. Тяговий синхронний генератор ТГ забезпечує живлення через некерований випрямляч В тягового інвертора ТІ та погоджувального перетворювача допоміжних систем ПП. Тяговий інвертор ТІ забезпечує живлення та керування тяговим асинхронним електродвигуном ТАД. Обертний момент від валу тягового асинхронного

електродвигуна *ТАД* передається на проміжний редуктор *P*, вихідний вал якого сполучений карданними валами з осьовими редукторами колісних пар екіпажної частини тепловозу *ЕЧ*.

Живлення допоміжних систем тепловозу здійснюється від погоджувального перетворювача *ПП*, який під'єднано до некерованого випрямляча *B*. На тепловозі застосовано частотно-керований електропривод мотор-вентиляторів охолоджуючого пристрою (електродвигун *O* та перетворювач *ПО*), частотно-керований електропривод мотор-вентилятора охолодження тягового електродвигуна (електродвигун *A* та перетворювач *ПВ*) та мотор-компресор, укомплектований електродвигуном *K* та перетворювачем *ПК*. Для живлення бортової мережі та допоміжних кіл тягового електрообладнання призначений багатоканальний перетворювач *ПБ*. На тепловозі застосовано акумуляторну батарею підвищеної ємності, що дозволяє забезпечити роботу обладнання у кабіні при непрацюючому дизельному двигуні.

Електрообладнання виконано у «тяговому» виконанні з урахування умов експлуатації тепловозу. Тяговий асинхронний електродвигун – з короткозамкненою обмоткою ротора, з незалежною вентиляцією, інтенсивність вентиляції змінюється в залежності від навантаження тягового асинхронного електродвигуна. Тяговий генератор – синхронний, з самовентиляцією. При розробці тягових електричних машин застосовані сучасні електротехнічні та ізоляційні матеріали. Тяговий інвертор та допоміжні перетворювачі виконані на IGBT-транзисторах.

Для системи керування тепловозом використовується мережа на основі протоколу CAN. Система керування забезпечує управління тяговою системою в штатних режимах та програмний захист у аварійних ситуаціях.

Особливістю розробленого тягового електроприводу є можливість тривалої роботи тепловозу з максимальною силою тяги при зниженій потужності: тяговий електропривод забезпечує тривалу роботу тепловозу з максимальною силою тяги при швидкості від 3 км/год. Застосування частотно-керованого електроприводу мотор-вентиляторів охолоджуючого пристрою та охолодження тягового асинхронного електродвигуна забезпечує їх роботу з оптимальним навантаженням, що сприяє зниженню споживання енергії.

Розрахунковий коефіцієнт корисної дії тепловозу та коефіцієнт корисного використання потужності дизеля при номінальній потужності та розрахунковій швидкості тривалого режиму, рівній 6 км/год, складають 0,312 д.о. та 0,69 д.о. відповідно. Ці значення задовольняють вимогам стандартів на маневрові тепловози, хоча знаходяться на межі допустимого діапазону. На теперішній час тепловоз проходить експлуатаційні випробування на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Експериментальні поїздки підтвердили реалізацію високих тягових зусиль. Зокрема, тепловоз забезпечив рух поїздів, для яких штатно застосовуються шестивісні тепловози типу ТЕМ2 та ЧМЕ3. Наразі тривають дослідна експлуатація та збір даних для оцінки паливної економічності модернізованого тепловозу.

Як зазначалося, модернізований тепловоз створений для «середньої» та «важкої» маневрової роботи, що передбачає його переважну експлуатацію з високими тяговими зусиллями. Це обумовило застосування традиційної дизель-генераторної установки та тягового електроприводу з одним електродвигуном. Водночас маневрові тепловози на промислових підприємствах використовуються у різних експлуатаційних режимах. Найпоширенішою ситуацією є тривалі режими роботи, які характеризуються неповним використанням потужності та сили тяги [11, 12]. Для виключення режимів роботи з підвищеною витратою палива доцільним вважається застосування гібридної силової енергетичної установки, у тому числі з використанням водневих технологій [13, 14]. Можливим варіантом є дводизельна силова енергетична установка або повністю акумуляторний локомотив [15, 16]. Опис схемних рішень, які використовуються при створенні подібних силових установок, та підходів до їх оптимізації можна знайти у роботах [13, 15, 17]. Доцільним є застосування електродинамічного гальмування.

Зменшення споживання енергії тяговим електроприводом при роботі з неповною силою тяги можливо досягнути шляхом застосування двох (чи більшої кількості) тягових електродвигунів, навантаження кожного з яких оптимізовано для поточної величини сили тяги [18]. При цьому можливими є такі варіанти:

– електродвигуни приєднані до спільного проміжного редуктора, який з'єднаний з осьовими редукторами колісних пар (рис. 8а) (технічне рішення, застосоване на тепловозах BR203H та LHy-M);

– є два окремі мотор-редуктори, які з'єднані з осьовими редукторами візків та між собою (рис. 8б);

– кожен мотор-редуктор з'єднаний з окремим візком, з'єднання редукторів між собою немає (рис. 8в).

Також можливим є варіант із застосуванням мономоторних візків.

Варто відзначити, що для реалізації роздільного навантаження електродвигунів вони повинні мати індивідуальне живлення. Електродвигуни можуть бути неідентичними один одному.

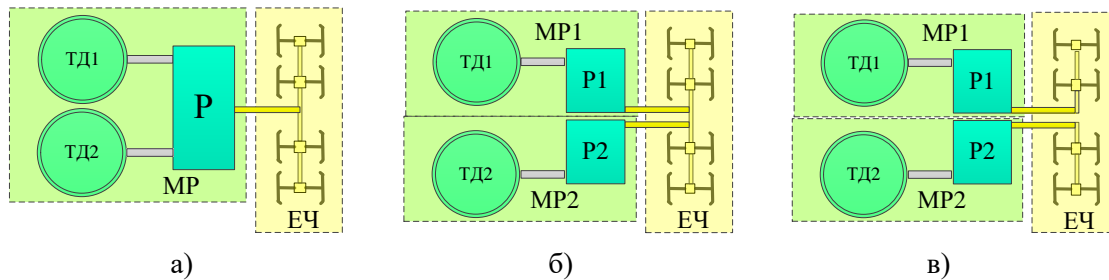


Рис. 8 – Схеми механічної частини багатодвигунного електроприводу з груповим приводом колісних пар: МР, МР1, МР2 – мотор-редуктор, ТД1, ТД2 – тягові електродвигуни; Р, Р1, Р2 – проміжні редуктори, ЕЧ – екіпажна частина тепловозу

Для зменшення енергоспоживання тяговим електроприводом необхідне застосування алгоритмів керування, спрямованих на мінімізацію втрат у його компонентах [18, 19]. Загальному споживанню паливно-енергетичних ресурсів сприяє впровадження електродинамічного гальмування із акумулюванням енергії у бортовому накопичувачі енергії.

Таким чином, застосування тягового електроприводу дозволяє провести модернізацію застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності. Для отримання найбільшого ефекту від модернізації необхідно врахування умов експлуатації тепловозу та впровадження у його тяговій системі рішень, які найбільш відповідають умовам експлуатації.

Висновки

1. Рациональним шляхом оновлення застарілих маневрових тепловозів з гідравлічною передачею потужності є застосування тягового електроприводу при збереженні групового приводу колісних пар. Ключовою перевагою такого підходу є менша вартість електроприводу (а отже – і модернізації в цілому) та можливість стабільної реалізації високих тягових зусиль.

2. Розроблено тяговий електропривод для модернізації застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності та уперше в Україні проведено модернізацію тепловозу ТГМ6Д із застосуванням розробленого тягового електроприводу.

3. Розрахунково-теоретичні показники модернізованого тепловозу відповідають рівню сучасних маневрових локомотивів. Отримані при експериментальних поїздках дані підтверджують можливість застосування модернізованого чотиривісного тепловозу ТГМ6 №0123 із складами, для водіння яких застосовуються шестивісні тепловози типу ТЕМ2 та ЧМЕЗ.

4. Запропоновано варіант удосконалення розробленого тягового електроприводу шляхом застосування декількох електродвигунів при збереженні групового приводу колісних пар, а також показано доцільність застосування гібридної силової енергетичної установки, впровадженні електродинамічного гальмування та необхідності оптимізації режимів тягової системи при її роботі з неповним навантаженням.

Перелік використаних джерел:

1. A korszerűsített TEM2 és TGM4B típusú mozdonyok bemutatása. URL: http://vasutgepeszet.hu/wp-content/uploads/vasutgepeszet_2017-1_Csetvei_Csuka_Szorath.pdf.
2. Hybrid locomotives overview of construction solutions / M. Konarzewski, T. Niezgod, M. Stankiewicz, P. Szurgott. *Journal of KONES*. 2013. № 20. Pp. 127-134. DOI: <https://doi.org/10.5604/12314005.1135325>.

3. Kolejové pohony a.s. URL: <https://www.kolejovepohony.cz/en/>.
4. Locomotiva hibrid de manevră – premieră mondială. Transformarea locomotivei diesel hidraulică LDH 1250 CP în Locomotiva hibrid LHy-M. URL: <http://www.locomotivahibrid.ro/wp-content/uploads/2017/10/LHy-M- Studiu-de-solutii Etapa-1-1.pdf>.
5. HELMS. Hybrid Electro-Mechanical Shunter. URL: https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infraolution/www/infrastructure/en/railway/as-sets/pdf/TOSHIBA_HELMS_Poster.pdf.
6. Compagnie de Chemins de Fer Départementaux. URL: <https://www.cfd.group/>.
7. František Palík, Petr Lapáček. Vzpomínky konstruktéra lokomotiv Škoda. Brně: CPRESS, 2023. 168 s.
8. Nouvion F.F. Three-Phase Motors in Electric Rail Traction. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1984. Vol. IA-20, № 5. Pp. 1152-1170. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504578>.
9. Рябов Є.С., Єріцян Б.Х., Якунін Д.І., Демидов О.В. Маневровий локомотив з електричною передачею потужності та груповим приводом колісних пар. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022*, м. Харків, 19-21 жовтня 2022 р. Харків: НТУ «ХПІ». С. 179.
10. Гетьман Г.К., Голік С.М. Тягові передачі електрорухомого складу: Навчальний посібник. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2020. 260 с.
11. Маслак Г., Красулін О. Нові енергозберігаючі технології в транспортному обслуговуванні промислових підприємств. *European Science*. 2023. Vol. 3(17-03). Pp. 69-94. DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-17-03-006>.
12. Оновлення тягового рухомого складу промислових підприємств / С.В. Рой, А.В. Качан, А.С. Тихонов, Є.С. Рябов, Б.Х. Єріцян. *Транспорт: наука та практика: збірник наукових праць за матеріалами II-ї Міжнародної науково-практичної конференції*, Київ - Одеса, 25-26 травня 2023 р. Київ: СНУ ім. В. Даля, 2023. С. 169-172.
13. Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive / A. Falendysh, P. Kharlamov, O. Kletska, N. Volodarets. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. Pp. 665-671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.325>.
14. Seyam S., Dincer I., Agelin-Chaab M. Development and assessment of a cleaner locomotive powering system with alternative fuels. *Fuel*. 2021. Vol. 296. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120529>.
15. NRE. URL: <https://nre.com/>.
16. Emd® joule battery electric locomotives. URL: <https://www.progressrail.com/en/Segments/RollingStock/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html>.
17. A multi-objective optimal sizing scheme for hybrid traction power supply systems onboard shunting locomotive / H. Pei, L. Diao, Zh. Jin, C. Xu, Y. Zhang, Y. Fan. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 72. Pp. 399-414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.023>.
18. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport / I. Riabov, S. Goolak, L. Kondratieva, L. Overianova. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023. Vol. 42, 101416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>.
19. Exploitation of Energy Optimal and Near-Optimal Control for Traction Drives with AC Motors / B. Ftorek, J. Šimon, M. Kiselev, V. Vavrůš, J. Vittek. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14122613>.

References:

1. A korszerűsített TEM2 és TGM4B típusú mozdonyok bemutatása Available at: http://vasutgepeszet.hu/wp-content/uploads/vasutgepeszet_2017-1_Csetvei_Csuka_Szorath.pdf (accessed 15 March 2023).
2. Konarzewski M., Niezgodna T., Stankiewicz M., Szurgott P. Hybrid locomotives overview of construction solutions. *Journal of KONES*, 2013, vol. 20, pp. 127-134. doi: <https://doi.org/10.5604/12314005.1135325>.
3. Kolejové pohony a.s. Available at: <https://www.kolejovepohony.cz/en/> (accessed 10 February 2023).

4. Locomotiva hibrid de manevră – premieră mondială. Transformarea locomotivei diesel hidraulică LDH 1250 CP în Locomotiva hibrid LHy-M Available at: http://www.locomotivahibrid.ro/wp-content/uploads/2017/10/LHy-M- Studiu-de-solutii_Etapa-1-1.pdf (accessed 08 December 2022).
5. HELMS. Hybrid Electro-Mechanical Shunter Available at: https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/TOSHIBA_HELMS_Poster.pdf (accessed 28 November 2022).
6. Compagnie de Chemins de Fer Départementaux Available at: <https://www.cfd.group/> (accessed 13 December 2022).
7. Palík F., Petr Lapáček P. *Vzpomínky konstruktéra lokomotiv Škoda*. Brně: CPRESS, 2023. 168 s. (Czech)
8. Nouvion F.F. Three-Phase Motors in Electric Rail Traction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol. IA-20, № 5, pp. 1152-1170. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504578>.
9. Riabov Ye.S., Yeritsian B.Kh., Iakunin D.I., Demydov O.V. Shunting locomotive with electric power transmission and group drive of wheel pairs. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: theses of reports of XX Int. Sci. and Pract. Conf. MicroCAD-2022, Ukraine, Kharkiv, 2022*, pp. 179. (Ukr.)
10. Hetman H.K., Holik S.M. *Traction transmissions of electric rolling stock: Training manual*. Dnipro, Standard-Service Publ., 2020. 260 p. (Ukr.)
11. Maslak H., Krasulin O. New energy-saving technologies in transport service of industrial enterprises. *European Science*, 2023, vol. 3(17-03), pp. 69-94. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-17-03-006>. (Ukr.)
12. Roi S.V., Kachan A.V., Tykhonov A.S., Riabov Ye.S., Yeritsian B.Kh. Modernization of the traction rolling stock of industrial enterprises. *Transport: Science and Practice: collection of scientific works based on the materials of the II Int. Sci. and Pract. Conf., Kyiv – Odesa, 2023*, pp. 169-172. (Ukr.)
13. Falendysh A., Kharlamov P., Kletska O., Volodarets N. Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive. *Transportation Research Procedia*, 2016, vol. 14, pp. 665-671. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.325>.
14. Seyam S., Dincer I., Agelin-Chaab M. Development and assessment of a cleaner locomotive powering system with alternative fuels. *Fuel*, 2021, vol. 296, 2021, pp. 1-15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120529>.
15. NRE Available at: <https://nre.com/> (accessed 01 November 2022).
16. Emd® joule battery electric locomotives Available at: <https://www.progressrail.com/en/Segments/RollingStock/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html> (accessed 13 November 2022).
17. Pei H., Diao L., Jin Z., Xu C., Zhang Y., Fan Y. A multi-objective optimal sizing scheme for hybrid traction power supply systems onboard shunting locomotive. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, vol. 72, pp. 399-414. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.023>.
18. Riabov I., Goolak S., Kondratieva L., Overianova L. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2023, vol. 42, 101416, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>.
19. Ftorek B., Šimon J., Kiselev M., Vavrůš V., Vittek J. Exploitation of Energy Optimal and Near-Optimal Control for Traction Drives with AC Motors. *Symmetry*, 2022, vol. 14, pp. 1-14. doi: <https://doi.org/10.3390/sym14122613>.

Рецензент: С.Г. Буряковський
д-р техн. наук, професор, НДКТІ «Молнія» НТУ «ХПІ»

Стаття надійшла 10.04.2023
Стаття прийнята 28.05.2023