

Аспіранти С. В. Бірюков, К. В. Ілленко, С. Д. Горбач, В. В. Говорун,
В. М. Клименко

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТЯГОВИХ МУФТ, ЩО ЕКСПЛУАТОВАНИ НА ЕЛЕКТРОПОЇЗДАХ ВІТЧИЗНЯНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ І МЕТРОПОЛІТЕНІВ



Анотація. У статті проаналізовано схеми конструкцій тягових передач, які застосовували на рейковому рухомому складі, експлуатованому на залізницях і метрополітенах. Вказано на відмінності та особливості конструкцій тягових приводів різних класів, зокрема доцільність використання тягових муфт як елемента, який дає змогу передавати обертальний момент від тягового двигуна на редуктор колісної пари з неспівпадінням осей їхніх валів.

Розглянуто конструкції тягових муфт, які застосовували на вагонах електропоїздів метрополітену старих і модернізованих конструкцій та електропоїздів приміського сполучення на залізницях. Вказано на основні складові конструкції муфт електропоїздів і можливі несправності такого вузла, які можуть виникати з експлуатацією. У статті зосереджено увагу на конструкції карданної муфти вагона електропоїзда метрополітену та зубчастій муфти ЗК 306, що встановлена на вагонах, які пройшли капітально-відновлювальний ремонт. Розглянуто гумокордну пружну муфту, яка встановлена на рухомому складі залізничних електропоїздів приміського сполучення.

Порівняно величини неспіввісності валів, що компенсують розглянуті тягові муфти, зроблено висновки щодо проведеного аналізу.

Ключові слова: рейковий рухомий склад, тягова передача, візок вагона, тяговий привод, карданна муфта, гумокордна муфта.

Вступ.

Залізничний транспорт у сучасному світі відіграє важливу роль у забезпеченні мобільності населення та перевезенні вантажів. Він дає змогу сполучати між собою країни та міста, тим самим сприяючи інтеграції економіки і розвитку інфраструктури. Саме залізничний транспорт найдоцільніше використовувати для перевезення великого обсягу вантажів на середні та великі відстані суходолом. Те саме справедливо і для пасажирських перевезень, якщо звісно є розвинена залізнична інфраструктура.

Щодо переміщення на порівняно малі відстані, то тут лідирує автомобільний транспорт [1], але також значну нішу займає і рейковий: трамвай, залізничний рухомий склад міського сполучення та електропоїзди метрополітену.

У свою чергу рухомий склад метрополітену, як один із видів громадського транспорту, робить вагомий внесок у розвиток міської транспортної інфраструктури, адже він є дуже зручним і порівняно швидким. Однак метрополітен є складною структурою із специфічною розгалуженою системою, яка розташована під землею, а саме тунелі та станції, які потребують постійного догляду і ремонту. Усе це призводить до значних витрат на експлуатацію, тому таку транспортну структуру потрібно впроваджувати

у великих містах, населення яких складає більше мільйона жителів [2], щоб покрити капітальні витрати на будівництво та подальшу експлуатацію. Відповідно і рухомий склад метрополітену має бути надійним, щоб забезпечувати перевезення пасажирів із належною безпекою [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ) і Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» є одними з основних вітчизняних центрів, де проводять дослідження і публікують роботи стосовно тягового привода та інших складових ходової частини рейкового транспорту [4, 5]. Дослідження механічної частини рухомого складу здебільшого стосуються її модернізації [6] і збільшення ресурсу роботи, оскільки значну частину локомотивів і поїздів експлуатують із пробігом, який перевищив нормативний [7], а нових рухомих одиниць на Укрзалізницях та метрополітенах не так багато.

За кордоном дослідженню ходової частини електропоїздів і вирішенню питань щодо її оптимізації та вдосконаленні приділяють багато уваги. Наприклад, досліджують динаміку тягової передачі та аналізують її відмови, зокрема на високошвидкісному рейковому транспорті [8, 9], адже

від надійності механічного обладнання залежить безпека руху.

Також моделюють ходову частину рейкового транспорту, щоб оцінити її стан у складних умовах експлуатації [10].

Визначення мети та задачі дослідження.

Метою статті є аналіз особливостей конструкції існуючих моделей тягових муфт, які експлуатовані на електропоїздах метрополітену і поїздах залізничного приміського сполучення, а також порівняння параметрів неспіввісності валів, які компенсують муфти.

Основна частина дослідження.

Одним із основних компонентів рейкового транспорту, який безпосередньо впливає на безпеку руху, є його ходова частина, а саме візки, які сприймають вагу вагона з пасажирами та рівномірно розподіляють її на колісні пари, а також передають тягові та гальмівні зусилля, виконують напрямлення руху вагона по колії. Для передавання обертового моменту від двигуна до колісної пари служить тягова передача [11]. Оскільки в конструкції візків вітчизняного рейкового транспорту геометричні осі

вала двигуна та колісної пари не співпадають, то необхідно застосовувати редуктор.

Тягові передачі рухомого складу залежно від способу підвішування двигуна та редуктора умовно поділяють на три класи [12]:

- привод першого класу: опорно-осьове підвішування двигуна та редуктора;
- привод другого класу: опорно-рамне підвішування двигуна та опорно-осьове редуктора;
- привод третього класу: опорно-рамне підвішування двигуна та редуктора.

Привод першого класу, кінематична схема якого зображена на рис. 1, здебільшого застосовано на локомотивах, задіяних у вантажних перевезеннях, і на електропоїздах старих серій. Також опорно-осьовий привод був дуже поширений на трамваях. Опорно-осьове підвішування має значну невіднесену вагу привода, оскільки тяговий електродвигун спирається на вісь колісної пари, що викликає значні напруження в елементах тягової передачі з рухом коліс по нерівностях рейкової колії. Така передача має більш просту конструкцію порівняно з іншими класами та буває односторонньою або двосторонньою залежно від конструктивного виконання.

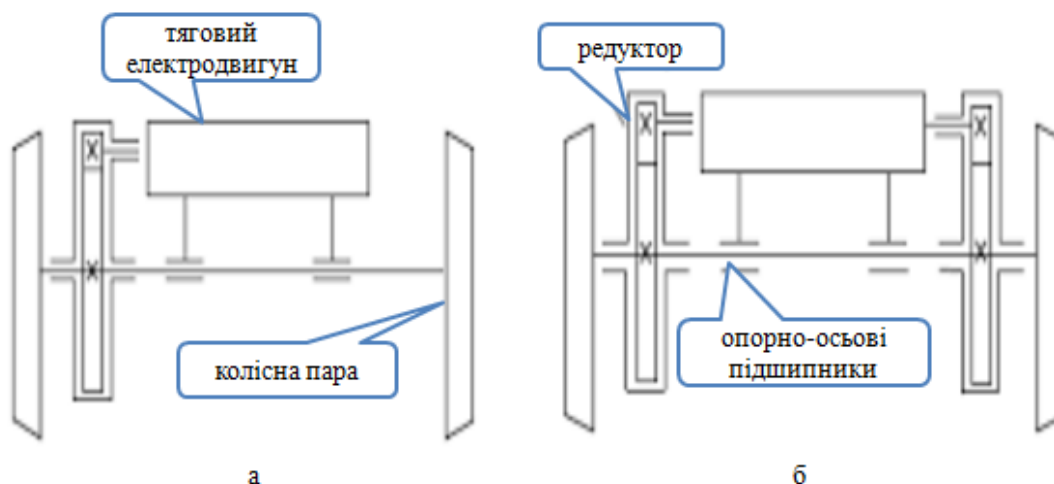


Рис. 1. Схема опорно-осьового підвішування електродвигунів:

а – одностороння передача; б – двостороння передача

Привод другого класу застосовувано на пасажирських локомотивах і поїздах, а також електропоїздах метрополітену (рис. 2). Для нього

характерне зниження невіднесеної ваги порівняно із приводом першого класу, оскільки двигун встановлено на віднесену частину візка, а саме – раму.

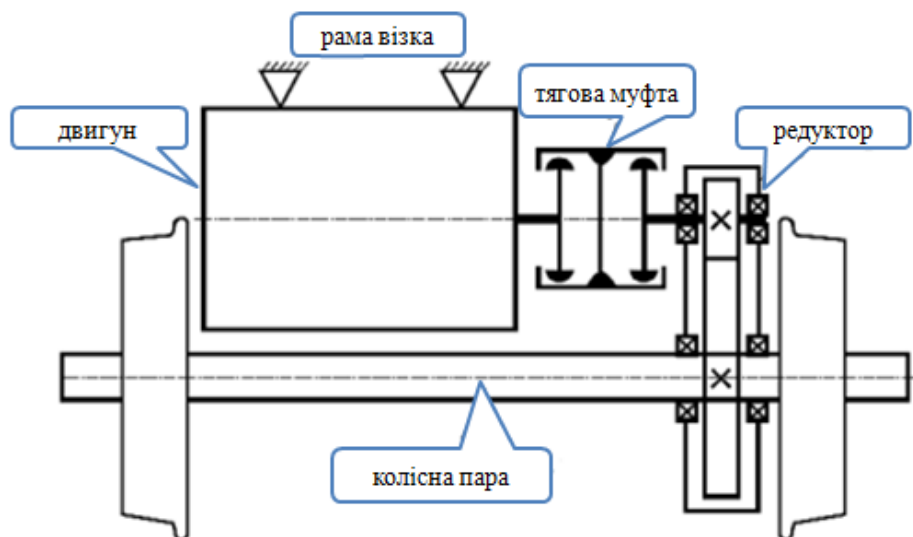


Рис. 2. Кінематична схема тягового привода II класу

Привод третього класу застосовано, зокрема, на високошвидкісному рухомому складі, деяких сучасних вантажних електровозах і вагонах метрополітену. Усі основні компоненти привода

підресорені, що показано на рис. 3, це зменшує вплив динамічних навантажень на них. Але такий привод має досить складну конструкцію, що впливає на його вартість і обслуговування.

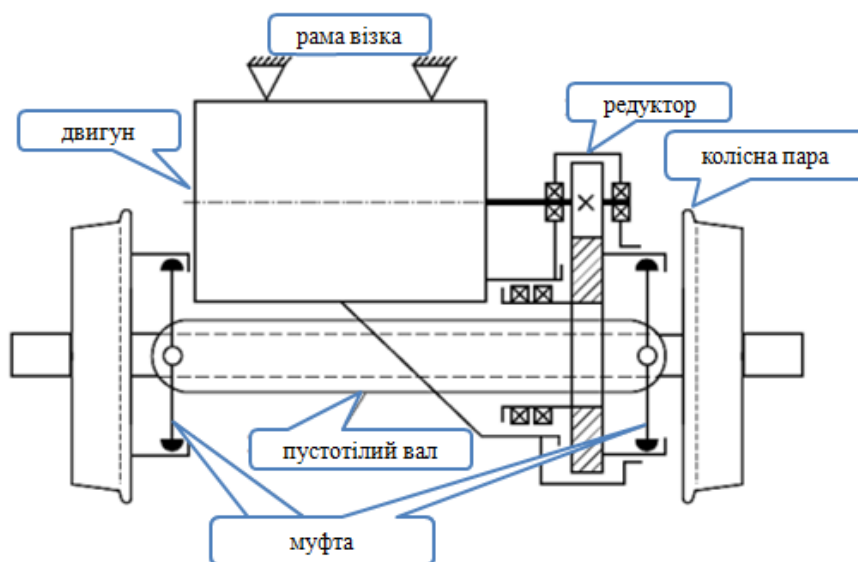


Рис. 3. Кінематична схема тягового привода III класу

Тяговий двигун під час руху вагона може переміщуватися відносно колісної пари, якщо він розташований на підресорених частинах візка. У таких умовах експлуатації застосовують муфти, які з'єднують вал двигуна та шестірню редуктора, щоб передавати обертальний момент на колісну пару. Але у випадку опорно-осьового підвішування двигуна, тобто із застосуванням тягової передачі I класу, необхідності в таких муфтах немає.

Застосовуючи привод II класу, між двигуном і редуктором використовують тягову муфту. Цей факт накладає певні обмеження на габаритні розміри

двигуна, адже необхідно вмістити разом із великим редуктором ще й муфту.

Щодо тягового привода III класу, то, коли і двигун і редуктор встановлені на підресореній частині візка, вал зубчастого колеса редуктора з'єднується з колісною парою за допомогою тягової муфти, яка має сприймати великі обертальні моменти, на відміну від муфт, що застосовані у приводах II класу. Також підресорювання редуктора створює додаткові обмеження за габаритами – через збільшення висоти положення нижньої точки редуктора над головками ходових рейок є необхідність зменшення граничного діаметра зубчастого колеса порівняно з аналогічним

діаметром у приводах I і II класів, що призводить до зменшення максимального передавального відношення редуктора, яке реалізовано на одній передачі. Це не має великого значення для пасажирського рейкового транспорту, але є дуже суттєвим для вантажного.

За конструкцією тягові муфти поділяють на муфти поздовжньої компенсації та муфти поперечної компенсації.

На вітчизняному рухомому складі, зокрема електропоїздах Харківського метрополітену, експлуатують візки, на яких тяговий електродвигун має рамне підвішування, а редуктор – опорно-осьове, відповідно застосовано тяговий привод другого класу [13].

Під час руху рухомого складу по колії виникає неспіввісність вала тягового двигуна з валом шестірні редуктора. Переміщення валів, що виникають із рухом, можуть відбуватися одночасно в горизонтальній і вертикальній площинах: горизонтальна площина – у результаті розбігу колісної пари, тобто можливості її руху відносно рами візка як у поздовжньому, так і поперечному напрямках; вертикальна площина – із навантаженням пружин буксового підвішування від нерівностей колії та навантаження від ваги пасажирів. Для компенсації цієї неспіввісності валів застосовують шарнірне з'єднання, а саме карданну муфту [14] (рис. 4), яка з'єднує вал тягового двигуна з валом шестірні редуктора та передає тягові й гальмівні зусилля від двигуна на колісну пару. Ця муфта допускає паралельне зміщення валів один відносно одного до 8 мм, кутове зміщення до $2,5^\circ$, взаємне поздовжнє зміщення валів до 11 мм.



Рис. 4. Розташування карданної муфти під вагоном

Складається карданна муфта з двох однакових напівмуфт, які з'єднані чотирма призонними болтами після встановлення на відповідні вали. До елементів кожної напівмуфти (рис. 5) входять кулачок із двома голковими підшипниками і двома ковпачками, кріпильна гайка з шайбою, корпус-вилка, стакан, ущільнюючий щит і чотири болти з

контргайками. Для з'єднання напівмуфт між собою встановлена загальна центруюча шайба та ущільнююча прокладка [15].

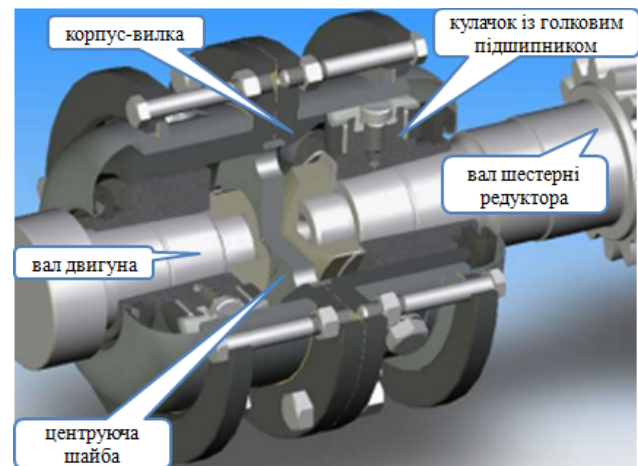


Рис. 5. Конструкція карданної муфти

Роботу карданної муфти можна описати так: кулачок, який насаджено на вал двигуна, обертається разом із ним і передає обертальний момент до вилки напівмуфти через голкові підшипники та цапфи, на яких вони закріплені. Вилка першої напівмуфти жорстко з'єднана фланцем із вилкою другої напівмуфти і передає обертання через вилку на кулачок, що насаджений на вал шестірні, яка у свою чергу приводить до обертання зубчасте колесо редуктора разом із колісною парою.

Виходячи з такої конструкції, за принципом дії карданну муфту відносять до універсальних шарнірів. Кулачки є нерухомими елементами в ній, а вилки із стаканами та центруючою шайбою – рухомими. Корпус муфти з її роботою не має визначеного положення та може бути розташований під нахилом і переміщуватися вздовж валів. Із роботою муфти відбувається постійне тертя металічних частин, тому застосовують змащення.

Карданна муфта візка електропоїзда метрополітену є дуже відповідальним вузлом, тому потребує ретельного догляду та обслуговування. Характерними несправностями муфти є неправильне регулювання, перегрів, відсутність або викид змазки, спресування кулачка, а також спрацювання сормайтівих наплавлень на вилці, яка зображена на рис. 6, що може призводити до виникнення люфту між вилкою та голковим підшипником і, як наслідок, зламу цапфи кулачка з пуском тягового двигуна.



Рис. 6. Вилка карданної муфти вагона метро

Вузол карданної муфти практично не модернізований за весь період експлуатації вітчизняних вагонів із рамним підвішуванням тягових двигунів, за винятком незначних змін у конструкції кулачка та вилки. Але на Харківському метрополітені експлуатують декілька поїздів (рис. 7), які пройшли капітально-відновлювальний ремонт. Саме на них встановлено більш сучасні тягові муфти, які мають іншу конструкцію. Ідеться про зубчасту муфту ZK 306 виробництва німецької компанії KWD Automotive.

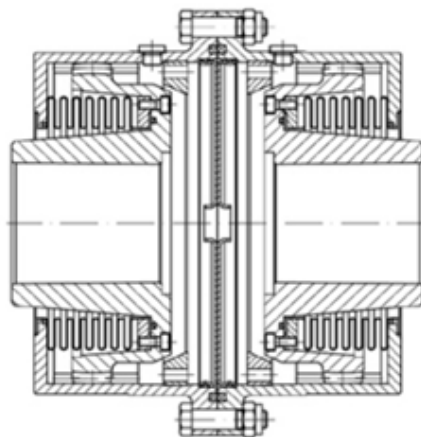


Рис. 7. Електропоїзд серії ЕЖ 3 після капітально-відновлювального ремонту

Ця муфта передає крутний момент шляхом кінематичного замикання через зовнішнє та внутрішнє зубчасте зачеплення, що зачіпляються одне за одного, з евольвентним профілем зуба маточини та гільзи. Муфта (рис. 8) складається з двох однакових напівмуфт із необхідним кріпильним матеріалом. На вал двигуна та вал малої шестірні напресовують маточину, виконану разом із зубчастим вінцем. Вінцем входить у зачеплення із зубчастим сектором, нанесеним на внутрішній поверхні гільзи. У гільзі встановлено роз'ємне упорне кільце, що обмежує осьове переміщення муфти, і гофрований металевий сильфон, який утримує мастило. Кожна гільза з боку фланця закрита кришкою з отвором і з'єднана з другою напівмуфтою за допомогою призонних болтів.



а



б

Рис. 8. Зубчаста муфта: а – зовнішній вигляд; б – поперечний переріз муфти

Муфта ZK 306 допускає паралельне зміщення валів один відносно одного до 8 мм, кутове зміщення до 2° , взаємне поздовжнє зміщення валів до 9 мм.

Характерними несправностями зубчастої муфти є проворот маточини, зношення зубців, тріщиноутворення в гільзі муфти, злам призонних болтів, викид змащування та нагрів вище встановленої норми.

Тим не менш саме муфта зубчастої конструкції зарекомендувала себе як більш надійна та невибаглива під час експлуатації порівняно з карданною муфтою немодернізованих вагонів.

Також цікаву конструкцію має пружна муфта, що зображена на рис. 9, застосовувана на залізничних електропоїздах приміського сполучення, зокрема ЕР2, ЕР9М, ЕД9Т, ЕР9П та інших.

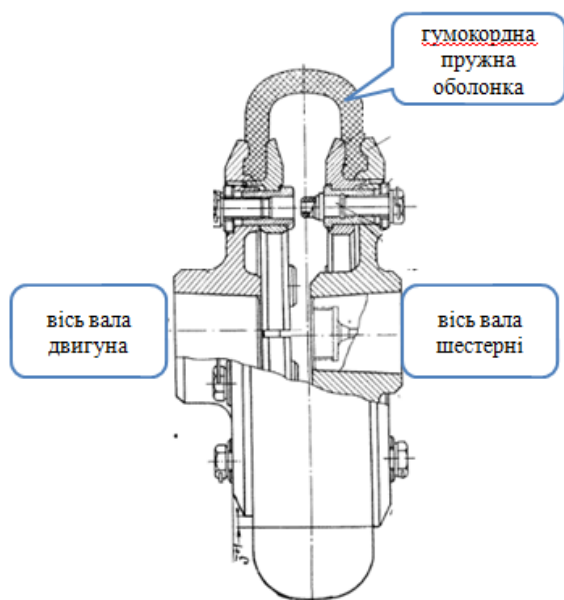


Рис. 9. Гумокордна пружна муфта електропоїзда ЕР2

Цю муфту використовують не тільки як з'єднувальну ланку, яка компенсує неспіввісність валів двигуна та шестірні редуктора, а ще й як пружну, оскільки знижує динамічні навантаження в приводі за рахунок гнучкості пружної оболонки. У ній відсутні поверхні, що труться або змащуються, а також для її виготовлення не потрібні дорогі матеріали.

Муфта складається з двох сталевих фланців, які в гарячому стані насаджені на кінці валів двигуна та шестірні редуктора, гумокордної пружної оболонки та елементів кріплення оболонки до фланців.

Гумокордна муфта допускає взаємне паралельне зміщення валів до 15 мм, поздовжнє – до 20 мм, кутове – до 4°.

Розглянуті вище тягові муфти мають різну конструкцію та застосовувані на рухомому складі, який має тягову передачу, що належить до II класу. Величини неспіввісностей валів, що компенсовані тяговими муфтами, наведено в таблиці залежно від типу зміщення осей якоря двигуна та шестірні редуктора, які виникають із рухом візка по рейках.

Величини неспіввісностей, що компенсують муфти

Тип тягової муфти	Тип неспіввісності валів, що компенсована		
	Паралельне зміщення	Поздовжнє зміщення	Кутове зміщення
Карданна муфта	до 8 мм	до 11 мм	до 2,5°
Зубчаста муфта	до 8 мм	до 9 мм	до 2°
Гумокордна муфта	до 15 мм	до 20 мм	до 4°

Висновки.

Одним з основних елементів ходової частини моторного рейкового рухомого складу є його тяговий привод, який залежно від класу тягової передачі має різну конструкцію підвішування тягового електродвигуна та редуктора. Тягові передачі з рамним підвішуванням двигуна належать до II або III класу та мають у своїй конструкції тягову муфту, яка з'єднує вал електродвигуна з шестірнею редуктора.

Саме тягові муфти компенсують значні взаємні переміщення, що виникають між підресореними та непідресореними частинами тягового привода. Без них передача крутного моменту була б неможливою або призвела до швидкого руйнування механічних вузлів.

Від надійності з'єднання валів двигуна та шестірні редуктора безпосередньо залежить безпека руху, відповідно дослідження та вдосконалення конструкції тягової муфти є перспективним напрямом, на який слід звертати увагу фахівцям із проєктуванням нових і модернізацією старих конструкцій тягових передач.

Карданна муфта є досить проблемним вузлом у конструкції тягової передачі та потребує постійного догляду і ремонту, на відміну від зубчастої муфти, яка має значно більший гарантійний пробіг і майже не потребує обслуговування. Гумокордна муфта може працювати за більших неспіввісностей валів двигуна та шестірні редуктора, але має більші габаритні розміри порівняно з карданною муфтою. Отже, найбільш переважним варіантом тягової муфти на вагонах метрополітену є зубчаста муфта, яку перспективно застосовувати для модернізації рухомого складу.

Т

Колектив авторів висловлює подяку співробітникам електродепо «Салтівське», а саме Андрію Фандеєву, Володимиру Сорокіну, Олександр

Острякову за надані консультації щодо питань, які висвітлені у статті.

Список використаних джерел

1. Стасюк О. М., Чмирьова Л. Ю., Федяй Н. О. Ринки вантажних та пасажирських перевезень в Україні: проблеми та тенденції. *Ефективна економіка*. 2020. № 9. DOI: [10.32702/2307-2105-2020.9.54](https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.9.54) (дата звернення 05.07.2025).
2. Loo Becky P. Y., Cheng Amy H. T. Are there useful yardsticks of population size and income level for building metro systems? Some worldwide evidence. *Cities*. 2010. Vol. 27(5). P. 299-306. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2010.02.003> (дата звернення 05.07.2025).
3. Правила технічної експлуатації метрополітенів України. Харків, 2015. 304 с.
4. Чигирик Н. Д., Найдьон Є. О., Сумцов А. Л. Аналіз схемних рішень та вибір тягового привода швидкісного рухомого складу. *Збірник наукових праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2016. Вип. 164. С. 104 – 112. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.164.2016.92524> (дата звернення 20.07.2025).
5. Лукашова Н. П., Павленко Т. П., Любарський Б. Г., Петренко О. М. Аналіз конструкцій ресорних підвішувань рейкового міського електрорухомого складу. *Оптимізація транспортних систем*. 2018. Вип. 5(51). С. 65 – 68. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.065> (дата звернення 20.07.2025).
6. Войтенко О. І. Дослідження модернізації вагонів метрополітену в Україні як альтернативи придбання нового рухомого складу та порядку проведення робіт з модернізації. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. 2018. Вип. 17. С. 29 – 35.
7. Капіца М. І., Дерев'янюк О. Й. Аналіз показників безпеки локомотивів з подовженим терміном експлуатації. *Інтелектуальні транспортні технології: IV Міжнар. наук.-техн. конф. (27-28 листопада 2023 р.): тези доповідей*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 290-292.
8. Yongxu Hu, Jianhui Lin, Andy Chit Tan. Failure analysis of gearbox in CRH high-speed train. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 105. P. 110 – 126. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.099> (дата звернення 20.07.2025).
9. Liang Zhao, Yuejian Chen. Dynamics and Fault Diagnosis of Railway Vehicle Gearboxes: A Review. *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics*. 2024. Vol. 3(2). P. 83-98. URL: <https://doi.org/10.37965/jdmd.2024.518> (дата звернення 20.07.2025).
10. Chao Cheng, Ming Liu, Bangcheng Zhang, Xiaojing Yin, Caixin Fu and Wanxiu Teng. Health Assessment of High-Speed Train Running Gear System under Complex Working Conditions Based on Data-Driven Model. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020(1). URL: <https://doi.org/10.1155/2020/9863936> (дата звернення 20.07.2025).
11. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с.
12. Гетьман Г. К., Голік С. М. Тягові передачі електрорухомого складу: навч. посіб. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2020. 260 с.
13. Бобрицький С. В. Аналіз особливостей конструкції тягових приводів моторвагонного рухомого складу метрополітену. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : наук. вид. : тези доп. 27-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2019 (15-17 травня 2019 р.)* / ред. Є. І. Сокол. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. Ч. 1. С. 167.
14. Бірюков С. В., Юрченко О. А. Аналіз конструкції карданної муфти вагону метрополітену. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 33-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р.* / ред. Є. І. Сокол; уклад. Г. В. Лісачук; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків: НТУ «ХПІ», 2025. С. 224.
15. Навчальний посібник по вивченню улаштування та роботи електричного, пневматичного та механічного обладнання вагонів метрополітену серії 81 – 717 та 81 – 714. КП «Київський метрополітен». Київ, 2005. 60 с.

S. BIRIUKOV, K. ILLIENKO, S. HORBACH, V. GOVORUN, V. KLYMENKO ANALYSIS OF TRACTION COUPLINGS USED ON ELECTRIC TRAINS OF DOMESTIC RAILWAYS AND SUBWAYS

Abstract. In this article, a comprehensive analysis of the design schemes of traction drives is performed. These drives are key components of bogie design for railway rolling stock used on both mainline railways and metro systems. The study meticulously examines and identifies the differences and specific features of various classes of traction drive designs, with a particular focus on the rationale for using traction couplings. These couplings are critical elements that ensure the transmission of torque from the traction motor to the wheelset gearbox, even when the axes of their shafts are misaligned.

Furthermore, the paper provides a detailed review of the designs of traction couplings used on metro electric multiple units (EMUs) of both older and modernized models, as well as on suburban rail EMUs. It describes the main components of the couplings and analyzes the most common failures that can occur during

their operation. This analysis helps to better understand the root causes of potential failures and to develop more effective preventative measures, which will undoubtedly have a positive impact on traffic safety.

Particular attention is given to two specific types of couplings used on metro rolling stock. The first is the design of the cardan coupling for metro EMU cars, which can compensate for angular and axial displacements that arise from the misalignment of the motor and gearbox shafts during motion. The second is the ZK 306 gear coupling, which is installed on cars that have undergone major overhaul and is known for its reliability. The study also examines and analyzes the rubber-cord resilient coupling, which is widely used on suburban rail EMUs due to its ability to effectively absorb shocks and vibrations, thereby reducing dynamic loads on the traction drive components.

A comparison of the levels of shaft misalignment that each of the reviewed traction couplings can effectively compensate for was conducted. This comparison allowed for objective conclusions regarding the optimal choice of couplings for different operating conditions.

The analysis establishes that the choice of a specific coupling type depends directly on the operating characteristics of the rolling stock, the magnitude of dynamic loads, and the reliability requirements. The research also underscores the necessity of continuous monitoring and timely maintenance of traction drives to ensure the safety and efficiency of train operations.

Keywords: rail rolling stock, traction transmission, carriage bogie, traction drive, universal joint, rubber cord clutch.

Бірюков Сергій Віталійович, аспірант кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0005-6403-5880. Тел.: +38 (097) 654-34-78.

E-mail: Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua.

Ілленко Костянтин Валерійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0000-5124-0862. Тел.: +380 99 382 93 80. E-mail: illenکو_phd@kart.edu.ua.

Горбач Сергій Дмитрович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-2945-3342. Тел.: +380 93 607 68 44. E-mail: horbach_phd@kart.edu.ua.

Говорун Владислав Вадимович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: 0009-0009-4323-7466. Тел.: +380 67 158 37 56. E-mail: hovorun_phd@kart.edu.ua.com.

Клименко Вадим Михайлович, аспірант кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0005-9532-6744. Тел.: +380 97 819 99 13. E-mail: Vadym.Klymenko@ieec.khpi.edu.ua.

Biriukov Serhii, Postgraduate student of the Computer modelling and integrated pressure processing technologies Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0009-0005-6403-5880. E-mail: Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua.

Illienko Kostiantyn, Postgraduate student, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0009-0000-5124-0862. E-mail: illenکو_phd@kart.edu.ua.

Horbach Serhii, Postgraduate student, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0009-0004-2945-3342. E-mail: horbach_phd@kart.edu.ua.

Govorun Vladyslav, Postgraduate student, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0009-0009-4323-7466. E-mail: hovorun_phd@kart.edu.ua.

Klymenko Vadym - Postgraduate student, Department of Turbine Engineering of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0009-0005-9532-6744. E-mail: Vadym.Klymenko@ieec.khpi.edu.ua.