

БІРЮКОВ С. В., ГУБСЬКИЙ С. О., ІЛЛЕНКО К. В., ГОРБАЧ С. Д., ГОВОРУН В. В.

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВІШУВАННЯ РЕДУКТОРІВ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНІВ, ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ ТА НИЗЬКОПІДЛОГОВИХ ТРАМВАЇВ

Дана стаття присвячена огляду конструкцій кріплення тягового редуктора до рами візка, які застосовуються на рухомому складі вагонів метрополітену, високошвидкісних електропоїздів та трамваїв. Також розглянуто різні конструкції підвішування редукторів, що виробляються компанією Siemens Mobility – однією з найбільших у світі виробників рухомого складу та його компонентів.

У статті висвітлюються відмінності між тяговими передачами різних класів та типи рухомого складу, на яких вони експлуатуються. Наголошується на важливості кронштейнів кріплення, які приварюються до рами візка, що є несучою конструкцією для тягового та гальмівного обладнання.

Одним із найважливіших вузлів конструкції візка рейкового рухомого складу є вузол підвішування тягової передачі. Від надійності його конструкції залежить не тільки безпека руху, а й стабільність роботи всього моторно-осьового блоку. Кронштейни підвішування мають різну геометричну форму та конструкцію, в залежності від типу рухомого складу та потужності його тягового приводу. В статті розглянуто різні види кронштейнів, які є елементами конструкції підвішування редуктора, за допомогою яких відбувається кріплення його до рами візка. Розглянуто приклади використання пружних та шарнірних елементів у конструкції підвішування тягового редуктора, які використовуються для ефективного поглинання реактивних моментів, зниження рівня шуму і пом'якшення ударів під час руху транспортного засобу по колії, а також компенсування неспіввісності вала двигуна та шестерні редуктора в залежності від положення рами візка відносно тягової передачі при статичному та динамічному навантаженні. Також зроблено висновки щодо аналізу конструктивних рішень підвішування редуктора на рухомому складі з тяговою передачею різних класів.

Ключові слова: рейковий рухомий склад, вагон метрополітену, трамвай, візок, тягова передача, підвішування редуктора, кронштейн підвішування.

BIRUKOV S., HUBSKYI S., ILLIENKO K., HORBACH S., HOVORUN V., KLYMENKO V.

ANALYSIS OF SUSPENSION STRUCTURES OF REDUCERS ON ROLLING STOCK OF METROPOLITANS, HIGH-SPEED TRAINS AND LOW-FLOOR TRAMWAYS

This article is devoted to a review of the structures of fastening the traction reducer to the bogie frame, which are used in the rolling stock of subway cars, high-speed electric trains and trams. Also considered are various designs of suspension of reducers, manufactured by Siemens Mobility - one of the world's largest manufacturers of rolling stock and its components.

The article highlights the differences between traction drives of different classes and the types of rolling stock on which they are operated. The importance of the mounting brackets, which are welded to the bogie frame, which is the supporting structure for traction and braking equipment, is emphasized.

One of the most important nodes of the design of the bogie of rail rolling stock is the traction drive suspension node. Not only the safety of movement, but also the stability of the entire motor-axle unit depends on the reliability of its design. Suspension brackets have different geometric shapes and designs, depending on the type of rolling stock and the power of its traction drive. The article considers different types of brackets, which are elements of the suspension design of the reducer, with the help of which it is attached to the bogie frame. Examples of the use of elastic and hinged elements in the suspension design of the traction reducer are considered, which are used to effectively absorb reactive moments, reduce noise and mitigate shocks when the vehicle moves along the track, as well as compensate for the misalignment of the engine shaft and the gear of the reducer depending on the position of the bogie frame relative to the traction transmission under static and dynamic loads. Conclusions are also drawn on the analysis of design solutions for suspension of the reducer on rolling stock with traction transmission of different classes.

Keywords: rail rolling stock, subway car, tram, trolley, traction transmission, gearbox suspension, suspension bracket.

Вступ. Залізниця є основою транспортної інфраструктури в багатьох країнах завдяки своїй надійності, пропускній здатності та ефективності. Відповідно рухомий склад, що експлуатується на залізниці, має задовольняти всім критеріям, щоб забезпечувати безпечні перевезення пасажирів та вантажів. Його конструкція повинна мати мінімальні витрати на експлуатацію та обслуговування, довговічність та якомога менше впливати на навколишнє середовище. Ці аспекти є не менш важливими, ніж сама безпека, і в сукупності визначають ефективність та економічну доцільність використання транспортного засобу.

Зокрема конструкція ходової частини рухомого складу напряму впливає на його надійність, динаміку та експлуатаційні характеристики. Візок рейкового транспорту має досить складну конструкцію, яка залежить від роду служби: пасажирський, вантажний або промисловий рухомий склад, а також від типу: локомотиви або моторвагонний рухомий склад. Так, візки залізничних локомотивів мають більш масивну та міцну конструкцію, в порівнянні з візками електропоїздів метрополітену та трамваїв, оскільки рухомий склад залізниць перевозить значно більші вантажі, має більші габаритні розміри та вагу, відповідно його ходова частина сприймає більші статичні та динамічні навантаження, що зумовлює застосування на ньому більш потужного тягового приводу, що неодмінно накладає певні умови на конструкцію вузлів підвішування елементів приводу та рами візка в цілому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Тягова передача візка та її несправності, що виникають через вібрації та втомні тріщиноутворення в конструкції є актуальною проблемою на рейковому рухомому складі, яка досліджується інженерами та науковцями по всьому світу. Так через недосконалість конструкції кріплення двигуна та недостатні заходи щодо її послаблення можуть виникати втомні тріщини в рамі візка, що досліджувалося на рухомому складі метрополітену [1]. На високошвидкісних поїздах досліджувалася проблема тріщиноутворення в корпусі редукторів, що виникала через вібрації, які пов'язані із нерівністю колії, деформацією колісних пар [2] та не досить якісною технологією лиття корпусів [3].

Також на втомну міцність корпусів редукторів можуть впливати навіть незначні напруження в зубчастому зачепленні шестерень [4], що потребує уваги кваліфікованих спеціалістів при проектуванні редукторів та їх корпусів для різних типів рухомого складу залізниць [5] та високошвидкісних ліній.

Несправності тягової передачі пов'язані з динамічними навантаженнями на ходову частину рухомого складу, тому для зниження цих навантажень застосовують первинний та вторинний ступені підвищення вузлів візка [6, 7, 8]. Ресорне та пневматичне підвищення в комплексі із надійною конструкцією підвищення тягової передачі забезпечує зменшення невідресореної маси, мінімізацію вібрацій і ударних навантажень на елементи колії та кузов вагона, підвищення безпеки руху, плавності ходу та комфорту пасажирів, а також подовження терміну служби як самої передачі, так і ходової частини в цілому.

Метою статті є проаналізувати технічні рішення щодо конструкцій підвищення тягового редуктора, які застосовуються на різних типах рейкового рухомого складу, зокрема на електропоїздах метрополітену, низькопідлогових трамваях та високошвидкісних електропоїздах. Також детально дослідити конструкцію кронштейнів кріплення підвищення до рами, адже при експлуатації виникає тріщиноутворення в елементах кронштейну та місцях його приєднання до рами візка. Оскільки тягова передача є одним з основних компонентів візка, пошук шляхів поліпшення її кріплення є актуальною задачею в сучасному вагонобудуванні та критично важливим для забезпечення надійної роботи тягового приводу та його передачі.

Основна частина. Одним із найважливіших елементів будь якого візка рейкового транспорту є його рама, яка слугує для передачі та розподілення вертикального навантаження між колісними парами, а також для сприйняття і передачі на раму кузова тягових та гальмівних зусиль. Саме на рамі візка кріпляться елементи тягової передачі, за допомогою якої відбувається передача обертального моменту від вала тягового двигуна до колісної пари. Тягова передача, в залежності від конструкції, окрім електродвигуна та колісної пари, також може включати в себе редуктор та тягову муфту.

В залежності від місця кріплення двигуна та редуктора на візку, тягові передачі класифікують за трьома класами [9]:

- привод I класу – має опорно-осьове підвищення двигуна та редуктора;
- привод II класу – опорно-рамне підвищення двигуна та опорно-осьове підвищення редуктора;
- привод III класу – опорно-рамне підвищення двигуна та редуктора.

Тягові передачі I класу здебільшого характерні для залізничних локомотивів, що задіяні у вантажному русі [10]. Такі передачі мають просту конструкцію, в порівнянні з іншими класами, але також мають значну невідресорену вагу тягового приводу, що негативно впливає на його динаміку.

Передачі II класу експлуатуються на пасажирському рухомому складі, а також на вагонах метрополітену. В них невідресорена вага приводу зменшується, за рахунок рамного підвищення тягового двигуна.

Тягові передачі III класу мають досить складну конструкцію, але значною мірою знижують динамічний вплив рейкової колії на тяговий привод. Вони застосовуються на високошвидкісному рухомому складі, на сучасних локомотивах та моторних вагонах електропоїздів метрополітену сучасних серій.

При проектуванні конструкції візка особливу увагу приділяють кронштейнам кріплення тягових двигунів та редукторів, оскільки саме вони сприймають силові навантаження від крутного моменту двигуна та динамічних сил, що виникають під час руху поїзда. Ці кронштейни мають складну форму, що забезпечує оптимальний розподіл навантажень і мінімізує концентрацію напружень у певних точках.

На візках рухомого складу метрополітену моделей ЕЖ 3, 81-717/714 застосовано тягову передачу II класу, відповідно це рамне підвищення тягового двигуна та опорно-осьове підвищення редуктора. На рамі візка вагону метрополітену розташовані всі кронштейни кріплення його вузлів [11]: на поздовжніх балках - кронштейни кріплення важелів гальмівної-важільної передачі, гальмівних циліндрів, блок-гальма, кронштейни для кріплення повідців (для рам з повідцевим буксовим підвищенням), гідравлічного гасителя коливань; на поперечних - кріплення тягових двигунів, підвіски редукторів, кріплення комплексного запобіжного пристрою, кріплення запобіжних скоб центрального підвищення та інш. (рисунок 1).

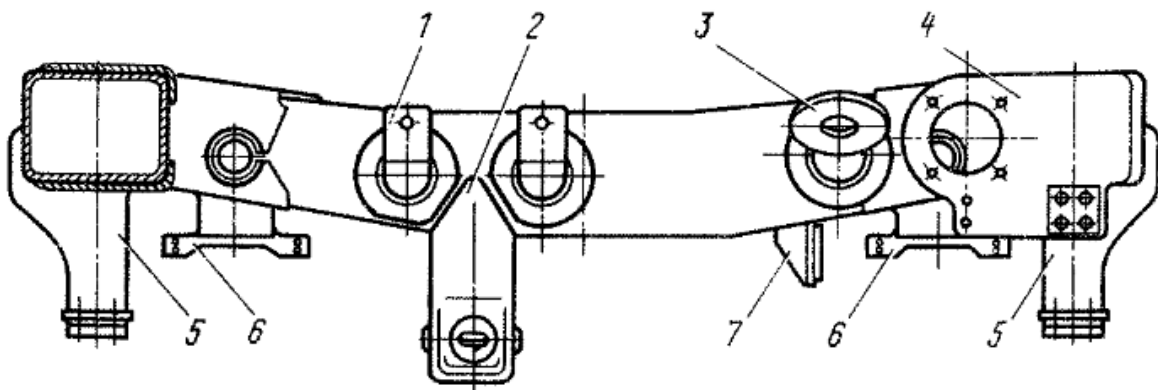


Рис. 1 – Поперечна балка рами візка вагону метрополітена: 1, 2 - верхній та нижній кронштейн підвішування двигуна, 3 – кронштейн підвішування редуктора, 4 - кронштейн кріплення гальмівного циліндру, 5 – кронштейн кріплення буксових повідців, 6 – кронштейни запобіжних скоб центрального підвішування, 7 – кронштейн вузла комплексного запобігання редуктора

Кріплення корпусу редуктора до рами візка виконано за допомогою кронштейна, модель якого зображено на рисунку 2. Корпус спирається на підшипники, які дозволяють вісі колісної пари обертатися в ньому під час руху в залежності від прогину ресор буксового підвішування. Кронштейн підвіски редуктора виготовляють із штампованої заготовки. Його вварюють циліндричною частиною в поперечну балку рами візка. Опорна частина кронштейну виконана у вигляді круглої провухини, яка має отвір по центру та нахилена під кутом 18° до горизонту. На такий же кут відхилена від вертикалі вісь підвішування, що забезпечує мінімальне вертикальне відхилення між валами двигуна та шестерні редуктора при просадці буксових ресор.

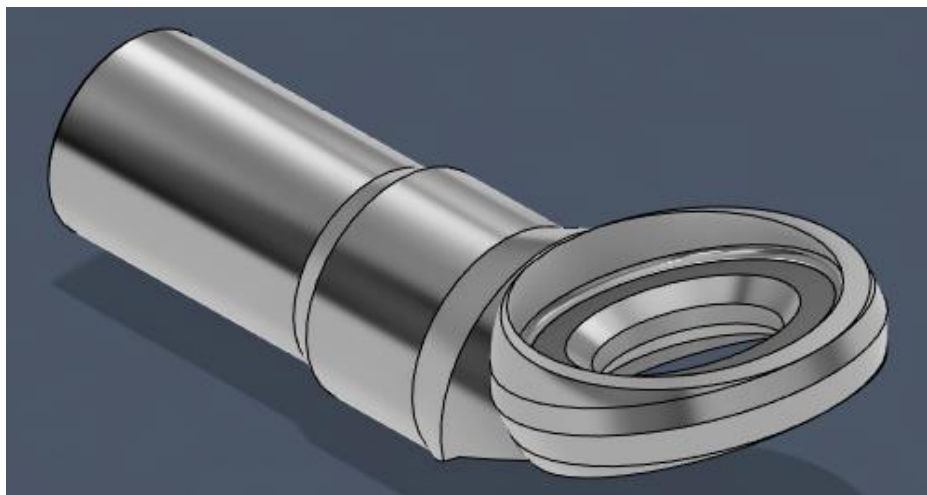


Рис. 2 – Кронштейн підвішування редуктора

До кронштейну кріпляться деталі вузла підвішування редуктора (рисунок 3): підвісний стрижень з двома гайками та двома гумо-металевими амортизаторами, штампована серга. Підвісний стрижень з'єднується з сергою за допомогою кульового підшипника ШС-40. При цьому зовнішнє кільце підшипника складає одне ціле зі стрижнем, а внутрішнє його кільце – одне ціле із сергою. Відповідно стрижень та серга можуть переміщуватися один відносно одного. В нижній точці серга з'єднується з корпусом редуктора також за допомогою підшипника – внутрішнє його кільце складає одне ціле з корпусом редуктора, а зовнішнє – одне ціле із сергою.

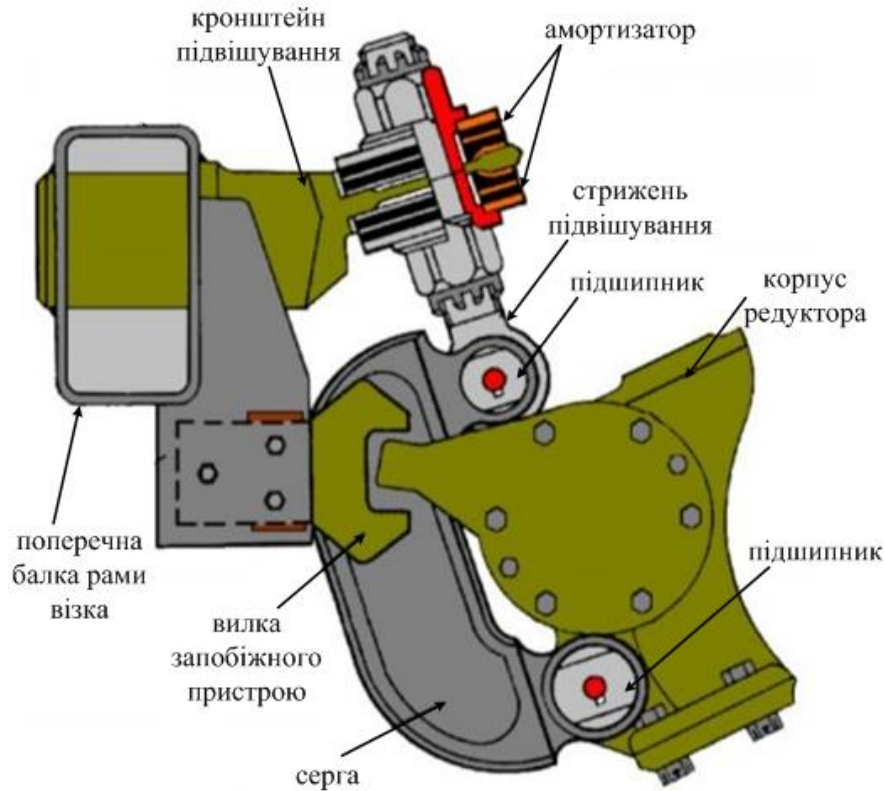


Рис. 3 – Вузол підвішування редуктора візка вагону метрополітену

Така конструкція підвіски призначена для підтримки вала шестерні редуктора на одному рівні з валом тягового двигуна, а також для пом'якшення вертикальних та бічних навантажень, що діють на підвішування редуктора та кронштейн поперечної балки під час руху по нерівностям колії. Зменшенню цих навантажень сприяють гумо-металеві амортизатори у формі шайби, які встановлені зверху та знизу провусини кронштейну підвішування редуктора.

Також для запобігання обертву корпуса редуктора до низу на рейкову колію у випадку обриву деталей підвішування або зламу кронштейну підвішування редуктора, що зварений в поперечну балку рами візка, кожен редуктор має комплексний запобіжний пристрій.

На більш сучасних візках вагонів метрополітену моделей 81-760/761 також застосовано тягову передачу II класу з опорно-осьовим підвішуванням редуктора, але сам кронштейн, що зображено на рисунку 4, та підвіска мають іншу конструкцію.

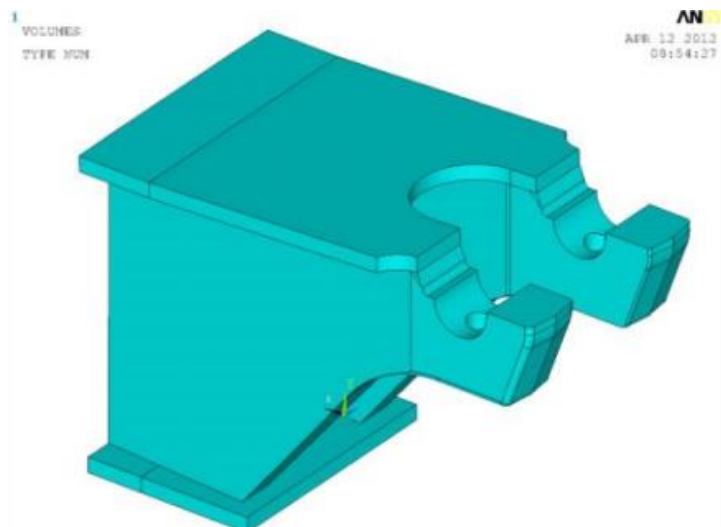


Рис. 4 – Кронштейн кріплення редуктора вагону 81-760/761

Слід зазначити, що на відміну від вагонів серії 81-717/714, де рама візка має зварно-штамповану Н-подібну конструкцію, балки якої мають коритоподібний перетин, на вагонах 81-760/761 застосовано раму листової

конструкції, яка крім поздовжніх та центральної балки також має ще дві кінцеві балки. Відповідно на рамі такої конструкції застосовано інший підхід до кріплення кронштейну підвищення редуктора - кронштейн з кованої заготовки виконано як одне ціле з фрагментом однієї вертикальної стінки центральної балки. Схема такої підвіски зображена на рисунку 5. Така конструкція знижує напруження в місцях їх концентрацій у порівнянні з попередньою схемою кріплення кронштейна на вагонах 81-717/714, коли важкий кований кронштейн приварювався до двох стінок поперечної балки візка, тим самим якби «протикаючи» її. Але така нова схема кріплення є гіршою з точки зору ремонтпридатності.

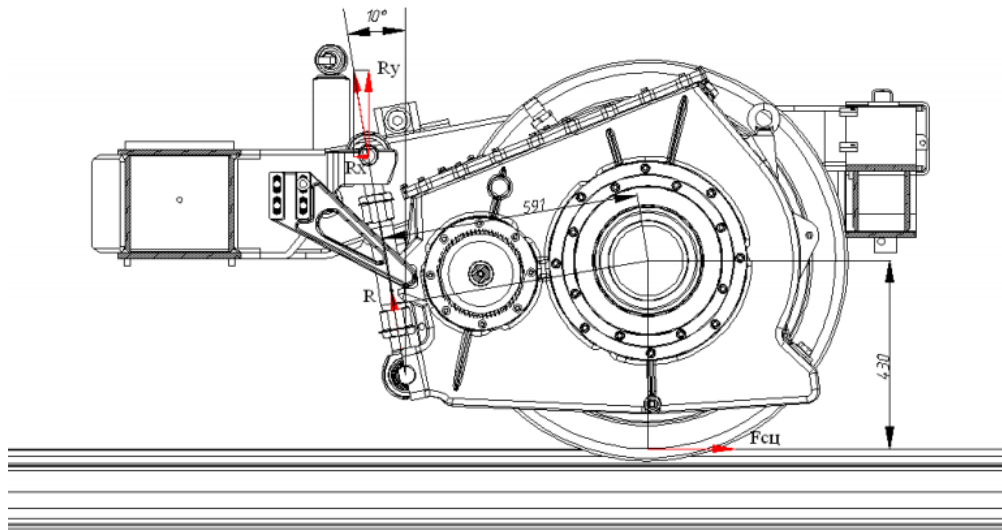


Рис. 5 – Схема підвищення редуктора вагону 81-760

Підвіска редуктора, яка зображена на рисунку 6 а, виконана у вигляді реактивної тяги та влаштована як і регульовальна тяга підвіски двигуна, що уніфікує конструкцію візка та спрощує обслуговування та ремонт. Підвіска має шарнірну конструкцію, яка кріпиться за допомогою металевого валика та болтів з гайками до кронштейну (рисунок 6 б) центральної балки та таким же чином до роз'єму на корпусі редуктора, що дозволяє регулювати співвісність валів редуктора та двигуна та висоту редуктора над рівнем головок ходових рейок.

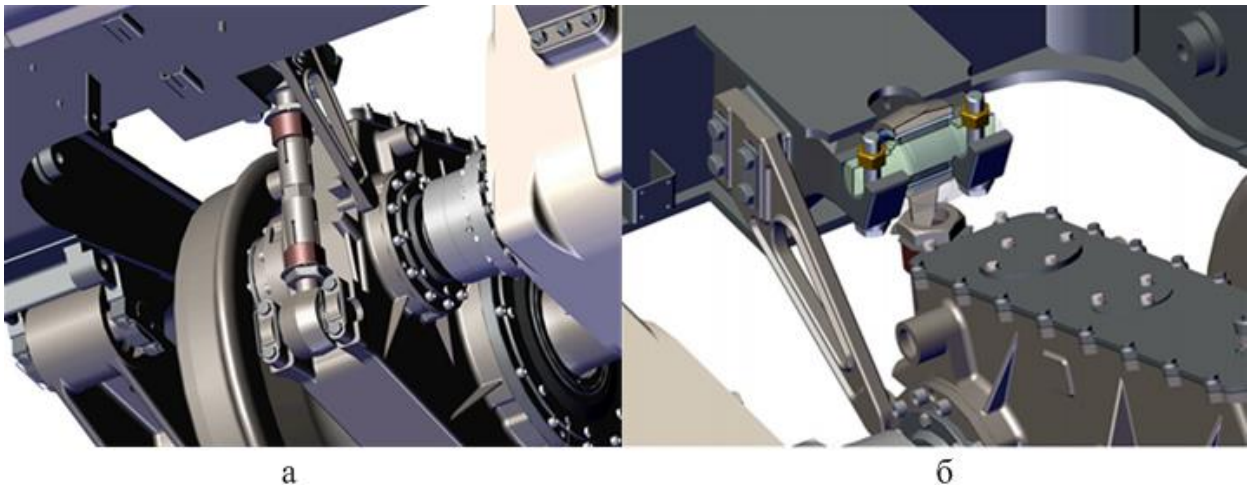


Рис. 6 – Візок вагона: а - кріплення редуктора до центральної балки; б - підвіска редуктора

У випадку несправності підвіски редуктора встановлено запобіжний пристрій у вигляді запобіжного кронштейну, який кріпиться чотирма болтами до кронштейну підвіски редуктора на центральній балці рами візка.

Також цікавою є конструкція підвищення редуктора на вагонах серії 81-740, адже на них застосовано тягову передачу III класу, тобто і тяговий двигун і редуктор мають рамне підвищення. Кріплення двигуна та редуктора до центральної поперечної балки виконано за допомогою універсального кронштейну, який зображено на рисунку 7.



Рис. 7 – Універсальний кронштейн з гумометалевими шарнірами

Кронштейн вставляється до втулки в центральній поперечній балці знизу, зверху він фіксується гайкою та стопорною пластиною. Універсальний кронштейн має два гумометалеві шарніри, до яких кріпляться з одного боку двигун, а з іншого – редуктор тягової передачі сусідньої колісної пари, як показано на схемі кріплення рисунок 8.

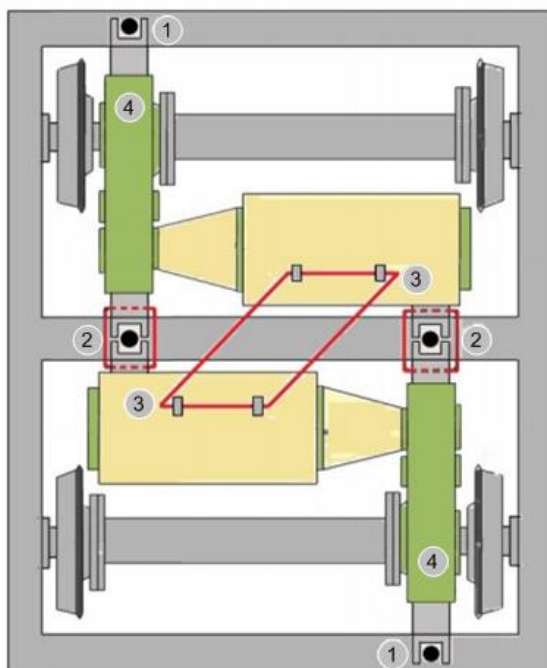


Рис. 8 – Схема кріплення тягового редуктора: 1 – кріплення через гумометалевий шарнір до кінцевої поперечної балки; 2 – універсальний кронштейн; 3 – тяговий електродвигун; 4 - редуктор

Зі сторони центральної поперечної балки корпус редуктора має кронштейн з двома приливами в торцевій частині (рисунок 9 а), аналогічний кронштейну двигуна, яким він кріпиться до універсального шарніру за допомогою болтів. Зі сторони кінцевої поперечної балки на корпусі редуктора також є кронштейн, яким він кріпиться до гумометалевого шарніру, що складається з двох однакових половин, з'єднаних регулювальною муфтою. Друга половина шарніру фіксується на приливі кінцевої поперечної балки рами візка, як показано на рисунку 9 б.

Тяговий двигун та тяговий редуктор мають запобіжні троси підвішування, які не дають впасти на рейки двигуну та редуктору у випадку несправності їх підвіски.

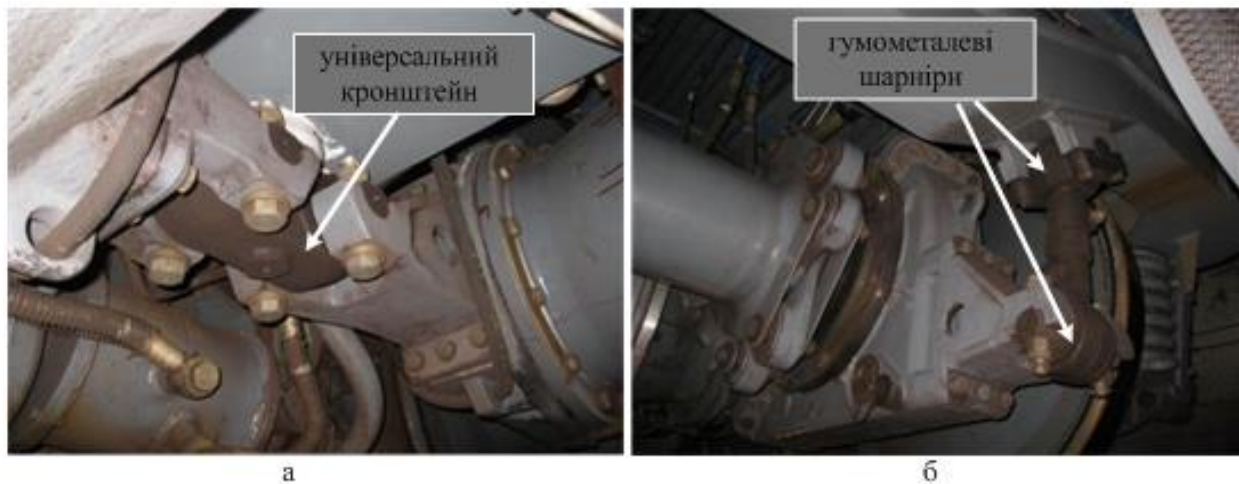


Рис. 9 – Кріплення редуктора вагона 81-740

На електропоїздах моделі CRH3A, що експлуатуються на високошвидкісних лініях в Китаї, застосовано С – подібний кронштейн кріплення редуктора до рами візка [12], модель якого зображено на рисунку 10. Даний рухомий склад працює на швидкостях 250 км/год, відповідно має підвищені вимоги до надійності ходової частини та, зокрема, тягової передачі.

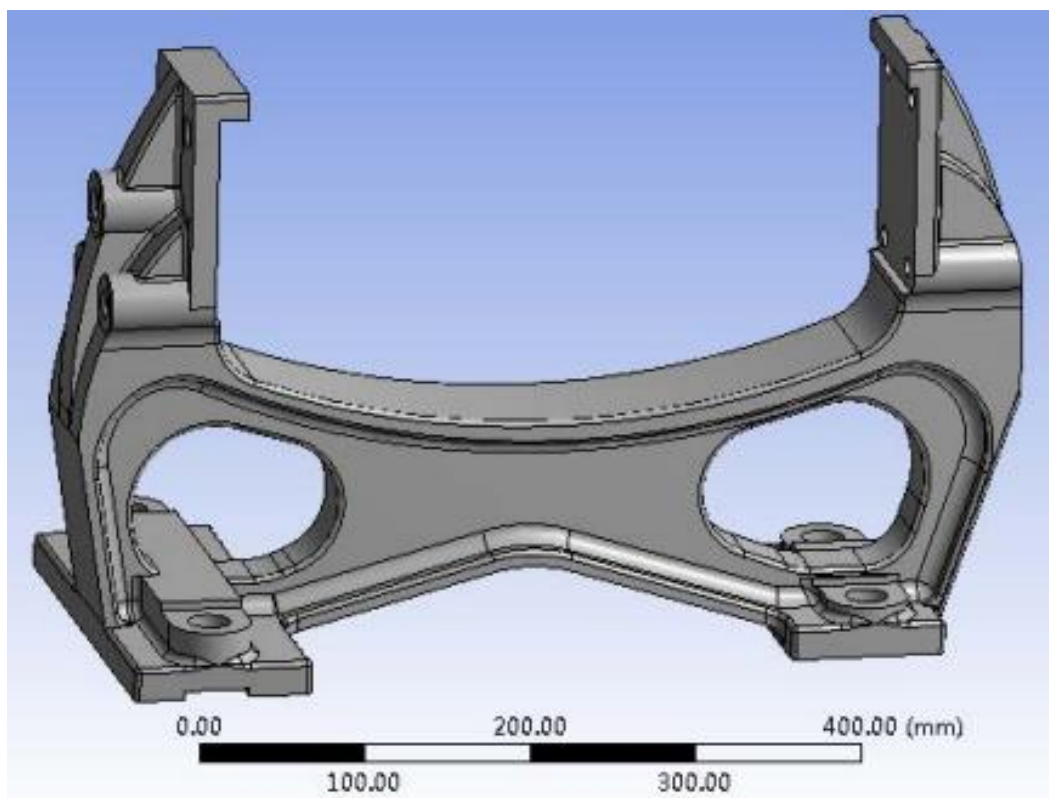


Рис. 10 – Кронштейн кріплення редуктора електропоїзда CRH3A

Кронштейн кріпиться за допомогою чотирьох болтів до спеціальної плити, що приварена до поперечної балки рами візка. З кожного боку в місці з'єднання кронштейна з редуктором знаходиться амортизаційний блок, що поглинає удари. Вертикальна жорсткість блоку становить 6,6 кН/мм, а робочий хід — 4–5 мм. Кріплення кронштейну до корпусу редуктора зображено на рисунку 11. Конструкція та дизайн кронштейну є інноваційним рішенням для з'єднання рами візка з редуктором, оскільки дозволяє зменшити вагу обладнання підвіски [13], що знижує динамічне навантаження на візок та неодмінно позитивно позначиться на енергоефективності високошвидкісного рухомого складу.

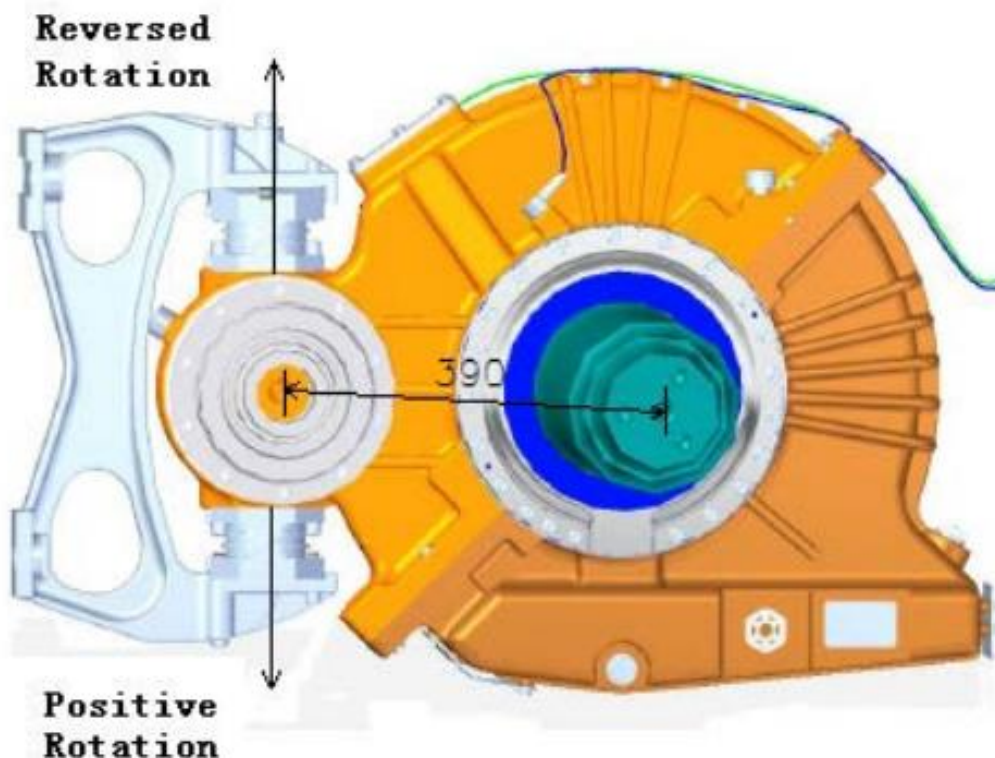


Рис. 11 – Кріплення кронштейну до корпусу редуктора

Підрозділ німецького концерну Siemens AG – компанія Siemens Mobility, спеціалізується на розробці та виробництві залізничної техніки, локомотивів, трамваїв, систем автоматизації для залізниць. Вони виробляють різноманітні рейкові транспортні засоби. Наприклад, серія локомотивів Vectron, які можуть експлуатуватися як у вантажному русі, так і в пасажирському. Розроблено версії локомотива, які працюють на постійному струмі, на змінному, багатосистемні електровози, дизельні версії, як Vectron DE та навіть дворезимний локомотив, що представляє собою комбінацію електровоза та тепловоза. Локомотиви Vectron експлуатуються на залізницях Європи та Туреччини.

Також Siemens Mobility виробляє вагони для міських транспортних систем, зокрема серія Inspiro, яка експлуатується на Варшавському, Лондонському метрополітенах та в Саудівській Аравії. Регіональні та приміські поїзди Desiro, які експлуатуються на залізницях в європейських країнах та Америці. Такі поїзди випускаються як на дизельній тязі, так і на електричній.

Високошвидкісні поїзди серії Velaro, що використовуються на лініях Іспанії та Китаю. Зокрема розглянутий вище електропоїзд CRH3A відноситься саме до серії Velaro високошвидкісних ліній Китаю.

Легкорейковий рухомий склад від Siemens Mobility – низькопідлогові трамваї серій ULF, Avanto, Combino, Avenio, які експлуатуються в містах Європи, Японії та Австралії.

В залежності від призначення транспортного засобу, конструкції його ходової частини та потужності тягового привода на рухомому складі Siemens застосовуються різні конструкції редукторів, що також впливає на дизайн та компоновку їх підвішування. Редуктори та елементи їх підвішування зображено на рисунку 12.

Відповідно на локомотивах, регіональних поїздах та електропоїздах метрополітену застосовується шарнірне підвішування редуктора, яке виконано за допомогою тяги з двома провусинами та підшипниками кочення з оптимізованою конструкцією сепаратора, а також кріпильних валиків, як зображено на рисунку 13.

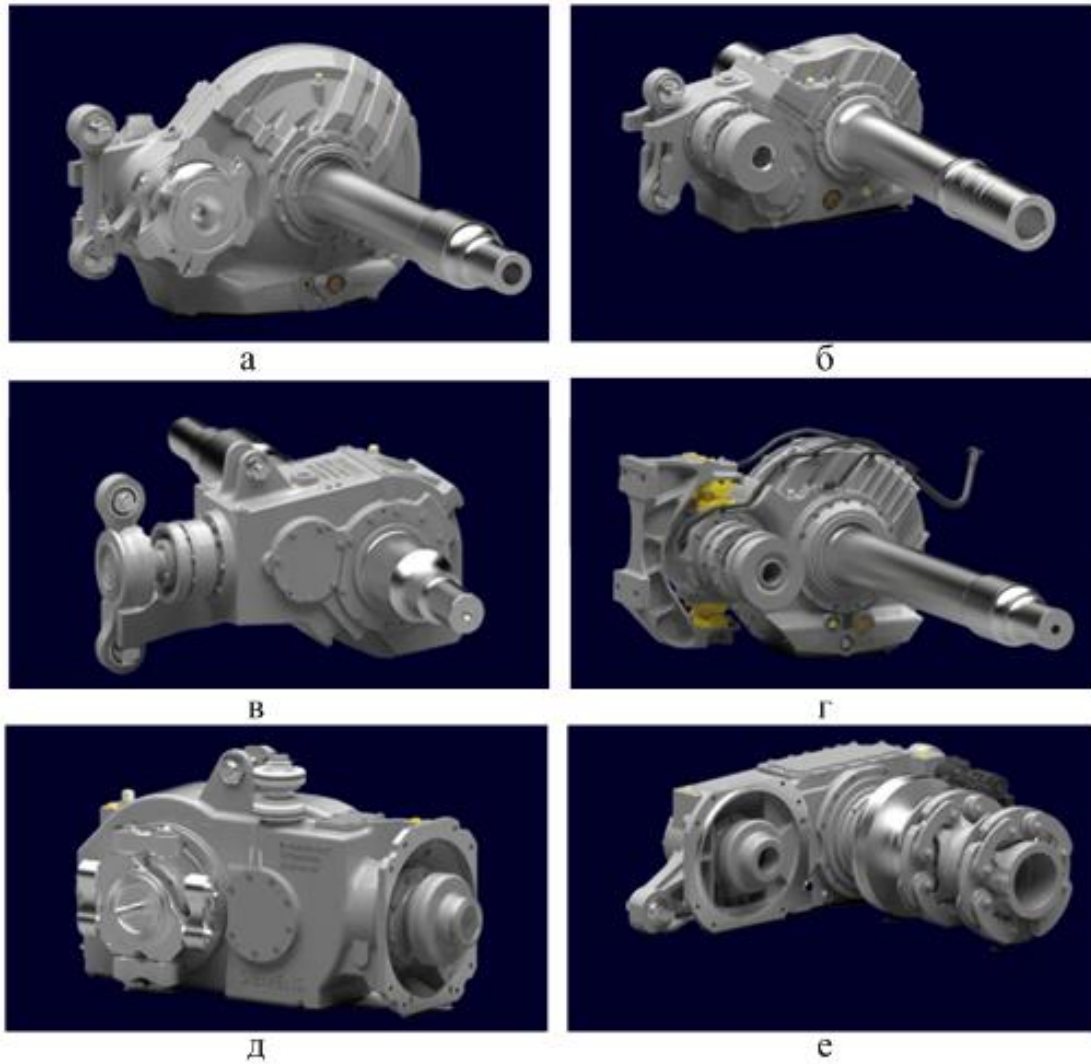


Рис. 12 – Моделі редукторів різного рухомого складу компанії Siemens Mobility: а – для локомотивів; б – для електропоїздів метрополітену та регіональних поїздів; в – конічно-циліндровий редуктор для вагонів метрополітену; г - для високошвидкісних поїздів; д – конічно-циліндровий редуктор для низькопідлогових трамваїв; е – для низькопідлогових трамваїв та електропоїздів



Рис. 13 – Елементи підвішування редуктора від Siemens Mobility

На рисунку 14 для прикладу наведено загальний вигляд візка SF 2000 від Siemens Mobility з малощумним редуктором для вагонів метро серії 4020, які експлуатуються в Австрії [14]. Як видно з рисунка, кронштейн кріплення підвіски редуктора представляє собою балку прямокутного перетину, яка приварюється до двох поперечних центральних балок рами візка, на одному кінці якої виконано кріплення редуктора, а на іншому – тягового електродвигуна сусіднього моторного блоку.

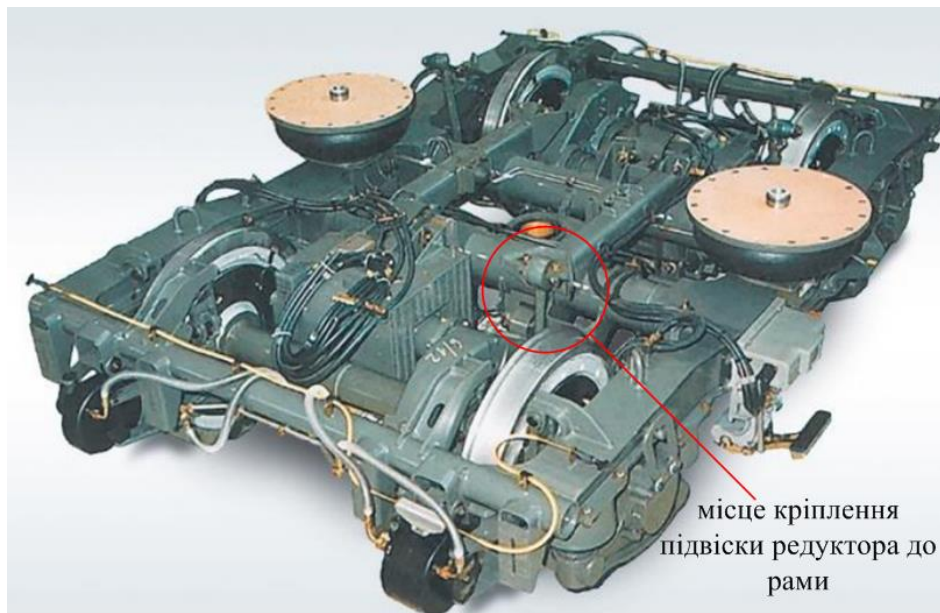
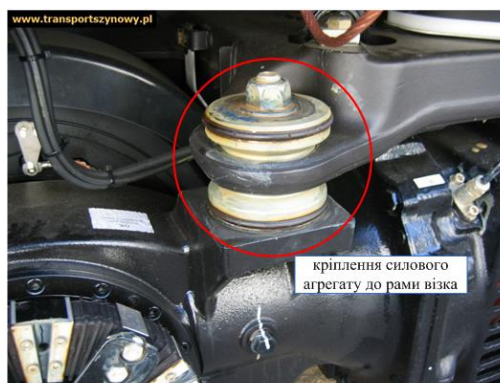


Рис. 14 – Візок SF 2000 вагона метро серії 4020

В конструкції візків [15] низькопідлогових трамваїв Combino (рисунок 15 а) застосовано компактну тягову передачу, яка розміщується по боках рами візка. Сама рама має внутрішню конструкцію, тобто площина коліс розташована назовні рами. Низька підлога салона забезпечується за рахунок використання колісних пар без традиційної осі [16]. Редуктор кріпиться до букси колеса через спеціальну вилку зчеплення, а також кріпиться на рамі візка до відливки у формі провухини. Це кріплення виконано з використанням пружних віброізоляторів [17], як показано на рисунку 15 б.



а



б

Рис. 15 – Візок низькопідлогового трамвая Combino моделі SF30: а – загальний вигляд візка; б – кріплення редуктора до рами візка

Висновки.

1. Конструкція підвішування тягової передачі на рейкових транспортних засобах різного типу може суттєво відрізнятися одна від одної, але загальна конструкція має спільні елементи, які присутні і в підвішуванні редукторів вагонів метрополітену, і в трамваях, і на високошвидкісному транспорті. Так у всіх конструкціях присутні шарнірні деталі підвішування або пружні елементи, а також кронштейн кріплення до рами візка, яка є несучою конструкцією для тягової передачі другого та третього класу.
2. Шарнірні конструкції підвішування редуктора широко застосовуються на візках як вітчизняних, так і закордонних електропоїздів метрополітену та залізничного рухомого складу. Це актуальна технологія для

ходової частини вагонів аналогічного типу, незалежно від країни виробництва. Така конструкція дозволяє компенсувати неспіввісність валів тягового двигуна та шестерні редуктора при переміщеннях рами візка під час статичного навантаження або при русі по нерівностям колії.

3. Пружні елементи застосовуються на візках високошвидкісних поїздів, що пов'язано зі значними динамічними навантаженнями на конструкцію візка при русі на великих швидкостях. Застосування пружних амортизаторів в конструкції підвищування тягової передачі на закордонних трамваях більше зумовлено особливостями їхньої ходової частини, особливо це актуально для низькопідлогових вагонів, де жорсткі вимоги до габаритів візків, а відповідно й до тягової передачі.

4. Кріплення редуктора до рами візка виконується за допомогою кронштейнів підвищування, які мають різну конструкцію – штамповану або поєднання зварної конструкції з листового металу та штампованих елементів. Кронштейни кріплення або вварюються в тіло балки рами візка або є його складовою частиною, що більш актуально для рам листової конструкції. Самі кронштейни повинні мати найбільш оптимізовану конструкцію для зменшення напружень, що виникають при роботі тягового приводу. Оптимізація форми кронштейну є одним із шляхів забезпечення його міцності, довговічності та зменшення концентрації напружень, що в свою чергу є перспективним напрямком досліджень для поліпшення надійності тягової передачі та візка загалом.

Список літератури

1. Wang, Q., Zhou, J., Gong, D., Wang, T., Chen, J., You, T. and Zhang, Z., 2020. The Influence of the Motor Traction Vibration on Fatigue Life of the Bogie Frame of the Metro Vehicle. *Shock and Vibration*, Vol. 2020, 11 pages. doi: 10.1155/2020/7385861. (дата звернення 14.10.2025).
2. Wu, H., Wu, P., Li, F., Shi, H. and Xu, K., 2019. Fatigue analysis of the gearbox housing in high-speed trains under wheel polygonization using a multibody dynamics algorithm. *Engineering Failure Analysis*, no. 100, pp. 351-364. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.058. (дата звернення 16.10.2025).
3. Hu, W., Liu, Z., Liu, D. and Hai, X., 2016. Fatigue failure analysis of high speed train gearbox housings. *Engineering Failure Analysis*, no. 73, pp. 57-71. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.12.008. (дата звернення 15.10.2025).
4. Liu, C., Sun, S. and Li, Q., 2025. The Impact of Gear Meshing in High-Speed EMU Gearboxes on Fatigue Strength of the Gearbox Housing. *Technologies*, no. 13 (311). doi: 10.3390/technologies13080311. (дата звернення 15.10.2025).
5. Morgado, T., Branco, C. and Infante, V., 2008. A failure study of housing of the gearboxes of series 2600 locomotives of the Portuguese Railway Company, *Engineering Failure Analysis*, no. 15, pp. 154-164. doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.052. (дата звернення 14.10.2025).
6. Лукашова Н. П., Павленко Т. П., Любарський Б. Г., Петренко О. М. Аналіз конструкцій ресорних підвищувачів рейкового міського електрорухомого складу. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Харків, 2018. № 5 (51). С. 65-68. DOI: 10.26906/SUNZ.2018.5.065. (дата звернення 16.10.2025).
7. Singh, S., Vishwakarma, A., Singh, SR. and Racherla, V., 2023. Effect of suspension parameters on dynamics of a metro coach: A parametric study. *Journal of Mechanical Science and Technology*, no. 6 (37), pp. 2741-2753. doi: 10.1007/s12206-023-0503-9. (дата звернення 15.10.2025).
8. Bruni, S., Vinolas, J., Berg, M., Polach, O. and Stichel, S., 2011. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamic*, Vol.49, no. 7, pp. 1021-1072. doi: 10.1080/00423114.2011.586430. (дата звернення 16.10.2025).
9. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник / С. В. Панченко та ін. Харків : УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с.
10. Гетьман Г.К., Голік С.М. Тягові передачі електрорухомого складу: Навчальний посібник. Дніпро: ПФ «Стандарт-Сервіс», 2020. 260 с.
11. Навчальний посібник по вивченню улаштування та роботи електричного, пневматичного та механічного обладнання вагонів метрополітену серії 81 - 717 та 81 - 714. Київ : КП «Київський метрополітен», 2005. 60 с.
12. Jianwei Yang, Minghan Yang, Xi Li and Xing Wang. Strength analysis and experiment of high speed railway gearbox bracket. *The open mechanical engineering journal*, 2015. Vol. 9. Pp. 266 – 270. DOI: 10.2174/1874155X01509010266. (дата звернення 15.10.2025).
13. Y. Chen, H.J. Zhang, Z.H. Tan, K.Z. Luo and T. Jian, "A C-shaped bracket to hold the gearbox," C.N. Patent, 201320706626.5, Nov. 2013. (дата звернення 15.10.2025).
14. Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF2000. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b2aafa39-b547-4f53-a5af-03aee90ea6f2/mobility-datasheet-bogies-sf2000-en.pdf>. (дата звернення 17.10.2025).
15. Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF30. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:6db6f600-1ac5-412d-8c06-9a0e85d46a84/mobility-datasheet-bogies-sf30-Plus-en.pdf>. (дата звернення 17.10.2025).
16. Chudzikiewicz, A., Maciejewski, I., Krzyzynski, T., Krzyszkowski, A. and Stelmach, A., 2022. Electric Drive Solution for Low-Floor City Transport Trams. *Energies*, no. 15, 4640. Doi: 10.3390/en15134640. (дата звернення 15.10.2025).
17. Maciej Górowski, 2004. Transport szynowy. Available at: [http:// www.transportszynowy.pl](http://www.transportszynowy.pl). (дата звернення 15.10.2025).

References (transliterated)

1. Wang, Q., Zhou, J., Gong, D., Wang, T., Chen, J., You, T. and Zhang, Z., 2020. The Influence of the Motor Traction Vibration on Fatigue Life of the Bogie Frame of the Metro Vehicle. *Shock and Vibration*, Vol. 2020, 11 pages. doi: 10.1155/2020/7385861. (Accessed 14.10.2025).
2. Wu, H., Wu, P., Li, F., Shi, H. and Xu, K., 2019. Fatigue analysis of the gearbox housing in high-speed trains under wheel polygonization using a multibody dynamics algorithm. *Engineering Failure Analysis*, no. 100, pp. 351-364. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.058. (Accessed 16.10.2025).
3. Hu, W., Liu, Z., Liu, D. and Hai, X., 2016. Fatigue failure analysis of high speed train gearbox housings. *Engineering Failure Analysis*, no. 73, pp. 57-71. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.12.008. (Accessed 15.10.2025).
4. Liu, C., Sun, S. and Li, Q., 2025. The Impact of Gear Meshing in High-Speed EMU Gearboxes on Fatigue Strength of the Gearbox Housing. *Technologies*, no. 13 (311). doi: 10.3390/technologies13080311. (Accessed 15.10.2025).
5. Morgado, T., Branco, C. and Infante, V., 2008. A failure study of housing of the gearboxes of series 2600 locomotives of the Portuguese Railway Company, *Engineering Failure Analysis*, no. 15, pp. 154-164. doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.052. (Accessed 14.10.2025).

6. Lukashova, N., Pavlenko, T., Liubarskyi, B. and Petrenko O., 2018. Analysis of spring suspension structures of rail urban electric rolling stock [Analiz konstruktsii resornykh pidvishuvan reikovoho miskoho elektrorukhomoho skladu]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, no 5 (51), pp. 65-68. doi: 10.26906/SUNZ.2018.5.065. (Accessed 16.10.2025).
7. Singh, S., Vishwakarma, A., Singh, SR. and Racherla, V., 2023. Effect of suspension parameters on dynamics of a metro coach: A parametric study. *Journal of Mechanical Science and Technology*, no. 6 (37), pp. 2741-2753. doi: 10.1007/s12206-023-0503-9. (Accessed 15.10.2025).
8. Bruni, S., Vinolas, J., Berg, M., Polach, O. and Stichel, S., 2011. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamic*, Vol.49, no. 7, pp. 1021-1072. doi: 10.1080/00423114.2011.586430. (Accessed 16.10.2025).
9. Panchenko, S. V. ed., 2018. *Konstruktsiia ta dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu: pidruchnyk* [Design and Dynamics of Electric Rolling Stock: Textbook]. Kharkiv : UkrDUZT.
10. Hetman H.K. and Holik S.M., 2020 *Tiahovi peredachi elektrorukhomoho skladu: Navchalnyi posibnyk*. [Traction drives of electric rolling stock: Training manual] Dnipro: PF «Standart-Servis».
11. *A training manual for studying the arrangement and operation of electrical, pneumatic and mechanical equipment of metro cars of series 81 - 717 and 81 - 714*, 2005. Kyiv : KP «Kyivskiy metropoliten».
12. Jianwei Yang, Minghan Yang, Xi Li and Xing Wang. Strength analysis and experiment of high speed railway gearbox bracket. *The open mechanical engineering journal*, 2015. Vol. 9. Pp. 266 – 270. DOI: 10.2174/1874155X01509010266. (Accessed 15.10.2025).
13. Y. Chen, H.J. Zhang, Z.H. Tan, K.Z. Luo and T. Jian, “A C-shaped bracket to hold the gearbox,” C.N. Patent, 201320706626.5, Nov. 2013. (Accessed 15.10.2025).
14. Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF2000. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b2aafa39-b547-4f53-a5af-03aee90ea6f2/mobility-datasheet-bogies-sf2000-en.pdf>. (Accessed 17.10.2025).
15. Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF30. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:6db6f600-1ac5-412d-8c06-9a0e85d46a84/mobility-datasheet-bogies-sf30-Plus-en.pdf>. (Accessed 17.10.2025).
16. Chudzikiewicz, A., Maciejewski, I., Krzyzyski, T., Krzyzyskowski, A. and Stelmach, A., 2022. Electric Drive Solution for Low-Floor City Transport Trams. *Energies*, no. 15, 4640. Doi: 10.3390/en15134640. (Accessed 15.10.2025).
17. Maciej Górowski, 2004. Transport szynowy. Available at: [http:// www.transportszynowy.pl](http://www.transportszynowy.pl). (Accessed 15.10.2025).

Надійшла (received) 06.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Бірюков Сергій Віталійович (Biriukov Serhii) - аспірант кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6403-5880>; mob.: 0976543478; e-mail: Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua.

Губський Сергій Олександрович (Hubskey Serhii) - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, м. Харків; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; mob.: 0662192050; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

Ілленко Костянтин Валерійович (Illienko Kostiantyn) – аспірант, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5124-0862>; mob.: +380 99 382 93 80; e-mail: illenko_phd@kart.edu.ua.

Горбач Сергій Дмитрович (Horbach Serhii) – аспірант, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2945-3342>; mob.: +380 93 607 68 44; e-mail: horbach_phd@kart.edu.ua.

Говорун Владислав Вадимович (Hovorun Vladyslav) – аспірант, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4323-7466>; mob.: +380 67 158 37 56; e-mail: hovorun_phd@kart.edu.ua.com.