УДК 629.4.02 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.164.2016.92641

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ І ВИБІР СТРУМОПРИЙМАЧІВ РУХОМОГО СКЛАДУ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В УМОВАХ ШВИДКІСНОГО РУХУ

Канд. техн. наук А. М. Зіньківський, М. Л. Беляков

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ И ВЫБОР ТОКОПРИЕМНИКОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Канд. техн. наук А. Н. Зиньковский, М. Л. Беляков

ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE OF DECISIONS AND CHOICE OF ROLLING STOCK RUNNING CONTACT FOR OPERATION IN HIGH-SPEED TRAFFIC

Cand. of techn. sciences A. Zinkivskyi, M. Belyakov

У статті проведено аналіз різних типів струмоприймачів високошвидкісного рухомого складу, який експлуатується на магістральних залізницях європейських країн. Визначено переваги та недоліки різних варіантів конструкції струмоприймачів. Встановлено основні причини відривання пантографів від контактного проводу, наслідки та методи запобігання даному явищу. Визначено принципи оцінки якості роботи струмоприймачів. Запропоновано варіанти вибору конструкції струмоприймачів для різних швидкостей руху.

Ключові слова: *струмоприймач, контактний провід, полоз, високошвидкісний рух, контактне натискання.*

В статье проведен анализ различных типов токоприемников высокоскоростного подвижного состава, эксплуатируемого на магистральных железных дорогах европейских стран. Определены преимущества и недостатки различных вариантов конструкции токоприемников. Установлены основные причины отрыва пантографов от контактного провода, последствия и методы предотвращения данного явления. Определены принципы оценки качества работы токоприемников. Предложены варианты выбора конструкции токоприемников для различных скоростей движения.

Ключевые слова: *токоприемник, контактный провод, полоз, высокоскоростное движение, контактное нажатие.*

The article set the appointment and conducted a technical analysis of the various types of locomotive pantographs high-speed rolling stock designed for maintenance of passenger trains on the main railway European roads. The advantages and disadvantages of various options of design solutions for current collectors. The basic types of failures in the pantographs, among which is the separation of pantograph on the contact wire during the movement, the lack of pressure on the contact wire. The probable consequences and methods of prevention of this phenomenon. Defined principles for evaluating the quality of the current collectors and tokosëma process and factors to be taken into account for their normal operation. Materials are considered optimal for the production of various elements of pantographs. A choice of optimal designs for current collectors of different speeds.

Keywords: *pantograph, the contact wire, slide, high-speed movement, contact pressure.*

Вступ. Забезпечення електричного рухомого складу якісним струмозніманням є одним з найскладніших завдань у ланцюзі електропостачання. Досвід експлуатації високошвидкісних магістралей за кордоном показав, що забезпечення надійної взаємодії рухомого струмоприймача і контактної підвіски є таким же складним технічним завданням, як і забезпечення надійної взаємодії рухомого екіпажа з рейками. Надійність і необхідна якість струмознімання визначаються швидкістю руху електрорухомого складу і конструктивними параметрами контактної підвіски і струмоприймача, а їх взаємодія являє собою складний коливальний процес, що викликає різну інтенсивність механічного та електричного зношування контактного проводу і струмознімальних елементів. На цей коливальний процес, у якому беруть участь різнорідні коливальні системи, впливають коливання кузова локомотива і автоколивання проводів контактної підвіски, викликані повітряним потоком. Всі ці коливання накладаються одне на одне, коливальні процеси мають різні амплітуди і спектр частот, а часто і напрямок поширення хвиль.

Для забезпечення високошвидкісного руху на електричний рухомий склад (ЕРС) з контактної мережі необхідно подати за допомогою струмоприймачів електричну енергію сумарною потужністю до 20000 кВт.

Збільшення потужності для високошвидкісних магістралей (ВШМ) обумовлені тим, що при збільшенні швидкості квадратично зростає аеродинамічна складова основного опору руху [1]. Так, якщо при швидкості 120-140 км/год основний питомий опір руху звичайних пасажирських поїздів не перевищує 4 кгс/т, то для високошвидкісного ЕРС (250-300 км/год) він становить 10-17 кгс/т. Відповідно до цього для реалізації високих швидкостей руху потрібно істотно більша питома потужність поїзда [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У джерелах [1, 2, 8] розглянуто основну конструкцію та матеріали, з яких виготовляються елементи локомотивних струмоприймачів (пантографів) і

контактної мережі для більш якісної та надійної їх взаємодії, у нормативних документах [9] встановлено основні параметри локомотивних засобів струмознімання та запропоновано системи спостереження для підтримання необхідного рівня надійності в роботі. У публікаціях [3-5] проводиться огляд та аналіз пантографів високошвидкісного рухомого складу країн, що його експлуатують. У дослідженнях [6, 7, 10-14] за результатами аналізу встановлено результати експлуатації пар тертя, запропоновано рекомендації з подальшої експлуатації з урахуванням експлуатаційних зносів і підтримання надійності.

Визначення мети та задачі дослідження. Метою та завданням дослідження є аналіз роботи електрорухомого складу різних типів в умовах високошвидкісного руху для вибору пантографа з найбільш оптимальними технічними параметрами.

Основна частина дослідження, отримана в результаті дослідження. Питання забезпечення надійної роботи елементів, що беруть участь у струмозніманні за допомогою змінного електричного контакту при системі тяги постійного струму напругою 3 кВ, є досить складним. Дослідні швидкісні поїздки на залізницях у Франції в середині 50-х років минулого століття остаточно підтвердили висновок про те, що живлення постійним струмом напругою 3 кВ вимагає забезпечення струмознімання на один пантограф зі струмом 2500 А, а отже, роботу електропоїзда з декількома струмоприймачами.

При живленні змінним струмом напругою 25 кВ знайдено цілком прийнятні конструктивні рішення, як з боку контактної мережі, так і з боку струмоприймача [1-14].

Систему «контактний провід - струмоприймач» необхідно розглядати комплексно, звертаючи увагу на конструктивні характеристики контактної підвіски і струмоприймача за умовами динаміки взаємодії в зазначеній системі.

На електрифікованих залізницях, призначених для високошвидкісного руху, застосовується контактна мережа з верхнім розташуванням контактного проводу над коліями (рис. 1).

Однією з проблем при русі з високими швидкостями є забезпечення надійного струмознімання. Зі збільшенням швидкості руху підйом контактного проводу зростає в геометричній прогресії і вже при швидкостях 300 км/год може досягати граничних значень.

Другим елементом контактної системи «контактний провід – струмоприймач» є струмоприймач (рис. 2).

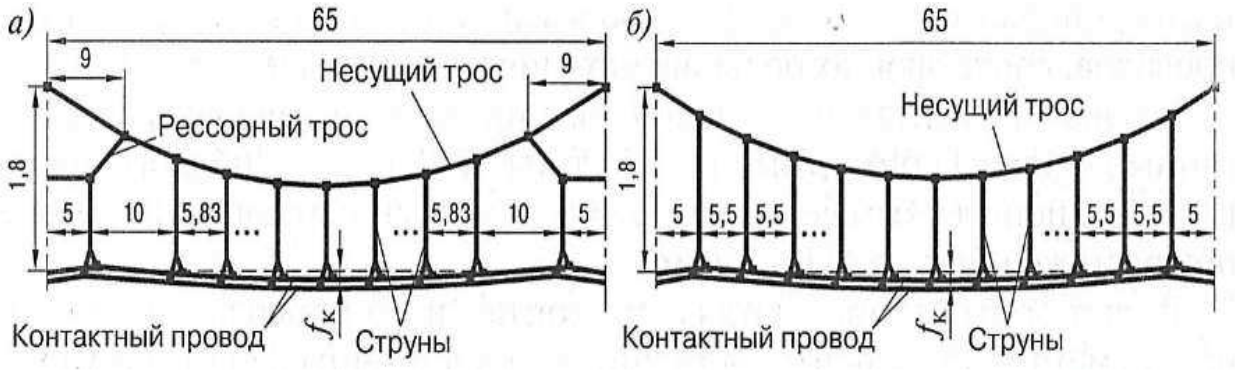

Рис. 1. Залізнична контактна мережа для високошвидкісного руху:
а – ресорна підвіска контактного проводу;
б – нересорна підвіска контактного проводу

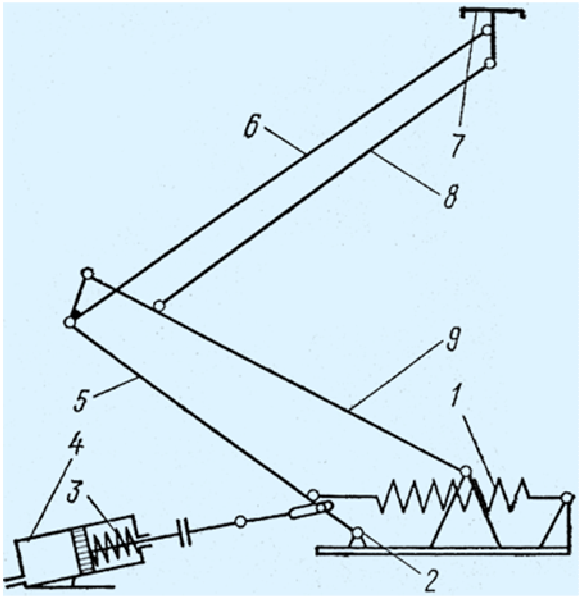

Рис. 2. Загальна схема асиметричного струмоприймача:
1 – піднімальна пружина; 2 – головний вал; 3 – опускальна пружина; 4 – циліндр привода; 5 – головний важіль; 6 – труба верхньої рами; 7 – полоз (лижа); 8 – поздовжня труба; 9 – управляюча штанга

При русі електрорухомого складу (ЕРС) повинні бути виключені удари струмоприймача з елементами підвіски в результаті їх динамічних переміщень. На електровозах і моторних вагонах електропоїздів у країнах СНД і ряді інших держав застосовують струмоприймачі пантографного типу. Їх часто називають пантографами.

Струмоприймачі повинні забезпечувати стійкий контакт з проводом. Тому сила натискання полоза на провід повинна бути досить великою, проте її не можна збільшувати вище певної межі, оскільки велика сила призводить до відтискання контактного проводу, його підвищеного зносу, зносу контактних деталей струмоприймача.

Найбільш поширеними для високошвидкісного руху є асиметричні струмоприймачі (пантографи). Такий струмоприймач являє собою багатоважільний механізм з шарнірно-зчленованих трубчастих рам. Переваги асиметричного струмоприймача перед звичайним пантографом: менша маса; коливання струмоприймача при русі менше розгойдують елементи контактної мережі, що забезпечує краще притискання полоза струмоприймача до контактного проводу краще струмознімання; потрібно менше місця на даху, що полегшує розміщення дахового обладнання. Деякі види електричного рухомого складу, розраховані на роботу з декількома системами електроживлення, мають різні пантографи для різних видів струму живлення; менша матеріаломісткість; потреба в менш потужному приводі для піднімання і опускання струмоприймача.

Важливим фактором надійного і якісного струмознімання є сила і сталість контактного натискання в усіх точках підвіски і у всьому діапазоні швидкостей руху ЕРС і величина тягового струму. Відривання струмоприймача від контактного проводу навіть на кілька мілісекунд призводить до іскріння, а порушення ковзного контакту на більш тривалий час – до утворення електричної дуги. Іскріння і особливо електрична дуга знижують стійкість роботи електрообладнання ЕРС. Вони також підвищують рівень перешкод у системі поїзного радіозв'язку і пристроях зв'язку, розташованих поблизу залізниці. Електрична дуга призводить до місцевого перегріву контактного проводу, що у свою чергу обумовлює відпал міді, зміну її структури, механічних та електричних властивостей і, отже, істотно знижує термін служби контактних проводів і погіршує в цілому характеристики контактної підвіски. Сильна дуга може перепалити контактний провід і знеструмити ЕРС. Електричне зношування контактних проводів і струмознімальних елементів призводить до збільшення витрат на утримання і ремонт контактної підвіски струмоприймачів. Тому чим менше коефіцієнт відриву k_{OT} полоза струмоприймача від контактного проводу, тим вище якість струмознімання і менше

електричне зношування контактного проводу.

Коефіцієнт відриву k_{OT} визначається з рівняння

$$k_{OT} = \frac{t_{OT}}{t} 100 \ , \qquad (1)$$

де t_{OT} – сумарний час відриву полоза струмоприймача від контактного проводу;

t – час проходження струмоприймачем даної ділянки.

Максимально допустимий коефіцієнт відриву t_{OT} полоза струмоприймача становить на залізницях Японії – 3 % при швидкості 300 км/год, Англії – 1 % при 160 км/год, Франції – 2 % при 270 км/год, США – 1 %.

Основним показником якості струмознімання, визначеним на підставі теоретичних і експериментальних досліджень, є коефіцієнт зміни контактного натискання. Він являє собою найбільше значення з двох:

$$\begin{cases} n' = \dfrac{P\max - (Po + Py)}{Po + Py} \\ n'' = \dfrac{(Po + Py) - P\min}{Po + Py} \end{cases} \qquad (2)$$

де P_0 – статичне натискання струмоприймача, що дорівнює напівсумі середнього активного і середнього пасивного натискань;

P_y – аеродинамічна підйомна сила струмоприймача;

P_{max} і P_{min} – відповідно максимальні і мінімальні значення контактного натискання.

Якість струмознімання оцінюється за значенням середньоквадратичного відхилення натискання:

$$\sigma[P] = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} [Pi - m(P)]^2 \cdot \frac{n_i}{n}} \ , \qquad (3)$$

де P_i – середнє значення контактного натискання в інтервалі i;

n_i – кількість випадків з натисканням Pi;

n – загальна кількість випадків (інтервалів).

$$m(P) = \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot \frac{n_i}{n} \ . \qquad (4)$$

Якість струмознімання, як зазначалося вище, залежить від сталості натискання контактними пластинами полоза струмоприймача на контактний провід, і чим менше різниця в значеннях максимальної та мінімальної сили натискання, тим менше амплітуда коливання сил натискання в прогоні. При малих амплітудах коливання контактного натискання його динамічна складова має незначний вплив на сумарну величину контактних натискань і, отже, не погіршує якість струмознімання. Сталість контактного натискання особливо важлива на високошвидкісних залізницях.

Сили, що діють у контакті, не можуть бути виміряні безпосередньо в точці натискання контактних пластин на контактний провід. Для вирішення цього завдання розроблено різні методи, відповідно до яких контактне натискання P в найпростішому випадку можна визначити як суму активних $P_{ак}$ та інерційних (пасивних) P_i сил, одночасно діючих на полоз:

$$P = P_{ак} + (-P_И) \, . \qquad (5)$$

Під дією сил $P_{ак}$, спрямованих вгору, контактні пластин притискаються до контактного проводу; сили P_i діють у зворотному напрямі. Величину цих сил визначають як суму сил, що діють на чотири кути полоза:

$$P_{ак} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4, \quad (6)$$

$$P_И = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_4}{4}(m_1 + m_2 + m_3 + m_4), \quad (7)$$

де P_1 ... P_4 – сили, що діють вертикально вгору на кожен кут полоза;

z_1 ... z_4 – прискорення рухомих вгору і вниз кутів полоза;

m_1 ... m_4 – маса кожного кута полоза.

Розподіл активних сил (P_1 ... P_4) і маси кутів полоза (m_1 ... m_4), а також залежність сили контактного натискання P від положення контактного проводу відносно полоза виглядають, як зображено на рис. 3.

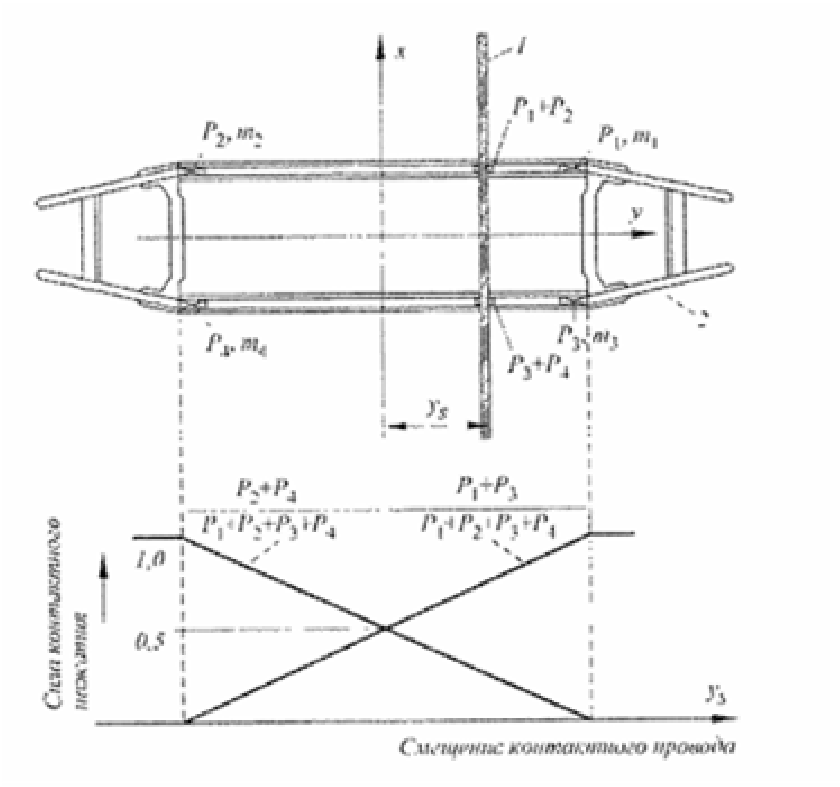

Рис. 3. Схематичне зображення сили контактного натискання залежно від розташування контактного проводу відносно полоза і розподіл активних сил і маси кутів полоза:
1 – контактний провід; 2 – полоз струмоприймача;
P_1 ... P_4 – розподіл активних сил; m_1 ... m_4 – маса кутів полоза

На контактне натискання крім зазначених сил, діють ще й інші сили, урахування яких особливо важливе при високошвидкісному русі. Для якісного струмознімання і зменшення інтенсивності електричного та механічного зношування контактних проводів встановлено межі статичного і динамічного контактного натискання. На залізницях змінного струму контактне натискання рухомим струмоприймачем має бути в межах від 40 до 200 Н, на залізницях постійного струму – від 60 до 300 Н. Нижня межа визначається натисканням, при якому контактні пластини за жодних умов не повинні відриватися від контактного проводу. Верхня межа встановлена з урахуванням того, щоб струмоприймач, натискаючи

знизу вгору, не зачіпав деталі на контактній підвісці.

Вивчення взаємодії контактної підвіски з рухомим струмоприймачем показує, що зі збільшенням швидкості руху сила динамічного контактного натискання істотно зростає (рис. 4) і, отже, зростає інтенсивність зносу контактних проводів і струмознімальних елементів. Контактне натискання зі збільшенням швидкості v має зростати за певним законом, тоді механічне та електричне зношування контактного проводу і струмознімальних елементів буде мінімальним.

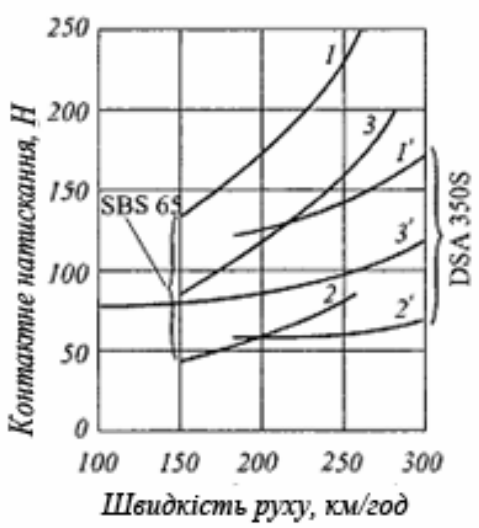

Рис. 4. Залежність сил динамічного контактного натискання струмоприймачами типу SBS 65 та DSA 350S на контактний провід підвіски:
1(1’) та 2(2’) – відповідно верхня та нижня межа амплітуди коливання сил контактного натискання; 3(3’) – середнє значення сили контактного натискання

Дослідні поїздки показали, що для забезпечення необхідного терміну служби контактних проводів і якісного струмознімання при швидкості руху до 300 км/год включно середнє динамічне натискання повинно бути не більше 120 Н, а стандартне відхилення – не більше 20 %, тобто не більше 24 Н. Цим вимогам, наприклад, відповідають нові німецькі струмоприймачі серій DSA 150, 200, 250, 380, 350, 380 до 380 км/год (рис. 5).

У Німеччині знаходиться в експлуатації контактна підвіска типу Re 250, розрахована на максимальну швидкість руху з двома піднятими струмоприймачами 280 км/год, з одним – 300 км/год. Цей несучий трос виконаний з магнієвої бронзи (БрМг0,35) і має перетин 70 мм^2, контактний провід зроблено з міді, легованої сріблом (0,1 % Ag), і має перетин 120 мм^2, а ресорний трос (БрМг0,35) має перетин 35 мм^2.

При високих швидкостях руху неодмінною умовою забезпечення стабільного ковзного контакту між струмознімальних елементами і контактним проводом є значна ширина полоза струмоприймача, яка повинна становити не менше 400 мм. Через велику кількість причин струмоприймачі на рухомому складі різних європейських країн мають полози різної довжини: у Німеччині, Австрії та Іспанії загальна довжина полоза дорівнює 1950 мм, у Великобританії – 1600 мм, у Франції та Швейцарії – 1450 мм. У країнах СНД загальна довжина полоза складає 2260 мм.

Рис. 5. Загальний вигляд струмоприймачів типу DSA виробництва Німеччини

Як вже зазначалося вище, дуже важливим для практики показником, що характеризує процес взаємодії струмоприймача і контактного проводу та забезпечує надійність і високу якість струмознімання, є контактне натискання. При русі ЕРС висота полоза струмоприймача над рівнем головки рейок не залишається постійною, оскільки не є постійною висота підвісу контактного проводу, його еластичність і маса в прогоні.

Еволюція конструкцій струмоприймачів пов'язана з необхідністю підвищення швидкості руху електрорухомого складу і поліпшення якості струмознімання, яка полягає в прагненні знизити приведену масу струмоприймача, забезпечуючи при цьому необхідну навантажувальну здатність і динамічні параметри. Це можна здійснити шляхом зменшення маси верхнього вузла і підвищення тим самим його рухливості, для чого необхідне застосування нових матеріалів, а також нових конструкцій.

При розробленні струмоприймачів для високошвидкісного руху важливим фактором є також аеродинамічна взаємодія полоза та інших елементів струмоприймача з повітряним потоком. Виникає аеродинамічна підйомна сила, починає істотно впливати на взаємодію струмоприймача з контактним дротом. При цьому особливо небезпечним є прояв асиметрії аеродинамічних сил в одну та іншу сторону. Цю силу необхідно врівноважити, вводячи в конструкцію струмоприймача додаткові елементи, що знижують вплив повітряного потоку.

На європейських швидкісних поїздах отримав застосування універсальний струмоприймач типу CX, який випускає компанія «Alstom». Маса останньої моделі французького асиметричного струмоприймача CX дорівнює 160 кг (для порівняння). Струмоприймачі цього типу призначені для ліній постійного струму напругою 1,5 і 3 кВ, змінного струму напругою 25 кВ (50 Гц) і 15 кВ (16,7 Гц), забезпечують передачу необхідної електроенергії при швидкості руху до 300 км/год.

Конфігурація й основні розміри стандартних струмоприймачів, які використовуються на залізницях Німеччини, і європейського полоза для нових високошвидкісних ліній з контактною мережею посиленого типу наведені в таблиці.

Таблиця

Технічні параметри струмоприймачів високошвидкісного рухомого складу

Основний параметр	Струмоприймач				
	DSA 200	SSS 87, SBS 2T	DSA 350S	DSA 350 SEK	DSA 380 D
Номінальне значення напруги, кВ	15/25*				
Номінальне значення струму, А	800/1000	700	1000	800/1000	1000
Максимальна швидкість експлуатації, км/год	200	260	280		380
Кількість полозів	2				
Тип струмознімальних елементів у полозах	вуглеграфітові				
Статичний натиск, Н					
при підніманні каретки (активне), не менше	-	40	50		70
при опусканні каретки (пасивне), не більше	-	120	140		120
Статичний натиск на німецьких залізницях, Н					
при підніманні	70		80	90	
при опусканні	120	140			150
Максимальна висота піднімання (з ізоляторами), мм	3000	2820	3106	3000	300
Мінімальна висота в опущеному стані, мм	550	-	556	590	540
Висота ізоляторів, мм	-	295	306		
Час піднімання на максимальну робочу висоту, с, не більше	10				5
Час опускання з максимальної робочої висоти, с , не більше	10	5	10		4
Маса (без ізоляторів), кг	125	118	109	105	106

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. За результатами проведеного дослідження встановлено, що для безперебійного та якісного струмознімання необхідне виконання таких вимог:

- під дією підйомних пружин струмоприймач при русі ЕРС повинен мати

на контактний провід оптимальне стабільне натискання: з одного боку, не повинен від нього відриватися, погіршуючи тим самим якість струмознімання і збільшуючи електричне зношування контактного проводу, а з іншого – не створювати надмірного натискання, посилюючи механічне зношування контактного проводу і струмознімальних елементів;

- рухливі вгору і вниз частини струмоприймача повинні мати мінімальну наведену масу;

- амплітуда коливань струмоприймача повинна бути незначною, а коливання повинні швидко загасати;

- сили тертя в шарнірах повинні бути мінімальними;

- конструкція струмоприймача повинна забезпечувати стійкість до аеродинамічних сил;

- в ідеальному випадку при будь-якій висоті полоза струмоприймача його натискання на контактний провід має бути постійним.

Список використаних джерел

1. Колесов, С. М. Матеріали та взаємодія контактної підвіски і струмоприймача [Текст]: підручник / С.М. Колесов, І.С. Колесов. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2006. – 284 с.
2. Беляев, И. А. Токосъем и токоприемники электроподвижного состава [Текст] / И.А. Беляев, В. П. Михеев, В. А. Шиян; под ред. И. А. Беляева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1976. – 184 с.
3. Михеев, В. П. Токосъемные устройства для высокоскоростных поездов [Текст] / В.П. Михеев // Железнодорожный транспорт. – 1997. – № 6. – С. 44-47.
4. Токосъем при высокоскоростном движении [Текст] // Железные дороги мира. – 2006. – № 7. – С. 55-59.
5. Регулируемый токоприемник для высокоскоростного подвижного состава [Текст] // Железные дороги мира. – 2006. – № 8. – С. 44-47.
6. Электрический износ в паре трения токоприемник – контактный провод [Текст] // Железные дороги мира. – 2007. – № 5. – С. 43-49.
7. Исследование контактной подвески по силам взаимодействия токоприемника и контактного провода [Текст] // Железные дороги мира. – 2007. – № 11. – С. 45-52.
8. Беляев, И. А. Машинисту о контактной сети и токосъеме [Текст] / И.А. Беляев. – М.: Транспорт, 1986. – 128 с.
9. Система відеоконтролю стану контактної мережі та струмоприймача електричного рухомого складу [Текст]: пат. 79111 Україна; МПК B60L 3/12, B60Q 11/00, G01D 3/00 / Артеменко В.В., Артеменко О.В., Фалендиш А.П., Грищенко О.В., Шершньов С.М.; заяв. та правовл. Артеменко В.В., Артеменко О.В., Фалендиш А.П., Грищенко О.В., Шершньов С.М. – заявл. 23.10.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. №7. – 5 с.
10. In search of a smoother ride on narrow gauge track. Sundararaja Gopalakrishnan // Railway Gazette International, April 2007, P. 214-217.
11. Experimental research on the friction and wear properties of a contact strip of a pantograph–catenary system at the sliding speed of 350 km/h with electric current / H.J. Yang, G.X. Chen, G.Q. Gao, G.N. Wu, W.H. Zhang // Wear, Volumes 332–333, May–June 2015, P. 949-955.
12. Design Methodology Developed For Wheelset. K. Bel. Knani, S. Bruni, S. Cervello, G. Ferrarotty // IRJ, July 2002, P. 27-28.
13. Single-Axle Bogies Promise Improvements. Y.Suda, S.Nishimur, A. Matsumoto,Y.Sato, M. Suzuki // IRJ, July 2002, P. 30-31.

14. Principal Technologies of Shinkansen Bodies Leading to Series 700. J.Ito // Japanese Railway Engineering No. 149, 2002. p.1-5.

Зіньківський Артем Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-99.
E-mail: kumasiktem@gmail.com.
Бєляков Михайло Леонідович, магістрант Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-99.

Zinkivskyi Artem, Cand. of techn. Sciences, associate professor in "Maintenance and repair of rolling stock."
Tel. 057-730-1999. E-mail: kumasiktem@gmail.com.
Belyakov Mikhail master of Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-99.

Стаття прийнята 26.09.2016 р.